

N° d'ordre : 4623

# THÈSE

présentée à

## L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

par **Alban LELEUX**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR**

SPÉCIALITÉ : MÉCANIQUE ET INGÉNIERIE

---

### CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DE COMPOSITES PAR ONDES ULTRASONORES GUIDÉES, GÉNÉRÉES ET DÉTECTÉES PAR MULTIÉLÉMENT.

---

Soutenue le 19 novembre 2012

Après avis de :

M. E. Moulin, Professeur, Université de Valenciennes  
M. J. Moysan, Professeur, Université d'Aix-Marseille

**Rapporteur**  
**Rapporteur**

Devant la commission d'examen formée de :

M. D. Rebière, Professeur, Université de Bordeaux  
M. E. Moulin, Professeur, Université de Valenciennes  
M. J. Moysan, Professeur, Université d'Aix-Marseille  
M. M. Castaings, Professeur, Université de Bordeaux  
M. P. Micheau, Professeur, Université de Sherbrooke  
Mme F. Zhang, Ingénieur, CETIM  
M. F. Reverdy, Ingénieur, CEA

**Président**  
**Rapporteur**  
**Rapporteur**  
**Directeur de thèse**  
**Examineur**  
**Invitée**  
**Invité**

- 2012 -



# Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe Ultrasons Matériaux (UM) du Laboratoire de Mécanique Physique (LMP) de l'Université Bordeaux 1, faisant partie depuis Janvier 2011 du département Acoustique Physique (APy) de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M) de Bordeaux. Je tiens donc à remercier tout d'abord Marc Deschamp, anciennement directeur du LMP et à présent directeur du groupe APy, de m'avoir accueilli au sein de ce laboratoire.

Je remercie bien évidemment Michel Castaings, mon directeur de thèse, un remarquable encadrant, qui a su me guider et m'apporter toute l'aide dont j'avais besoin pour la réalisation de ce travail. J'ajouterai que ce fut particulièrement agréable d'être encadré par une personne aussi sympathique et disponible. Je le remercie enfin de m'avoir témoigné sa confiance tout au long de ma thèse et de m'avoir ainsi permis de vivre une très belle expérience dans le domaine de la recherche scientifique, qui je l'espère se poursuivra dans les années à venir. Michel, continue de prendre aussi bien soin de tes thésards que de ta moto!

Un grand merci également à Philippe Micheau, professeur à l'Université de Sherbrooke au Canada, qui lors de son séjour au laboratoire a fortement contribué à l'avancement de ce travail grâce à son aide et ses connaissances pointues dans le domaine du contrôle de santé intégré. Je le remercie aussi d'avoir accepté de participer au jury de thèse. Philippe, bon courage, les hivers au Canada ne durent en général pas plus de 6 mois.

Je remercie toutes les personnes qui travaillent au sein du pôle d'activité équipements sous pression et ingénierie de l'instrumentation (EPI) dirigé par monsieur Henry Walaszek au centre du CETIM basé à Senlis. Merci de m'avoir apporté votre aide et de m'avoir permis d'utiliser vos locaux et matériels. Je tiens à remercier particulièrement Fan Zhang, chef de projet au pôle EPI, qui a été ma correspondante principale avec le CETIM. Je la remercie, d'une part d'avoir fait partie du jury de thèse, et d'autre part pour nos échanges sur les aspects techniques et sur l'évolution de mon travail, ainsi que pour sa gentillesse. Fan, continue de bien profiter de cette région qui m'est chère, la Picardie.

Merci à Nicolas Terrien, qui travaille au centre CETIM basé à Nantes, de m'avoir fourni les matériaux composites que j'ai utilisés et testés en long, en large et en travers, et de m'avoir apporté bon nombre de conseils quant au développement expérimental de mon travail.

Merci à Jérôme Lachèvre, ingénieur chez Lecoœur électronique, et Philippe Dumas, cadre chez Imasonic, d'avoir apporté l'expertise et les compétences techniques de leurs entreprises respectives pour la mise au point du dispositif expérimental utilisé lors de ce projet. Je les remercie d'avoir été disponibles tout au long de ma thèse pour répondre à mes questions et m'aider à résoudre certains problèmes.

Je remercie les professeurs Emmanuel Moulin, de l'Université de Valenciennes, et Joseph Moysan, de l'Université d'Aix-Marseille, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce

mémoire. Merci au professeur Dominique Rebière, de l'Université de Bordeaux, d'avoir présidé le jury de thèse, et à monsieur Frédéric Reverdy, ingénieur au CEA, d'avoir accepté l'invitation de faire partie du jury.

Au sein du laboratoire, je souhaite remercier l'ensemble des enseignants-chercheurs, maîtres de conférences et ingénieurs, membres de l'I2M toutes équipes et groupes confondus, qui m'ont toujours témoigné beaucoup de sympathie. En particulier les autres membres de l'équipe UM, que je n'ai pas encore cités, avec lesquels j'ai pu avoir de nombreux échanges : Christophe Bacon, Anissa Meziane, Mathieu Renier et Christine Biateau. Mathieu et Christine, je vous remercie pour m'avoir particulièrement aidé sur la mise en place de certaines expérimentations. Merci également à Béatrice Desoudin, Sandrine Guit, Jérémy Guitard et Cathy Blanchard pour leur bonne humeur, je suis cependant déçu de ne pas avoir réussi à mettre la main sur la réserve personnelle de chocolats de l'une de ces personnes.

Et puis je remercie l'ensemble des anciens et actuels thésards et post-docs qui ont rendu ces trois années de travail particulièrement plaisantes, toujours dans la bonne humeur, que ce soit pendant nos pauses café, nos fantastiques déjeuners au restaurant du CNRS, nos soirées, nos courses à pied ou encore nos parties de pétanque acharnées. Merci donc à : Mahmoud Koabaz, Jérôme Dubois, Philippe Blanloeuil, Edith Grippon, Guillaume Lepert, Maria Korotyeva, Matthieu Dhondt, Djoudi Sidane, Dmitrii Ilin, Benoit Mascaro, Jérémy Jallageas, Samuel Rodriguez, Samuel Raetz, Mhamad Aoun, Lucie Monede-Hocquart, Di Zhang, Thierry Kouadio, Mohamed Masmoudi, Dilbag Singh, Bénédicte Le Crom, Hugues Lourme, Emilie Bousquet, Gregory Bresson, Sebastien Chauffaille, Laurent Pierre, Slah Yaacoubi, Mathieu Ducouso, Damien Ségur, Abderemane Mohamed Elarif, Frédéric Puel, Raphael Royer, Allaoua Abbas, Julien Chandezon, Maroun Abi Ghanem, Anis Ben-Abdessalem, Lazhar Homri, Naoufel Ben Salem, Nam Hoai Le, Salvatore Minissale, Michal Budzik, Atef Gadalla, Maixent Mouanga, Anton Kucenko, Benjamin Normandin et Pierric Mora.

*A ma famille et mes proches.*

*A ma chère Barbara.*



# Table des matières

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 Enjeux et intérêts du procédé .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Contexte industriel.....</b>	<b>6</b>
1.1.1 Besoins industriels .....	6
1.1.2 CND et SHM dans l'industrie.....	7
1.1.2.1 Les courants de Foucault .....	7
1.1.2.2 La magnétoscopie .....	8
1.1.2.3 Le ressuage .....	9
1.1.2.4 La radiographie.....	10
1.1.2.5 La thermographie infrarouge .....	11
1.1.2.6 La shearographie.....	12
1.1.2.7 Les ultrasons .....	13
1.1.2.8 Les techniques en SHM.....	13
<b>1.2 Développement du procédé de CND multiélément ondes guidées (MEOG) .....</b>	<b>14</b>
1.2.1 L'utilisation des ondes guidées en CND/SHM.....	14
1.2.2 Le développement et l'utilisation des systèmes multiéléments .....	17
1.2.2.1 L'emploi des transducteurs multiéléments en volumique .....	17
1.2.2.2 L'utilisation des systèmes multiéléments avec les ondes guidées.....	19
1.2.2.3 Méthodes employant le <i>Phased addition algorithm</i> avec les ondes guidées .....	20
1.2.2.4 Elaboration d'un nouveau procédé .....	21
<b>1.3 Conclusion .....</b>	<b>22</b>
<b>Chapitre 2 Caractéristiques des ondes guidées dans les matériaux étudiés.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 Modélisation des matériaux .....</b>	<b>26</b>
2.2.1 Rappels théoriques sur la mécanique des milieux continus dans le domaine (visco)élastique .....	26
2.2.2 Classes de symétrie des matériaux.....	28
<b>2.3 Ondes guidées dans les plaques .....</b>	<b>31</b>
2.3.1 Rappel sur les ondes de volume en milieu infini .....	31
2.3.2 Modes de Lamb .....	33
2.3.3 Les courbes de dispersion .....	35
2.3.4 Les champs de déplacement .....	38
<b>2.4 Caractérisation des matériaux.....</b>	<b>40</b>
2.4.1 Les méthodes de caractérisation .....	40
2.4.1.1 Caractérisation par temps de vol .....	41
2.4.1.2 Caractérisation par fonction de transfert .....	42
2.4.1.3 Caractérisation par ondes guidées et transformée de Fourier 2D .....	43
2.4.1.4 Caractérisation par méthode numérique .....	46
2.4.2 Résultats des mesures .....	47
<b>2.5 La méthode SAFE .....</b>	<b>50</b>
2.5.1 Implémentation des équations .....	51
2.5.2 Modélisation de la plaque .....	53

2.5.3	Post traitement .....	54
2.5.4	Résultats obtenus .....	54
<b>2.6</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>57</b>
<b>Chapitre 3</b>	<b>Génération/détection d'ondes de Lamb via un système multiélément .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>60</b>
<b>3.2</b>	<b>Méthode <i>Phased array</i> .....</b>	<b>60</b>
3.2.1	Conditions de validité de la méthode .....	60
3.2.1.1	Caractéristiques et configuration du réseau .....	60
3.2.1.2	Excitation et allure des champs .....	61
3.2.1.3	Directions d'inspection .....	66
3.2.2	Description de la méthode .....	67
<b>3.3</b>	<b>Système expérimental .....</b>	<b>71</b>
3.3.1	Description du matériel .....	71
3.3.1.1	Système multivoie .....	71
3.3.1.2	Sondes multiéléments .....	72
3.3.2	Fonctionnement du système .....	75
<b>3.4</b>	<b>Evaluation expérimentale du procédé .....</b>	<b>77</b>
3.4.1	Performances et limites du procédé sur aluminium .....	77
3.4.1.1	Sélectivité modale à l'émission .....	77
3.4.1.2	Sélectivité modale à la réception .....	88
3.4.1.3	Directivité à l'émission .....	90
3.4.1.4	Directivité à la réception .....	92
3.4.2	Performances et limites du procédé sur composite .....	93
3.4.2.1	Sélectivité modale à l'émission .....	94
3.4.2.2	Sélectivité modale à la réception .....	95
3.4.2.3	Directivité à l'émission .....	96
3.4.2.4	Directivité à la réception .....	98
<b>3.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>99</b>
<b>Chapitre 4</b>	<b>Applications du procédé .....</b>	<b>101</b>
<b>4.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>102</b>
<b>4.2</b>	<b>Caractérisation de la raideur via un système multiélément .....</b>	<b>102</b>
4.2.1	Conditions de validité .....	102
4.2.2	Méthodes de mesure employées .....	103
<b>4.3</b>	<b>Utilisation du procédé <i>Phased array</i> pour la détection de défauts .....</b>	<b>105</b>
4.3.1	Compensation de la dispersion .....	105
4.3.2	Localisation et imagerie de défauts .....	107
4.3.2.1	Type corrosion dans plaque d'aluminium .....	108
4.3.2.2	Type délaminage 3D dans composite .....	109
4.3.2.3	Type endommagement par impact sur composite courbé avec raidisseur .....	112
4.3.3	Confrontation avec d'autres procédés .....	114
4.3.3.1	Les différentes méthodes CND employées .....	115
4.3.3.2	Bilan comparatif .....	121
<b>4.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>124</b>
<b>Chapitre 5</b>	<b>Développement numérique par éléments finis .....</b>	<b>125</b>
<b>5.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>126</b>
<b>5.2</b>	<b>Le modèle numérique .....</b>	<b>126</b>
5.2.1	Apport de la modélisation par EF .....	126
5.2.2	Description des différents composants du modèle .....	127
5.2.2.1	Sonde multiélément .....	127
5.2.2.2	Plaque .....	129
5.2.2.3	Zones absorbantes .....	130
5.2.2.4	Symétries du modèle .....	131
5.2.3	Définition de la physique appliquée .....	132

5.2.4	Définition du maillage et du solveur.....	133
5.2.5	Exploitation des résultats et traitement sous <i>Matlab</i> .....	134
<b>5.3</b>	<b>Validation du modèle.....</b>	<b>134</b>
5.3.1	Réponse en fréquence de la sonde multiélément .....	135
5.3.2	Sélectivité modale.....	136
5.3.2.1	A l'émission.....	137
5.3.2.2	A la réception.....	139
5.3.3	Directivité .....	140
5.3.3.1	A l'émission.....	141
5.3.3.2	A la réception.....	144
<b>5.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>145</b>
	<b>Conclusions générales et perspectives.....</b>	<b>147</b>
	<b>Annexe A .....</b>	<b>153</b>
	<b>Annexe B.....</b>	<b>155</b>
	<b>Annexe C .....</b>	<b>161</b>
	<b>Annexe D .....</b>	<b>163</b>
	<b>Annexe E.....</b>	<b>165</b>
	<b>Annexe F.....</b>	<b>170</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>171</b>



# Introduction générale

Les besoins des industries mécaniciennes concernées par les matériaux composites en terme de fabrication ou de maintenance sont de trois types : 1) contrôle de composants de formes complexes, 2) contrôle des zones inaccessibles par les méthodes traditionnelles, 3) suivi de l'état de santé des composants en cours de leur exploitation. Pour répondre à ces besoins, il est nécessaire de rendre plus facile l'application des techniques de contrôle par ultrasons, en développant des technologies nouvelles exploitant notamment les potentialités des ondes guidées et des sondes multiéléments. En effet les ondes ultrasonores guidées (ondes de Lamb, ondes SH, etc.) sont réputées pour leur forte potentialité à se propager sur de grandes distances, tout en produisant des déformations dans toute l'épaisseur du guide. Elles constituent ainsi un moyen largement reconnu pour ausculter rapidement et intégralement des pièces d'assez grandes dimensions ou des zones d'accès difficile. Toutefois, leur distance de propagation dépend des propriétés absorbantes des matériaux (viscoélasticité, multidiffusion interne, etc.) et de la fréquence choisie pour le contrôle.

Ce projet de développement d'un procédé original de génération et détection d'ondes ultrasonores guidées a pour ambition de compléter les techniques de contrôle non destructif (CND) actuelles. Il s'inscrit dans un partenariat entre l'institut de mécanique et d'ingénierie (I2M) de Bordeaux et le centre technique des industries mécaniques (CETIM), et est financé par la Fondation CETIM et le centre national de recherche scientifique (CNRS). L'ensemble du travail a été réalisé au laboratoire I2M au sein du campus universitaire Bordeaux 1, dans le groupe acoustique physique (APy), et au centre du CETIM basé à Senlis, dans le département du pôle d'activité équipements sous pression et ingénierie de l'instrumentation (EPI).

Le procédé consisterait à utiliser un système électronique multivoie qui, associé à une ou plusieurs sondes multiéléments, permettrait d'exciter et de réceptionner divers types d'ondes guidées pour l'auscultation des structures industrielles, et plus particulièrement de zones difficiles d'accès. La principale originalité de ce projet est d'associer les ondes ultrasonores guidées à un système de génération-détection de type multiélément qui, jusqu'à présent, n'est utilisé généralement que pour produire des ondes de volume (ondes longitudinales ou transversales) et ausculter des zones situées à proximité immédiate des sondes. Les systèmes électroniques multivoies, associés à des sondes multiéléments, ont émergé depuis quelques années, et ont été conçus pour apporter la facilité et la flexibilité d'utilisation qui faisaient défaut aux systèmes monovoies. Cependant, ces nouveaux appareillages n'ont pas encore été exploités pour générer et détecter des ondes ultrasonores guidées. Ceci permettrait pourtant d'éliminer la contrainte d'orientation angulaire requise avec certains transducteurs monoéléments, grâce à des lois de déphasage appliquées aux divers éléments. Judicieusement choisies, les lois permettraient de reconstituer, avec une sonde multiélément disposée parallèlement à la pièce testée (donc sans orientation angulaire particulière), le champ produit par un traducteur monovoie incliné. Ce procédé astucieux peut fonctionner pour l'émission et pour la réception des ondes guidées. Il rendrait donc possible l'émission et la détection de plusieurs ondes guidées, de manière très sélective, et sans

modifier la disposition spatiale. Le couplage acoustique de la sonde avec un fluide (gel ou pâte) serait tout de même nécessaire, notamment avec une sonde constituée d'éléments piézoélectriques, mais il serait réalisé une seule fois si le procédé peut permettre à la sonde d'inspecter toute la structure à partir d'une position unique. De plus, ce couplage restant le même pendant toute la procédure expérimentale (contrairement au cas des systèmes monoéléments), il deviendrait possible de mesurer les amplitudes des diverses ondes, et d'exploiter ces données riches en information pour caractériser les éventuels défauts (position, taille, etc.).

L'objectif du projet a consisté en la mise en place d'une part d'un prototype expérimental de laboratoire composé d'un système de pilotage (excitation/acquisition) et de sondes multiéléments matricielles ou linéaires et, d'autre part, d'un procédé servant à piloter ces sondes, en mode « émission » ou « réception » pour la génération et la détection de modes guidés bien spécifiques dans des directions bien contrôlées de la pièce inspectée. Le procédé, une fois mis au point, a fait l'objet d'une évaluation de ses capacités et de ses limites sur différents types d'échantillons (plaques en aluminium et plaques composites en carbone-époxy). Il a fallu, dans un premier temps, vérifier son aptitude à sélectionner à l'émission et à la réception un mode de Lamb particulier. Dans un deuxième temps, l'évaluation a porté sur la capacité à émettre un faisceau ultrasonore dans une direction choisie autour de la sonde multiélément matricielle, et à la réception, sur la capacité à identifier la direction de provenance d'une onde. Pour finir, la technique a été testée pour la détection et l'imagerie de différents types de défauts, simulant des problèmes souvent rencontrés dans l'industrie (défauts de corrosion, délaminages, dommages causés par des impacts) pour des matériaux métalliques ou composites (soit fabriqués par l'I2M et le CETIM, soit mis à disposition par Airbus). La procédure, ainsi que les résultats obtenus, ont été comparés à ceux de techniques de CND connues.

Enfin, des modèles de simulation numérique par éléments finis (EF) ont été développés afin d'aider à mieux comprendre les phénomènes physiques et de servir d'outils de base à une étude d'optimisation du procédé pour améliorer ses capacités de contrôle, à l'émission et la réception, des ondes guidées pour les différents types de matériaux. Ces modèles doivent tenir compte des caractéristiques des sondes multiéléments (géométrie, nombre d'éléments, dimensions, disposition spatiale, comportement électromécanique, etc.), du type d'excitation appliquée, de la génération-propagation-réception des modes de Lamb dans différents matériaux (isotropes, anisotropes, élastiques ou encore viscoélastiques), etc. Ils doivent être capables de reproduire le plus fidèlement possible les résultats expérimentaux obtenus avec la méthode de déphasage appliquée aux sondes multiéléments. Pour s'assurer de cela, plusieurs simulations numériques ont été confrontées à des résultats issus de campagnes de mesures.

Le premier chapitre fait une description du contexte scientifique et industriel dans le domaine du CND et du SHM (Structural Health Monitoring). Les besoins liés aux contrôles et suivis de santé des structures industrielles, et plus particulièrement pour les matériaux composites, sont rappelés. Un tour d'horizon est fait des différentes techniques les plus utilisées en CND et SHM, puis, plus spécifiquement, sur les méthodes employant les ondes guidées. Le développement des transducteurs multiéléments est ensuite abordé ainsi que les techniques y ayant recours, pour la génération-réception d'ondes de volume. Quelques développements et études sur le dimensionnement de capteurs multiéléments linéaires permettant la génération et la détection d'ondes guidées sont également présentés. Enfin, pour terminer, quelques techniques utilisant des réseaux de capteurs, souvent employés en SHM pour le contrôle de structures par ondes guidées, sont décrites, ainsi que celles appliquant plus spécifiquement le principe de sommation de signaux déphasés (*Phased addition algorithm*).

L'intérêt du procédé développé dans le cadre de ce travail est finalement expliqué et son principe est décrit.

Le deuxième chapitre fait d'abord un rappel sur la théorie des milieux continus et la modélisation de la propagation acoustique dans les matériaux anisotropes et viscoélastiques. Puis il décrit les caractéristiques des ondes de volume ultrasonores et des ondes guidées (modes de Lamb). Il évoque les différentes techniques employées (ayant recours aux ondes de volume ou ondes guidées) pour la caractérisation des matériaux étudiés. Enfin, il explique le calcul, entre autres, des courbes de dispersion et des champs des modes (déplacements, contraintes, etc.), grâce à une méthode semi analytique, la méthode SAFE (Semi Analytical Finite Element).

Le troisième chapitre commence par la description de la méthode de déphasage (*Phased array*) employée dans le procédé pour générer et recevoir des modes de Lamb spécifiques dans des directions données, tout en tenant compte des effets de dispersion de ces modes guidés. Il explique les conditions de validité de la méthode, sa formulation et son implémentation. Le dispositif expérimental (système multivoie, sondes multiéléments matricielles) utilisé est ensuite présenté. Enfin la dernière partie de ce chapitre aborde l'évaluation expérimentale du procédé, c'est à dire ses performances et ses limites, à l'émission et à la réception, en terme de sélectivité modale (capacité à générer ou détecter un seul mode de Lamb à la fois) et de directivité (capacité à émettre ou recevoir dans une direction choisie).

Le quatrième chapitre aborde les applications du procédé. Il présente à la fois sa capacité, grâce au système multiélément, à caractériser la raideur des matériaux ou encore à détecter et imager des défauts dans des matériaux métalliques ou composites. Une technique de compensation des effets de dispersion, qui s'amplifient durant la propagation des ondes guidées, est implémentée dans le procédé de traitement des signaux délivrés par les éléments de la sonde. Cela permet d'améliorer la précision du positionnement de défauts et d'augmenter la taille des pièces à inspecter. En dernier lieu les caractéristiques du procédé, ainsi que des résultats de ses détections de défauts sur composites, sont comparés avec ceux de méthodes CND connues (ultrasons et thermographie) employées durant ce travail.

Le cinquième chapitre explique la conception et l'évaluation des modèles de simulation par éléments finis, qui permettent de reproduire le procédé de génération et réception avec les sondes multiéléments, et la propagation des ondes de Lamb dans des plaques métalliques ou composites. Ces modèles permettent à la fois l'anticipation et la compréhension des phénomènes physiques, et peuvent servir de base à une étude d'optimisation du procédé de contrôle proposé dans cette thèse. Ce chapitre explique, dans un premier temps, l'apport de la modélisation par éléments finis, puis décrit les différentes parties du modèle et la formulation des phénomènes physiques. Dans un deuxième temps, il confronte des résultats de simulations numériques et de mesures expérimentales qui ont permis l'évaluation de ce type de modélisation par EF, suivant les deux critères de sélectivité modale et de directivité.



# Chapitre 1

## Enjeux et intérêts du procédé

### Sommaire

<b>1.1</b>	<b>Contexte industriel.....</b>	<b>6</b>
1.1.1	Besoins industriels .....	6
1.1.2	CND et SHM dans l'industrie.....	7
1.1.2.1	Les courants de Foucault .....	7
1.1.2.2	La magnétoscopie .....	8
1.1.2.3	Le ressuage .....	9
1.1.2.4	La radiographie .....	10
1.1.2.5	La thermographie infrarouge .....	11
1.1.2.6	La shearographie.....	12
1.1.2.7	Les ultrasons .....	13
1.1.2.8	Les techniques en SHM .....	13
<b>1.2</b>	<b>Développement du procédé de CND multiélément ondes guidées (MEOG) .....</b>	<b>14</b>
1.2.1	L'utilisation des ondes guidées en CND/SHM.....	14
1.2.2	Le développement et l'utilisation des systèmes multiéléments .....	17
1.2.2.1	L'emploi des transducteurs multiéléments en volumique .....	17
1.2.2.2	L'utilisation des systèmes multiéléments avec les ondes guidées.....	19
1.2.2.3	Méthodes employant le <i>Phased addition algorithm</i> avec les ondes guidées .....	20
1.2.2.4	Elaboration d'un nouveau procédé .....	21
<b>1.3</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>22</b>

## 1.1 Contexte industriel

### 1.1.1 Besoins industriels

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans de nombreux secteurs industriels : aéronautique, automobile, bâtiment et travaux publics, chaudronnerie, construction navale, mécanique, menuiserie, métiers de l'art, nucléaire, pétrochimie, transports, stockage et transport des énergies [1]. Par définition, il s'agit de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Pris au sens adopté ici, il s'agit généralement d'empilements de différents plis composés de fibres (carbone, verre, kevlar, etc.), qui peuvent être éventuellement tissées, imprégnées dans une matrice polymère (époxy, PEEK, polyester, etc.). Ces matériaux sont usuellement hétérogènes, anisotropes et viscoélastiques [2] avec des propriétés mécaniques équivalentes, voire supérieures à celles de matériaux classiques, une masse réduite et une bonne résistance aux agressions des environnements extérieurs (résistants à la corrosion, isolants, étanches, etc.). Cependant ces matériaux peuvent présenter certains dommages qui altèrent leurs performances, comme par exemple des défauts de porosité causés par un procédé de manufacture inapproprié, des fissurations de la matrice dues à des chocs mécaniques ou thermiques, des délaminages entre couches apparaissant suite à certaines charges mécaniques ou encore dus à des dommages provoqués par des impacts en surface, etc.

L'emploi de ces matériaux spécifiques, mais également de matériaux métalliques plus classiques, pour l'élaboration de pièces ou de structures industrielles, nécessite le recours à des techniques et procédés fournissant des informations sur la santé de ces dernières, sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure. Ces méthodes peuvent avoir plusieurs buts et peuvent être classées en deux catégories : l'évaluation non destructive (END) qui consiste en la caractérisation des propriétés physiques du matériau (détermination de la viscoélasticité, de la conductivité thermique, etc.), soit lors de sa fabrication de manière à vérifier sa conformité, soit en cours de son utilisation pour suivre son éventuel vieillissement. L'autre catégorie est le contrôle non destructif (CND) qui consiste plutôt en la détection de défauts localisés, et parfois l'imagerie de ces défauts. L'objectif du CND est donc la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné. C'est pourquoi le recours au CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits et de la gestion des risques, assurant ainsi la sécurité des personnes et des biens. Parfois, son utilisation revêt un aspect réglementaire pour la sécurité, cependant la démarche des industriels est souvent volontaire et s'intègre dans la politique de qualité mise en place, qui peut être motivée par le potentiel de progrès techniques et économiques qu'offrent ces techniques aux industries concurrentielles qui n'ont pas d'obligations légales de les pratiquer (par exemple le contrôle du processus de fabrication pour garantir et améliorer la qualité des produits).

Pour concevoir ces techniques d'essais non destructifs, une bonne connaissance de la composition complexe des matériaux et de leurs propriétés physiques, comme par exemple leur anisotropie, est généralement nécessaire, ainsi que celle de la nature des défauts recherchés. Le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut toujours être effectué à trois stades différents de son cycle de vie, conduisant ainsi à plusieurs types d'applications se différenciant à la fois par le contexte industriel et par la nature du contrôle lui-même :

- ✓ En amont de toute fabrication en série, le CND peut être utilisé pour analyser un ouvrage, une installation, un lot de pièces et ainsi vérifier ses spécifications de qualité en comparaison de celles définies dans le cahier des charges. Qu'il s'agisse du choix du procédé de fabrication, du choix des paramètres de réglage, de l'étalonnage, de la présentation et de l'archivage des résultats obtenus, c'est avant tout l'aspect procédure de la démarche qui est important. À ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi bien souvent d'en définir la nature et les dimensions.
- ✓ Au cours de la production, le CND joue le rôle d'outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant un appareillage installé sur la ligne de production. Celui-ci fait preuve alors d'une grande robustesse dans les mesures (bonne fiabilité), d'une réaction rapide, et permet un coût d'exploitation réduit. Durant cette phase de production, les défauts sont généralement bien identifiés et le CND aboutit à un repérage ou un tri des produits défectueux. Lorsque l'appareil de CND ne peut pas être installé sur la ligne de production, des bancs de contrôles annexes, parfois importants en taille et en coût d'investissement, peuvent être utilisés.
- ✓ Durant l'utilisation d'un produit, le CND s'effectue dans le cadre de la maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement du matériel. Au vu des graves conséquences éventuelles que peut entraîner la non détection d'un défaut, il est primordial qu'il soit d'une très grande fiabilité. Pour ce type de contrôle, il convient d'estimer le mieux possible la nature et les dimensions des défauts pour en apprécier la nocivité ; il faut disposer aussi d'une grande reproductibilité de l'examen non destructif, de façon à pouvoir suivre l'évolution du dommage au cours du temps.

Durant la phase d'utilisation d'un matériau, d'autres techniques, permettant le suivi de l'état d'une structure, peuvent être mises en parallèle du CND ; ce sont les méthodes de « contrôle de santé intégré » ou « structural health monitoring » (SHM). Ces systèmes, dont les composants sont intégrés à la structure durant sa phase de fabrication, assurent, par des mesures périodiques dans le temps, le contrôle de l'intégrité du matériau en identifiant des variations de ses propriétés ou de sa géométrie. Le CND et le SHM peuvent avoir des principes et des objectifs similaires, mais restent fondamentalement différents dans leur utilisation du fait que le SHM fournit certes un suivi plus régulier et automatique d'une structure, mais repose sur des systèmes fixés de manière permanente et dont la durée de vie est liée à celle de la structure. Le paragraphe suivant présente certaines techniques souvent employées en CND et SHM dans le cadre de l'industrie.

### 1.1.2 CND et SHM dans l'industrie

Les contrôles non destructifs et les contrôles de santé intégrés font appel à des méthodes spécifiques aux matériaux analysés, à leur environnement et aux anomalies recherchées. Il en existe donc une grande variété avec différents types de capteurs. Cette partie fait un tour d'horizon des principales techniques employées en CND et développées pour l'industrie. Certaines techniques utilisées en SHM sont, en dernier lieu, brièvement abordées.

#### 1.1.2.1 Les courants de Foucault

Cette méthode de CND (ET : Electromagnetic Testing en anglais) consiste à créer, dans des matériaux conducteurs électriques, des courants induits (courants de Foucault) par un champ magnétique variable, au moyen d'un capteur [3]. Ces courants induits circulent localement dans le matériau (figure 1.1) et ont une distribution spatiale qui dépend du champ

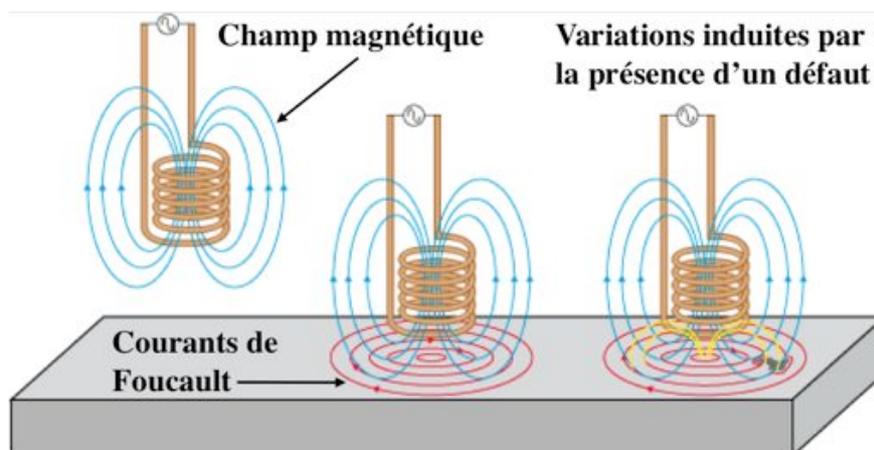


Figure 1.1 : Schéma du principe de la technique CND par courants de Foucault (<http://www.olympus-ims.com/fr>).

magnétique d'excitation, de la géométrie et des caractéristiques de conductivité électrique et de perméabilité magnétique de la pièce examinée. En présence d'une anomalie dans la pièce contrôlée, leur distribution spatiale est perturbée, entraînant ainsi une variation de l'impédance apparente du capteur, qui dépend de la nature de l'anomalie et de sa dimension volumique. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournit les indications exploitables pour effectuer le contrôle. L'interprétation des signaux recueillis s'effectue par comparaison avec ceux relevés dans un matériau étalon, qui peut être sain ou comportant des anomalies représentatives des phénomènes recherchés. Cette technique, utilisant des sondes sans contact avec la structure étudiée, a été développée pour principalement détecter des fissures ou de la corrosion pour lesquelles elle présente une forte sensibilité (de l'ordre du  $\mu m$ ). Cependant cette méthode est surtout utilisée pour détecter des défauts superficiels car les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau). Elle est de plus adaptée aux contrôles de structures cylindriques (barres, tubes) et aux contrôles de surface (tôle). Les courants de Foucault permettent également de déceler les variations de composition d'un alliage et même de mesurer des épaisseurs de revêtements. Il s'agit ainsi d'une méthode présente dans de nombreuses industries mais en particulier dans celles de la fabrication de tubes et de la maintenance de pièces métalliques conductrices.

### 1.1.2.2 La magnétoscopie

La magnétoscopie (Magnetic particle Testing en anglais) est l'une des méthodes incontournables de CND et aussi une des plus anciennes. Elle est utilisée pour détecter des discontinuités de surface, débouchant en surface ou sous-cutanées (dans certaines conditions, jusqu'à quelques millimètres de profondeur), exclusivement sur matériaux ferromagnétiques. Il s'agit d'une méthode largement utilisée dans le domaine du CND qui permet de contrôler des pièces en fer, en fonte, des aciers forgés, des soudures, des tôles, des tubes, etc., toutes sortes de pièces de géométrie simple ou complexe, pourvu que le matériau qui les constitue soit de nature ferromagnétique. Contrairement aux courants de Foucault, elle ne craint pas les effets de bord, et surtout elle ne se limite pas à un contrôle ponctuel. La magnétoscopie fait en effet partie des méthodes dites « globales », qui autorisent l'inspection de l'ensemble d'une pièce en une seule opération. Les contrôles, relativement rapides, s'effectuent aussi bien sur des vis de quelques millimètres de long que sur des vilebrequins de locomotive Diesel électrique ou encore sur des trains d'atterrissage d'avions. La magnétoscopie consiste à aimanter la pièce à contrôler à l'aide d'un champ magnétique suffisamment élevé. En présence d'une discontinuité, les lignes du champ magnétique subissent une distorsion qui

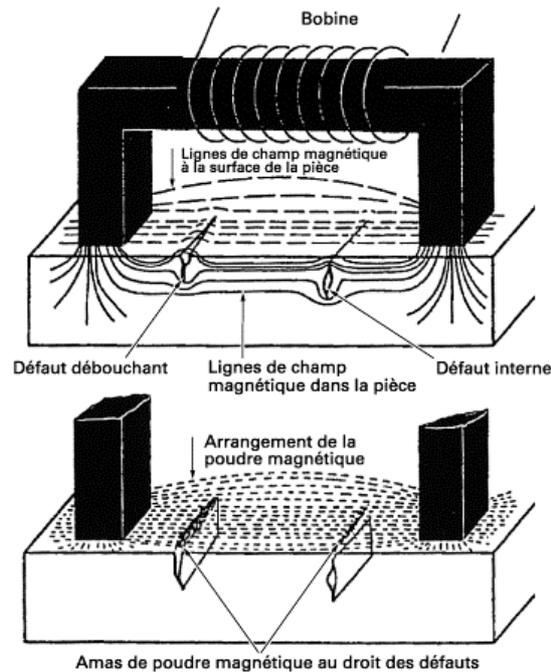


Figure 1.2 : Schéma du principe de la technique CND par magnétoscopie (<http://www.techniques-ingenieur.fr/>).

génère un « champ de fuite », appelé également « fuite de flux magnétique » [4]. Un produit indicateur (composé d'une poudre magnétique très fine) est appliqué sur la surface à examiner pendant l'aimantation (technique simultanée) ou après aimantation (technique d'aimantation résiduelle). Le produit indicateur coloré et/ou fluorescent est attiré au droit du défaut par les forces magnétiques pour former des indications (figure 1.2). Ces indications sont observées, dans des conditions appropriées, soit en lumière blanche (lumière artificielle ou du jour), soit sous rayonnement ultraviolet (UV-A). Les indications sont d'autant mieux détectées qu'elles se situent perpendiculairement aux lignes de force du champ magnétique. Pour détecter toutes les discontinuités à la surface d'une pièce, il faut effectuer deux aimantations orthogonales l'une par rapport à l'autre. Après contrôle, en fonction des conditions d'utilisation de la pièce, celle-ci peut nécessiter une désaimantation. Les équipements utilisés pour l'aimantation sont : des aimants permanents, des électroaimants portatifs, des générateurs de courants ou des bancs magnétoscopiques. La désaimantation des pièces, lorsqu'elle est requise, est effectuée à l'aide d'un démagnétiseur ou de tout autre dispositif ou technique appropriés.

### 1.1.2.3 Le ressuage

Le ressuage (Penetrant Testing en anglais) est, selon les professionnels, la méthode de CND la plus ancienne car l'une de ses premières utilisations daterait de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Cette méthode est par définition la résurgence d'un liquide (ou d'un gaz) d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement introduit au cours d'une opération d'imprégnation [5]. Prolongement logique de l'examen visuel, cette méthode permet donc de détecter les discontinuités débouchant en surface de la pièce contrôlée sous forme d'indications colorées ou fluorescentes, observées respectivement sur un fond blanc ou sur un fond noir. Le ressuage comporte quatre phases (figure 1.3) dont la première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. En effet la détectabilité des discontinuités est en grande partie conditionnée par la qualité de la préparation des surfaces. Un liquide coloré et/ou fluorescent, appelé « pénétrant », est ensuite appliqué sur la surface à contrôler au cours de la deuxième phase. Il pénètre par capillarité à l'intérieur des défauts (fissures de corrosion, porosités, piqûres, etc.), nécessitant une durée de pénétration avant l'étape suivante. Durant la troisième

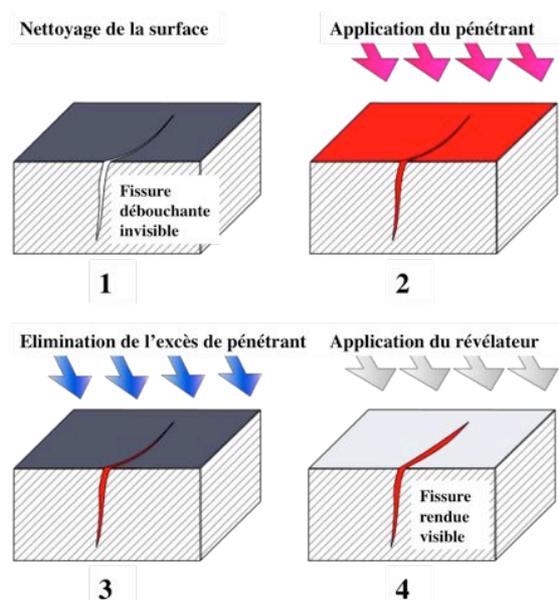


Figure 1.3 : Les quatre étapes de la technique CND par ressuage.

phase, l'excès de pénétrant en surface est éliminé par lavage suivi d'un séchage. La surface peut alors être recouverte d'une couche mince de « révélateur » qui adsorbe le pénétrant contenu dans les discontinuités, à la suite de quoi les indications de discontinuités apparaissent sous forme de taches colorées en surface. Ces taches étant plus larges que les discontinuités, il est alors plus simple de localiser ces dernières. Pendant cette quatrième phase, le révélateur fait « ressuier » le pénétrant, ce qui permet d'obtenir un bon contraste avec le pénétrant, facilitant ainsi l'observation visuelle. Le contrôle s'effectue en lumière blanche artificielle ou lumière du jour (ressuage coloré) ou sous rayonnement ultraviolet (UV-A). Cette technique permet de détecter des discontinuités ouvertes et débouchantes en surface sur tous matériaux métalliques, sur de nombreux matériaux minéraux (verre, céramique) et également sur certains matériaux organiques. Malgré la rigueur nécessaire à son utilisation, cette méthode a un faible coût de mise en œuvre et peut être considérée comme globale car elle peut contrôler toute la surface d'une pièce en une seule opération.

#### 1.1.2.4 La radiographie

Découverte il y a plus de 100 ans, la radiographie (Radiographic Testing en anglais) est une méthode de CND couramment employée pour contrôler l'intégrité de nombreux matériaux ou sonder le cœur d'une pièce [6]. Le principe de cette technique est basé sur la formation d'une image qui traduit l'absorption subie par un rayonnement ionisant ayant traversé l'objet à contrôler. Le rayonnement, X ou  $\gamma$ , transmis à travers la pièce vient ainsi impressionner un film qui fournit, après développement, une « image » de la zone traversée (figure 1.4). Comme pour le contrôle par ultrasons, cette méthode de CND permet de déceler essentiellement des défauts internes mais peut être utilisée pour inspecter des surfaces. La mise en évidence de ces défauts est assurée par une variation de densité optique sur le radiogramme (film radiographique irradié et développé), suite aux différences d'absorption des rayons entre une zone saine et une zone défectueuse. Les rayons X ou  $\gamma$  utilisés (rayonnements électromagnétiques) sont dits ionisants du fait de leur capacité à agir sur la matière et à y créer des charges électriques. Les rayons X sont créés en envoyant des électrons accélérés sur une cible en tungstène. Ils ont des longueurs d'onde comprises entre  $10^{-7} m$  et

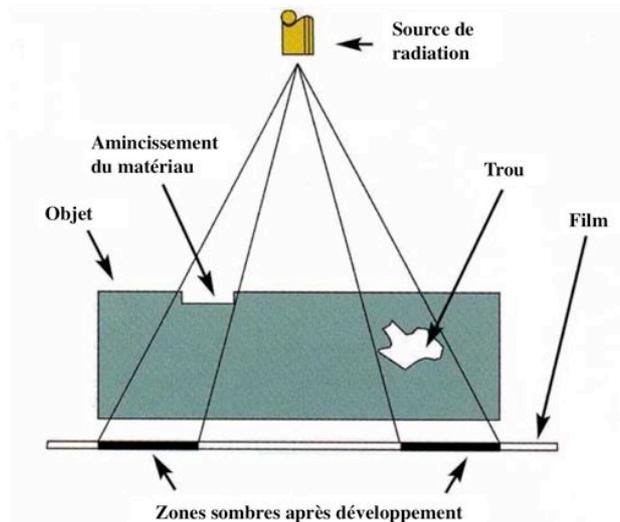


Figure 1.4 : Schéma du principe de la technique CND par radiographie (<http://www.ndt-ed.org>).

$10^{-12} m$ , ce qui correspond à une gamme d'énergie allant de  $10 eV$  à  $1\ 000 keV$ . Toutefois, seuls les rayons X de longueur d'onde inférieure à  $2.5 \cdot 10^{-10} m$  (c'est à dire d'énergie supérieure à environ  $5 keV$  environ) ont un pouvoir pénétrant suffisant pour être utilisés industriellement. Avec les accélérateurs linéaires, qui constituent des équipements très coûteux, on sait aujourd'hui produire des rayonnements X de quelques  $MeV$ , capables de radiographier des épaisseurs d'acier souvent supérieures à  $200 mm$ . Les rayons  $\gamma$  sont créés par désintégration spontanée d'un élément radioactif tel l'iridium 192 ou le cobalt 60. Les énergies produites (entre  $0.3$  et  $0.6 MeV$  pour l'iridium, entre  $1.1$  et  $1.3 MeV$  pour le cobalt) permettent de radiographier des pièces plus épaisses qu'avec les rayons X produits par des moyens classiques : en général, les épaisseurs d'acier acceptables vont jusqu'à  $20 mm$  avec les rayons X classiques, et jusqu'à  $150 mm$  avec les rayons  $\gamma$ . Dans la plupart des applications industrielles, la formation de l'image radiographique s'effectue grâce à un film qui, après développement, est observé par transparence. Cette procédure complexe prend du temps (quelques heures, si on veut une image de qualité) et est coûteuse si on a beaucoup de contrôles, mais c'est celle qui conduit à la meilleure qualité d'image (haute résolution inférieure au  $\mu m$  et bon contraste). Plus que pour les autres méthodes de CND, la radiographie exige un savoir faire important, tant au niveau des conditions opératoires (complexes et pouvant être dangereuses pour la santé) qu'à celui de l'interprétation des résultats. D'autres techniques, souvent onéreuses, existent pour obtenir l'image d'absorption des rayons X ou  $\gamma$  : les écrans fluorescents, la xérographie (l'image est obtenue en moins de deux minutes), les images enregistrées par caméra (assurant un contrôle en temps réel).

### 1.1.2.5 La thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge stimulée (ou active) fait partie des méthodes de contrôle non destructif utilisées pour détecter les défauts dans les matériaux et structures métalliques et composites [7]. Elle consiste à chauffer rapidement la surface du matériau inspecté au moyen, par exemple, de lampes flashes et à mesurer l'élévation de température résultante avec une caméra infrarouge. La présence d'un défaut se manifeste localement sur les images de thermographie par un retour anormalement lent à la température ambiante. Les images du film enregistrées après le flash peuvent être normalisées par rapport au signal recueilli sur une région saine pour donner un film de contraste. Cette technique peut fournir plus qu'une simple détection des défauts, elle peut aussi aider à les caractériser. Ayant été employée dans le cadre de ce travail, l'explication de la méthode et la description du dispositif sont données plus en



concentration de tension au sein d'un solide, il se déformera donc différemment du reste de l'objet lorsque celui-ci sera sollicité. Cela se traduit en shearographie par une concentration de franges.

### 1.1.2.7 Les ultrasons

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore (de volume, de surface ou guidée) se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit sur les défauts ou limites de la pièce puis revient vers le transducteur (mono ou multiélément, qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). Une technique basée sur ce principe est expliquée en détail au paragraphe 4.3.3.1. L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions [9] (au mieux une centaine de  $\mu m$ ). Dans le cas des ondes de volume, fortement employées dans l'industrie, la sensibilité des mesures dépend principalement de la nature du défaut (par exemple plus sensible aux fissures qu'aux porosités) et peu de son orientation. Les ultrasons sont employés pour la détection en temps réel de défauts en surface et au cœur de nombreux matériaux (métaux, composites, plastiques, bois, etc.), mais peuvent également servir à la mesure d'épaisseur et à la caractérisation des propriétés viscoélastiques des matériaux par des mesures de vitesse de propagation et d'atténuation. De manière un peu différente des mesures classiques de signaux réfléchis, certaines méthodes, telle que la méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction) pour le contrôle de soudures [10], utilisent le principe de diffraction des ondes ultrasonores pour la détection et la caractérisation des défauts (figure 1.6). Cette méthode présente une résolution spatiale élevée (environ  $\pm 0.1 mm$ ) et la possibilité de trouver des défauts aussi bien dans le volume de la matière qu'en surface. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Cette méthode nécessite cependant d'effectuer un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler la pièce, à partir de plusieurs de ses surfaces, pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts. Mais elle permet, en particulier, de bien mesurer la longueur des défauts dans la direction perpendiculaire aux surfaces.

### 1.1.2.8 Les techniques en SHM

Tout comme le CND, ces techniques font appel à une grande variété de domaines de la physique et de l'ingénierie [11]. Parmi les méthodes les plus utilisées se trouve l'analyse modale de vibrations forcées ou libres (avec ou sans actionneurs), pour laquelle des capteurs judicieusement positionnés permettent de reconstruire la déformée modale d'une structure sous l'action d'un chargement externe (méthode globale). Ces capteurs sont généralement des accéléromètres (à détection piézoélectrique, à détection capacitive, à jauge de contrainte, etc.). Suivant l'énergie nécessaire à injecter, on utilise des actionneurs piézoélectriques, des pots vibrants ou des impacteurs. La détection de défauts peut se faire par un changement des fréquences de résonance ou d'anti résonance du système, ou par l'apparition de non linéarités comme par exemple lors du frottement des faces d'une fissure [12].

Pour une détection locale, comme celle de l'apparition d'une fissure, il existe des systèmes comme le « comparative vacuum monitor » (CVM) [13]. C'est un capteur souple fabriqué à base de silicone constitué de deux réseaux de petites galeries, l'un rempli d'air et l'autre dans lequel on fait le vide. Si l'apparition d'une fissure fait communiquer les deux réseaux de galeries du capteur collé sur la surface contrôlée, il est alors impossible de faire le vide dans un seul des deux réseaux.

D'autres techniques, proches du CND, utilisent soit des capteurs à courants de Foucault, soit des patches piézocéramiques minces pour la génération et/ou réception d'ondes ultrasonores (ondes guidées). Pour ces derniers, lorsqu'ils sont employés de manière passive

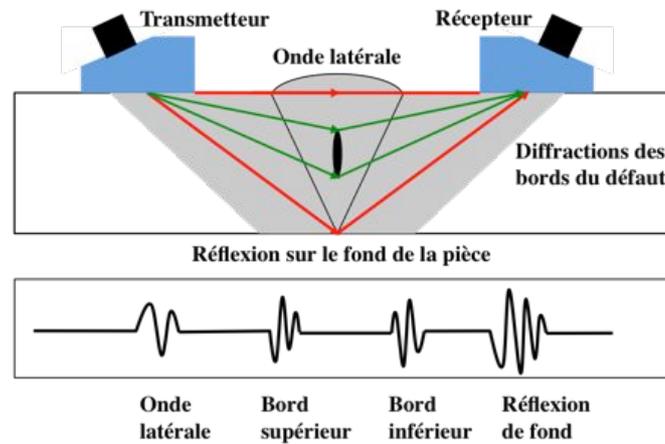


Figure 1.6 : Schéma du principe de la technique TOFD, employée en CND par ultrasons, pour l'auscultation de soudures.

(seulement à la réception), on étudie alors l'émission acoustique. Celle-ci consiste à capter la libération des ondes provoquée lors de l'endommagement d'une structure. Le taux d'émission acoustique peut renseigner sur la santé de la structure et prévenir de sa prochaine rupture [14]. Le même type de patches céramiques peut également être utilisé pour des mesures d'impédance électrique [15] aux bornes des capteurs, dépendant de la fréquence et de la liaison de la céramique à la structure.

Un dernier exemple de méthode employée est celui des capteurs à fibres optiques qui peuvent être insérées dans les structures composites sans risquer de les perturber [16]. En général on utilise des réseaux de Bragg gravés sur la fibre, qui permettent de sélectionner des longueurs d'ondes (condition de Bragg) dépendantes de la période du motif. Sous l'effet d'une déformation de la fibre, la longueur d'onde se décale, le système jouant alors le rôle de jauge.

## 1.2 Développement du procédé de CND multiélément ondes guidées (MEOG)

Le procédé de CND élaboré dans le cadre de ce travail découle du développement scientifique (en CND et SHM) des méthodes ultrasonores employant les ondes guidées et du développement technologique des systèmes multiéléments (réseaux de monoéléments ou transducteurs compacts). Avant de décrire le procédé, l'ensemble de ces développements est expliqué ainsi que les premières techniques ayant recours au principe du *Phased array* avec les ondes guidées.

### 1.2.1 L'utilisation des ondes guidées en CND/SHM

Pour tester efficacement (en terme de rapport performance / durée du contrôle) les structures métalliques ou composites, qu'elles soient de géométrie plane, courbe ou cylindrique, les techniques basées sur la propagation des ondes ultrasonores guidées [17, 18] sont assez souvent privilégiées. Elles ont montré une bonne capacité à analyser des pièces de grandes superficies, dans toute l'épaisseur du matériau, et avec des sensibilités suffisantes, selon la nature des modes guidés, pour détecter plusieurs types de défauts [19-21], comme par exemple la détection de délaminages grâce aux modes de Lamb [22, 23]. Elles sont particulièrement employées expérimentalement pour l'auscultation de structures cylindriques de type canalisation ou réservoir [24] et de structures minces de type plaque [25], ainsi que

pour le suivi de l'évolution de défauts sous contraintes, tel que l'évolution de fissurations dans des matériaux multicouches [26]. Les distances de propagation vont varier selon le choix des fréquences de travail, la nature viscoélastique du matériau, ou encore dépendre d'un éventuel couplage entre ce matériau et un fluide environnant, par exemple. Cette aptitude à se propager sur de longues distances leur permet de contrôler rapidement des pièces de grandes dimensions (jusqu'à quelques mètres pour des composites, et quelques dizaines de mètres pour des métaux), ou encore des zones difficiles d'accès situées assez loin des capteurs utilisés pour leur émission ou leur réception. Cependant leur nature dispersive représente un obstacle pour la réalisation de mesures précises et l'élaboration d'images de défauts que certaines méthodes, comme celle employée au paragraphe 4.3.1, tentent de compenser. En plus de leur utilisation en CND, les ondes guidées ont démontré leur intérêt pour l'évaluation non destructive des propriétés mécaniques des matériaux [27, 28].

Pour la génération et la détection de ces ondes guidées, il existe plusieurs techniques, dont les plus utilisées sont schématisées sur la figure 1.7. La plus classique est celle du transducteur piézoélectrique en contact surfacique (figure 1.7.a), généralement couplé avec du gel (parfois avec une pâte collante pour la génération d'ondes de cisaillement comme les modes *SH*), qui à l'émission excite tous les modes guidés possibles (suivant l'épaisseur du guide d'onde, la fréquence employée et l'excitabilité des modes) dans toutes les directions du plan de la structure (selon l'anisotropie).

Afin d'éviter le contact avec la structure, certaines techniques emploient des systèmes sans couplage comme les transducteurs capacitifs à couplage air ou l'utilisation de Lasers impulsions pour une excitation ponctuelle en surface (figure 1.7.b) par effet de dilatations thermiques (déformations thermoélastiques). Des sondes Laser sont également utilisées à la réception pour mesurer les déplacements normaux (ou tangentiels selon l'inclinaison de la sonde), elles sont généralement constituées d'un interféromètre de type Mach-Zehnder, permettant des mesures ponctuelles précises [29].

Les progrès technologiques obtenus dans la conception de capteurs ont permis l'émergence de transducteurs exploitant les phénomènes d'interactions des champs magnétiques, permettant ainsi la génération ou la détection d'ondes ultrasonores, en particulier guidées. L'exemple principal (figure 1.7.c) est celui de l'EMAT (transducteur acoustique électromagnétique) qui permet, sans contact, d'exciter les ondes par la force de Lorentz résultant de l'interaction entre un champ magnétique constant et des courants de Foucault induits à la surface de la structure par un champ magnétique alternatif. Ces transducteurs sont principalement employés pour exciter efficacement des modes guidés dont le déplacement est principalement dans le plan de la structure, comme par exemple les modes *SH*. Ce type de capteur a entre autre montré ses capacités pour la détection de la présence de délaminages, entre un émetteur et un récepteur, dans des matériaux multicouches [30]. D'autres systèmes souvent employés exploitent également le magnétisme pour la génération et la détection d'ondes guidées dans les canalisations (figure 1.7.d), ce sont des systèmes magnétostrictifs. L'interaction d'un champ magnétique avec un matériau ferromagnétique provoque la déformation de ce dernier. Les capteurs sont généralement montés avec une bande ferromagnétique posée en contact autour du conduit, et qui transmet les ondes ultrasonores par frottement ou par le biais d'une colle type époxy.

Les techniques évoquées jusqu'à présent génèrent l'ensemble des ondes guidées dans différentes voire toutes les directions de la structure. Il existe des méthodes pouvant privilégier certains modes et/ou certaines directions de propagation. Parmi celles-ci se trouve le transducteur piézoélectrique à onde longitudinale monté en incidence oblique variable sur un sabot (souvent composé de rexolite) couplé à la structure avec du gel (figure 1.7.e). Afin d'assurer la transmission de l'onde entre les différents milieux, un gel couplant est appliqué

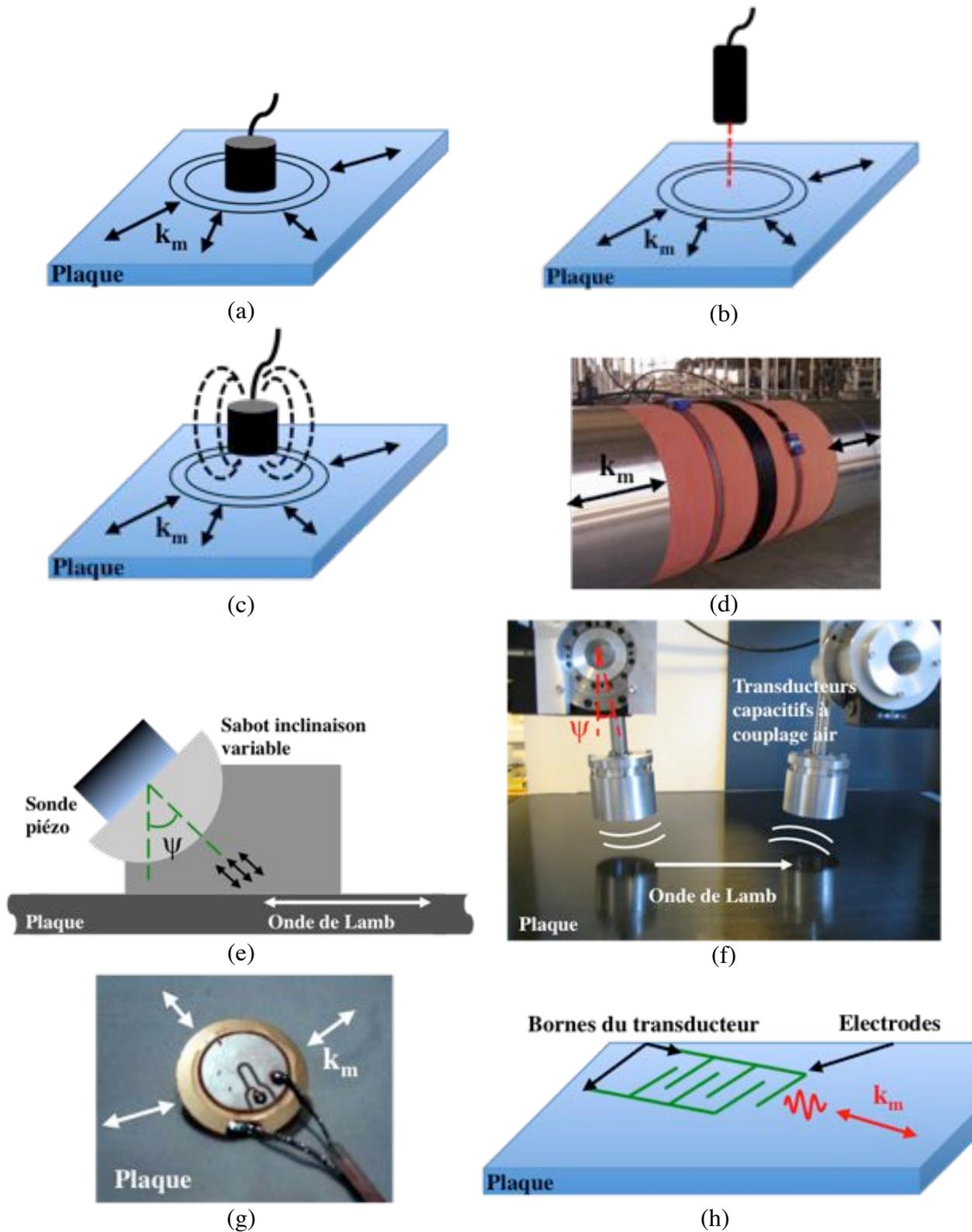


Figure 1.7 : Techniques classiques pour la génération et détection d'ondes guidées : (a) transducteur piézoélectrique monoélément en contact, (b) excitation et réception ponctuelle avec Laser, (c) transducteur acoustique électromagnétique (EMAT), (d) magnétostriction pour canalisation, (e) transducteur piézoélectrique à inclinaison variable sur sabot en contact, (f) transducteurs capacitifs inclinés à couplage air, (g) patch piézocéramique collé, (h) transducteur interdigital collé.

entre le transducteur et le sabot. L'orientation de la sonde permet de générer ou de réceptionner, sous un certain angle d'incidence, un faisceau ultrasonore, qui d'après les lois de Snell-Descartes assure l'excitation ou la détection d'un mode de Lamb particulier dans la direction considérée. Cette technique peut être utilisée, en mode pitch catch, pour observer des variations de vitesse de propagation de certains modes dues à la présence de défauts, comme par exemple des délaminages [31]. Basé sur le même principe, on utilise des systèmes composés de transducteurs capacitifs inclinés à couplage air [32], qui permettent également la détection de défauts entre un émetteur et un récepteur (figure 1.7.f) par l'observation d'éventuelles atténuations des ondes.

Pour conclure ce tour d'horizon, il faut évoquer les techniques qui s'appuient sur les capteurs développés en SHM. Celui qui est le plus fréquemment utilisé est le patch piézo-céramique qui peut être inséré dans la structure ou collé en surface (figure 1.7.g). Dans ce cas de figure, les paramètres d'excitation et de réception des ondes guidées sont adaptés au système étudié pour garantir la génération et la mesure d'un mode unique [33]. Les capteurs sont donc spécifiquement conçus et dimensionnés pour le contrôle d'un mode guidé, et en particulier de Lamb. A l'origine de ces conceptions, sont élaborées des modélisations s'appuyant sur des méthodes hybrides, comme le couplage entre éléments finis et méthode d'expansion de modes, réalisé en 2D [34, 35] ou en 3D [36], appliqué à l'étude de matériaux simples ou pour des matériaux viscoélastiques [37]. D'autres types de capteur, comme les transducteurs interdigitaux [38], ont également été conçus par des méthodes d'approximation analytiques comme le couplage de la théorie des couches discrétisées et la méthode de la transformation d'intégrales multiples [39]. En effet celle-ci est particulièrement bien adaptée pour l'étude de la propagation d'ondes guidées, générées par ces transducteurs (figure 1.7.h), au travers de matériaux qui peuvent être composites [40]. Elle permet de concevoir au mieux un transducteur interdigital pour la génération d'un mode pur. Cette modélisation se limite, pour le moment, à la génération du mode de Lamb  $A_0$  et doit être encore perfectionnée pour prendre d'avantages de paramètres en considération (nombre de tiges, apodisation, etc.), et permettre la conception de transducteurs interdigitaux plus précis qui ne généreraient pas de modes parasites, en particulier dans le cas de matériaux non isotropes.

### 1.2.2 Le développement et l'utilisation des systèmes multiéléments

#### 1.2.2.1 L'emploi des transducteurs multiéléments en volumique

En parallèle du développement des techniques d'imagerie ultrasonore médicale (échographie), les systèmes multiéléments en contact ont fait leur apparition depuis quelques années et se sont avérés être des outils de CND performants pour l'industrie. En effet dans ces deux domaines, ce type de transducteurs permet de répondre aux mêmes exigences [41] (rapidité, facilité d'utilisation, précision, etc.) et la recherche des systèmes les plus performants et les mieux adaptés y est la même [42]. L'utilisation de transducteurs multiéléments déphasés a rendu possible, en imagerie volumique, le balayage de faisceaux ultrasonores dans toutes les directions d'un volume à ausculter. Ceci du fait de la capacité de ces systèmes à focaliser une onde propagative sur un point spécifique du matériau, et donc de pouvoir créer un balayage spatial, en introduisant un déphasage temporel entre les éléments de la sonde [43]. Il a été également montré que l'utilisation d'un déphasage adéquat des éléments permet de corriger des problèmes de détection causés par une géométrie complexe de la structure, et qui ont tendance à masquer la présence de défauts [44]. Ainsi est rendu possible l'accès à un volume plus important sans avoir à déplacer le transducteur. Il n'en demeure pas moins que l'analyse reste limitée au voisinage du transducteur et ne peut pas être effectuée pour des zones inaccessibles à celui-ci.

Des modélisations du comportement de focalisation d'un faisceau ultrasonore [45], généré par des réseaux linéaires (1D) ou matriciels (2D), ont montré l'impact des différentes caractéristiques d'un transducteur multiéléments en contact, voire même à couplage par air [46], sur sa directivité et ses performances, telles que la résolution d'image, la sensibilité, etc. Ainsi l'amélioration de ces dernières, qui peuvent être obtenues par une focalisation en champs proche du système, dépend, entre autres, des dimensions du système, du nombre d'éléments, de leur taille [47] et de leur forme [48], de l'espace inter éléments, de l'angle de balayage [49] ou encore de l'ouverture du réseau [50]. La composition de ces systèmes, tel que le type de matériau ou les composants employés pour les éléments [51], entre également en jeu dans l'optimisation de leurs performances et caractéristiques, comme la bande passante fréquentielle qui peut être obtenue par la mesure des réponses des différents éléments [52].

L'intérêt croissant de l'imagerie 3D a poussé le développement de nouvelles solutions technologiques, pour les transducteurs multiéléments de type matriciel (2D), ayant un bon compromis entre le nombre de canaux et la perte de résolution, tout en conservant une qualité optimale des images. Dans ce but, des systèmes multiéléments plus performants, comme par exemple des réseaux annulaires 2D, ont été conçus et testés [53] pour garantir au mieux ces performances, tout en minimisant certains effets perturbants de couplage électromécanique entre éléments, en prenant en compte, au travers de modèles numériques [54], des excitations électriques adaptées. Des comparaisons, en terme de résolution et de contraste, ont été également effectuées entre différents types de réseaux (matriciel et annulaire) pour des applications en imagerie volumique. Il s'est avéré par exemple que certains réseaux annulaires offrent de meilleures performances avec un nombre réduit d'éléments [55], mais restent plus difficiles à concevoir. De nombreuses géométries différentes ont ainsi été testées et simulées, toujours dans le but d'optimiser le compromis entre technologie nécessaire, coût du système et performance en matière d'imagerie [56-58]. Plus récemment sont apparus des systèmes flexibles permettant des analyses de structures à géométrie plus complexe [59-62].

Outre le développement et l'optimisation technologique de ces transducteurs multiéléments, différentes méthodes d'imagerie, adaptée à ces systèmes, ont été élaborées dans les cas de propagation d'ondes volumiques. Les plus employées sont celles basées sur la TFM (Total Focusing Method) qui, analytiquement, permettent de créer une focalisation en chaque point du volume d'un matériau étudié, via l'exploitation d'une matrice complète de capture de données [63] (Full Matrix Capture en anglais), correspondant à l'ensemble des combinaisons de signaux entre les éléments du transducteur émetteur et les éléments du transducteur récepteur. Ce sont des méthodes performantes mais qui nécessitent beaucoup de temps de mesure et de traitement des données. De plus elles sont sensibles aux parasitages de réflexions éventuelles de surfaces proches et nécessitent un positionnement optimal du récepteur, dépendant, entre autres, du type de défaut, de la distance d'inspection et de l'ouverture angulaire du système. Parmi ces méthodes, certaines optimisent le contraste et la résolution de l'image en corrigeant les effets provoqués par la géométrie de surface et les caractéristiques de la structure étudiée [64]. D'autres, comme la VTFM (Vector Total Focusing Method), donnent une représentation vectorielle des résultats, permettant une meilleure caractérisation des défauts [65]. Enfin les plus récentes, comme la MMTFM (Multi-Mode Total Focusing Method), permettent de prendre en compte la présence de différents modes et la conversion modale dans des milieux multicouches [66]. Ces méthodes sont principalement employées pour la détection et l'analyse de défauts mais peuvent également servir à observer des déformations de structure en analysant la variation de l'image d'un échantillon soumis à des contraintes [67].

Il existe d'autres techniques similaires comme la méthode S-SAFT (Sectorial Synthetic Aperture Focusing Technique), basée sur une approche en temporel, qui superpose des images

de zones scannées obtenues par différents points de mesure. Ou encore des techniques d'inversion comme l'ISIM (Inverse Scattering Imaging Method), basée sur une approche en fréquentiel, qui repose sur une inversion élastodynamique fondée sur l'approximation de Kirchhoff. L'ISIM est performante pour positionner un défaut, mais la S-SAFT est mieux adaptée pour en déterminer précisément la forme [68]. Ces deux méthodes sont souvent complémentaires.

Une dernière voie, de plus en plus empruntée en volumique, dans les techniques d'imagerie de signaux exploitant les systèmes multiéléments, est celle du retournement temporel. De nombreuses techniques sont élaborées sur ce principe et consiste à isoler les informations nécessaires issues des champs diffractés, grâce principalement aux méthodes DORT (Décomposition de l'Opérateur de Renversement Temporel) et TR&MUSIC (Time Reversal and Multiple Signal Classification). La méthode DORT consiste à mesurer la réponse impulsionnelle entre les éléments du réseau du transducteur (émetteur-récepteur), puis à déterminer l'opérateur de renversement temporel [69]. Les valeurs propres et vecteurs propres de ce dernier permettent de déterminer le nombre de défauts et donnent des informations sur l'amplitude et la phase nécessaires pour refocaliser sur chaque défaut. La méthode TR&MUSIC est aussi basée sur une analyse de l'espace propre de l'opérateur de renversement temporel, elle offre cependant de meilleures performances, en terme de résolution spatiale, que la méthode DORT, particulièrement en présence de niveau de bruit élevé [70].

### 1.2.2.2 L'utilisation des systèmes multiéléments avec les ondes guidées

L'inspection par ondes de volume occupe une place dominante dans les techniques ultrasonores non destructives qui emploient des sondes multiéléments. La littérature sur le sujet est donc abondante (conceptions de transducteurs, techniques d'imagerie), et plusieurs dispositifs sont disponibles sur le marché. Même si la focalisation ou la déviation des faisceaux ultrasonores apportent des améliorations nettes en matière de résolution et de rapidité d'exécution, ces procédés n'en restent pas moins limités au contrôle d'un volume restreint situé au voisinage du (ou des) capteur(s). Ainsi pour l'auscultation de grandes structures type plaque ou canalisation, ces systèmes sont également envisagés pour générer et détecter des ondes guidées. Certaines études ont été réalisées pour dimensionner au mieux des capteurs linéaires afin d'exciter ou recevoir un mode guidé particulier. De la même manière que pour la conception des transducteurs interdigitaux, vue précédemment, des modélisations hybrides ou analytiques, de ces transducteurs et de la propagation des ondes dans un guide, ont été réalisées en s'appuyant sur la méthode d'expansion de modes [71], ou encore sur la théorie des couches discrétisée associée à celle de la piézoélectricité dynamique [72].

L'emploi de ces capteurs multiéléments compacts en CND avec des ondes guidées est encore peu développé. On peut cependant noter quelques utilisations avec des procédés de retournement temporel comme la méthode DORT [73] sur des plaques. Par contre il n'est pas rare, pour le contrôle non destructif de canalisation, de rencontrer des ensembles de capteurs montés en anneau autour du conduit inspecté, permettant par exemple l'analyse des temps de vol de modes de torsion ou encore l'utilisation de différentes techniques telles que, par exemple, le retournement temporel [74]. Au cours des dernières années, on a surtout observé, pour les structures type plaque, l'utilisation de réseaux de monoéléments (patches piézocéramiques) en SHM. Ces premières tentatives d'associer ondes guidées et systèmes multiéléments concernent essentiellement les plaques métalliques, milieux isotropes et élastiques qui rendent plus simples la mise au point des procédés. L'extrapolation à des matériaux composites reste donc toujours très ouverte. Différentes techniques de détection et d'imagerie ont donc été développées s'appuyant sur des configurations différentes de réseaux

d'éléments. Pour des réseaux épars, sur l'ensemble de la structure inspectée, on retrouve des procédés comme celui de multirésolution [75], qui par une « isolation » de modes propagatifs (principalement  $SH_0$ ), s'appuyant sur une transformée en ondelette, et une étude du temps de vol, permet de localiser assez précisément un défaut de type délaminage. D'autres, comme le procédé de déconvolution [76], permettent d'obtenir, lorsqu'il n'y pas trop de bruit dans les mesures, un meilleur contraste et une meilleure résolution. A cela peut s'ajouter des méthodes algorithmiques ayant pour but de prendre en considération les conditions expérimentales de mesures, en tenant compte des phénomènes principaux de perturbation comme la variation de température [77, 78]. En ce qui concerne les autres configurations, on retrouve souvent des méthodes utilisant des réseaux compacts à la réception permettant, par exemple, de réaliser des transformées de Fourier 2D en différentes positions d'une structure mince afin d'identifier la localisation d'un défaut [79].

### 1.2.2.3 Méthodes employant le *Phased addition algorithm* avec les ondes guidées

De même que certaines techniques évoquées précédemment, employées avec les transducteurs multiéléments qui génèrent et détectent des ondes volumiques, de nombreux procédés réalisent des matrices complètes de capture de signaux, qui sont produits par les ondes guidées générées et détectées par des réseaux de capteurs. Basées sur l'exploitation de ces données brutes et sur la connaissance des courbes de dispersion des ondes guidées, on trouve des méthodes similaires qui appliquent des algorithmes de sommation de signaux déphasés (*Phased addition algorithm*).

Sur les structures du type canalisation, des anneaux composés de plusieurs capteurs sont fixés en contact, leurs caractéristiques et la fréquence à laquelle ils opèrent leur permettent de générer un mode unique à l'émission, et une fois les données récupérées, ces algorithmes permettent de créer des focalisations de signaux en chaque point de la structure (similaire aux méthodes TFM, SAFT ou encore CSM) afin d'obtenir des images avec une bonne résolution et de localiser d'éventuels défauts [80]. Avec ce type de procédure il est ainsi possible de dimensionner des défauts [81], d'opérer sur des matériaux viscoélastiques [82], ou encore de tenir compte de la sensibilité au bruit [83].

Des applications identiques ont également été développées sur des structures type plaque en 2D, c'est à dire dans toutes les directions du plan de la plaque, avec un émetteur et un réseau de récepteurs. Certaines utilisent des réseaux d'éléments délimitant la zone à inspecter sur des matériaux qui peuvent être anisotropes [84]. La plupart, qui pour l'instant ne sont employées que sur des matériaux métalliques, isotropes et élastiques, ont recours à des

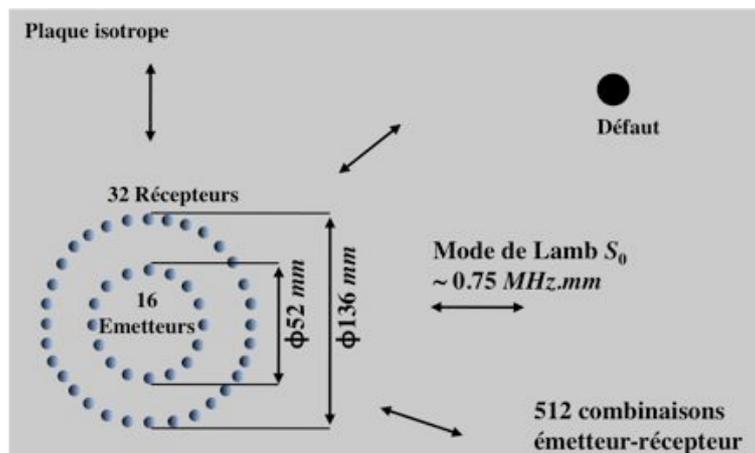


Figure 1.8 : Schéma d'un dispositif 2D utilisant le procédé FCM (Full Capture Matrix) et le *Phased addition algorithm* pour l'inspection d'une plaque métallique à l'aide d'un réseau d'EMAT générant/détectant le mode de Lamb  $S_0$ .

réseaux compacts, éloignés des défauts observés, considérant la propagation de faisceaux ultrasonores dans différentes directions (Beam steering en anglais) et permettant, dans les algorithmes, de prendre en compte les effets dispersifs des modes guidés. Les réseaux se composent de capteurs spécifiques qui génèrent et reçoivent un mode en particulier à certaines fréquences, comme par exemple des patchs piézocéramiques excitant le mode de Lamb  $A_0$  [85], ou encore des capteurs EMAT travaillant avec le mode de Lamb  $S_0$  [86]. La figure 1.8 est un exemple typique de dispositif utilisant ce genre de procédé, combinant la FMC (Full Matrix Capture) et le *Phased addition algorithm*. Il est composé d'un réseau d'EMAT excitant le mode  $S_0$  dans toutes les directions d'une plaque métallique de 5 mm d'épaisseur à 0.15 MHz ( $\lambda = 35$  mm), avec 16 émetteurs et 32 récepteurs. En parallèle du développement de ces systèmes expérimentaux, des travaux ont été menés, au travers de modèles analytiques, sur des études de sensibilité de la qualité du balayage de faisceau (Beam steering) en fonction de la configuration des réseaux utilisés [87, 88]. Il est cependant souvent nécessaire, afin d'augmenter la résolution des images obtenues par ce type de procédé, d'employer certaines techniques utilisant des algorithmes de traitement de données supplémentaires comme la méthode de déconvolution angulaire [86] ou le moyennage de la covariance entre signaux obtenus en différents points d'une zone spatiale définie [89].

### 1.2.2.4 Elaboration d'un nouveau procédé

Les différentes techniques évoquées précédemment, qui emploient les ondes guidées dans les plaques, ont un certain nombre de limitations (table 1.1). L'objectif du projet, réalisé dans le cadre de cette thèse, est d'apporter une solution alternative à ces techniques qui permettrait de pallier l'ensemble de ces limitations. Le projet est une suite logique des travaux menés jusqu'à présent et des procédés existants susmentionnés. Il a pour but de mettre au point un procédé de CND alternatif, pour l'auscultation de grandes structures minces type plaque (dont certaines zones peuvent être inaccessibles et éloignées de la sonde), utilisant le principe de déphasage pour réaliser un balayage de faisceaux (Beam steering) en 2D avec une sélectivité modale des ondes guidées. Ce procédé, utilisant les ondes de Lamb, tiendrait compte de leurs caractéristiques dispersives inhérentes à leur propagation. L'idée est d'avoir un procédé dont la mise en place et l'utilisation seraient rapides et faciles, et qui permettrait la détection, voire la réalisation d'une image de la structure étudiée et de l'ensemble des défauts, qui y sont présents. Il utiliserait une sonde ultrasonore, matricielle, multiélément, compacte, directement posée, en un point fixe, en contact avec la surface de la plaque, couplée à l'aide d'un gel, permettant ainsi son emploi aussi bien sur des matériaux métalliques que composites. En comparaison avec des transducteurs EMAT, qui ont besoin, pour l'inspection de matériaux composites, d'un film métallique collé en surface de l'échantillon [90], la sonde ultrasonore n'aurait seulement besoin que de gel, ce qui la rendrait facile à installer et à enlever. De plus, le procédé proposé n'aurait pas besoin d'avoir recours à des méthodes complémentaires, comme par exemple l'utilisation d'une technique de déconvolution requérant un signal de référence simulé [86], afin d'améliorer ses capacités de détection.

A l'émission, des applications 1D sur des plaques [91] ou sur des canalisations [92] ont permis de contrôler la génération de certains modes par l'implémentation de lois de retard dans le domaine temporel (figure 1.9). De la même manière, mais élargie à une application 2D qui tiendrait compte des effets de dispersion, le système développé ici vise à contrôler directement, à l'émission, la génération d'un mode de Lamb spécifique dans une direction du plan de la plaque (figure 1.10.a). Cela devrait permettre d'avoir une sensibilité plus importante pour la détection de défauts, du fait que tous les éléments de la sonde contribuent à l'excitation dans une seule direction, ce qui devrait augmenter les performances en terme de localisation et d'identification. De plus, lorsque l'on utilise une méthode comme la FMC (Full

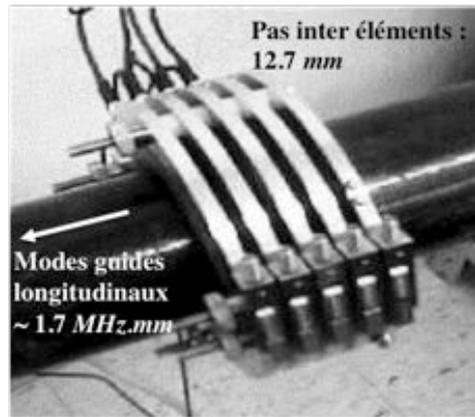


Figure 1.9 : Photographie d'un système muni de 5 éléments annulaires piézocéramiques montés sur une canalisation en acier et carbone d'épaisseur 6.35 mm et de diamètre 88.9 mm. Il génère des modes guidés longitudinaux grâce à l'application de lois de retard en temps entre les éléments.

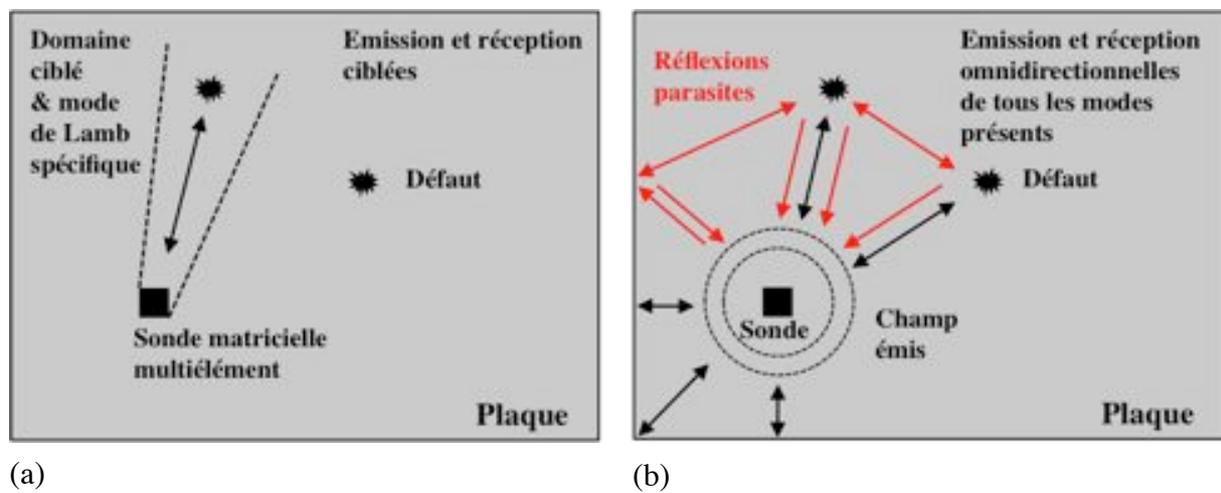


Figure 1.10 : Observation d'une structure type plaque : (a) Balayage progressif de zones ciblées à l'émission et à la réception avec le procédé CND MEOG, (b) Mesures omnidirectionnelles à l'émission et à la réception.

Matrix Capture), l'excitation est simultanément réalisée dans toutes les directions, ce qui peut provoquer de multiples réflexions (figure 1.10.b) entre les différents réflecteurs présents (défauts, bords de plaque, raidisseurs, etc.), qui en revenant vers la sonde depuis différentes directions vont perturber les mesures et causer, durant le post traitement, l'apparition d'images erronées. Le contrôle de la direction de propagation du faisceau ultrasonore pourrait aider à éviter ce problème.

A la réception, l'objectif serait d'utiliser le *Phased addition algorithm* et d'employer un post traitement optimisé afin de garantir une inspection rapide en temps réel, sur le domaine angulaire et dans la direction choisie (figure 1.10.a).

### 1.3 Conclusion

Après un rappel des besoins de l'industrie en matière de contrôle et de suivi de santé des structures métalliques et composites, ce chapitre a fait, tout d'abord, un tour d'horizon des principales techniques CND et SHM employées actuellement. Afin de connaître le contexte technique et de situer le projet, l'ensemble des techniques classiques utilisées pour générer et détecter les ondes guidées dans des structures planes ou cylindriques ont été rappelées. A partir de là, il était possible d'évoquer les développements scientifiques, sur lesquels s'est

appuyé le procédé élaboré dans le cadre de ce travail, à savoir la conception, l'amélioration et l'utilisation des systèmes multiéléments, qu'il s'agisse de transducteurs compacts ou de réseaux de monoéléments, avec des ondes de volume ou des ondes guidées. Pour finir, les travaux, à l'origine du projet, réalisés sur des techniques employant le *Phased addition algorithm*, sont expliqués et la description du procédé CND alternatif (intérêts et principe de fonctionnement) est faite. L'ensemble de cette partie a permis de rappeler le contexte scientifique et technique et de positionner le projet au sein des techniques CND existantes. Avant d'expliquer de manière plus approfondie la méthode employée pour ce procédé et le fonctionnement du système expérimental au chapitre 3, il est nécessaire de rappeler les caractéristiques et le comportement des ondes guidées dans les différents matériaux utilisés. Ceci est l'objet du chapitre 2.

	Réseau de patchs (SHM) Analyse temps de vol	Focalisation	Retournement temporel	Contrôle unidirectionnel de mode	Beam steering avec FMC (+déconvolution angulaire)
Uniquement sur matériaux isotropes		X	X		X
Acquisition/ traitement long	X	X	X		X
Zone d'auscultation spatialement limitée		X	X	X	
Nécessite 1 seul et unique mode à l'émission/ réception	X	X			X
Non prise en compte de la dispersion des modes guidés	X			X	

Table 1.1 : Limites des techniques employant les ondes guidées sur les structures type plaque.



# Chapitre 2

## Caractéristiques des ondes guidées dans les matériaux étudiés

### Sommaire

<b>2.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>Modélisation des matériaux .....</b>	<b>26</b>
2.2.1	Rappels théoriques sur la mécanique des milieux continus dans le domaine (visco)élastique .....	26
2.2.2	Classes de symétrie des matériaux.....	28
<b>2.3</b>	<b>Ondes guidées dans les plaques .....</b>	<b>31</b>
2.3.1	Rappel sur les ondes de volume en milieu infini .....	31
2.3.2	Modes de Lamb .....	33
2.3.3	Les courbes de dispersion .....	35
2.3.4	Les champs de déplacement .....	38
<b>2.4</b>	<b>Caractérisation des matériaux.....</b>	<b>40</b>
2.4.1	Les méthodes de caractérisation .....	40
2.4.1.1	Caractérisation par temps de vol .....	41
2.4.1.2	Caractérisation par fonction de transfert .....	42
2.4.1.3	Caractérisation par ondes guidées et transformée de Fourier 2D .....	43
2.4.1.4	Caractérisation par méthode numérique .....	46
2.4.2	Résultats des mesures .....	47
<b>2.5</b>	<b>La méthode SAFE .....</b>	<b>50</b>
2.5.1	Implémentation des équations .....	51
2.5.2	Modélisation de la plaque .....	53
2.5.3	Post traitement .....	54
2.5.4	Résultats obtenus .....	54
<b>2.6</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>57</b>

## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre sont faits, dans un premier temps, quelques rappels théoriques sur la mécanique des milieux continus dans le domaine (visco)élastique et la modélisation des matériaux. Ensuite est abordée la description des caractéristiques des ondes de volumes et des ondes guidées, en particulier les ondes de Lamb, qui se propagent dans les structures minces, type plaque. Ce rappel permet, entre autre, de comprendre les principes des méthodes de caractérisation qui suivent et qui sont nécessaires pour déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés dans le cadre de ce travail (matériaux métalliques et composites). Différentes méthodes expérimentales et numériques sont expliquées, puis une méthode semi analytique est décrite, la méthode SAFE (Semi Analytical Finite Element), qui permet, à partir des modules de viscoélasticité, de calculer les champs normalisés des modes guidés, ainsi que l'ensemble de leurs courbes de dispersion.

## 2.2 Modélisation des matériaux

### 2.2.1 Rappels théoriques sur la mécanique des milieux continus dans le domaine (visco)élastique

Considérons un solide déformable (S) repéré dans une base orthonormée directe ( $0, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ ). Sous l'effet d'actions mécaniques extérieures, le solide se déforme de manière continue. Il est alors possible de définir le tenseur des déformations  $\boldsymbol{\varepsilon}$  traduisant la variation des champs de déplacement des points du solide. Dans l'hypothèse des petites déformations des solides (visco)élastiques, dans laquelle s'inscrit l'acoustique linéaire, les termes du deuxième ordre et supérieur sont négligés par rapport à ceux du premier ordre. Les composantes du tenseur des déformations s'écrivent alors :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.1)$$

Il s'agit d'un tenseur de rang 2, symétrique, ne contenant par conséquent que 6 composantes indépendantes. L'ordre des indices n'étant pas significatif, on utilise généralement une notation plus simple qui consiste à remplacer la matrice de 9 éléments par un vecteur colonne à 6 composantes [18] :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

avec la convention classique de contraction des indices :

$\alpha = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  respectivement pour  $(i, j) = (1, 1), (2, 2), (3, 3), (2, 3), (1, 3), (1, 2)$ .

Dans le solide déformé apparaissent également des tensions mécaniques appelées contraintes qui tendent à ramener le solide dans son état de repos et assurent l'équilibre de la matière. Ainsi, il est également possible de définir le tenseur des contraintes  $\boldsymbol{\sigma}$  qui, en vertu de l'équation d'équilibre des moments des forces exercées sur un élément de volume du solide considéré, est lui aussi symétrique. Il ne contient donc que 6 composantes indépendantes et peut être écrit, avec la même convention d'indices que celle du tenseur des déformations, sous la forme d'un vecteur :

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Les champs de déformations et de contraintes dans un milieu solide sont liés par les lois dites de comportement  $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon})$ , caractérisant le comportement mécanique du matériau. Dans le cadre de l'acoustique linéaire, c'est à dire dans le cas de petites déformations des solides (visco)élastiques, la relation entre contraintes et déformations est linéaire et est connue sous le nom de loi de Hooke :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (2.4)$$

où  $\mathbf{C}$  est un tenseur d'ordre 4 appelé tenseur de rigidité. A noter qu'on utilise la règle de sommation sur les indices répétés. Ce tenseur possède 81 composantes, mais du fait de la symétrie des tenseurs de contraintes et de déformations, ainsi que certaines propriétés thermodynamiques des solides [18], le nombre de ses composantes indépendantes se réduit à 21 ( $C_{ijkl} = C_{jilk} = C_{klij} = C_{lkji}$ ). C'est le cas d'un matériau ne possédant aucune symétrie, le matériau triclinique, dont la relation de comportement, en utilisant la contraction des indices vue précédemment, s'écrit :

$$\sigma_\alpha = C_{\alpha\beta} \varepsilon_\beta \quad \alpha, \beta = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (2.5)$$

ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & \text{Sym.} & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Les coefficients  $C_{\alpha\beta}$  de la matrice de rigidité sont généralement complexes ( $C_{\alpha\beta} = C_{\alpha\beta}' + iC_{\alpha\beta}''$ ). Les parties réelles représentent la raideur des matériaux et les parties imaginaires la viscoélasticité [17].

### 2.2.2 Classes de symétrie des matériaux

La plupart des matériaux utilisés dans le monde industriel possèdent des symétries supplémentaires par rapport au cas général triclinique. Ces propriétés de symétrie, par rapport à certains plans, appelés plans principaux, assurent à la matrice de rigidité une invariance lors d'un changement de base par rapport à un de ces plans, et réduisent le nombre de composantes indépendantes. En général les matériaux rencontrés sont, au plus, orthotropes, c'est à dire qu'ils possèdent 3 plans de symétrie perpendiculaires deux à deux, ce qui conduit à des matrices de rigidité ayant au maximum 9 composantes indépendantes. Cette forme de la matrice est donc obtenue en rajoutant au matériau monoclinique deux plans de symétrie perpendiculaires au précédent. L'expression de ces matrices de rigidité à 9 modules est valable lorsque les directions principales du matériau coïncident avec les directions 1, 2 et 3 du repère de travail ( $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ ), comme sur l'exemple de la figure 2.1.

Dans le cadre de ce travail, les matériaux dont il sera question possèdent encore plus de symétries (table 2.1). Tout d'abord la classe des matériaux quadratiques, tels que les composites  $[0^\circ/90^\circ]$ , composés d'une superposition de plis dont les fibres sont orientées, alternativement, parallèlement aux directions 2 et 3, ou encore les composites composés de plis tissés avec un entrelacement perpendiculaire de leurs fibres (en supposant les caractéristiques et la quantité de fibres identiques dans les deux directions). Ils possèdent des propriétés identiques suivant les directions 2 et 3 et leur matrice de rigidité a 6 composantes indépendantes. Ensuite vient la classe des matériaux hexagonaux (ou isotropes transverses), tels que les composites unidirectionnels, qui possèdent un axe de révolution, par exemple suivant la direction 3 lorsque celle-ci est parallèle à l'orientation des fibres. La matrice de rigidité de ce type de matériaux possède 5 composantes indépendantes. On peut également associer à cette classe les matériaux dits quasi isotropes dans le plan des fibres, c'est à dire isotropes dans le plan dont la normale est parallèle à la direction 1. Même si, du point de vue industriel, ils ne sont pas classables dans cette catégorie car le plan d'isotropie n'est pas perpendiculaire à la direction des fibres, leur comportement mécanique est similaire à celui de la classe isotrope transverse. Leur tenseur de rigidité est similaire au cas unidirectionnel, que l'on peut voir dans la table 2.1, avec simplement une permutation des indices 1 et 3. Les matériaux en question sont, par exemple, des composites croisés multicouches  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ . La dernière classe de symétrie, utilisée lors de ce travail, est celle des matériaux isotropes, tels que les aluminiums, aciers ou plexiglas. Leurs propriétés sont indépendantes du choix des axes de références, et leur matrice de rigidité a seulement 2 composantes indépendantes.

Comme il a été stipulé précédemment, l'expression de ces matrices de rigidité est valable lorsque les directions principales du matériau coïncident avec les directions du repère de travail. Par la suite, l'étude de la propagation des ondes ultrasonores nécessitera la connaissance du comportement mécanique des matériaux dans des directions non principales. En effet le repère de travail sera lié au plan de propagation des ondes qui ne sera pas toujours aligné avec les directions principales du matériau. La plupart du temps, dans le cas des matériaux composites anisotropes, pour passer du repère initial défini dans les directions principales du matériau au nouveau repère de travail lié au plan de propagation, il suffira de réaliser une rotation d'un angle  $\theta$  autour de l'axe normal au plan des fibres (c'est à dire la direction 1 sur la figure 2.1). Le tenseur de rigidité correspondant à ce changement de repère est donc obtenu par l'application d'une matrice de rotation  $R(\theta)$  de la base  $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$  vers la base  $(\mathbf{e}'_1 = \mathbf{e}_1, \mathbf{e}'_2, \mathbf{e}'_3)$  [93], qui s'écrit :

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cos \theta \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cos \theta \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & -\cos \theta \sin \theta & \cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Le tenseur de rigidité obtenu dans la nouvelle base, après transformation, s'exprime :

$$\mathbf{C}' = \mathbf{R} \mathbf{C} \mathbf{R}' = \begin{pmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{13} & C'_{14} & 0 & 0 \\ & C'_{22} & C'_{23} & C'_{24} & 0 & 0 \\ & & C'_{33} & C'_{34} & 0 & 0 \\ & & & C'_{44} & 0 & 0 \\ & \text{Sym.} & & & C'_{55} & C'_{56} \\ & & & & & C'_{66} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

ce qui correspond à la forme générale d'un matériau monoclinique. Cela signifie qu'il est possible de déterminer le comportement mécanique d'un matériau de symétrie au plus orthotrope dans n'importe quelle direction du plan de normale 1 (plan des fibres dans le cas des composites) en utilisant la forme générale d'un matériau monoclinique. Ceci sera particulièrement employé dans la phase de caractérisation et de calcul des courbes de dispersion des ondes guidées, ainsi que lors de la modélisation numérique de leur propagation.

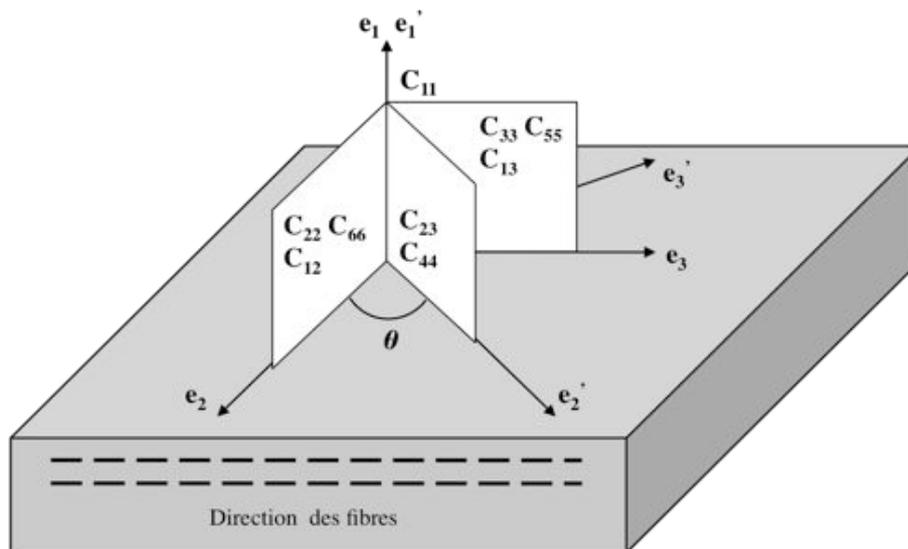


Figure 2.1 : Orientations des repères de travail suivant les directions principales du matériau ( $\mathbf{e}_1$ ,  $\mathbf{e}_2$ ,  $\mathbf{e}_3$ ), ici dans un cas unidirectionnel, et suivant la direction de propagation des ondes ( $\mathbf{e}'_1$ ,  $\mathbf{e}'_2$ ,  $\mathbf{e}'_3$ ).



## 2.3 Ondes guidées dans les plaques

### 2.3.1 Rappel sur les ondes de volume en milieu infini

Avant d'étudier la propagation des ondes guidées (principalement les modes de Lamb), il est nécessaire de commencer par quelques rappels sur la propagation des ondes de volumes en milieu infini. Les déplacements dans le matériau sont régis par l'équation du mouvement (deuxième loi de Newton) :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.9)$$

où  $f_i$  représente les composantes des forces de volume au sein du matériau,  $\rho$  la masse volumique,  $u_i$  et  $\sigma_{ij}$ , respectivement, les composantes du vecteur champ de déplacement et du tenseur des contraintes du matériau.

La propagation d'une onde correspond à un régime dynamique pour lequel les forces de volume (par exemple la pesanteur) sont généralement négligées. On se place également, dans le cadre de cette étude, dans le domaine de l'acoustique linéaire et sous l'hypothèse des petites perturbations. Ainsi, en l'absence de forces volumiques extérieures, l'équation du mouvement (2.9) associée à la loi de Hooke (2.4) conduit aux équations de propagation :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_l} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (2.10)$$

Ce système de trois équations différentielles couplées admet une solution du type onde plane qui s'écrit sous la forme complexe suivante :

$$u_i(\mathbf{x}, t) = AP_i e^{I(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})} \quad i = 1, 2, 3 \quad \text{et} \quad I^2 = -1 \quad (2.11)$$

où  $A$  est l'amplitude du déplacement de l'onde,  $P_i$  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,  $\mathbf{k}$  le vecteur d'onde et  $\mathbf{x}$  le vecteur position du point considéré (point où passe l'onde à l'instant  $t$ ).  $\mathbf{k}$  peut s'exprimer sous la forme :

$$\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} \mathbf{n} \quad (2.12)$$

avec  $c$  la célérité de l'onde et  $\mathbf{n}$  le vecteur unité indiquant la direction de propagation du front d'onde.

En combinant les équations (2.10) et (2.11), on obtient l'équation de Christoffel qui permet de déterminer la vitesse de phase et la polarisation d'une onde plane se propageant dans un milieu infini :

$$\left( \Gamma_{il} - \rho c^2 \delta_{il} \right) P_l = 0 \quad i, l = 1, 2, 3 \quad (2.13)$$

avec  $\delta_{il}$  le symbole de Kronöcker et  $\Gamma$  le tenseur de Christoffel dont les composantes s'écrivent sous la forme :

$$\Gamma_{il} = C_{ijkl} n_k n_j \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (2.14)$$

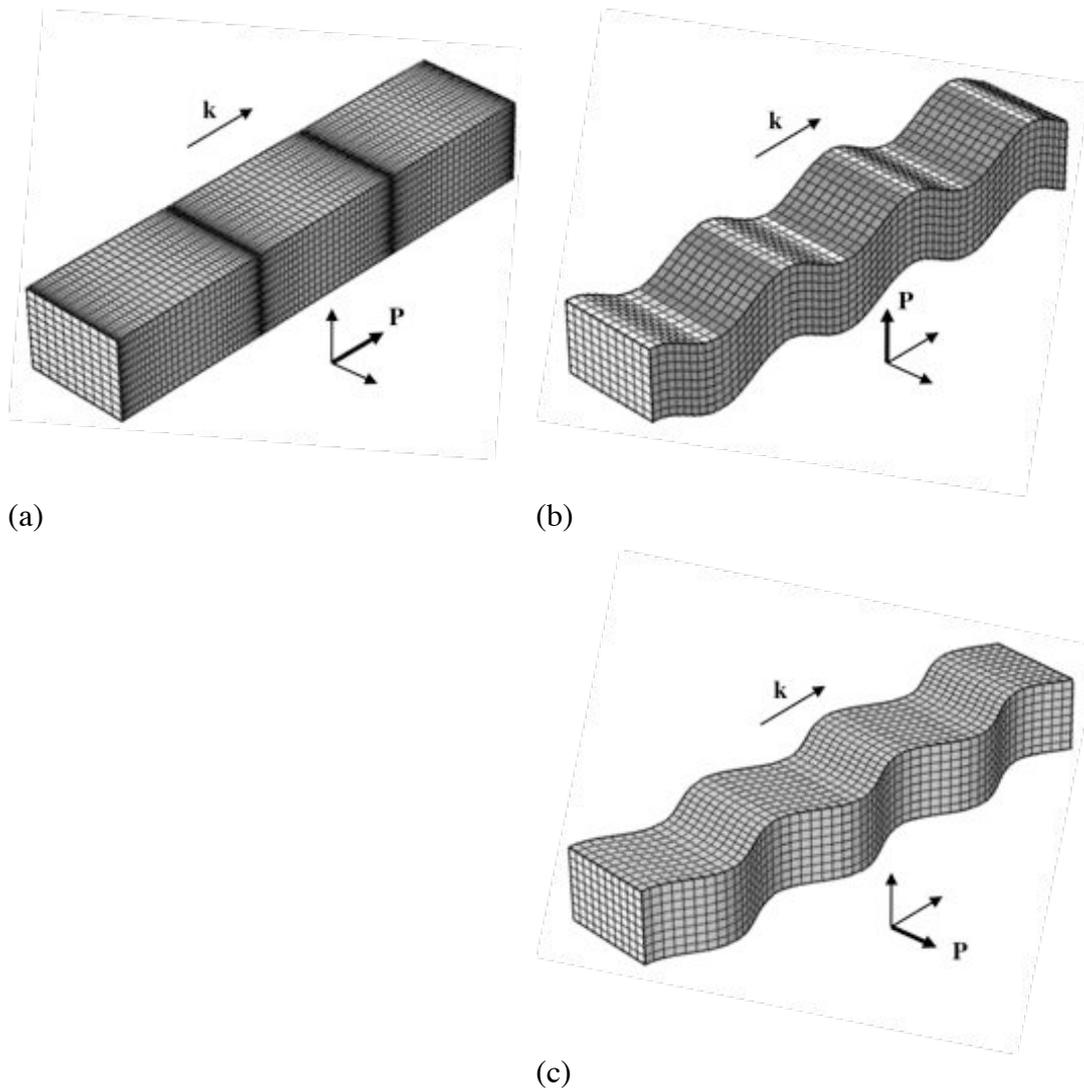


Figure 2.2 : Les trois types d'onde dans le cas d'un matériau homogène isotrope : (a) polarisation longitudinale, (b) polarisation transverse verticale, (c) polarisation transverse horizontale.

Le vecteur polarisation  $\mathbf{P}$  est donc vecteur propre du tenseur de Christoffel avec pour valeur propre  $\rho c^2$ . De part la symétrie de ce tenseur, on peut montrer [18] que les trois vecteurs propres sont orthogonaux et associés à des vitesses de phase généralement distinctes. Dans le cas d'un matériau homogène isotrope, et par rapport à un repère cartésien dans lequel est établie et résolue l'équation de propagation, 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 (figure 2.2.a). Elle produit des déformations de type compression-traction.

Deux ondes transversales, de vitesse  $c_T = \sqrt{C_{66}/\rho}$  et de polarisation perpendiculaire à la direction de propagation. La première est parfois appelée onde SV, « shear vertical » (figure 2.2.b), et la seconde est appelée onde SH, « shear horizontal » (figure 2.2.c). Elles produisent des déplacements de type cisaillement.

### 2.3.2 Modes de Lamb

Lorsque le milieu de propagation considéré est borné dans au moins une direction (c'est à dire que la largeur de cet espace ainsi délimité est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde de volume) et invariant dans une direction perpendiculaire à la première, ce dernier constitue un guide d'ondes. Les ondes vont subir des réflexions successives entre les frontières du guide et leurs interactions vont engendrer des ondes guidées. La direction de propagation de ces ondes s'appelle l'axe de propagation et correspond à une direction d'invariance du milieu.

Parler de direction d'invariance signifie que la géométrie et la composition du milieu doivent rester invariants pour garantir la propagation d'une onde guidée sans variation de ses caractéristiques. Ainsi, un guide peut être hétérogène si cette hétérogénéité est constante dans la direction de propagation. De même la condition sur le bord du guide doit demeurer la même tout le long du guide. En général, comme dans le cadre de ce travail, on considère que la paroi du guide est libre mais il pourrait y avoir d'autres types de conditions aux limites, comme le couplage avec un fluide par exemple.

En élastodynamique, il existe principalement deux types de géométries susceptibles de guider les ondes : les cylindres et les plaques. Le cylindre est obtenu par extrusion d'une surface fermée quelconque (non nécessairement circulaire), la résonance transverse s'effectuant dans la section et la propagation dans la direction d'extrusion. Dans le cas de la plaque, la résonance a lieu dans l'épaisseur et la propagation s'effectue dans n'importe quelle direction perpendiculaire à l'épaisseur.

Dans le cadre de ce travail nous étudierons les modes de Lamb produits dans les plaques, c'est à dire par des guides d'ondes délimités par deux surfaces parallèles de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde (figure 2.3.a). Ces modes de résonance sont, dans le cas d'un matériau isotrope ou d'un plan de symétrie, le résultat de la superposition des ondes de volume longitudinales et transversales SV dans l'épaisseur de la plaque, et leur polarisation est contenue dans le plan de propagation. Il faut savoir qu'il existe également un autre type de modes guidés dans les plaques, correspondant aux ondes transverses (superposition des ondes de volume SH) dont la polarisation, dans le cas isotrope, est perpendiculaire au plan de propagation, ce sont les modes SH (peu abordés dans ce travail). Les ondes de Lamb produisent des déplacements et des contraintes dans toute l'épaisseur et se propagent sur de très longues distances. Il existe une infinité de modes de Lamb classés en deux familles relatives aux symétries du champ de déplacement dans l'épaisseur de la plaque par rapport au plan médian. A noter, toutefois, que l'on a à faire à des modes de Lamb si la plaque est symétrique par rapport au plan médian, sinon on ne peut plus parler de modes symétriques ou antisymétriques. Les modes apparaissant alors s'apparentent plus ou moins aux modes de Lamb selon la dissymétrie de la structure, et sont qualifiés de « quasi » modes de Lamb. Dans la suite on ne considèrera que des cas où la structure est symétrique par rapport au plan médian. On distingue donc les modes symétriques dont les composantes longitudinales (parallèles au plan de la plaque), sur les deux surfaces opposées, sont égales et les composantes transversales (normales au plan de la plaque) sont opposées, et les modes antisymétriques ayant des composantes longitudinales opposées et des composantes transversales égales (figure 2.3.b).

Du point de vue théorique (cas isotrope ou plan de symétrie), on peut assimiler le champ de déplacement d'une onde de Lamb, dans l'épaisseur de la plaque, à la superposition, c'est à dire la somme, de quatre ondes planes de volume (deux longitudinales et deux transversales SV, avec pour chaque cas une descendante et une montante). Afin de caractériser les différents modes possibles, il faut que les solutions des équations de

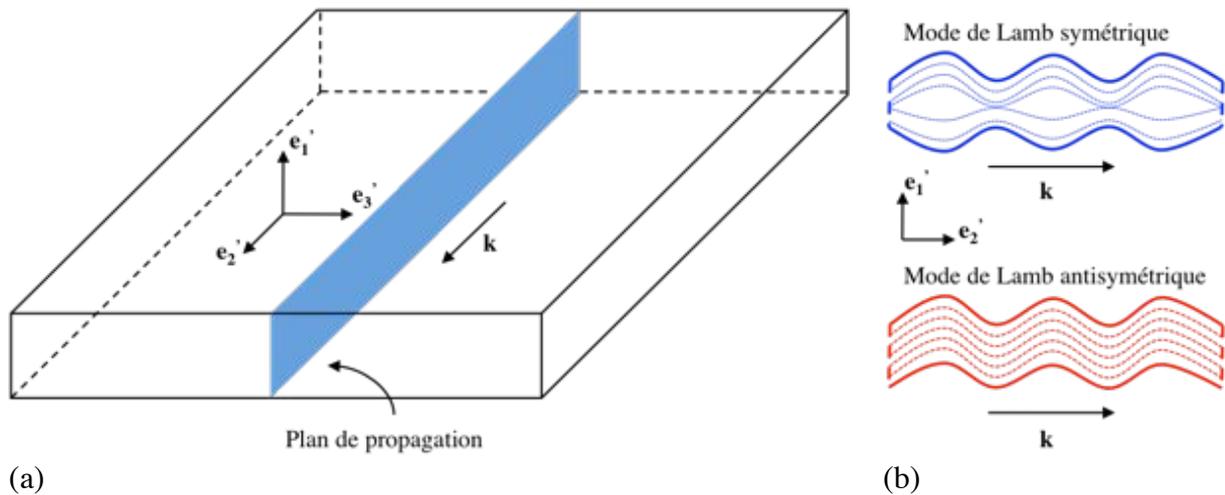


Figure 2.3 : Guide d'onde type plaque dans lequel se propagent des modes de Lamb : (a) plan de propagation dans l'épaisseur du guide, (b) exemples de profils de déformées produites par les ondes de Lamb.

propagation du champ de déplacement satisfassent les conditions aux limites, c'est à dire les conditions de contraintes imposées par le milieu extérieur sur la structure (dans notre cas, on suppose l'impédance acoustique de l'air négligeable par rapport à celle des matériaux, on utilise donc des conditions de surfaces libres). La prise en compte de ces conditions aux limites permet d'établir les équations de dispersion des ondes de Lamb symétriques et antisymétriques, qui relie les nombres d'onde  $k$  aux fréquences  $f$ .

Dans le cas, par exemple, d'un matériau homogène et isotrope d'épaisseur  $h$ , les équations de dispersion des modes symétriques et antisymétriques (les formulations pour le cas général orthotrope ne sont pas données car beaucoup plus complexes), dont l'orientation du plan de propagation est similaire à celui de la figure 2.3.a, sont respectivement [94] :

$$\frac{\tan(k_{1T}h/2)}{\tan(k_{1L}h/2)} = -\frac{4k_2^2 k_{1L} k_{1T}}{(k_{1T}^2 - k_2^2)^2} \quad (2.15)$$

$$\frac{\tan(k_{1T}h/2)}{\tan(k_{1L}h/2)} = -\frac{(k_{1T}^2 - k_2^2)^2}{4k_2^2 k_{1L} k_{1T}} \quad (2.16)$$

avec  $k_2$  la composante du nombre d'onde dans la direction de propagation,  $k_{1L}$  et  $k_{1T}$  les composantes transverses des nombres d'onde de l'onde longitudinale et transversale SV définies par :

$$k_{1L}^2 = \left(\frac{2\pi f}{c_L}\right)^2 - k_2^2 \quad \text{et} \quad k_{1T}^2 = \left(\frac{2\pi f}{c_T}\right)^2 - k_2^2 \quad (2.17)$$

La résolution des équations de dispersion est souvent complexe, et plus particulièrement pour les matériaux anisotropes, et nécessite d'utiliser des méthodes numériques de type Newton-Raphson. Elle conduit à des couples de solutions  $(f, k)$  qui permettent de tracer les courbes de dispersion des ondes de Lamb, c'est à dire l'évolution en fonction de la fréquence du nombre d'onde, mais aussi de l'atténuation des modes, de leur vitesse de phase, de leur vitesse d'énergie ou encore de leur vitesse de groupe.

Pour une fréquence et une épaisseur données, il existe un nombre fini de modes guidés propagatifs et un nombre infini de modes évanescents et hétérogènes, qui ont, dans le cas d'un matériau élastique non dissipatif et considéré non couplé avec le milieu extérieur, leurs nombres d'onde respectivement réels, imaginaires purs et complexes. Sinon dans le cas d'un matériau viscoélastique, ou en présence d'un couplage avec un fluide extérieur, ces nombres d'onde sont tous complexes. Cependant lorsque la partie imaginaire du nombre d'onde est jugée suffisamment négligeable par rapport à la partie réelle, l'onde est considérée comme propagative, et inversement pour les ondes évanescents. Dans la suite, seuls les modes propagatifs seront pris en compte.

### 2.3.3 Les courbes de dispersion

Les courbes de dispersion correspondent à l'évolution des différentes caractéristiques d'un mode en fonction de la fréquence et de l'épaisseur de la plaque considérée. Elles sont constituées par l'ensemble des solutions  $(f, k)$  de l'équation de dispersion. Ces courbes sont particulièrement utiles pour comprendre le comportement des ondes guidées (dans notre cas les modes de Lamb) lors de leur propagation et mettent en lumière un aspect particulier de ces modes, qui rend leur utilisation parfois délicate, leur dispersion. En effet lorsqu'une source émet un signal (train d'onde composé de plusieurs fréquences), celui-ci va engendrer une superposition de modes (plusieurs modes existent aux mêmes fréquences) dont les paquets d'ondes vont se déformer au cours de la propagation, car les composantes fréquentielles peuvent avoir des variations d'amplitude et des vitesses de propagation différentes les unes des autres. C'est ce qu'on appelle la dispersion modale et fréquentielle.

D'une manière générale, il est possible de représenter les courbes de dispersion d'un matériau en fonction du produit fréquence-épaisseur, et pour chaque valeur de ce produit, comme il a été précédemment évoqué, il y a un nombre fini de solutions correspondant aux modes propagatifs. Ces résultats peuvent être obtenus via la méthode SAFE (paragraphe 2.5). Plusieurs grandeurs sont utiles pour décrire le comportement d'un mode (figure 2.4) :

Le nombre d'onde  $k$ , exprimé en  $rad/mm$ , qui est relié à la longueur d'onde des modes ( $k = 2\pi/\lambda$ ), est obtenu directement des solutions de l'équation de dispersion. Lorsque ce nombre est complexe (mais toujours dans le cas des ondes propagatives), on prendra sa partie réelle pour tracer les courbes de dispersion.

La valeur absolue de la partie imaginaire du nombre d'onde permet quant à elle de décrire l'atténuation des modes. Néanmoins pour des raisons de commodité et d'ordre de grandeur, ce terme calculé en  $rad/mm$  est souvent exprimé en  $dB/mm$  par la relation :

$$k''_{dB/mm} = 20 \log(e^{|k''|}) \quad (2.18)$$

Du nombre d'onde (ou de sa partie réelle), on peut calculer la vitesse de phase  $V_\phi$  des modes. Il s'agit de la vitesse de propagation de la phase d'une onde monochromatique. C'est une grandeur vectorielle qui par définition est toujours orientée dans la direction de propagation du front d'onde. Sa norme s'exprime en fonction du rapport de la fréquence de l'onde et de son nombre d'onde :

$$V_\phi = \frac{2\pi f}{k} \quad (2.19)$$

En observant les courbes des vitesses de phase des modes de Lamb, certains points sont à souligner. Le premier mode antisymétrique  $A_0$  présente une vitesse de phase qui tend vers 0

lorsque la fréquence tend vers 0, alors que la vitesse de phase du premier mode symétrique  $S_0$  tend vers une vitesse non nulle appelée vitesse de plaque. A haute fréquence la vitesse de ces deux modes tend vers une limite correspondant à la célérité des ondes de Rayleigh. Enfin tous les autres modes (symétriques et antisymétriques) présentent une fréquence de coupure et tendent, à haute fréquence, vers la célérité des ondes transverses en milieu infini.

Etant donné que l'on génère et reçoit des ondes composées de plusieurs fréquences voisines centrées sur une fréquence  $f_0$ , c'est à dire des paquets d'ondes, il est nécessaire de connaître la vitesse de propagation de ces paquets, que l'on définit par la vitesse de groupe  $V_g$ . Cette vitesse est le rapport des variations de la fréquence et du nombre d'onde autour de la valeur centrale  $k_0 = k(f_0)$  :

$$V_g = 2\pi \left( \frac{\partial f}{\partial k} \right)_{k_0} \quad (2.20)$$

Cette vitesse peut être facilement déterminée à partir des nombres d'ondes et des fréquences. Dans un milieu non dispersif et isotrope, cette vitesse est égale à la vitesse de phase, mais dans le cas des guides d'onde (milieux dispersifs), cette vitesse n'a généralement pas la même

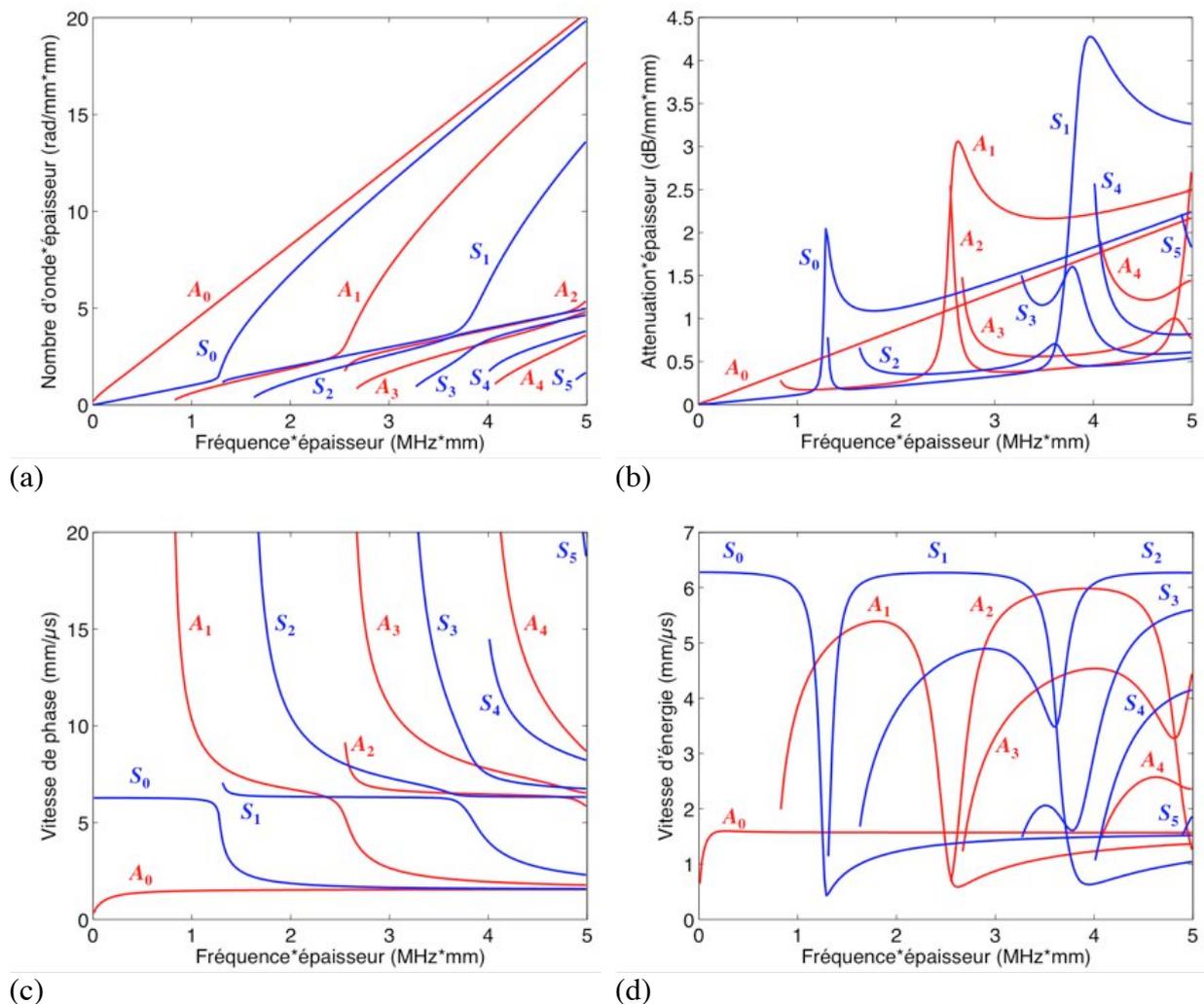


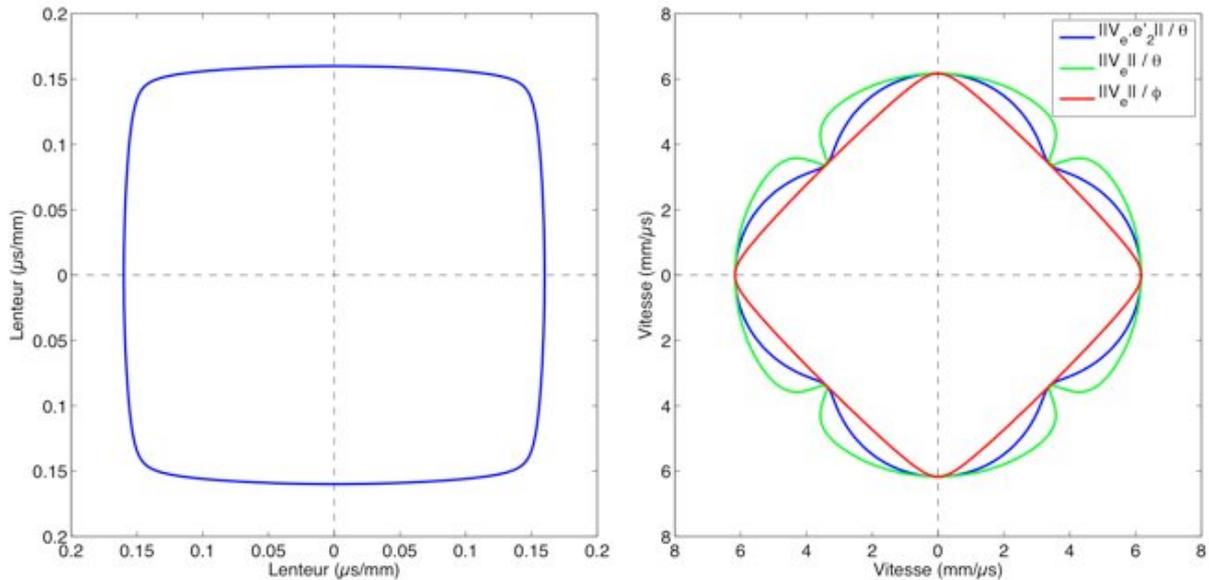
Figure 2.4 : Courbes de dispersion des modes de Lamb d'une plaque carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_s$  dans la direction  $\theta = 0^\circ$  : (a) le nombre d'onde  $k$ , (b) l'atténuation  $k$  (dB/mm), (c) la vitesse de phase  $V_\phi$ , (d) la vitesse d'énergie  $V_e$  (égale à la vitesse de groupe  $V_g$ ). Courbes obtenues via la méthode SAFE.

norme et la même direction (suivant l'anisotropie du matériau) que la vitesse de phase. De plus elle n'a plus de sens physique lorsque le matériau devient dissipatif, c'est à dire lorsque la partie imaginaire du nombre d'onde ne peut plus être considérée comme négligeable devant la partie réelle. A strictement parler elle n'est pas définissable si le nombre d'onde est complexe, mais tant que la partie imaginaire est jugée suffisamment négligeable, on peut la calculer à partir de la partie réelle de ce dernier et avoir une bonne approximation.

Tant que la vitesse de groupe est définie, celle-ci est toujours égale (en terme de norme et de direction) à une autre grandeur vectorielle [95], qui est la vitesse d'énergie. Il s'agit de la vitesse de propagation de l'énergie acoustique qui, contrairement à la vitesse de groupe, est toujours définie quel que soit le matériau. Le vecteur vitesse d'énergie, à un instant donné, est le rapport du vecteur de Poynting  $\mathbf{P}$  (flux d'énergie en un point du guide) sur la densité d'énergie totale  $E$  (énergie totale instantanée par unité de volume). Généralement, on travaille avec des grandeurs complexes, donc pour simplifier on calcule le vecteur de Poynting moyenné sur une période temporelle  $T$ . On ne considèrera donc que la moyenne temporelle des deux grandeurs précédentes. De plus, dans le cas des guides d'ondes, comme les ondes sont confinées, par exemple dans l'épaisseur  $h$  d'une plaque, on s'intéresse aux flux total d'énergie et on intégrera également au préalable, sur l'épaisseur, ces deux quantités. L'expression de la vitesse d'énergie devient alors :

$$\mathbf{V}_e = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \int_0^T \mathbf{P} dt dx}{\int_{-h/2}^{h/2} \int_0^T E dt dx} \quad (2.21)$$

Comme il a été indiqué, dans le cas des guides d'onde (milieux dispersifs), la vitesse de groupe et, par conséquent, la vitesse d'énergie n'ont pas la même norme et la même direction (suivant l'anisotropie du matériau) que la vitesse de phase, qui est toujours orientée dans le



(a)

(b)

Figure 2.5 : Mode  $S_0$  à 0.5 MHz dans une plaque carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de 1.6 mm d'épaisseur : (a) courbe de lenteur, (b) Superposition de la norme de la composante de  $\mathbf{V}_e$ , dans le plan de propagation, en fonction de l'angle  $\theta$ , de la norme de  $\mathbf{V}_e$  en fonction de l'angle  $\theta$ , et de la norme de  $\mathbf{V}_e$  en fonction de l'angle  $\phi$  (surface d'onde). Courbes obtenues via la méthode SAFE.

plan de propagation (figure 2.3.a). La valeur de la vitesse d'énergie  $V_e$  (ou de la vitesse de groupe  $V_g$ ), considérée dans l'ensemble de ce travail (comme dans le graphique des courbes de dispersion de la figure 2.4.d) correspond en réalité à la norme de la composante du vecteur  $\mathbf{V}_e$  (ou du vecteur  $\mathbf{V}_g$ ) dans le plan de propagation ( $\|\mathbf{V}_e \cdot \mathbf{e}'_2\|$ ). Cette composante est égale à la norme du vecteur, dans le cas des matériaux isotropes et pour certaines directions des matériaux anisotropes, mais est différente, comme il vient d'être dit, dans d'autres directions de ces derniers. On étudiera, dans le cadre de ce travail, uniquement les directions de propagation orientées d'un angle  $\theta$  (figure 2.1), dans lesquelles les ondes ont des vecteurs vitesses de phase et d'énergie colinéaires (paragraphe 3.4.2).

Pour déterminer ces directions où les vitesses sont colinéaires, il suffit de tracer les courbes de lenteur en fonction de  $\theta$ , marquant la direction de propagation (figure 2.5.a), dont les tangentes en chaque point sont perpendiculaires aux vecteurs  $\mathbf{V}_e$ . Les directions recherchées correspondent alors à celles où la tangente de la courbe est perpendiculaire à la direction de propagation. Ces directions peuvent être également déduites par la superposition des différentes courbes indiquant : les variations de la norme de la composante de la vitesse d'énergie, dans le plan de propagation, en fonction de l'angle  $\theta$ , la norme du vecteur vitesse d'énergie en fonction de l'angle  $\theta$ , et la norme du vecteur vitesse d'énergie en fonction de l'angle  $\phi$  qui correspond à la direction de ce vecteur. La dernière courbe correspond à la surface d'onde. Ainsi les directions considérées sont celles pour lesquelles les normes sont égales. Un exemple est donné sur la figure 2.5.b, montrant les courbes de vitesses d'énergie du mode  $S_0$  à 0.5 MHz, dans une plaque carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de 1.6 mm d'épaisseur.

### 2.3.4 Les champs de déplacement

Pour n'importe quelle solution modale ( $f, k$ ) il est possible de tracer la distribution des champs de déplacement, de contraintes et de flux de puissance dans l'épaisseur de la plaque. Nous nous intéressons en particulier aux champs de déplacement, dont les profils, qui dépendent de la fréquence, permettent de caractériser les modes, savoir s'ils sont symétriques ou antisymétriques par rapport au plan médian, et apportent des informations sur la sensibilité des modes aux caractéristiques du milieu étudié (figure 2.6). Ainsi il est possible de savoir si un mode a tendance à se propager en surface de la plaque ou plutôt au niveau du plan médian, et pour quelle fréquence, ce qui est utile pour déterminer les modes les mieux adaptés à la détection de défauts, suivant leur position dans la structure.

Pour pouvoir comparer entre elles les distributions de déplacement, tracées pour deux modes à une même fréquence ou pour un seul mode à deux fréquences différentes, ces champs doivent être normalisés en puissance (comme dans le cas de la figure 2.6). Le facteur de normalisation, propre à un mode et à une fréquence, est défini par la racine au carré de la puissance totale, sur toute l'épaisseur de la plaque, et moyennée sur une période temporelle  $T$ , qui est transportée dans la direction de propagation. On intègre donc la composante, suivant la direction de propagation, du vecteur de Poynting  $\mathbf{P}$  moyenné sur une période temporelle  $T$ , sur une section  $S$  du guide (de normale  $\mathbf{n}$ ) perpendiculaire à la direction de propagation. Le facteur de normalisation  $\xi$  s'exprime de la façon suivante :

$$\xi = \sqrt{\left| \int_S \int_0^T \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} dt ds \right|} \quad (2.22)$$

En 2D, avec les conditions de déformations planes (dans le plan de propagation), l'intégrale sur la section  $S$  peut se simplifier en une intégration sur l'épaisseur  $h$  de la plaque. Toutes les composantes de déplacement sont ainsi divisées par ce facteur, et représentent alors les

champs de déplacement obtenus lorsque chacun des modes transporte une puissance de  $1\text{ W}$  dans toute l'épaisseur de la plaque, durant une période et pour un guide supposé de dimension  $1\text{ m}$  dans la direction perpendiculaire au plan de propagation.

En général, lorsque la fréquence tend vers 0, pour les modes  $A_0$  et  $S_0$ , ou tend vers les fréquences de coupure des autres modes de Lamb, ceux-ci deviennent soit purement axiaux (dans la direction de propagation), soit purement transverses (dans la direction normale à la plaque), l'autre composante étant complètement nulle dans l'épaisseur de la plaque. On peut voir ce phénomène en observant les cas des deux modes  $A_0$  et  $S_0$  (figure 2.7) aux fréquences basses (exemple à  $0.51\text{ MHz}$ , courbe bleu). La composante normale du mode  $A_0$  et la composante tangentielle du mode  $S_0$  augmentent fortement, alors que les autres, respectivement, tangentielle et normale sont proches de zéro. La tendance des courbes montre

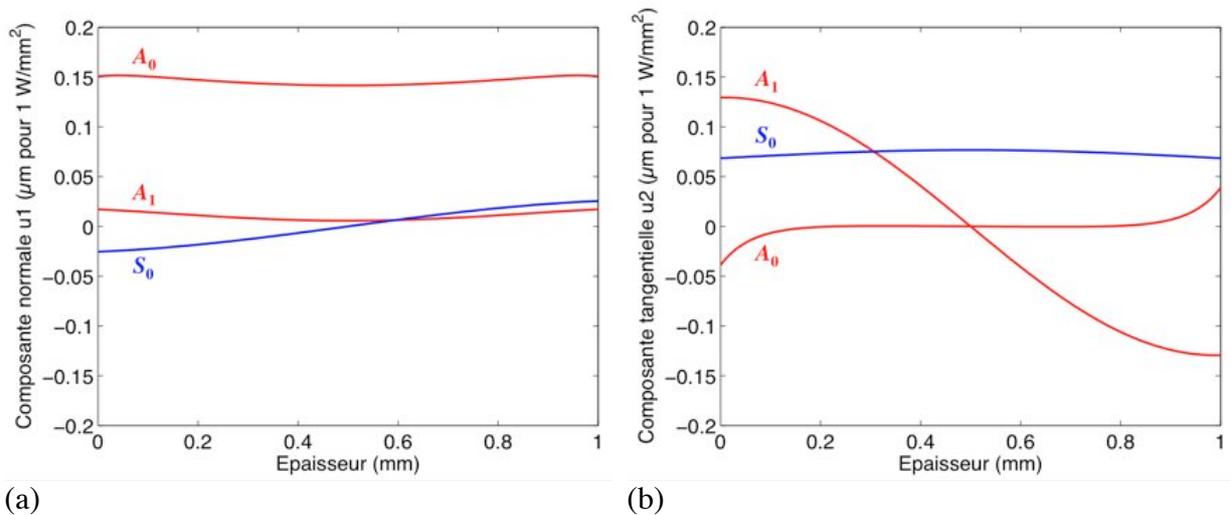


Figure 2.6 : Champ de déplacement des modes de Lamb pour une plaque carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_s$  dans la direction  $\theta = 0^\circ$ , à  $1\text{ MHz}$  et  $1\text{ mm}$  d'épaisseur : (a) composantes normales à la plaque, (b) composantes tangentielles à la plaque, dans le plan de propagation. Courbes obtenues via la méthode SAFE.

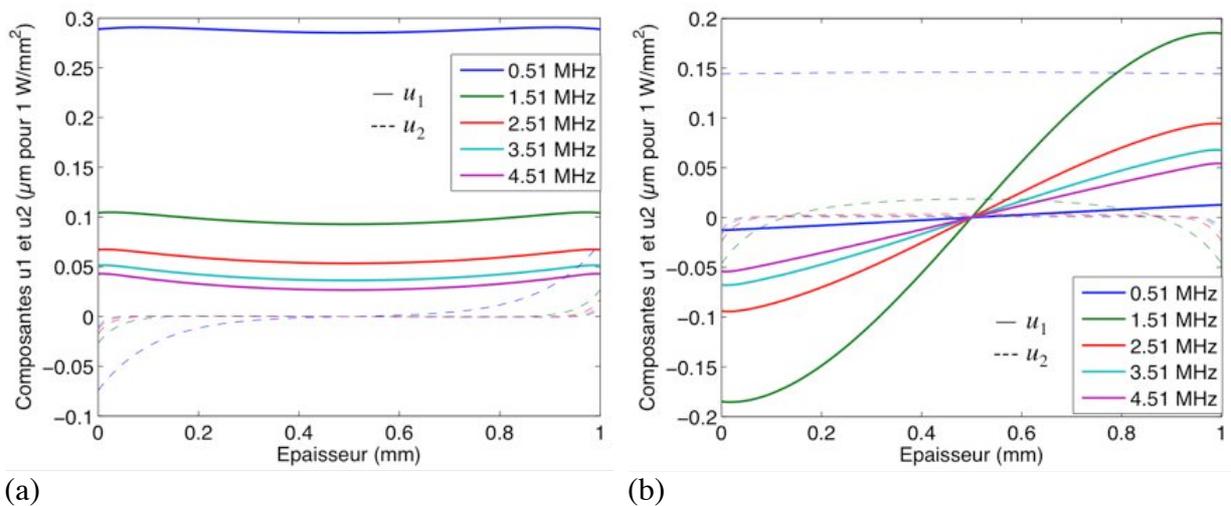


Figure 2.7 : Evolution du champ de déplacement, en fonction de la fréquence, des modes de Lamb pour une plaque carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_s$  dans la direction  $\theta = 0^\circ$ , d'épaisseur  $1\text{ mm}$  : (a) mode  $A_0$ , (b) mode  $S_0$ . Courbes obtenues via la méthode SAFE.

également que lorsque la fréquence augmente les déplacements sont de plus en plus localisés sur les bords de la plaque. Il faut rappeler qu'à haute fréquence les ondes  $A_0$  et  $S_0$  se propagent à la vitesse des ondes de Rayleigh et que la somme ou la différence de ces deux modes forment une onde de Rayleigh sur le bord supérieur ou inférieur de la plaque.

## 2.4 Caractérisation des matériaux

### 2.4.1 Les méthodes de caractérisation

Au paragraphe précédent, nous avons vu l'intérêt, dans le cadre d'une étude sur les ondes guidées, de déterminer les courbes de dispersion et les champs de déplacement des modes de Lamb dans les plaques. Afin d'obtenir ces courbes, une étape préalable est nécessaire, qui consiste à caractériser les propriétés mécaniques des matériaux. Pour cela, on utilise des techniques d'évaluation non destructive (END), utilisant les ondes ultrasonores, volumiques ou guidées, comme vecteurs d'information. Le but de cette caractérisation est de connaître avec suffisamment de précision les différentes caractéristiques d'une plaque, à savoir son épaisseur  $h$ , sa masse volumique  $\rho$  et les différents modules de viscoélasticité  $C_{ij}$  qui composent son tenseur de rigidité. Les deux premiers paramètres sont aisément accessibles par une mesure au comparateur et une pesée de l'échantillon. On utilise les techniques END ultrasonores pour déterminer les modules de viscoélasticité. Les techniques utilisées dans le cadre de ce travail permettent, au plus, de caractériser des matériaux à symétrie orthotrope (table 2.1). Il est donc possible de déterminer les 9 composantes du tenseur de rigidité de ce type de matériau. Ceci est largement suffisant, sachant que nous travaillons essentiellement avec des matériaux isotropes (aluminium, plexiglas) et des matériaux composites (carbone-époxy) quadratiques ou hexagonaux. L'ensemble des résultats de caractérisation des plaques, fabriquées à l'institut I2M ou au CETIM, utilisées lors de ce travail, sont regroupés dans l'annexe A. Les  $C_{ij}$  obtenus représentent les propriétés mécaniques du milieu ou du milieu homogène équivalent dans le cas de composites avec empilement de plis. Les structures apparaissent homogènes vis à vis des longueurs d'onde utilisées car celles-ci sont choisies (via la fréquence) toujours grandes devant l'épaisseur des plis.

La mesure des épaisseurs a été réalisée au comparateur mécanique (précision de 0.01 mm), et l'ensemble des valeurs obtenues a une dispersion de  $\pm 5\%$ . Pour déterminer la masse volumique, il faut peser les échantillons dans l'air puis dans l'eau et calculer la valeur de  $\rho$  grâce au principe d'Archimède. Celui-ci stipule que tout corps plongé dans un fluide est soumis à une poussée, s'exerçant 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 :

$$\rho = \rho_{eau} \frac{M_{air}}{M_{air} - M_{eau}} \quad (2.23)$$

Les résultats obtenus ont une précision minimale de  $\pm 2\%$  (annexe A).

Pour la mesure des modules de viscoélasticité, plusieurs méthodes complémentaires sont utilisées et rappelées brièvement dans la suite. Elles sont complémentaires car permettent d'avoir des informations plus ou moins précises sur les différents  $C_{ij}$ , dans les plans principaux ou hors plan principaux. Ainsi plusieurs jeux de valeurs des composantes du tenseur de rigidité ont été mesurés et comparés afin d'établir des valeurs moyennes les plus

fiables possible. A noter que ces modules de viscoélasticité sont complexes ( $C_{ij} = C_{ij}' + iC_{ij}''$ ) avec la partie réelle correspondant à la raideur du milieu et la partie imaginaire à sa viscoélasticité. Ces deux grandeurs sont exprimées généralement en *GPa*, mais la partie imaginaire peut être notée en pourcentage de la partie réelle (comme pour les résultats de l'annexe A).

### 2.4.1.1 Caractérisation par temps de vol

Cette technique classique de caractérisation [96], consiste à mesurer des temps de propagation et des atténuations des ondes volumiques longitudinales et transversales propagées à travers l'épaisseur du matériau à tester, qui doit être sous forme de plaque. Pour obtenir des mesures exploitables il faut que le matériau soit homogène à l'échelle des longueurs d'onde et que les échos des modes générés soient parfaitement séparés pour permettre la mesure du temps de vol. Les résultats, de l'exemple montré sur la figure 2.8.b, pour un échantillon d'aluminium de 3 mm d'épaisseur, ont été obtenus par des mesures effectuées dans l'eau à la fréquence centrale de 5 MHz. Dans le cas d'une mesure en transmission, on dispose deux transducteurs face à face (un émetteur et un récepteur), et on place un échantillon du matériau (par exemple une plaque de dimension plus petite que celle dont on souhaite obtenir les caractéristiques, mais qui est de composition identique) entre les deux capteurs sur un système rotatif, qui permet de faire varier l'angle d'incidence du faisceau ultrasonore (figure 2.8.a). L'ensemble du dispositif est soit laissé à l'air libre, dans ce cas on utilise de préférence des capteurs à couplage air de forte puissance, soit plongé dans un milieu liquide couplant comme l'eau, dans lequel on utilisera des transducteurs piézoélectriques.

Une onde incidente est donc générée (grâce à un signal d'excitation de type impulsion) sous une incidence  $\alpha$  généralement comprise entre  $0^\circ$  et  $70^\circ$ . A chaque angle, une mesure du temps de vol et de l'amplitude est effectuée. Les modes générés à l'interface fluide / solide sont au nombre de deux ou trois selon que le plan de mesure soit principal (par exemple  $P_{12}$  et  $P_{13}$ ) ou non (par exemple  $P_{45^\circ}$ ). L'orientation des structures, dans la base ( $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ ), est similaire à celle de la figure 2.1. Il existe ainsi, dans le cas général des matériaux anisotropes, au plus un mode quasi longitudinal et deux modes quasi transversaux. En mesurant le décalage en temps, du fait de la traversée du matériau, de chacun de ces modes par rapport à une onde de référence mesurée sans la présence de l'échantillon, pour différents angles d'incidence, il est possible de construire les courbes de vitesse de propagation des modes générés dans la structure. Pour finir, on superpose ces résultats expérimentaux à des courbes calculées à partir de l'équation de Christoffel (2.13) et de la loi de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin \alpha}{C_{eau}} = \frac{\sin \alpha_m}{C_m} \quad (2.24)$$

avec  $\alpha$  l'angle du faisceau incident,  $\alpha_m$  l'angle selon lequel se propage le mode dans l'échantillon,  $C_{eau}$  la vitesse de propagation dans le milieu incident (dans ce cas de l'eau) et  $C_m$  la vitesse du mode dans le matériau. Pour calculer ces valeurs théoriques des vitesses, on part d'un premier jeu de valeurs des  $C_{ij}$  donné arbitrairement. Puis on exécute un algorithme d'optimisation (celui du simplex [97] ou de Newton-Raphson [98] ou encore une combinaison des deux) qui permet de déterminer les modules de viscoélasticité donnant la meilleure corrélation entre les mesures expérimentales de vitesse et les courbes théoriques (figure 2.8.b). Les parties imaginaires des modules de viscoélasticité sont déterminées à partir des atténuations d'amplitude mesurées, auxquelles on essaie également de faire coïncider des valeurs théoriques calculées par une méthode d'optimisation qui minimise l'écart quadratique moyen entre calculs et mesures.

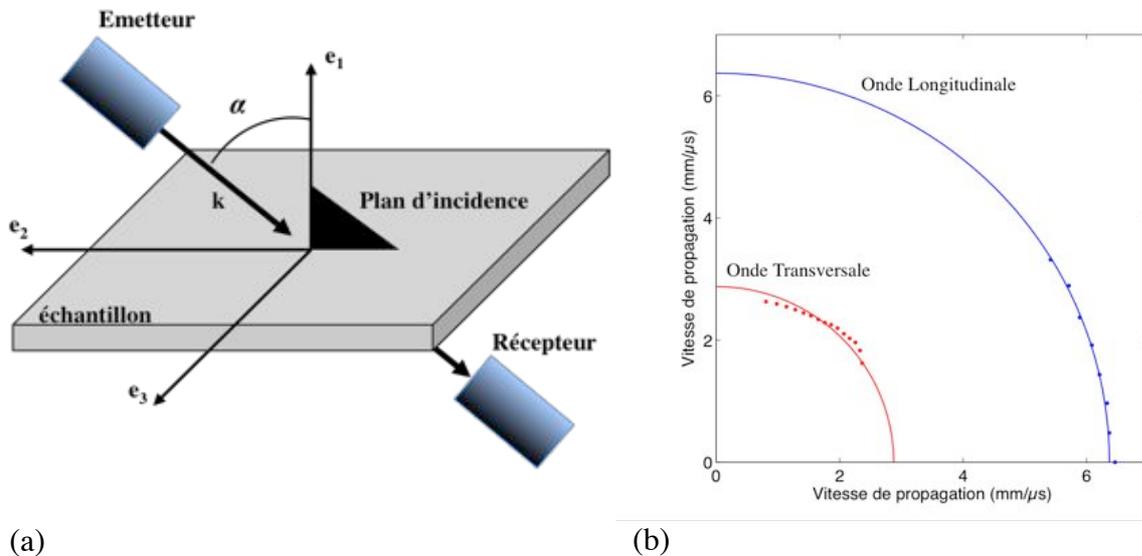


Figure 2.8 : Caractérisation par temps de vol : (a) schéma du dispositif expérimental, (b) exemple de courbes des vitesses de propagation des ondes dans un échantillon d'aluminium de 3 mm d'épaisseur, • mesures expérimentales, — courbes théoriques obtenues après optimisation des  $C_{ij}$ .

Lors de la réalisation de ces mesures, plusieurs zones des échantillons ont été auscultées, afin de vérifier toute inhomogénéité. Une valeur moyenne, pour chaque module de viscoélasticité, a été déterminée à partir de l'ensemble de ces mesures.

#### 2.4.1.2 Caractérisation par fonction de transfert

L'objectif de cette technique [99, 27] est d'identifier les modules de viscoélasticité du matériau considéré, en comparant les champs acoustiques transmis, obtenus expérimentalement, à ceux calculés par le modèle théorique. Le dispositif et la procédure expérimentale sont similaires à ceux de la méthode précédente excepté qu'on ne cherche plus à discerner les ondes longitudinales et transversales car le but est de récupérer l'ensemble du champ acoustique transmis. Toutefois il est nécessaire d'employer de grands capteurs ( $\geq 20 \lambda$ ) pour être en condition d'ondes planes. Après l'arrivée du faisceau incident sur l'échantillon, différents échos, se propageant dans le matériau, sont transmis vers le récepteur, qui grâce à sa taille peut couvrir l'étendue du champ acoustique (figure 2.9.a). Puisque les signaux n'ont pas besoin d'être séparés dans le temps, la zone de fréquence est choisie assez basse pour que le milieu soit homogène vis à vis des longueurs d'onde. Cette technique est en cela mieux adaptée que la précédente pour la caractérisation de matériaux multicouches, comme des composites formés d'un empilement de plis. Il faut tout de même faire attention que le domaine de fréquence utilisé permette de récupérer suffisamment d'informations concernant la viscoélasticité du matériau (les fréquences élevées y étant plus sensibles). Le respect de la condition d'onde localement plane permet de simplifier les calculs, car sinon 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. Les résultats, montrés en exemple sur la figure 2.9.b, sont ceux d'un échantillon composite  $[0^\circ/90^\circ]_8$ s de 4.3 mm d'épaisseur dont les plis font 0.13 mm d'épaisseur. Ils ont été obtenus par des mesures effectuées, dans le plan  $P_{13}$  du matériau, dans l'eau à la fréquence centrale de 0.5 MHz.

De la même manière que précédemment, un processus d'optimisation est appliqué, mais cette fois pour corrélérer les valeurs des champs acoustiques transmis, qui dépendent de l'angle d'incidence  $\alpha$ , de la fréquence  $f$  et des caractéristiques mécanique ( $C_{ij}$ ) du matériau. Pour cela on calcule le module du champ  $|A_T^{Th}|$ , qui est le produit du coefficient de transmission

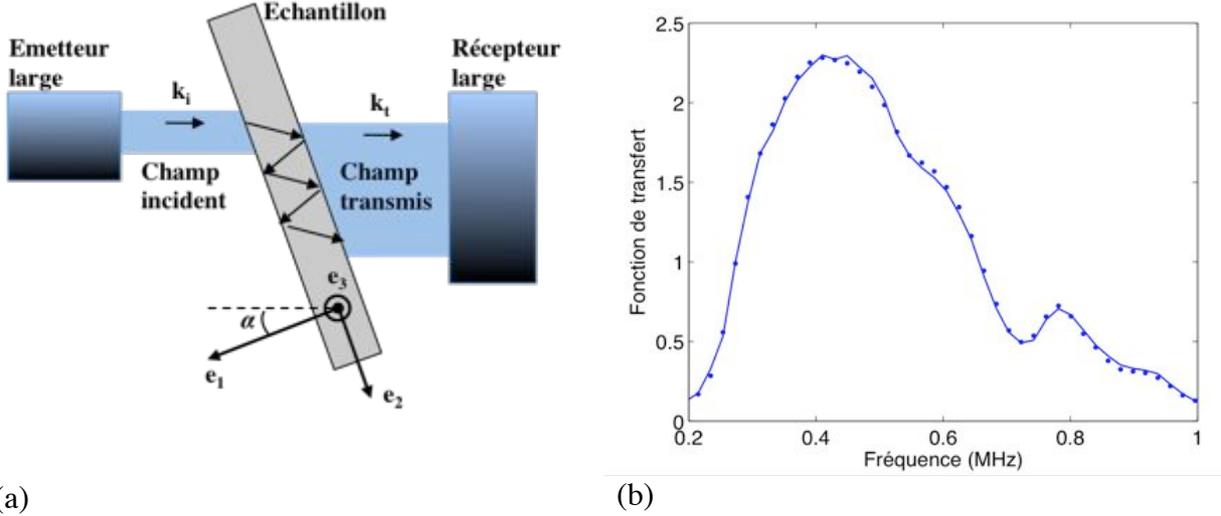


Figure 2.9 : Caractérisation par fonctions de transfert : (a) schéma du dispositif expérimental, (b) exemple de courbe de fonction de transfert du champ ultrasonore transmis par un échantillon composite  $[0^\circ/90^\circ]_8s$  de  $4.3 \text{ mm}$  d'épaisseur, dans le plan  $P_{13}$ , avec un angle d'incidence de  $45^\circ$ , • mesures expérimentales, — courbes théoriques obtenues après optimisation des  $C_{ij}$ .

théorique  $T$  et du spectre de l'onde incidente  $A_i$ , qui lui est déterminé expérimentalement. L'expression de ce module est la suivante :

$$\left| A_T^{Th}(f, \alpha, C_{ij}) \right| = \left| T(f, \alpha, C_{ij}) \times A_i(f) \right| \quad (2.25)$$

Le coefficient de transmission est déterminé par la méthode des impédances de surface [27, 100], qui peut être utilisée pour considérer des propagations tenant compte de la stratification des matériaux ou plus simplement, comme dans notre cas, des propagations au travers d'un milieu homogène. L'anisotropie et la viscoélasticité sont prises en compte par l'utilisation du concept d'ondes planes hétérogènes et de modules de viscoélasticité complexes [101]. L'optimisation des valeurs des  $C_{ij}$  vise à minimiser la fonctionnelle suivante :

$$F(C_{ij}) = \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \left( \left| A_T^{Th}(f_p, \alpha_q, C_{ij}) \right| - \left| A_T^{Exp}(f_p, \alpha_q) \right| \right)^2 \quad (2.26)$$

où  $m = P \times Q$  est le nombre total de points de comparaison,  $P$  est le nombre de points fréquentiels et  $Q$  le nombre de points angulaires.  $|A_T^{Th}|$  est le module du champ transmis théorique et  $|A_T^{Exp}|$  le module du spectre du champ transmis mesuré. Là encore, un algorithme d'optimisation (celui du simplexe ou de Newton-Raphson ou encore une combinaison des deux) permet de déterminer les modules de viscoélasticité donnant la meilleure corrélation entre les mesures expérimentales et théoriques.

De la même manière que pour la méthode précédente, plusieurs zones des matériaux considérés ont été auscultées et une moyenne sur l'ensemble des valeurs déterminées a été effectuée pour chaque module de viscoélasticité.

### 2.4.1.3 Caractérisation par ondes guidées et transformée de Fourier 2D

Cette technique, utilisant la propagation des modes guidés (en particulier les modes de Lamb), consiste à identifier les modules de viscoélasticité du matériau considéré, en comparant les courbes de dispersion des différents modes, obtenues expérimentalement, à

celles calculées par un modèle théorique de propagation des modes guidés, pour des plaques homogènes (notre cas) ou multicouches [27]. Une source d'excitation permet de générer un ou plusieurs modes de Lamb, qui se propagent alors dans la plaque étudiée, et un récepteur, pouvant se translater le long de la direction de propagation, effectue une mesure à chaque position spatiale définie par un déplacement du récepteur d'un pas  $\Delta x$  le long de cette direction. Ainsi une série de signaux temporels, enregistrés pour chaque position spatiale, est constituée et forme une fonction  $s(t, x)$  dépendant du temps et de l'espace. En appliquant une transformée de Fourier 2D, on passe d'une représentation temps/espace  $s(t, x)$  à une représentation fréquence/nombre d'onde  $S(f, k)$ , qui permet de séparer les modes contenus dans les signaux temporels. L'expression de la transformée de Fourier 2D est la suivante :

$$S(f, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} s(t, x) e^{-2i\pi ft} dt \right) e^{-ikx} dx \quad (2.27)$$

Il faut être attentif à l'échantillonnage spatial et temporel, c'est à dire aux périodicités spatiale et temporelle des mesures, afin de respecter le critère d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, qui exige au moins trois mesures par période spatiale et temporelle des ondes présentes. Il faut donc des relevés dans l'espace et le temps qui permettent de valider ce critère pour les fréquences et nombres d'onde les plus élevés présents, afin d'éviter tout phénomène de recouvrement lors de la transformée de Fourier. Pour chaque fréquence  $f$ , les maxima de la fonction  $S(f, k)$  correspondent aux nombres d'ondes  $k$  des modes générés dans la plaque. On peut ensuite en déduire d'autres grandeurs comme la vitesse de phase des modes ou leur vitesse de groupe (si elle est définie, cf. paragraphe 2.3.3). L'algorithme d'optimisation, utilisé précédemment, permet là encore de déterminer les modules de viscoélasticité donnant la meilleure corrélation entre les mesures expérimentales et les solutions théoriques. Les parties imaginaires des modules de viscoélasticité sont déterminées à partir des atténuations d'amplitude mesurées le long de l'axe de propagation.

Pour réaliser ce type de mesure, plusieurs modes opératoires sont possibles, combinant différents types de transducteurs à l'émission et à la réception, voir même l'utilisation de lasers (principalement à la réception). Dans le cadre de ce travail, deux procédés ont été utilisés, le premier (figure 2.10.a) combinant deux transducteurs à couplage air d'inclinaisons variables par rapport au plan de la plaque [32], le deuxième (figure 2.10.b) utilisant un transducteur piézoélectrique en contact à l'émission et un transducteur parabolique à couplage air à la réception [102]. Dans tous les cas il est préférable d'avoir des transducteurs à large bande fréquentielle, ou un jeu de transducteurs couvrant des bandes complémentaires, afin d'obtenir le plus d'information sur chacun des modes dans le domaine fréquentiel et de pouvoir, en fonction du matériau et de son épaisseur, travailler avec plusieurs modes à la fois.

Dans le premier procédé, l'inclinaison des transducteurs permet de sélectionner un mode de Lamb (loi de Snell-Descartes). Ce mode opératoire nécessite donc tout d'abord de déterminer l'angle d'un mode. Pour cela une recherche des maxima d'amplitudes des signaux temporels est effectuée en faisant varier l'angle d'inclinaison des transducteurs. Une fois un angle défini, la mesure est lancée en translatant le récepteur dans l'axe de propagation (via un système automatisé), ce qui est facilité par le fait qu'il n'y ait pas de couplage liquide. Plusieurs points rendent cependant cette méthode peu adéquate pour une caractérisation. Premièrement la recherche approximative des modes et le fait que la qualité de la sélection modale dépende de l'ouverture angulaire du transducteur qui doit être la plus faible possible. Deuxièmement le fait qu'on ne puisse travailler que sur un mode à la fois, il faut donc répéter le processus pour chaque mode et combiner l'ensemble des séries de mesures. Troisièmement,

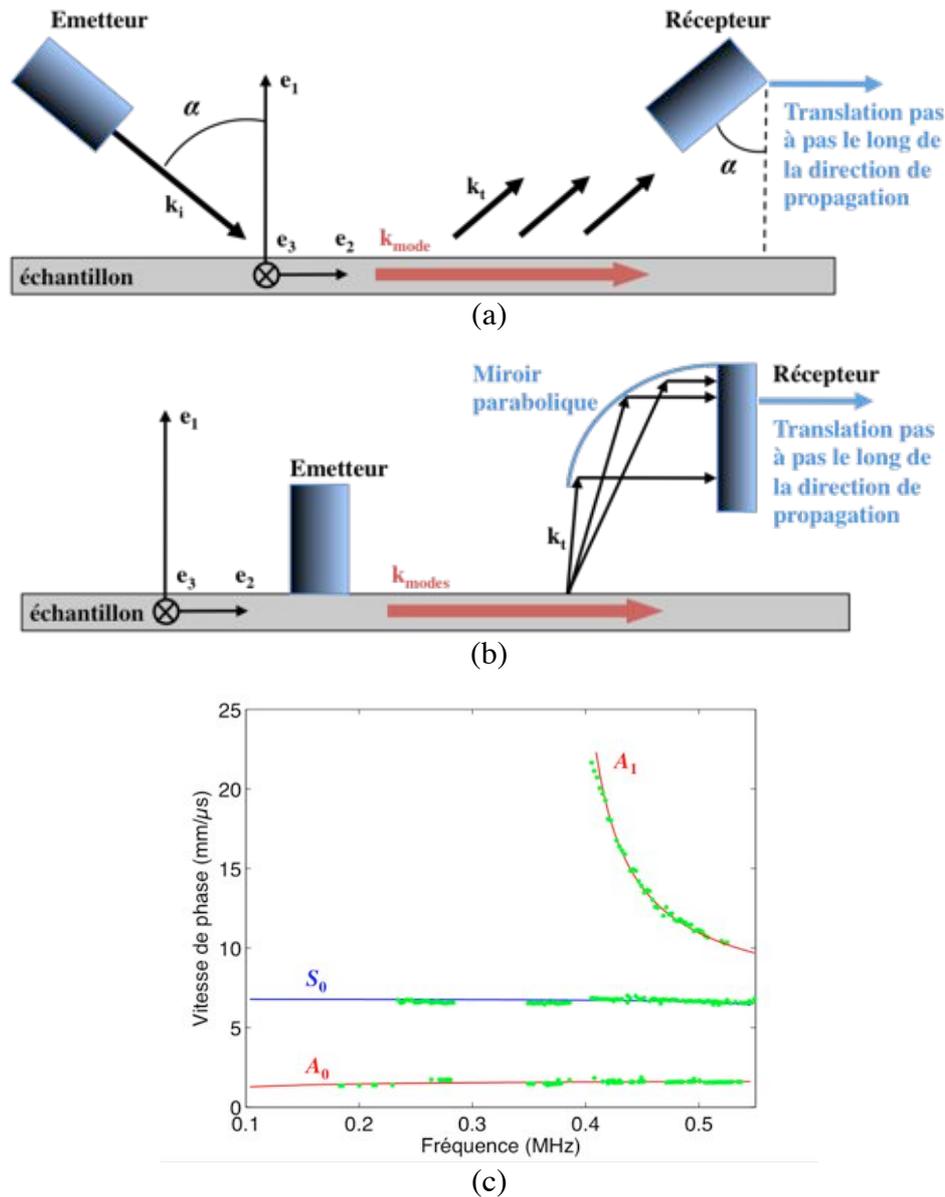


Figure 2.10 : Caractérisation par ondes guidées : (a) schéma du dispositif expérimental à deux transducteurs à couplage air inclinés, (b) schéma du dispositif expérimental avec émetteur en contact et récepteur à couplage air parabolique, (c) exemple de courbes de dispersion des vitesses de phase d'une plaque composite  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur, dans le plan  $P_{12}$ , • mesures expérimentales, — courbes théoriques obtenues après optimisation des  $C_{ij}$ .

un émetteur à couplage air, qui transmet peu d'énergie à la structure et qui est assez éloigné pour considérer des fronts d'ondes plans, ne permet pas de générer et détecter correctement l'ensemble des modes, à cause d'une excitabilité très différente de chacun d'eux (déplacement normal à la plaque). Cette méthode permet de déterminer une partie des modules de viscoélasticité, à savoir  $C_{11}$ ,  $C_{22}$  et  $C_{33}$ , suivant que l'on mesure dans le plan  $P_{12}$  ou  $P_{13}$ . Lors des mesures, seuls les modes  $A_0$  et  $S_0$  étaient exploitables, et même si  $A_0$  est sensible à la variation des modules  $C_{55}$  et  $C_{66}$ , cette sensibilité n'était pas suffisante pour obtenir une mesure précise de ces derniers. Pour toutes ces raisons, cette méthode n'a été utilisée que pour vérifier les modules précédents, et l'utilisation du deuxième procédé a été privilégiée.

En effet l'utilisation d'un transducteur en contact, même si nécessitant le recours à un couplant type gel, permet de générer avec plus de puissance les modes présents dans la plaque

aux fréquences considérées. Le récepteur quant à lui garde l'avantage du couplage par air, qui facilite sa translation, et ne nécessite pas d'inclinaison particulière. En effet le miroir parabolique, rajouté à l'avant de la zone active du transducteur, permet de capter simultanément les rayonnements dans l'air de tous les modes guidés par la plaque et de les réfléchir vers cette zone. Cela permet donc de réaliser l'acquisition de l'ensemble des modes en une seule opération. Les résultats, de l'exemple montré sur la figure 2.10.c pour une plaque composite  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de  $2.1 \text{ mm}$  d'épaisseur dont les plis font  $0.13 \text{ mm}$  d'épaisseur, ont été obtenus par des mesures effectuées dans le plan  $P_{12}$  du matériau, sur une bande de fréquence allant de  $0.2$  à  $0.5 \text{ MHz}$ . Les modes présents sont  $A_0$ ,  $S_0$  et  $A_1$ .

Là aussi plusieurs lignes de mesures, parallèles, dans les différents plans des matériaux ont été réalisées, et une moyenne sur l'ensemble des valeurs déterminées a été effectuée pour chaque module de viscoélasticité. Il faut noter que pour ce mode opératoire utilisant les ondes guidées, une attention particulière doit être accordée à la vérification, pour chaque série de mesures, du parfait parallélisme entre la surface de la plaque et le déplacement du récepteur. En effet, une variation d'angle de  $\pm 0.1^\circ$  dans ce parallélisme peut entraîner une erreur proche de  $10\%$  sur une vitesse mesurée.

#### 2.4.1.4 Caractérisation par méthode numérique

Une dernière technique utilisée pour la caractérisation de certains matériaux est une méthode numérique. Les matériaux concernés par cette méthode sont ceux formés d'un empilement de couches (ici identiques), mais dont chacune possède une orientation différente de celle de ses voisines, comme par exemple un composite  $[0^\circ/90^\circ]_s$ . Comme nous l'avons déjà mentionné, il est possible à l'aide d'un modèle théorique de calculer les courbes de dispersion des modes guidés, pour des plaques multicouches [101, 103, 27]. Ainsi, en supposant les modules de viscoélasticité, d'une des couches, connus, il est possible de modéliser l'ensemble du matériau et de déterminer ses courbes de dispersion. Les cas étudiés lors de ce travail sont ceux des composites  $[0^\circ/90^\circ]_s$ , que l'on peut modéliser par un empilement de plis composites UD (unidirectionnels) d'orientations différentes, en supposant la composition d'un pli UD identique à celle d'un pli du  $[0^\circ/90^\circ]_s$ . Les modules de viscoélasticité de l'UD sont déterminés à l'aide des techniques de caractérisation vues précédemment. Le modèle théorique multicouche s'appuie alors sur le jeu de valeurs des  $C_{ij}$

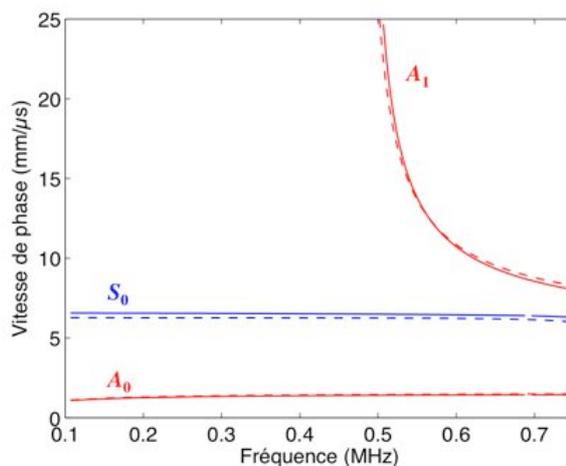


Figure 2.11 : Validité du modèle numérique multicouche : exemple de courbes de dispersion des vitesses de phase d'une plaque composite  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de  $1.6 \text{ mm}$  d'épaisseur, dans le plan  $P_{12}$ , --- résultats obtenus après caractérisation via les méthodes expérimentales, — courbes théoriques du modèle multicouche, en supposant connus les  $C_{ij}$  de chaque couche.

déterminé pour l'UD et calcule les courbes de dispersion de l'ensemble de la structure dans un plan de propagation choisi. Les courbes ainsi obtenues sont supposées être les courbes réelles du matériau. Sur la figure 2.11, un exemple est donné montrant, dans le plan  $P_{12}$  d'un matériau composite  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de 1.6 mm d'épaisseur (constitué de 12 plis UD d'environ 0.13 mm d'épaisseur), la bonne concordance, dans le domaine fréquentiel d'étude, entre les courbes de dispersion, obtenues après caractérisation via les méthodes précédentes, et celles du modèle multicouche. Entre les deux résultats, sur chacun des modes, on ne dépasse pas 5% d'écart entre les valeurs.

A partir de ces courbes, obtenues par la modélisation du multicouche, on peut lancer un calcul d'optimisation, similaire à ceux des méthodes précédentes, des  $C_{ij}$  du milieu homogène équivalent, sur différents plans de propagation ( $P_{12}$ ,  $P_{13}$  et  $P_{45^\circ}$ ). Le premier intérêt de cette méthode est de pouvoir rapidement réaliser la caractérisation de composites, formés de l'empilement de plis identiques ou non, même orientés différemment, dont les caractéristiques mécaniques sont connues. Le second est de pouvoir déterminer certains  $C_{ij}$ , difficilement mesurables par les méthodes expérimentales, comme par exemple les modules  $C_{23}$  et  $C_{44}$  qui doivent être obtenus par des mesures réalisées en dehors des plans principaux, souvent délicates à réaliser.

## 2.4.2 Résultats des mesures

En ce qui concerne le calcul d'erreur, qui est similaire, pour tous les procédés de caractérisation employés ici, il est réalisé à l'aide de la méthode des matrices d'insensibilité [104]. Cette méthode permet d'estimer, dans chacun des plans de mesures, les erreurs relatives commises sur les modules de viscoélasticité complexes (parties réelles et imaginaires). En effet le vecteur  $\mathbf{r}$  regroupant les erreurs relatives  $r_i$ , telles que :

$$r_i = \frac{\Delta C_i}{C_i} \quad i = 1 \dots n \quad (2.28)$$

où les coefficients  $C_i$  correspondent, dans notre cas, aux modules de viscoélasticité, est relié au vecteur  $\mathbf{E}$  (de composantes  $e_{k=1..m}$ , avec  $m$  le nombre de points de mesures,  $m \gg n$ ) regroupant les différences entre les valeurs calculées (des courbes de vitesse par exemple), qui dépendent des modules de viscoélasticité, et celles mesurées. Les valeurs théoriques calculées proviennent d'une fonction des composantes du tenseur de rigidité, notée  $V(\mathbf{C})$ . La relation entre  $\mathbf{r}$  et  $\mathbf{E}$  s'écrit :

$$\mathbf{r} = \mathbf{IE} \quad (2.29)$$

où  $\mathbf{I}$  (de composantes  $I_{ik}$ ) représente la matrice d'insensibilité qui est l'inverse de la matrice de sensibilité, qui peut être calculée à partir des dérivées partielles de la fonction  $V(\mathbf{C})$ . Au final la plus grande erreur commise sur les  $r_i$  est maximisée de la manière suivante :

$$\max(r_i) \leq \sum_{k=1}^m |I_{ik} e_k| \quad i = 1 \dots n \quad (2.30)$$

Ce calcul d'erreur est à prendre en compte lors de la caractérisation pour voir si la méthode utilisée permet d'avoir des valeurs précises des modules de viscoélasticité et donc de pouvoir tracer des courbes de dispersion fidèles au comportements réels des modes guidés dans les structures. Dans le cas contraire, l'utilisation de méthodes complémentaires, comme dans

notre situation, est nécessaire pour tenter d'affiner certaines valeurs des modules, dans la mesure du possible.

Plusieurs plaques, de différents matériaux, ont ainsi fait l'objet d'une caractérisation : des plaques d'aluminium et des plaques composites carbone-époxy, formées d'un empilement de plis, symétrique par rapport au plan médian, tissés ou unidirectionnels orientés suivant différents schémas, à savoir dans la même direction (UD), à  $[0^\circ/90^\circ]$  ou à  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ . Tous les matériaux sont d'abord considérés orthotropes et les résultats permettent ensuite de vérifier ou non les éventuelles symétries. L'ensemble des résultats est dans l'annexe A et l'exemple du composite  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  est donné dans la table 2.2.

Dans une première approche, les méthodes de caractérisation par temps de vol et par fonction de transfert ont permis, respectivement pour les aluminiums et les composites, d'obtenir un premier jeu de valeurs des modules de viscoélasticité dans les plans principaux  $P_{12}$  et  $P_{13}$ . Pour le cas des aluminiums, deux directions perpendiculaires dans le plan des échantillons ont été choisies. Le module  $C_{11}$  peut être directement déterminé lorsque le faisceau ultrasonore incident est normal au plan de l'échantillon. En faisant varier les angles d'incidence, on obtient alors les autres modules :  $C_{22}$ ,  $C_{66}$  et  $C_{12}$  d'une part et les modules  $C_{33}$ ,  $C_{55}$  et  $C_{13}$  d'autre part. Une fois ces modules déterminés on peut obtenir le  $C_{23}$  et  $C_{44}$  dans le plan  $P_{45^\circ}$ . Ces deux premières méthodes sont assez performantes pour mesurer les modules dont la sensibilité, à la propagation des ondes longitudinale et transversale, est importante dans le domaine angulaire  $[0^\circ, 70^\circ]$ . On obtient des résultats avec une erreur moyenne égale à 8% de la valeur des modules. Par contre, l'estimation de leur valeur des modules  $C_{22}$  et  $C_{33}$  se révèle insuffisante. Il est par conséquent difficile d'avoir aussi avec précision les modules  $C_{23}$  et  $C_{44}$ , qui de plus ne sont pas aisés à obtenir, car nécessitent une propagation des ondes ultrasonores, hors plans principaux, dont les signaux ont souvent une faible amplitude.

Pour compléter, avec plus de précision, les modules de viscoélasticité en mesurant  $C_{22}$  et  $C_{33}$  dans les plans  $P_{12}$  et  $P_{13}$ , et comparer avec les autres modules déjà mesurés, on a recours à la caractérisation par ondes guidées. Le procédé utilisant le récepteur parabolique et l'émetteur en contact permet, dans la gamme de fréquence exploitable et si le matériau est suffisamment épais, de travailler avec les modes  $A_0$ ,  $S_0$  et  $A_1$ . On obtient ainsi des mesures précises de  $C_{11}$  à 5% d'erreur au maximum, et de  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{55}$  et  $C_{66}$  à 1% d'erreur. Le mode  $A_1$  est essentiel pour obtenir cette précision sur  $C_{55}$  et  $C_{66}$ . Sans celui-ci, dans la plage de

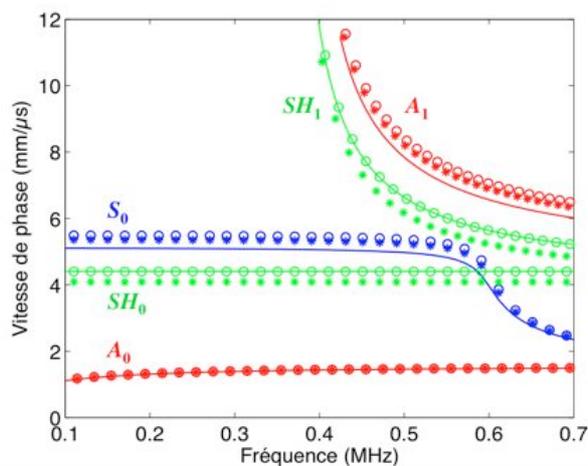


Figure 2.12 : Sensibilité des modes guidés à la variation des modules de viscoélasticité  $C_{23}$  et  $C_{44}$  : exemple de courbes de dispersion des vitesses de phase d'une plaque composite  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur, dans le plan  $P_{45^\circ}$ , —  $C_{23} = 7$   $C_{44} = 4$ , \*  $C_{23} = 15$   $C_{44} = 4$ , o  $C_{23} = 7$   $C_{44} = 10$ , les valeurs sont en  $GPa$ .

fréquence exploitable, l'erreur sur ces deux derniers modules passe à 10%. On note également une forte incertitude sur la détermination de  $C_{12}$  et  $C_{13}$  qui peut monter jusqu'à 25%. Ceci probablement dû au fait que la variation de ces modules n'a que peu d'influence sur les premiers modes. On conservera donc, pour les composites, les valeurs de ces deux modules obtenues par les méthodes précédentes.

Pour finalement obtenir  $C_{23}$  et  $C_{44}$ , une étude supplémentaire est nécessaire en dehors des axes de symétries des plaques. En utilisant les valeurs des  $C_{ij}$  déterminés précédemment et en fixant les valeurs des modules  $C_{23}$  et  $C_{44}$ , il est possible d'observer les courbes théoriques de dispersion, obtenues hors plans principaux, et de voir quels modes ont le plus de sensibilité aux variations de ces deux derniers modules. Les modes de Lamb ( $A_0$ ,  $S_0$  et  $A_1$ ) n'étant pas suffisants pour déterminer  $C_{23}$  et  $C_{44}$ , les modes guidés SH ont aussi été pris en compte dans cette étude de sensibilité. Un exemple, dans le plan  $P_{45^\circ}$ , est donné sur la figure 2.12, pour le composite  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur. Comme on peut le constater, entre les coefficients  $C_{44}$  et  $C_{23}$ , seul ce dernier a de l'effet sur les modes  $SH_0$  et  $SH_1$ .

Ainsi pour déterminer ces modules correctement, il est nécessaire, dans un premier temps, de déterminer  $C_{23}$  par la mesure des modes  $SH_0$  et/ou  $SH_1$ , puis de déterminer  $C_{44}$ , par la mesure des modes  $S_0$  et/ou  $A_1$ , sur lesquels celui-ci a de l'effet. Malheureusement les mesures réalisées expérimentalement ne donnent pas de résultats concluants, du fait de la difficulté de générer et de réceptionner les modes SH. L'émission peut s'effectuer à l'aide d'un transducteur à cisaillement en contact (fréquence centrale à 0.5 MHz), couplé avec du miel. La réception, quant-à elle, est toujours assurée par le récepteur parabolique à couplage air. L'impossibilité des mesures est due d'une part au fait que dans le plan  $P_{45^\circ}$ , qui est un plan principal des composites croisés, la transmission des ondes SH est nulle, et d'autre part, que pour d'autres directions la transmission d'énergie, normale à la plaque, de ces ondes est faible. Il a donc été nécessaire d'avoir recours, pour les matériaux composites quadratiques et quasi-isotropes, à la caractérisation par méthode numérique pour calculer  $C_{23}$  et  $C_{44}$ . L'hypothèse de départ est que chaque pli des composites a bien la même composition que celle des plis du composite UD, dont la symétrie est supposée connue, à savoir que  $C_{23}$  et  $C_{44}$

Propriétés	Carbone-époxy $[0^\circ/90^\circ]_3s$
Dimensions (mm x mm)	750 x 550
Density ( $g/cm^3$ )	$1.47 \pm 0.02$
Average thickness (mm)	$1.62 \pm 0.07$
$C_{ij} (GPa) = C'_{ij} + iC''_{ij}$	$C'_{ij}$
$C_{11}$	$10 \pm 0.5$
$C_{22}$	$58 \pm 1$
$C_{66}$	$3.8 \pm 0.05$
$C_{12}$	$3.2 \pm 0.5$
$C_{33}$	$58 \pm 1$
$C_{55}$	$3.8 \pm 0.05$
$C_{13}$	$3 \pm 0.5$
$C_{23}$	$3.5 \pm 0.5$
$C_{44}$	$5.5 \pm 0.5$
	$C''_{ij} \approx 2.5\% C'_{ij}$

Table 2.2 : Dimensions et caractéristiques mécaniques d'un composite  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de 1.6 mm d'épaisseur, les modules de viscoélasticité ont été obtenus via les diverses méthodes de caractérisation.

sont respectivement égaux à  $C_{13}$  et  $C_{55}$ . Les erreurs commises sur ces deux modules sont au maximum de 15%.

En ce qui concerne les termes de vicoélasticité, c'est à dire la partie imaginaire des modules, on prend généralement la moyenne des valeurs mesurées les plus précises (aux alentours de 2 à 3% d'erreur). Il s'agit principalement des parties imaginaires des modules  $C_{22}$ ,  $C_{66}$ ,  $C_{33}$  et  $C_{55}$  (exprimées ensuite en pourcentage des parties réelles), qui sont alors prises comme valeur pour tous les  $C_{ij}$ . Au final une moyenne, pour chacun des modules, des résultats de différentes séries de mesures (en diverses positions des matériaux) est réalisée.

### 2.5 La méthode SAFE

Le modèle matriciel [27], utilisé dans les méthodes à ondes guidées présentées au paragraphe précédent, permet de déterminer les courbes de dispersion dans des milieux anisotropes, homogènes ou multicouches. Sa mise en œuvre est cependant assez lourde. Il faut en effet résoudre l'équation de Christoffel (2.13) pour chaque couche, trier les solutions, calculer la matrice de chaque couche, ainsi que la matrice globale, résoudre les conditions aux limites, etc. Pour cette raison, une méthode numérique alternative extrêmement performante, souple et plus facile à implémenter, la méthode SAFE (Semi Analytical Finite Element), mise au point dans les années 70 [105, 106], a été choisie pour calculer, à partir des caractéristiques géométriques et mécaniques (épaisseur, masse volumique, modules de viscoélasticité) connues, les courbes de dispersion en fonction de la fréquence et de l'angle  $\theta$ , c'est à dire l'orientation du plan de propagation des ondes guidées autour de l'axe normal à la plaque, dans le repère définissant les directions principales du matériau (figure 2.1). 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 discrétisée. La méthode SAFE repose sur une approximation des solutions du fait de l'utilisation de modèles éléments finis, mais a l'avantage de pouvoir modéliser la propagation dans des guides de section arbitraire [107, 108], de plus, elle permet de prendre en compte, de façon plus simple, des conditions aux limites non uniformes dans l'espace. Enfin, les modèles basés sur la méthode des éléments finis permettent de simuler assez simplement des variations dans la section de propriétés mécaniques ou encore des défauts localisés. Dans le cas des plaques étudiées, l'utilisation de cette méthode est restreinte aux guides d'ondes bidimensionnels, c'est à dire ayant une section dont une seule dimension suffit à l'analyse (l'épaisseur de la plaque), avec des conditions de contraintes nulles en surface. Le but est de déterminer les nombres d'onde complexes (possibilité de prendre en compte la viscoélasticité) des modes, solutions de l'équation de propagation dans le guide dont l'épaisseur est discrétisée, par la résolution d'un problème aux valeurs propres. Il est donc possible de faire appel à des méthodes d'algèbre linéaire pour, par exemple, rechercher des solutions sur un sous-espace afin d'accélérer la résolution et ne manquer aucune solution.

La résolution modale, du modèle éléments finis, s'effectue avec un logiciel commercial (*Comsol Multiphysics*) [109]. On obtient alors, pour une fréquence donnée, les nombres d'ondes des modes propagatifs, évanescents et hétérogènes. A partir de chacune des solutions, il est possible de calculer les champs, dans l'épaisseur du guide considéré, de différentes grandeurs physiques (déplacements, contraintes, flux de puissance, etc.). Ces données peuvent être post traitées et stockées via le logiciel *Matlab (The MathWorks, Inc)* [110], et il est ainsi possible de reconstruire la base modale des ondes guidées (Lamb et SH). L'ensemble du traitement permet d'obtenir, non seulement les champs des modes dans l'épaisseur du guide, mais aussi leurs courbes de dispersion (Nombres d'onde, atténuations, vitesses de phase,

vitesse d'énergie ou encore vitesses de groupe) en fonction de la fréquence et de l'orientation du plan de propagation par rapport aux axes du matériau.

### 2.5.1 Implémentation des équations

On se place dans le cas de la propagation d'ondes planes guidées au sein d'une plaque, qui peut être assimilée à un guide d'ondes bidimensionnels, similaire à la représentation de la figure 2.3.a. Plus précisément il s'agit d'un modèle 2.5D qui considère une invariance des quantités physiques suivant la direction perpendiculaire au plan de propagation, mais ne considère pas que la composante du champ de déplacement, suivant cette direction, soit nulle. On peut donc également avoir des ondes guidées dont la polarisation a une composante perpendiculaire au plan de propagation, comme par exemple les modes SH ou plus généralement tout type de mode, dans le cas de propagation hors directions principales de matériaux anisotropes. Ainsi le champ de déplacement  $\mathbf{u}$  d'une onde guidée se propageant dans la direction 2 du plan de propagation (orientation de la figure 2.3.a) a des composantes s'écrivant, sous forme complexe, de la manière suivante :

$$u_i = U_i(x_1) e^{I(\omega t - kx_2)} \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.31)$$

avec le terme  $U$  indiquant le profil du champ dans la section du guide et le terme en exponentielle marquant la phase de la propagation. En supposant l'invariance suivant la direction 3 et en imposant une propagation suivant la direction 2, on voit que le modèle se réduit à une dimension (dans laquelle le profil du champ varie), dans ce cas, celle de l'épaisseur.

L'équation d'équilibre dynamique résultante dans le milieu élastique ou viscoélastique, toujours en considérant la sommation des indices répétés, s'écrit :

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_j} - \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = 0 \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (2.32)$$

En développant cette équation, elle peut être mise sous la forme d'un problème aux valeurs propres [111] :

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_k \partial x_j} + I(C_{i2,jk} + C_{ikj2}) \frac{\partial(kU_j)}{\partial x_k} - kC_{i2,j2}(kU_j) + \rho\omega^2 U_i \delta_{ij} = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad k, l = 1 \quad (2.33)$$

avec  $\delta_{ij}$  le symbole de Kronecker. Les conditions aux frontières du domaine (conditions aux limites de Neumann) que l'on impose, sont celles de bords libres. Le vecteur contrainte  $\mathbf{T} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}$ , où  $\mathbf{n}$  est le vecteur unitaire normal à la surface de la plaque, est donc nul et les conditions aux limites s'écrivent :

$$C_{ijkl} \frac{\partial u_j}{\partial x_l} n_k = T_i = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad k, l = 1 \quad (2.34)$$

et en les développant sous le même formalisme que l'équation dynamique, elles deviennent :

$$C_{ijkl} \frac{\partial U_j}{\partial x_l} n_k + IC_{ikj2}(kU_j)n_k = T_i = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad k, l = 1 \quad (2.35)$$

Dans le logiciel *Comsol*, le formalisme utilisé pour résoudre un problème aux valeurs propres, avec conditions aux limites de Neumann, est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot (c \nabla \tilde{U} + \alpha \tilde{U} - \gamma) - a \tilde{U} - \beta \cdot \nabla \tilde{U} + d_a \lambda \tilde{U} - e_a \lambda^2 \tilde{U} + f = 0 \quad \text{dans } \Omega \\ \mathbf{n} \cdot (c \nabla \tilde{U} + \alpha \tilde{U} - \gamma) + q \tilde{U} = g \quad \text{sur } \partial \Omega \end{array} \right. \quad (2.36)$$

dans lequel les coefficients peuvent être écrits sous forme de scalaires, de vecteurs ou de matrices. Ces coefficients admettent tous des valeurs complexes, ce qui est essentiel pour travailler avec les matériaux viscoélastiques.  $\tilde{U}$  représente le vecteur regroupant les variables du problème et  $\lambda$  est la valeur propre recherchée. En supposant les coefficients  $c$ ,  $\alpha$  et  $\gamma$  uniformes, c'est à dire indépendants des variables d'espaces, alors le système précédent peut s'écrire de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{ijkl} \frac{\partial^2 \tilde{U}_j}{\partial x_k \partial x_l} + (\alpha_{ijk} - \beta_{ijk}) \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial x_k} - a_{ij} \tilde{U}_j + \lambda d_{ij} \tilde{U}_j - \lambda^2 e_{ij} \tilde{U}_j + f_i = 0 \quad \text{dans } \Omega \\ c_{ijkl} \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial x_l} n_k + \alpha_{ijk} \tilde{U}_j n_k - \gamma_{ik} n_k + q_{ij} \tilde{U}_j = g_i \quad \text{sur } \partial \Omega \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \end{array} \right. \quad (2.37)$$

Par analogie entre, d'une part les équations (2.33) et (2.35), et d'autre part le système (2.37), on voit que pour implémenter le problème aux valeurs propres, il faut poser comme variable le vecteur  $U$  tel que :

$$\tilde{U} = \begin{pmatrix} \tilde{U}_1 \\ \tilde{U}_2 \\ \tilde{U}_3 \\ \tilde{U}_4 \\ \tilde{U}_5 \\ \tilde{U}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ kU_1 \\ kU_2 \\ kU_3 \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

Par identification des différents termes, il est finalement possible d'établir les expressions de l'ensemble des coefficients du système d'équations (2.37) :

$$c = \begin{bmatrix} [C_{11}] & [C_{16}] & [C_{15}] & & & \\ [C_{16}] & [C_{66}] & [C_{65}] & & & 0 \\ [C_{15}] & [C_{65}] & [C_{55}] & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix}, a = -\rho \omega^2 [I_6],$$

$$d_a = \begin{bmatrix} & & -C_{66} & -C_{62} & -C_{64} \\ & 0 & -C_{62} & -C_{22} & -C_{24} \\ -\rho\omega^2 & & -C_{64} & -C_{24} & -C_{44} \\ & -\rho\omega^2 & & & 0 \\ & & -\rho\omega^2 & & \end{bmatrix}, f = 0, g = 0, e_a = 0, \gamma = 0, q = 0,$$

$$\alpha = -I \begin{bmatrix} & [C_{16}] & [C_{12}] & [C_{14}] \\ 0 & [C_{66}] & [C_{62}] & [C_{64}] \\ & [C_{56}] & [C_{52}] & [C_{54}] \\ 0 & & 0 & \end{bmatrix}, \beta = I \begin{bmatrix} & [C_{61}] & [C_{66}] & [C_{65}] \\ 0 & [C_{21}] & [C_{26}] & [C_{25}] \\ & [C_{41}] & [C_{46}] & [C_{45}] \\ 0 & & 0 & \end{bmatrix}$$

Les coefficients exprimés sous forme matricielle, sont de dimension  $2N \times 2N$ , avec  $N$  le nombre de variables (dans ce cas 3 composantes spatiales). Les trois matrices  $c$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  sont constituées de sous matrices dont les dimensions sont respectivement  $L \times L$ ,  $L \times 1$  et  $L \times 1$ , avec  $L$  le nombre de dimensions spatiales considérées (dans ce cas 1, problème ramené à 1 dimension).

## 2.5.2 Modélisation de la plaque

Avant toute chose, il faut fixer la fréquence  $f$  de l'étude et le nombre de solutions que doit rechercher l'algorithme, c'est à dire l'ensemble des nombres d'onde solution du problème, correspondant aux divers types d'onde (propagatives, hétérogènes, évanescentes). On prend une valeur particulière du nombre d'onde, autour de laquelle cette recherche de solution s'effectue, puis on définit l'orientation de la plaque modélisée par rapport à la direction de propagation. Cette orientation apparaît dans l'expression des modules de viscoélasticité, en effet, il est possible de déterminer le comportement mécanique d'une plaque orthotrope dans n'importe quelle direction du plan de normale 1 (plan des fibres dans le cas des composites) en utilisant la forme générale d'un matériau monoclinique (2.8), dont chaque composante du tenseur de rigidité se déduit par une rotation, d'un angle  $\theta$ , de la base principale du matériau orthotrope.

Le modèle géométrique se réduit, comme il a été dit, à une dimension (direction de l'épaisseur). Deux cas de figure sont traités ici, le modèle homogène équivalent d'une plaque, et le modèle multicouche, dont chaque couche possède les mêmes caractéristiques mais une orientation différente de celle des autres, dans le plan de la plaque. Dans le premier cas, l'épaisseur de la plaque est modélisée par un seul domaine géométrique (un segment) auquel est affecté la masse volumique et l'ensemble équivalent des modules de viscoélasticité avec l'orientation adéquate. Dans le deuxième cas, on assemble bout à bout des segments, correspondant aux épaisseurs des différentes couches, on a ainsi plusieurs domaines géométriques, ayant chacun une masse volumique et un jeu de  $C_{ij}$  défini dans une orientation qui lui est propre. Une rotation globale de la structure, par rapport à l'axe normal à la plaque, est alors, éventuellement, rajoutée à toutes les couches. A noter que les conditions aux limites, entre les couches, imposent la continuité des contraintes et des déplacements, et que seules les limites aux deux extrémités du modèle global ont des conditions de bords libres.

Il ne reste plus qu'à définir le maillage qui doit être suffisamment fin pour bien tenir compte de la variation des profils des champs dans l'épaisseur de la plaque. Le modèle étant 1D, il ne consomme pas beaucoup de mémoire et la résolution, par un solveur direct, peut être rapidement exécutée. Par exemple, pour le calcul complet d'un modèle homogène équivalent d'une plaque, pour un domaine angulaire (orientation du plan de propagation par rapport aux axes principaux de la plaque) allant de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  par pas de  $1^\circ$ , avec 250 fréquences calculées pour chaque angle (entre 0 et 5 MHz), 30 solutions recherchées pour chaque cas et un maillage de 100 éléments (pour une épaisseur de 1 mm), il faut compter environ 25 minutes, avec un système récent de 12 cœurs soit environ 48 Go de RAM, et avoir environ 2 à 3 Go de mémoire. Le nombre d'éléments du maillage est, pour cet exemple, très élevé, un nombre plus restreint suffit à garantir un profil régulier des champs dans l'épaisseur de la plaque.

### 2.5.3 Post traitement

Une fois la résolution du problème achevée, la phase de post traitement s'effectue via le logiciel *Matlab* et débute par la récupération de l'ensemble des données des champs calculés pour chaque solution ( $f, k, \theta$ ). Avant de pouvoir, entre autre, calculer les champs normalisés ou tracer les courbes de dispersion, il est nécessaire de trier ces solutions. L'objectif est de regrouper entre eux les modes propagatifs, hétérogènes et évanescents. Ensuite, au sein de chaque groupe, les ondes guidées seront classées, d'abord en modes SH et modes de Lamb puis, pour ces derniers, en modes antisymétriques et symétriques (on est toujours dans le cas de structures symétriques par rapport au plan médian).

Pour exécuter ce tri, plusieurs critères ont été fixés. Premièrement, seules les solutions (nombres d'onde) dont les parties réelles sont positives sont prises en compte, c'est à dire les modes se propageant dans le sens défini positif. Ensuite vient la distinction entre les trois types d'ondes qui dépend de l'importance relative entre la partie réelle et la partie imaginaire, c'est à dire qu'il faut avoir la partie réelle suffisamment grande par rapport à la partie imaginaire pour considérer qu'une onde est propagative et inversement pour une onde évanescence, sinon c'est une onde hétérogène. On ne retient également que les solutions distinctes, c'est à dire celles dont les valeurs des parties réelles et imaginaires sont différentes en valeur absolue (pour éviter de prendre les complexes conjugués). Pour finir, on observe les composantes du champ de déplacement aux deux extrémités de la section (en surface de la plaque), suivant l'importance de la composante qui est hors plan de propagation, on pourra classer une onde guidée comme étant un mode SH, sinon un mode de Lamb, qui à son tour sera classé en mode antisymétrique ou symétrique, suivant que son déplacement normal à la plaque, sur les deux extrémités, est respectivement identique ou opposé.

Une fois ce tri réalisé, on peut normaliser les champs (déplacements, contraintes, flux de puissance) comme dans le cas de la figure 2.6 et de la figure 2.7, tracer les courbes de dispersion (nombres d'onde, atténuation, vitesse de phase, vitesse de groupe, vitesse d'énergie) ou encore les surfaces de lenteur et surfaces d'onde, et stocker l'ensemble des données. Un exemple de courbes de dispersion obtenues avec la méthode SAFE a été donné sur la figure 2.4.

### 2.5.4 Résultats obtenus

La modélisation d'un milieu homogène équivalent, avec SAFE, est simple et ne pose aucun problème pour déterminer les courbes de dispersion. Il reste à vérifier si la modélisation multicouche de SAFE permet d'obtenir des résultats fiables, comme ceux des méthodes analytiques, vus au paragraphe 2.4.1. Il faut rappeler que l'intérêt d'utiliser ce genre de modèle vient du fait que les structures composites, type plaque, étudiées lors de ce travail

sont celles des composites  $[0^\circ/90^\circ]_s$  ou encore  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ , et qu'il est donc possible, sans avoir à faire de caractérisation expérimentale, de les modéliser par un empilement de plis composites UD (unidirectionnels) d'orientations différentes, en supposant que les caractéristiques mécaniques de ces plis sont connues (dans ce cas obtenues par caractérisation expérimentale) et que la composition d'un pli UD est identique à celle d'un pli du composite modélisé. Sur la figure 2.13, un exemple est donné montrant, dans le plan  $P_{12}$  d'un matériau composite  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de 1.6 mm d'épaisseur (constitué de 12 plis UD d'environ 0.13 mm d'épaisseur), la bonne concordance, dans le domaine fréquentiel d'étude, entre les courbes de dispersion, obtenues après caractérisation via les méthodes expérimentales vues au paragraphe 2.4.1, et celles du modèle SAFE, multicouche. Entre les deux résultats, sur chacun des modes, on ne dépasse pas 5% d'écart entre les valeurs, on a donc dans ce domaine d'étude une bonne fiabilité du modèle.

La méthode SAFE apparaît véritablement comme une alternative aux méthodes analytiques utilisées dans la phase de caractérisation, car elle est extrêmement performante, souple et facile à implémenter. Elle permet ainsi de déterminer complètement les graphiques de dispersion des modes guidés, à la fois en fonction de la fréquence et de l'orientation du plan de propagation dans la plaque étudiée, puis de calculer entre autres les surfaces d'onde et les champs normalisés. Un ensemble de graphiques de dispersion des modes  $A_0$  et  $S_0$ , d'une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de 1.6 mm d'épaisseur, est visible sur la figure 2.14. Ils représentent la dispersion de ces modes dans le domaine de fréquence, généralement utilisé comme dans le cadre de la caractérisation, allant de 0.1 MHz à 0.8 MHz, et pour une orientation du plan de propagation allant de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  par rapport à la base principale du matériau (figure 2.1).

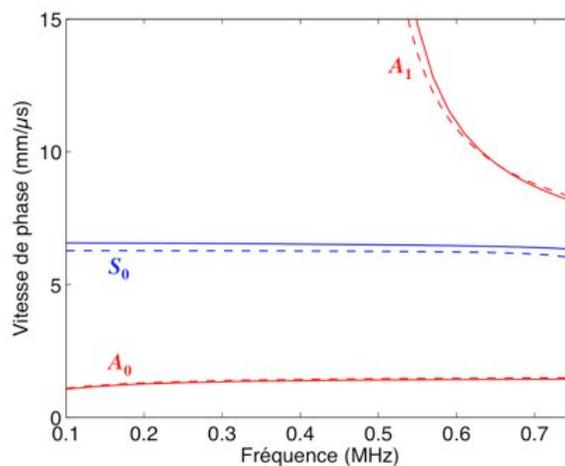


Figure 2.13 : Validité du modèle SAFE multicouche : exemple de courbes de dispersion des vitesses de phase d'une plaque composite  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de 1.6 mm d'épaisseur, dans le plan  $P_{12}$ , --- résultats obtenus après caractérisation via les méthodes expérimentales, — courbes théoriques du modèle SAFE, en supposant connus les  $C_{ij}$  d'une couche.

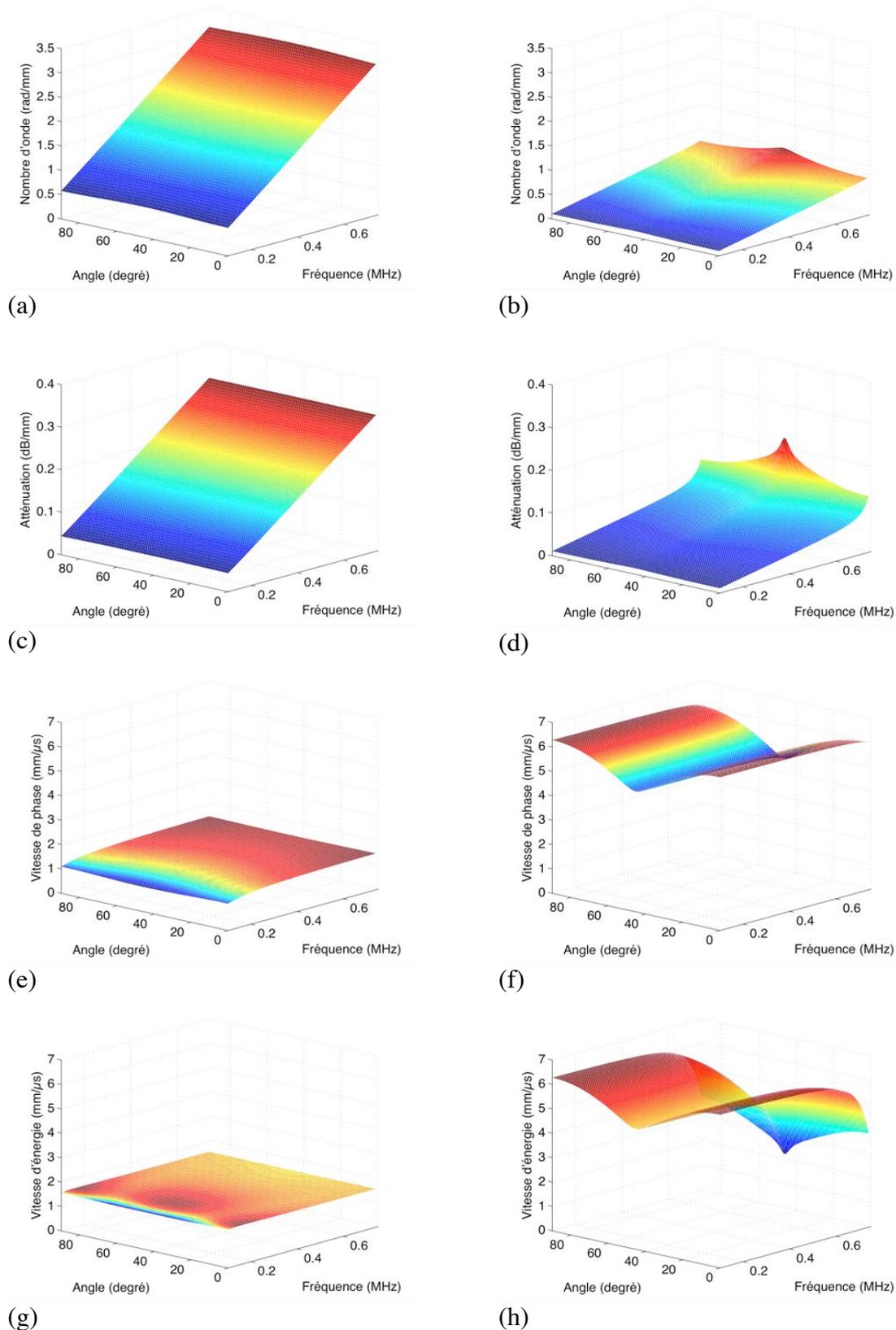


Figure 2.14 : Dispersion fréquentielle et angulaire des modes de Lamb  $A_0$  (à gauche) et  $S_0$  (à droite) d'une plaque carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$  de 1.6 mm d'épaisseur : (a) (b) le nombre d'onde  $k$ , (c) (d) l'atténuation  $k''$  (dB/mm), (e) (f) la vitesse de phase  $V_\phi$ , (g) (h) la vitesse d'énergie  $V_e$  (égale à la vitesse de groupe  $V_g$ ). Graphiques obtenus via la méthode SAFE.

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de rappeler comment sont modélisés les matériaux élastiques et viscoélastiques, et quelles sont les caractéristiques des ondes de volumes et des ondes guidées, en particulier les ondes de Lamb, qui se propagent dans les structures minces, type plaque. Grâce à ce rappel, il a été possible, entre autre, de comprendre les principes des méthodes de caractérisation, qui sont nécessaires pour déterminer les caractéristiques mécaniques, plus précisément les modules de viscoélasticité du tenseur de rigidité, des matériaux utilisés dans le cadre de ce travail. Différentes méthodes expérimentales et numériques ont été appliquées, puis une méthode semi analytique a été décrite, la méthode SAFE, qui permet, à partir des modules de viscoélasticité, de calculer les champs normalisés, dans l'épaisseur des structures, des modes guidés, ainsi que l'ensemble de leurs courbes de dispersion, en fonction de la fréquence des ondes ultrasonores et de l'orientation du plan de propagation par rapport aux directions principales des matériaux. Avec les informations déterminées par ces techniques, il est possible de connaître le comportement des modes de Lamb dans différents types de plaques (métalliques ou composites), ce qui est nécessaire lorsque l'on souhaite générer ou détecter ces modes, via un système multiélément, pour faire de la détection et de l'imagerie de défauts. Ceci est l'objet des chapitres 3 et 4. De plus l'ensemble des jeux de valeurs, des composantes du tenseur de rigidité, est aussi utilisé dans la modélisation, par éléments finis (EF), des matériaux dans le cadre du chapitre 5.



# Chapitre 3

## Génération/détection d'ondes de Lamb via un système multiélément

### Sommaire

<b>3.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2</b>	<b>Méthode <i>Phased array</i> .....</b>	<b>60</b>
3.2.1	Conditions de validité de la méthode.....	60
3.2.1.1	Caractéristiques et configuration du réseau.....	60
3.2.1.2	Excitation et allure des champs .....	61
3.2.1.3	Directions d'inspection.....	66
3.2.2	Description de la méthode .....	67
<b>3.3</b>	<b>Système expérimental .....</b>	<b>71</b>
3.3.1	Description du matériel.....	71
3.3.1.1	Système multivoie .....	71
3.3.1.2	Sondes multiéléments .....	72
3.3.2	Fonctionnement du système.....	75
<b>3.4</b>	<b>Evaluation expérimentale du procédé.....</b>	<b>77</b>
3.4.1	Performances et limites du procédé sur aluminium.....	77
3.4.1.1	Sélectivité modale à l'émission .....	77
3.4.1.2	Sélectivité modale à la réception .....	88
3.4.1.3	Directivité à l'émission.....	90
3.4.1.4	Directivité à la réception.....	92
3.4.2	Performances et limites du procédé sur composite.....	93
3.4.2.1	Sélectivité modale à l'émission .....	94
3.4.2.2	Sélectivité modale à la réception .....	95
3.4.2.3	Directivité à l'émission.....	96
3.4.2.4	Directivité à la réception.....	98
<b>3.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>99</b>

## 3.1 Introduction

Nous abordons dans ce chapitre la description et le fonctionnement expérimental du procédé de génération et détection d'ondes de Lamb dans des structures du type plaque, via l'application du principe *Phased array* à un système multiélément compact. Tout d'abord, l'aspect théorique et le domaine de validité de cette méthode sont expliqués, ainsi que la description de son implémentation. Puis le dispositif expérimental est présenté. La dernière partie évalue les performances et limites du procédé sur différentes structures (métalliques et composites) en terme de sélectivité modale et de directivité du faisceau ultrasonore. Ces deux aspects sont observés à l'émission et à la réception.

## 3.2 Méthode *Phased array*

L'objectif du procédé est de pouvoir détecter et imager des défauts présents dans les structures, type plaque, étudiées à l'aide des ondes guidées (ondes de Lamb), qui servent alors de vecteurs d'information, car elles peuvent se propager sur de longues distances dans la plaque. Le choix des modes guidés utilisés est important, et dépend de l'information recherchée. En effet, lors d'une application CND, la connaissance de la dimension et de la nature d'un défaut susceptible d'être découvert, ou encore de sa position dans l'épaisseur de la structure est déterminante pour la sélection du mode guidé adapté à la mesure. A l'émission, ce mode doit être plus ou moins sensible, c'est à dire qu'il interagit plus ou moins avec le défaut qui le diffuse suivant une direction et avec une amplitude qui dépendent de la longueur d'onde et de la répartition des composantes du champ de déplacement de ce mode dans la structure. A la réception, il est préférable de traiter les signaux mesurés afin de sélectionner les modes porteurs d'informations, que ceux-ci soient présents dans le paquet d'onde incident ou qu'ils résultent d'une conversion modale riche d'information sur le défaut. Il est donc important d'être capable de sélectionner le mode adéquat, à l'émission et à la réception, tout en tenant compte de sa dispersion fréquentielle (paragraphe 2.3.3). Dans ce but, une méthode basée sur le principe du *Phased array* est employée [112, 113]. Il s'agit d'appliquer un déphasage aux différents signaux, générés ou mesurés par des capteurs formant un réseau, dans le but, généralement, d'avoir des interactions entre ces différents signaux, constructives ou destructives. Ainsi, par l'application de cette méthode, il est possible d'effectuer une sélection modale et de réaliser, dans le cas de réseaux 2D d'éléments, un *Beam steering*, c'est à dire la génération ou la réception d'un faisceau ultrasonore dans une direction particulière, ce faisceau correspondant à la propagation d'un mode guidé bien contrôlé.

### 3.2.1 Conditions de validité de la méthode

Plusieurs critères, liés aux caractéristiques des éléments piézoélectriques utilisés, au domaine fréquentiel employé, aux caractéristiques de la structure étudiée ou encore aux distances de propagation, sont à prendre en compte pour utiliser convenablement la méthode *Phased array* pour la génération-détection d'ondes guidées.

#### 3.2.1.1 Caractéristiques et configuration du réseau

Tout d'abord, cette méthode repose sur la condition que chacun des éléments, qui forment un réseau compact, produise une excitation surfacique uniforme et doive donc avoir une dimension suffisamment petite devant les longueurs d'onde produites. Ils doivent

également être identiques, c'est à dire avoir la même réponse en fréquence. De plus il est nécessaire d'employer des basses fréquences pour propager des ondes de Lamb sur de grandes distances dans les composites. Ainsi, l'utilisation d'un système multiélément fait sur mesure, formé de ce type de réseau d'éléments piézoélectriques, pour appliquer ce principe à la génération/détection d'ondes guidées est adéquate. En effet, les avancées technologiques actuelles dans la conception et la fabrication de transducteurs multiéléments permettent désormais d'élaborer des systèmes suffisamment compacts, avec des éléments piézoélectriques de petites tailles et homogènes, en terme de performances et de comportements électromécaniques, sur l'ensemble du réseau, et fonctionnant à basse fréquence. De plus, le couplage électromécanique entre eux peut être très bien maîtrisé.

Du point de vue de la sélectivité modale, la performance vient de la capacité du réseau à imposer au mieux la distribution spatiale du champ de déplacement d'un mode guidé désiré. Il est donc plus intéressant d'avoir plusieurs éléments par longueur d'onde, pour imposer la distribution d'un mode spécifique, plutôt que des éléments éloignés les uns des autres simplement synchronisés entre eux (voir l'étude réalisée au paragraphe 3.4.1.1) et qui ne permettent pas de supprimer suffisamment les modes parasites. On aura alors des performances et des limitations, à l'émission et à la réception, suivant les modes ciblés, en fonction du domaine fréquentiel utilisé, de la structure étudiée et des dimensions du réseau et des éléments.

### 3.2.1.2 Excitation et allure des champs

Il est ensuite important de déterminer les conditions requises à respecter, suivant l'allure des fronts d'onde considérés et de la forme des sources qui les génèrent. En effet, lorsque l'on étudie la propagation des ondes guidées, générées par un réseau d'éléments, dans le plan d'une plaque isotrope, il est possible de définir une zone de champ proche et une zone de champ lointain (figure 3.1) [87]. Cette définition, qui repose sur les modèles de diffraction de Fresnel (champ proche) et de Fraunhofer (champ lointain), permet de prendre en compte, par exemple en champ proche, le front d'onde convergeant (figure 3.1.a), qui est la résultante des fronts circulaires générés par chacune des sources, considérées omnidirectionnelles. Elle permet aussi, en champ lointain, de considérer que le front d'onde tend vers un front plan (figure 3.1.b). La formulation des limites de ces domaines, dépendant de la fréquence d'excitation, des caractéristiques mécaniques du milieu et des dimensions du réseau, est la suivante :

$$0.62\sqrt{\frac{a^3}{\lambda}} < R_{\text{proche}} < \frac{2a^2}{\lambda} < R_{\text{lointain}} \quad (3.1)$$

où  $R$  est la distance de propagation par rapport à la position du réseau d'éléments,  $a$  est l'ouverture du réseau (sur la figure 3.1,  $a$  correspond au rayon du réseau), et  $\lambda$  est la longueur d'onde. Il est donc possible dans le cas de matériaux isotropes et pour des sources omnidirectionnelles de définir une zone proche où une focalisation de l'énergie s'effectue et peut être modifiée en jouant sur le déphasage des différents éléments entre eux. En champ lointain, on utilise en fait l'approximation des rayons parallèles (front d'onde plan) dans une direction, supposée invariante dans le matériau. Cette considération ne nécessite pas le

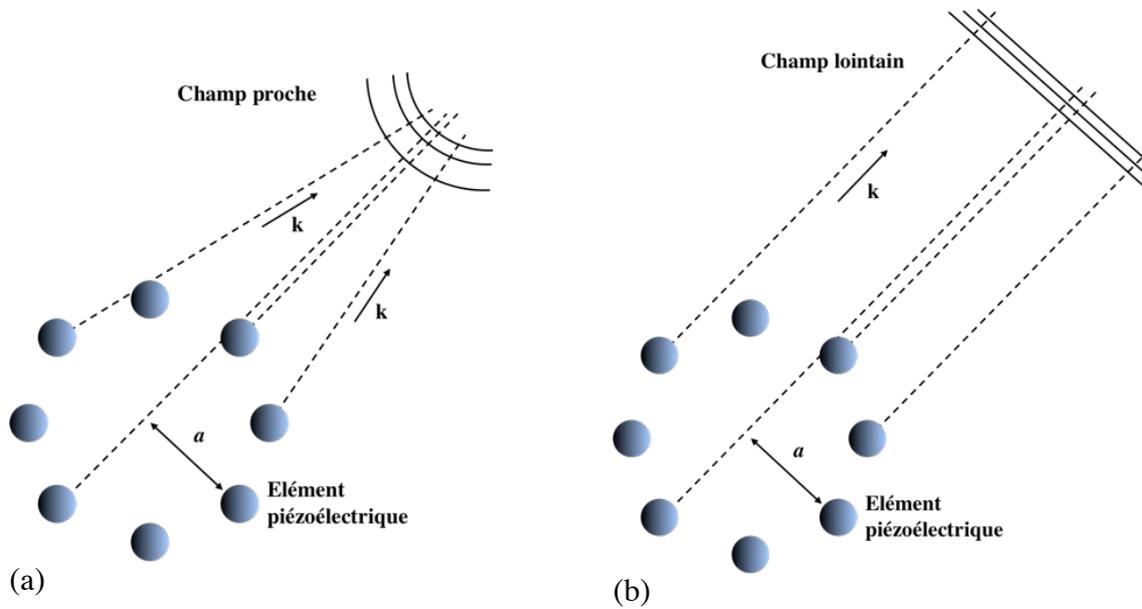


Figure 3.1 : Schématisation de l'allure du front d'onde généré par un réseau d'éléments, sur une plaque isotrope : (a) champ proche, (b) champ lointain.

caractère omnidirectionnel des sources du réseau, mais il faut pouvoir supposer que le comportement 3D des ondes (par exemple une onde radiale), peut se simplifier, localement en champ lointain, en un comportement plan 2D. Avec cela il faut également vérifier si ces hypothèses sont respectées lorsque les sources ne sont pas circulaires, c'est à dire évaluer l'effet de la géométrie de la surface active d'un élément piézoélectrique sur les fronts d'ondes qu'il génère le long de la structure à laquelle il est couplé.

Les systèmes multiéléments utilisés dans le cadre de ce travail ont des éléments présentant une géométrie carrée ou rectangulaire. Or en SHM (*Structural Health Monitoring*), il a été démontré, en s'appuyant sur un modèle analytique monofréquentiel, par Raghavan et Cesnik [114], qu'un émetteur piézoélectrique de dimensions finies, collé en surface d'une plaque isotrope et générant des ondes guidées, est omnidirectionnel s'il est de forme circulaire et devient omnidirectionnel, après quelques longueurs d'onde, s'il est de forme rectangulaire. Cette affirmation repose sur la formulation du champ de déplacement des ondes guidées générées par un émetteur surfacique de forme arbitraire et de dimensions finies. Pour obtenir cette formulation, on se base sur l'équation de mouvement (2.9), considérée en régime élastique harmonique, et on décompose le champ de déplacement  $\mathbf{u}$ , solution de l'équation, comme la somme du gradient d'un champ scalaire  $\phi$  et du rotationnel d'un champ vectoriel  $\Psi$  (théorème de Helmholtz-Hodge) s'écrivant :

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \nabla\phi + \nabla \times \Psi \\ \nabla \cdot \Psi &= 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

On utilise alors une double transformée de Fourier spatiale pour faciliter la résolution du problème. Pour une quantité  $\chi$  définie dans le plan ( $\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ ) similaire à celui de la figure 3.2, la double transformée de Fourier spatiale de la variable, et l'inverse de cette double transformée, s'écrivent respectivement :

$$\bar{\chi}(k_2, k_3) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \chi(x_2, x_3) e^{-I(k_2 x_2 + k_3 x_3)} dx_2 dx_3 \quad (3.3)$$

$$\chi(x_2, x_3) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{\chi}(k_2, k_3) e^{I(k_2 x_2 + k_3 x_3)} dk_2 dk_3 \quad (3.4)$$

En appliquant cette double transformée au problème de propagation, on obtient les équations suivantes, dans l'espace des nombres d'onde :

$$(-k_2^2 - k_3^2)\bar{\phi} + \frac{d^2 \bar{\phi}}{dx_1^2} = -\frac{\omega^2}{c_L^2} \bar{\phi} \quad (3.5)$$

$$(-k_2^2 - k_3^2)\bar{\Psi} + \frac{d^2 \bar{\Psi}}{dx_1^2} = -\frac{\omega^2}{c_T^2} \bar{\Psi} \quad (3.6)$$

avec  $k_2$  et  $k_3$  les coordonnées de cet espace,  $c_L$  et  $c_T$  sont les vitesses, respectivement, longitudinale et transversale. On résout alors ces équations en tenant compte du type d'excitation surfacique et de sa répartition spatiale. Ce problème, dans le cas isotrope, peut être divisé entre les solutions (modes) antisymétriques et symétriques (on poursuivra l'explication avec ces dernières). Enfin en appliquant une double transformée de Fourier inverse, qui nécessite également l'utilisation du théorème des résidus (pour le calcul des intégrales qui se réduisent alors à la sommation des résidus autour des singularités correspondant aux modes guidés, dans l'espace des nombres d'ondes qui peut être complexe), on retrouve les composantes du champ de déplacement en surface de la structure. L'ensemble du développement peut être vu en détail dans la référence [114]. On s'intéresse au cas d'une excitation surfacique par un élément piézoélectrique en contact, de forme rectangulaire (ou carrée dans le cas simple), ayant pour demi longueur  $a_3$  et demi largeur  $a_2$  (figure 3.2). L'expression générale, en coordonnées polaires, dans la base ayant pour origine le centre de l'émetteur, des composantes de déplacement en surface ( $x_1 = h$ ), dans la région ( $x_2 > a_2$ ,  $x_3 > a_3$ ) est la suivante :

$$u_{i=1..3}^S(x_1 = h) = \sum_{k^S} \left( \frac{N_S^i(k^S)}{D_S^i(k^S)} e^{I\omega t} \times \int_0^{\pi/2} \frac{\sin(a_3 k^S \cos \varphi) \sin(a_2 k^S \sin \varphi)}{\sin \varphi} e^{-Ik^S(x_3 \cos \varphi + x_2 \sin \varphi)} d\varphi \right) \quad (3.7)$$

Les expressions de  $N_S$  et  $D_S$  sont également développées dans la référence [114] et l'indice  $S$  indique les modes symétriques. Une approximation de cette solution, correspondant au champ de déplacement en champ lointain, c'est à dire après 4 ou 5 longueurs d'onde, peut être

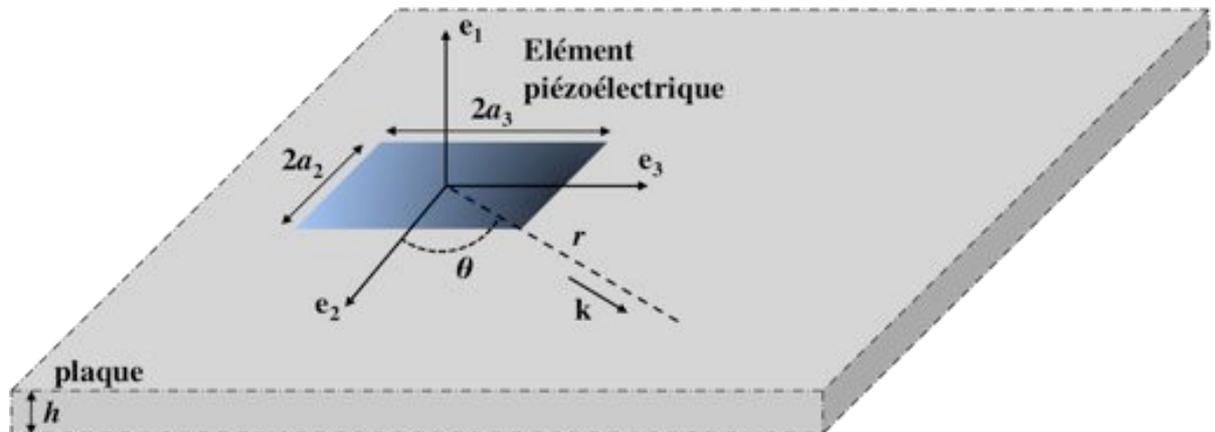


Figure 3.2 : Élément piézoélectrique de forme rectangulaire en contact surfacique avec une plaque isotrope (infinie).

déterminée en utilisant la méthode de la phase stationnaire, permettant d'évaluer le comportement asymptotique d'une intégrale du genre de celle de l'équation précédente. On obtient alors la formulation suivante :

$$u_{i=1..3}^S(x_1 = h) = \sum_{k^S} \left( \frac{N_S^i(k^S)}{D_S^i(k^S)} \sqrt{\frac{2\pi}{k^S r}} \times \frac{\sin(a_3 k^S \cos \theta) \sin(a_2 k^S \sin \theta)}{\sin \theta} e^{-I(k^S r + \pi/4 - \omega t)} \right) \quad (3.8)$$

où  $r = \sqrt{x_2^2 + x_3^2}$  et  $\theta = \tan^{-1}(x_2 / x_3)$ . Ceci indique que le champ harmonique, né de la superposition des différents modes guidés (symétriques dans ce cas), à longue distance de l'émetteur, tend vers un champ circulaire dont l'amplitude décroît avec la distance mais peut varier avec l'angle. Il est possible de généraliser cette observation sur un réseau d'éléments carrés, en supposant que le champ lointain de l'ensemble est la superposition des champs produits par chaque élément. Un exemple de simulation numérique par éléments finis (modèle expliqué au chapitre 5), présenté sur la figure 3.3.a, montre le champ de déplacement normal, en surface d'une plaque d'aluminium (vue du dessous de la plaque), produit par l'excitation à 0.5 MHz d'une ligne d'éléments piézoélectriques carrés d'un système multiélément en contact surfacique. Malgré la forme carrée des éléments piézoélectriques excitateurs, on peut voir que le champ de déplacement (composante normale) prend rapidement l'allure d'un front d'onde plan décroissant avec la distance. Après quelques longueurs d'ondes on peut supposer que le champ est localement plan dans une direction quelconque. On obtient par ailleurs des résultats analogues quelles que soient les composantes d'excitation et les modes considérés. Il faut savoir que les résonances en fréquence d'un élément piézoélectrique soumis à un champ électrique, lui font exercer sur la surface de la structure avec laquelle il est en contact, des forces de cisaillement et de traction/compression, qui sont plus ou moins importantes et plus ou moins couplées, suivant les caractéristiques électromécaniques de l'élément piézoélectrique [17], ses dimensions et le type de couplage utilisé pour le relier à la structure. Dans tous les cas, il est possible de généraliser ces hypothèses pour des systèmes multiéléments excitant ou étant sensibles principalement à la composante normale de déplacement (par rapport à la surface de la structure). Il en est de même pour des systèmes couplés en surface d'une plaque par un gel et n'agissant donc que sur cette composante normale de déplacement.

Pour un milieu anisotrope, il n'est plus possible de considérer les éléments excitateurs comme omnidirectionnels. Il devient alors impossible de définir une zone proche de focalisation pour un réseau multiélément compact. Pour ce qui est du comportement plan en champ lointain, des ondes guidées émises par un élément piézoélectrique en contact de forme circulaire ou rectangulaire, ceci n'a pas encore été démontré pour les matériaux anisotropes. Cependant, certains auteurs comme Velichko et Wilcox [115] ont développé un modèle analytique de propagation d'ondes, excitées par une source ponctuelle, basé sur une fonction de Green 3D calculée également dans l'espace des nombres d'onde, dont il est possible de déterminer une forme asymptotique en champ lointain, qui est similaire au champ d'un problème 2D. Ils ont également montré de bonnes corrélations, entre des modèles de propagation éléments finis 3D et le modèle analytique, qui ont permis de valider ce dernier et de considérer comme plans les fronts d'ondes guidées en champ lointain dans le cas anisotrope. Nous conservons et élargissons, aux sources rectangulaires et de dimensions inférieures à la taille des longueurs d'onde, cette hypothèse dans le cadre de ce travail et lors de l'application de la méthode *Phased array* pour les matériaux composites anisotropes. Un exemple de simulation numérique par éléments finis (figure 3.3.b et figure 3.3.c), dont le principe repose sur le modèle développé au chapitre 5, nous montre le champ de déplacement

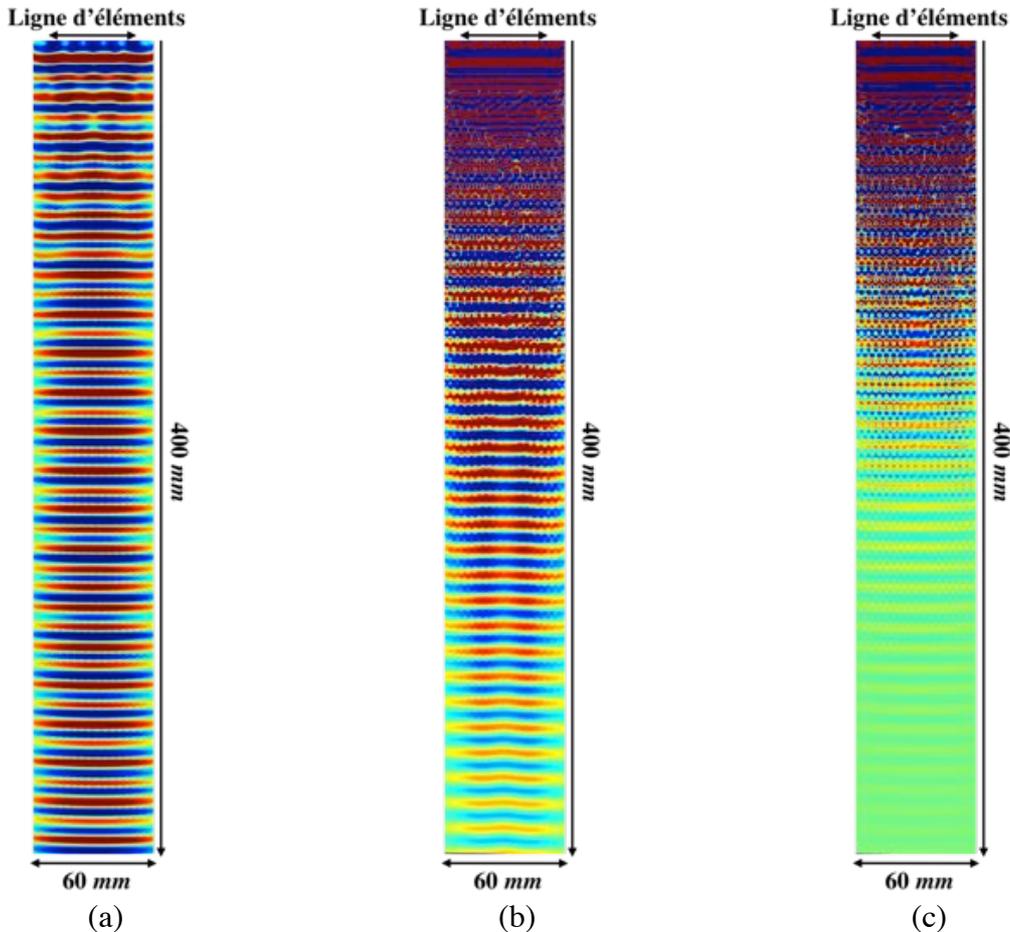


Figure 3.3 : Champ de déplacement normal (amplitude normalisée) des modes guidés le long d'une plaque (vue du dessous de la plaque), produit par une excitation à  $0.5 \text{ MHz}$  d'une ligne de 11 éléments piézoélectriques carrés ( $4 \times 4 \text{ mm}$  et espacement de  $1 \text{ mm}$ ) d'un système multiélément en contact surfacique : (a) cas d'une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, (b) cas d'une plaque composite  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de  $1.6 \text{ mm}$  d'épaisseur et propagation dans la direction des fibres, (c) propagation à  $45^\circ$  de la direction des fibres. Pour le composite, les deux graphes ont le même facteur de normalisation.

normal dans deux directions (celle des fibres et celle à  $45^\circ$  des fibres) d'un composite  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  anisotrope. Il est produit par l'excitation à  $0.5 \text{ MHz}$  d'une ligne d'éléments piézoélectriques carrés d'un système multiélément en contact surfacique, et indique qu'en champ lointain il peut être considéré localement plan. Le champ à  $45^\circ$  des fibres (figure 3.3.c) est plus faible que celui dans leur direction (figure 3.3.b) à cause de l'atténuation plus importante dans cette direction et d'un phénomène de canalisation de l'énergie des modes guidés expliqué au paragraphe 3.4.2.1.

A la vue du comportement du champ harmonique ultrasonore guidé dans une plaque isotrope ou anisotrope, produit par une ou plusieurs sources surfaciques qui peuvent être circulaires ou rectangulaires, l'application de la méthode *Phased array*, aux sondes multiéléments, en mode émission ou réception, est restreinte à la supposition que les fronts d'onde sont plans (figure 3.1.b) dans une direction spécifique (approximation des rayons parallèles). Cela nous contraint à travailler en champ lointain dont la limite pour les matériaux isotropes est donnée par la définition (3.1). Cette limite peut être également prise comme indication pour les matériaux anisotropes (avec les transducteurs employés dans cette étude) car elle est généralement équivalente ou supérieure à plusieurs longueurs d'onde (au moins une dizaine). Le respect de cette condition ne représente pas une grande contrainte du fait que

l'on travaille sur de grandes structures avec des ondes guidées, qui peuvent se propager sur des distances importantes. Les zones d'émission et de réception ne sont généralement pas proches de la zone observée (généralement à plus de 10 fois la longueur d'onde maximale). On pourra également généraliser ces suppositions pour des excitations du type burst (salve sinusoïdale à nombre de cycles fini), en partant du principe qu'ils sont une superposition de signaux harmoniques.

### 3.2.1.3 Directions d'inspection

La méthode *Phased array* telle qu'elle est employée dans le cadre de ce travail présente certaines restrictions quant aux directions possibles d'inspection dans les différents matériaux, selon l'anisotropie des modes de Lamb dans ces derniers. En effet, lorsque l'on génère le faisceau ultrasonore d'un mode de Lamb dans une direction donnée, on agit principalement sur la vitesse de phase et donc sur la direction de la vitesse de phase. Cependant l'information acoustique est véhiculée dans la direction de transport de l'énergie. Dans les cas où les directions de la phase et de l'énergie sont différentes, il s'avère expérimentalement difficile de vérifier le contrôle de la bonne direction de propagation à l'émission ou l'identification de celle d'un réflecteur à la réception, du fait qu'il est parfois difficile, voire impossible, de générer proprement des fronts d'onde dans ces directions, principalement à cause de l'atténuation. Pour garantir la fiabilité des mesures obtenues avec le procédé en mode pulse écho, on ne va donc, comme il a été mentionné au chapitre 2, travailler que dans les directions où les vecteurs de la vitesse de phase et de la vitesse d'énergie sont colinéaires. En ce qui concerne les matériaux isotropes, comme on peut le voir sur la figure 3.4.a représentant les courbes de lenteur des modes de Lamb dans le plan de la plaque, il n'y a aucune restriction car les vitesses de phase et d'énergie sont toujours colinéaires (la vitesse d'énergie est perpendiculaire à la tangente de la courbe de lenteur). Par contre lorsque l'on considère les matériaux composites (figure 3.4.b et c), et plus particulièrement ceux pour lesquels les modes de Lamb sont fortement anisotropes, comme le mode  $S_0$  dans le composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$ , les directions possibles d'inspections se limitent alors aux directions orientées à  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$  (figure 3.4.c). Dans la suite de ce travail, en particulier dans les formulations employées, on supposera donc que les vitesses de phase et d'énergie sont toujours colinéaires.

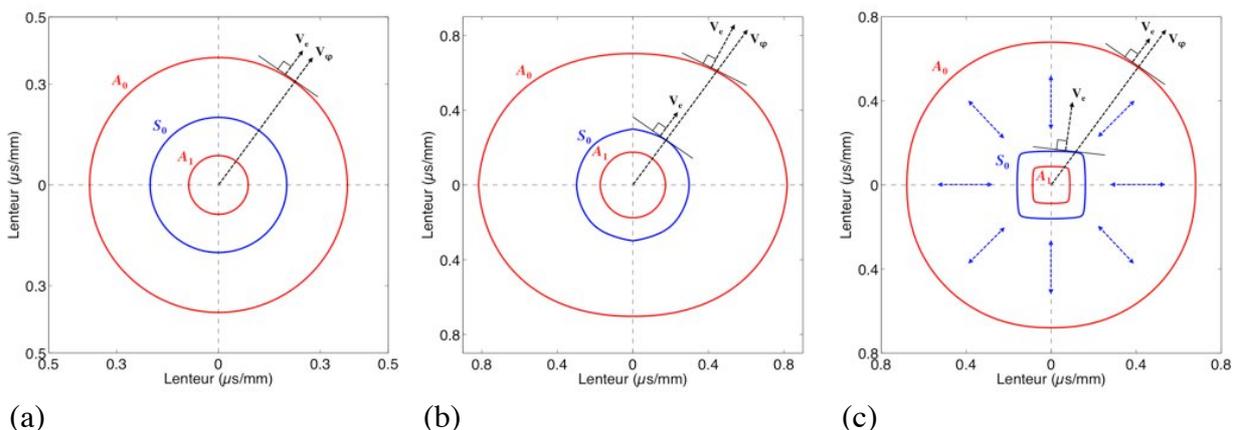


Figure 3.4 : Courbes de lenteur des modes de Lamb dans le plan de la plaque à  $0.45 \text{ MHz}$  : (a) matériau isotrope, plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, (b) matériau quasi isotrope, plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$  de  $1 \text{ mm}$  d'épaisseur, (c) matériau anisotrope, plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de  $2.1 \text{ mm}$  d'épaisseur (les doubles flèches indiquent les directions possibles d'inspection).

### 3.2.2 Description de la méthode

La méthode *Phased array* consiste à appliquer un déphasage spécifique à chacun des éléments (ici piézoélectriques) d'un réseau (compact), qu'il fonctionne en émetteur ou récepteur. L'objectif est de contrôler, à la génération, les modes guidés que l'on souhaite propager ainsi que leur direction de propagation, et à la réception, de filtrer ceux qui sont pertinents, provenant d'une direction donnée. Sachant que l'on travaille avec des ondes guidées, il faut tenir compte de la dispersion en fréquence, qui impose d'appliquer le déphasage dans le domaine fréquentiel (paragraphe 2.3.3). On pose l'hypothèse des fronts d'onde plans, et on considère, par exemple, l'émission ou la réception par un réseau 2D carré, formé d'éléments carrés (figure 3.5). Le calcul de ce déphasage en fréquence doit prendre en compte, premièrement, la position de chaque élément dans le réseau 2D, noté  $(m, n)$  et repéré par les coordonnées polaires  $(r_{mn}, \gamma)$ , avec pour origine le centre du réseau. Cette origine est la même que celle du repère cartésien  $(X, Y, Z)$  définissant les axes du réseau. Ce repère est choisi avec la direction  $X$  normale au plan des éléments. Le calcul doit également prendre en compte la direction de propagation repérée par l'angle  $\theta$ , que celle-ci forme avec l'axe  $Y$ . Enfin il faut connaître la vitesse de phase (en fonction de la fréquence et de la direction de propagation) du mode guidé, ultrasonore, étudié.

En supposant les conditions de validité respectées (paragraphe 3.2.1) et en se positionnant en champ lointain, la formulation de l'amplitude du champ de déplacement en surface de chaque mode  $i$  peut être représentée, en régime harmonique, comme suit [92] :

$$A_i(r, \theta) = F(f) \times C_i(r, \theta) \times e^{I(2\pi ft - \mathbf{k}^i(f, \theta) \cdot \mathbf{r})} \quad (3.9)$$

où  $F(f)$  est la réponse en fréquence d'un élément,  $C_i(r, \theta)$  est le coefficient de couplage entre l'excitation appliquée en surface du guide et le mode guidé, et  $\mathbf{k}^i$  le nombre d'onde du mode harmonique  $i$ . Soit le point  $M_0$  localisé sur un front d'onde plan à un instant  $t$  (figure 3.5), qui à  $t = 0$  se trouvait au centre du réseau ( $Y = 0, Z = 0$ ). En posant  $\mathbf{r}_0 = \mathbf{0}M_0$ , le terme propagatif d'un mode guidé s'exprime de la façon suivante :

$$e^{I(2\pi ft - \mathbf{k}^i(f, \theta) \cdot \mathbf{r}_0)} \quad (3.10)$$

On pose  $\mathbf{r}_M$  le vecteur position d'un point  $M$ , par rapport à  $0$ , localisé sur le front d'onde plan, on a  $\mathbf{r}_M = \mathbf{r}_{mn} + \mathbf{r}$  avec  $\mathbf{r}_{mn}$  le vecteur position de l'élément  $(m, n)$ , par rapport à  $0$ , et  $\mathbf{r}$  le vecteur position du point  $M$ , par rapport à l'élément  $(m, n)$ , comme les rayons sont considérés parallèles,  $\mathbf{r}$  est parallèle à  $\mathbf{r}_0$ . Ainsi le terme propagatif peut s'exprimer de la manière suivante :

$$e^{I(2\pi ft - \mathbf{k}^i(f, \theta) \cdot \mathbf{r})} \cdot e^{-I\mathbf{k}^i(f, \theta) \cdot \mathbf{r}_{mn}} \quad (3.11)$$

avec à gauche le terme propagatif correspondant au front d'onde plan, qui à  $t = 0$  se trouve à la position de l'élément  $(m, n)$ , et à droite le terme à appliquer au signal de cet élément pour qu'il soit en phase avec l'origine du réseau, et ainsi produire, dans la direction  $\theta$ , le front

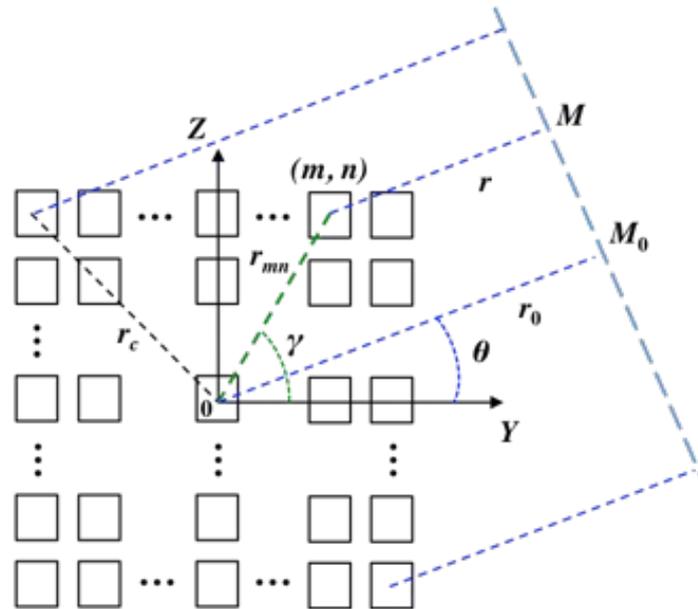


Figure 3.5 : Schéma d'un réseau multiélément carré compact, regroupant les paramètres géométriques nécessaires à l'application de la méthode *Phased array* dans le cas d'ondes planes.

d'onde plan du mode  $i$ . Le terme de phase (celui de droite dans l'équation précédente), d'après les données géométriques de la figure 3.5, se développe de la manière suivante :

$$e^{-12\pi f \frac{r_{mn} \cos(\gamma - \theta)}{C_\varphi^i(f, \theta)}} \quad (3.12)$$

où  $C_\varphi^i$  est la vitesse de phase du mode guidé  $i$ . C'est par ce terme que la dispersion est prise en compte. Ainsi tous les signaux, produits ou réceptionnés par chacun des éléments du réseau, interfèrent de façon constructive vis à vis du mode  $i$  considéré, et dans le cas de forte dispersion du mode, cela contribue à limiter la déformation du signal temporel résultant de ces interférences. En effet, la non prise en compte de la dispersion, ne permet pas de correctement mettre les signaux des différents éléments en phase, du fait de leur déformation lors de la propagation. Cela limite la capacité à sélectionner de manière optimale un mode. Ceci est étudié plus en détail au paragraphe 3.4.1.1.

A l'émission et à la réception, on applique une succession d'étapes dans le traitement des données. Dans le premier cas, on détermine la formulation des différents déphasages à appliquer à chaque élément du réseau pour générer un mode guidé particulier. Dans le deuxième cas, on construit le signal résultant de la contribution d'un mode guidé sur l'ensemble des éléments du réseau.

Ainsi pour l'émission, on définira tout d'abord la forme du signal temporel d'excitation, à savoir généralement un burst, avec une fréquence centrale  $f_0$ , et fenêtré par une gaussienne, qui s'écrit de la manière suivante :

$$e(t) = AG(t) \sin(2\pi f_0 t) \quad (3.13)$$

où  $A$  est l'amplitude du signal et  $G$  est la fenêtre gaussienne. Le nombre de cycles du signal dépend de la bande de fréquence désirée (sélectivité en fréquence). La fenêtre gaussienne peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$G(t) = \frac{a}{\Delta t \sqrt{\pi}} e^{-\frac{a^2 \left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)^2}{\Delta t^2}} \quad (3.14)$$

où  $\Delta t$  est la longueur du signal temporel et  $a$  est un paramètre variable de la gaussienne permettant de régler l'amplitude aux extrémités du signal. Le spectre du burst est alors calculé à l'aide d'une transformée de Fourier, et le déphasage (3.12) est appliqué à chaque composante fréquentielle. Ensuite une apodisation spatiale en amplitude est appliquée sur l'ensemble des éléments du réseau, il s'agit généralement d'une gaussienne en 2 dimensions (dans le plan du réseau). La pondération correspondant à l'élément  $(m, n)$  est définie par :

$$W_{mn} = e^{-\beta r_{mn}^2} \quad (3.15)$$

où  $r_{mn}$  est la distance entre l'élément  $(m, n)$  et le centre du réseau. Cette apodisation spatiale 2D permet, à la fois, d'améliorer la sélectivité modale dans la direction de propagation (les lobes secondaires sont diminués dans l'espace des nombres d'onde grâce à un fenêtrage spatial de l'excitation ou de la réception), et de minimiser l'ouverture du faisceau ultrasonore produit (figure 3.6), en diminuant les lobes secondaires spatiaux d'énergie et en canalisant l'énergie. Le facteur de la fenêtre gaussienne d'apodisation spatiale est  $\beta = \alpha/r_c^2$  avec  $r_c$  la longueur de la demi diagonale du réseau, et  $\alpha$  est un paramètre choisi de telle manière que la sélectivité modale soit optimale (généralement on fixe  $\alpha$  égal à 4). On revient finalement dans le domaine temporel en exécutant une transformée de Fourier inverse. La formulation finale du signal injecté à l'élément  $(m, n)$  du réseau s'écrit de la manière complète suivante :

$$E_{mn}(t, \theta) = TF^{-1} \left( e^{-\frac{\alpha}{r_c^2} r_{mn}^2} e^{-12\pi f \frac{r_{mn} \cos(\gamma - \theta)}{C_\varphi(f, \theta)}} TF \left( \frac{a}{\Delta t \sqrt{\pi}} e^{-\frac{a^2 \left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)^2}{\Delta t^2}} \sin(2\pi f_0 t) \right) \right) \quad (3.16)$$

avec  $TF$  et  $TF^{-1}$ , respectivement, la transformée de Fourier et son inverse. Deux exemples de signaux, employés pour la génération du mode de Lamb  $S_0$  dans une plaque d'aluminium, sont montrés sur la figure 3.7. Le premier est le signal normal de référence (figure 3.7.a) appliqué à l'élément central du réseau, le second est le signal appliqué à un élément éloigné du centre, dans la direction de propagation, qui tient compte de la dispersion du mode (figure 3.7.b). On voit sur ce dernier la déformation en temps du signal qu'il faut prendre en compte pour conserver des interférences constructives. Pour un élément situé à l'opposé, par rapport

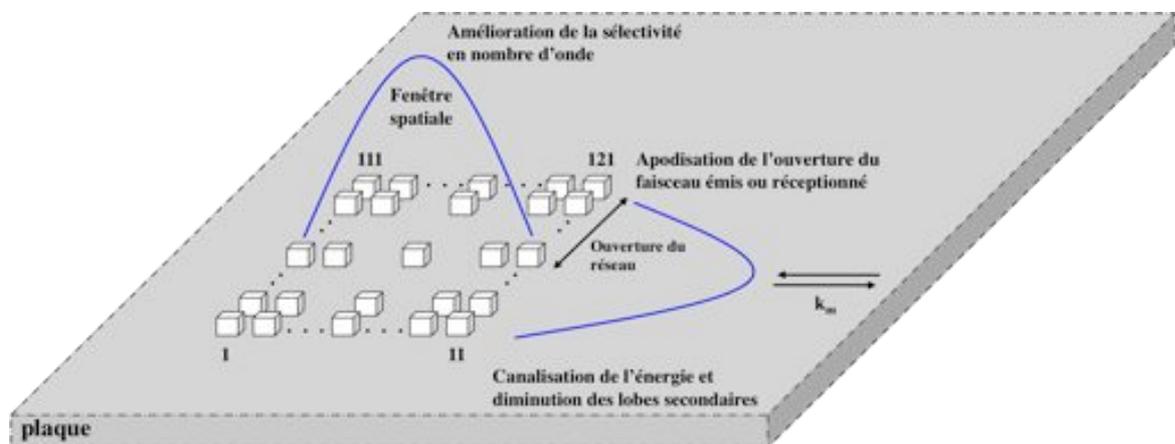


Figure 3.6 : Apodisation spatiale 2D d'un réseau carré compact formé de 121 éléments carrés.

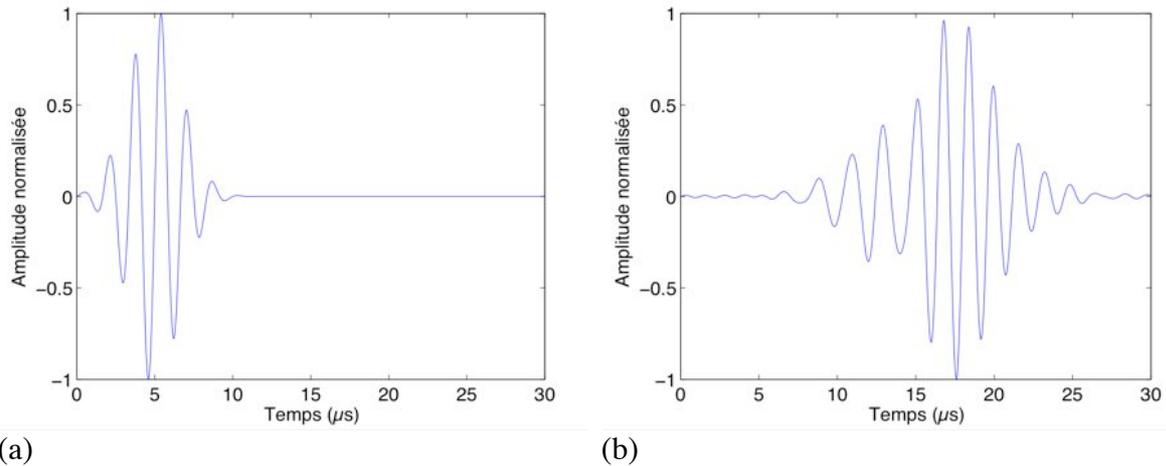


Figure 3.7 : Exemples de signaux d'excitation appliqués à l'émission sur différents éléments d'un réseau (sans prise en compte de l'apodisation spatiale), pour la génération du mode  $S_0$  à la fréquence centrale de  $0.6 \text{ MHz}$  (domaine de forte dispersion) dans une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, en tenant compte de la dispersion du mode : (a) signal non déphasé car appliqué au centre du réseau, (b) signal appliqué à un élément situé à  $25 \text{ mm}$  du centre du réseau, dans le sens de propagation.

au centre du réseau, dans le sens opposé à la propagation, le signal aura une allure semblable mais inversée et débutera à un temps  $t < 0$  (par rapport à la référence).

A la réception le principe de traitement est le même. Soit le signal  $s_{mn}(t, \theta)$  mesuré par l'élément  $(m, n)$ , après l'application d'un fenêtrage en temps sur ce signal, on calcule son spectre  $S_{mn}(f, \theta)$  et on applique le déphasage à chaque composante fréquentielle. Puis on multiplie par le terme de pondération en amplitude, correspondant à l'apodisation spatiale, qui là encore sert à améliorer la sélectivité modale et à restreindre l'ouverture angulaire du réseau, et on somme l'ensemble des spectres ainsi obtenus, avant de revenir à un signal temporel, par transformée de Fourier inverse. On amplifie ainsi, par interactions constructives, le signal du mode considéré provenant d'une direction choisie, et on minimise par interactions destructives les autres modes éventuellement présents. L'expression complète du signal temporel  $r(t, \theta)$  calculé est la suivante :

$$r(t, \theta) = TF^{-1} \left( \sum_{m,n} \left( W_{mn} e^{-12\pi f \frac{r_{mn} \cos(\gamma - \theta)}{C_\phi(f, \theta)}} S_{mn}(f, \theta) \right) \right) \quad (3.17)$$

Un exemple de traitement des signaux mesurés est montré sur la figure 3.8. Une excitation est appliquée en surface d'une plaque d'aluminium, et le signal temporel des ondes guidées se propageant est mesuré par le réseau multiélément. La figure 3.8.a montre le signal mesuré par l'un des éléments. Dans ce signal sont présentes les ondes incidentes ainsi que des échos provenant de réflexions de bords situés à l'arrière du réseau. La figure 3.8.b représente le signal obtenu après l'application de la méthode *Phased array*, pour le filtrage du mode  $S_0$  provenant de la direction à l'avant du réseau. On constate que les interactions des différents signaux mesurés ont bien supprimé les échos provenant de l'arrière et filtré le mode  $S_0$ .

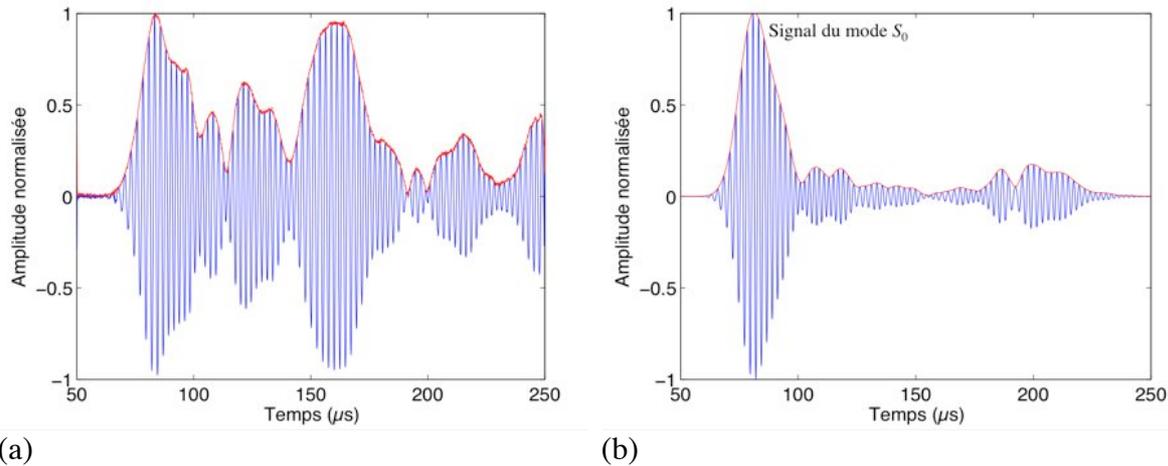


Figure 3.8 : Exemples de signaux mesurés et traités à la réception, pour une excitation, de fréquence centrale  $0.45\text{ MHz}$  sur une plaque d'aluminium de  $4\text{ mm}$  d'épaisseur, générant plusieurs modes guidés ( $A_0$ ,  $S_0$  et  $A_1$ ) : (a) signal mesuré par un des éléments du réseau (plusieurs échos du faisceau incident réfléchis par des bords situés à l'arrière du réseau parasitent le signal), (b) signal obtenu après application de la méthode *Phased array* en réception, pour le filtrage du mode  $S_0$  provenant de l'avant du réseau.

### 3.3 Système expérimental

Pour mettre en place un système expérimental permettant d'utiliser la méthode *Phased array*, il faut être attentif à plusieurs points. Les réseaux compacts employés, qui peuvent être de géométrie 1D ou 2D suivant les applications à réaliser, sont des sondes multiéléments piézocomposites qui doivent avoir des éléments identiques, comme mentionné au paragraphe 3.2.1.1, du point de vue de leurs performances électromécaniques, de leurs réponses en fréquence (avec une bande passante la plus large possible), et de leur géométrie. Leur dimension et le pas inter éléments doivent être suffisamment petits, suivant le domaine de fréquence utilisé et les structures étudiées, pour respecter les conditions de la méthode vis à vis des longueurs d'onde. Comme il a été dit, la principale difficulté à gérer avec les modes guidés (ondes de Lamb) est leur caractère dispersif, se traduisant physiquement par une variation de vitesse avec la fréquence et la direction de propagation, ainsi que leur nombre augmentant avec la fréquence. C'est pourquoi il est préférable de travailler dans un domaine fréquentiel assez bas où les modes sont peu nombreux et peu dispersifs. On cherche donc, dans le cadre de ce travail, à opérer dans les basses fréquences, en ciblant les modes fondamentaux. Dans le cas des plaques utilisées, les modes en présence sont généralement les modes antisymétriques  $A_0$  et  $A_1$ , et les modes symétriques  $S_0$  et  $S_1$ . Du point de vue du contrôle de ces systèmes multiéléments, chacun de leurs éléments doit pouvoir être piloté indépendamment des autres à l'émission comme à la réception. Il est donc nécessaire d'utiliser un système d'acquisition contrôlable par ordinateur qui permet de programmer entièrement la construction des signaux, leur implémentation, leur émission, et de la même manière en réception, de récupérer les données pour réaliser les post traitements nécessaires.

#### 3.3.1 Description du matériel

##### 3.3.1.1 Système multivoie

Le système d'acquisition est un système multivoie (figure 3.9), appelé *Open* et conçu par la société *Lecoeur électronique* [116]. Ce système, capable d'effectuer des acquisitions en

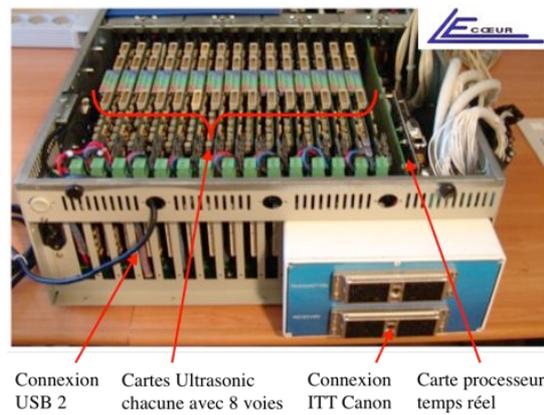


Figure 3.9 : Photographie du système d'acquisition *Open* de *Lecoer électronique* et de ses composants.

temps réel, est pilotable par ordinateur via le logiciel *Matlab* (*The MathWorks, Inc*) [110]. Ceci permet de concevoir n'importe quel type de signaux, de les charger dans le système, soit d'un bloc soit sous forme de séquences, de contrôler entièrement l'émission, la réception, la récupération des données et le post traitement. Il est muni de deux connexions ITT Canon 260 pins, permettant de fonctionner en mode pulse écho (avec une seule connexion pour l'émission/réception) ou en mode pitch catch (une connexion pour l'émission et une autre pour la réception). Chaque connexion fonctionne avec 128 voies en parallèle, pouvant transmettre des signaux analogiques programmables. Les convertisseurs à l'émission, numérique/analogique, et à la réception, analogique/numérique, fonctionnent sur 12 bits, pour une fréquence d'échantillonnage pouvant aller jusqu'à 80 MHz. En émission le système bénéficie d'une mémoire de stockage, pour les signaux programmés, de 4 Mo par voie (soit environ une durée de signal maximale de 1 s à une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz). La largeur de bande fréquentielle en analogique est de 10 MHz à -3 dB et la tension crête à crête est de 120 Vcc pour une résistance de 50 Ohm. En réception, il possède une capacité d'amplification allant jusqu'à 80 dB. Sa mémoire de stockage pour chaque voie est de 32 Mo, et la largeur de bande fréquentielle est de 25 MHz. Sur une mesure, une voie peut saisir jusqu'à 8000 échantillons (soit, par exemple, 400 μs de signal à 20 MHz d'échantillonnage).

### 3.3.1.2 Sondes multiéléments

Les sondes multiéléments employées sont des transducteurs piézocomposites fabriqués sur mesure par la société *Imasonic* [117]. Ce sont des transducteurs en contact (généralement couplés à la structure avec du gel ou de l'eau) reliés au système d'acquisition par une connexion ITT Canon. On dispose de deux types de sonde, à savoir deux sondes matricielles carrées (*Imasonic 7939 A101-A102*), pouvant opérer en 2 dimensions, dans le cadre de la méthode *Phased array*, et une sonde linéaire (*Imasonic 9725 A101*) pouvant travailler en 1 dimension (figure 3.10). Ces transducteurs sont composés d'une partie piézocomposite, formée d'éléments piézocéramiques insérés dans une matrice polymère, sur laquelle sont collées des électrodes cuivrées, le tout adjoint, sur la face arrière, à un backing absorbant d'impédance acoustique faible, et sur la face avant (en contact avec les structures), à une lame d'adaptation élastomère (figure 3.11). La description géométrique et les caractéristiques techniques des sondes sont regroupées dans la table 3.1. Certaines caractéristiques mécaniques (tenseur de rigidité, tenseur de couplage électromécanique, etc.) concernant les différentes parties des transducteurs ont été fournies par *Imasonic* pour les besoins de cette étude, et sont prises en compte comme données d'entrée dans les modèles éléments finis développés au chapitre 5.



Figure 3.10 : Photographies des sondes multiéléments *Imasonic* : (a) sonde matricielle carrée 121 éléments, (b) sonde linéaire 128 éléments.

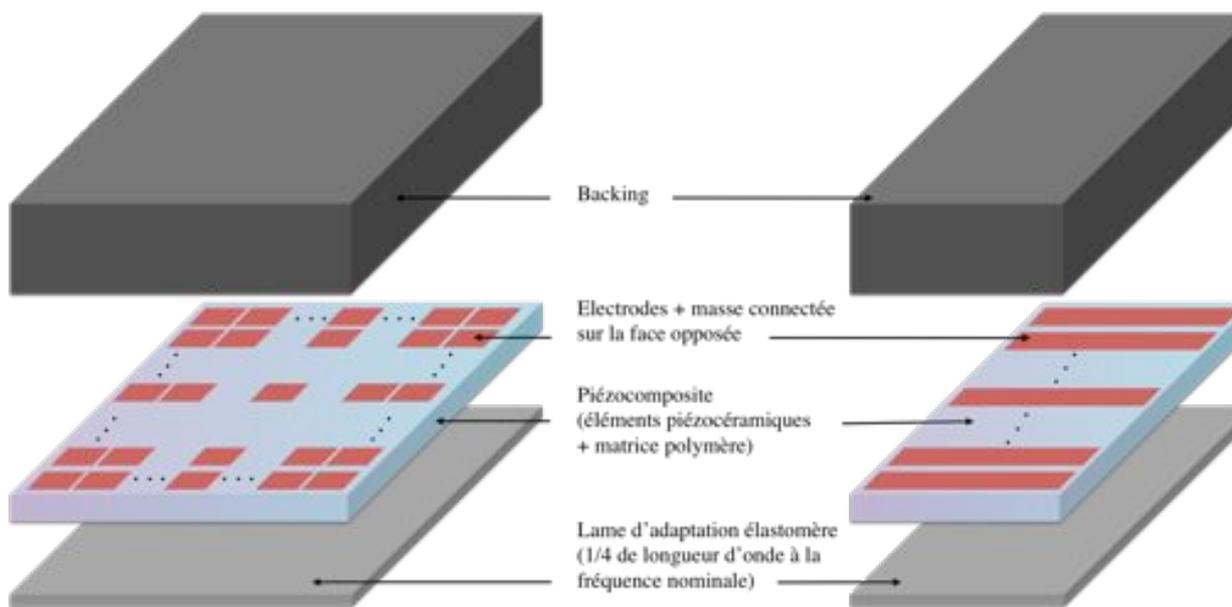


Figure 3.11 : Composition interne des systèmes multiéléments en contact.

Pour des raisons de confidentialité, les valeurs de ces caractéristiques ne peuvent être divulguées.

Une mesure de la réponse en fréquence de chaque élément, et cela pour chaque sonde, est réalisée pour vérifier, dans un premier temps, l'accord avec les données du constructeur et, dans un deuxième temps, l'homogénéité des sondes. Pour cela, le test réalisé par le constructeur est reproduit, c'est à dire que chaque sonde est positionnée sur la surface supérieure d'un bloc de plexiglas (matériau isotrope) d'une hauteur de 50 mm (figure 3.12). Une attention particulière est portée sur l'homogénéité du couplage par gel des sondes sur le matériau. A tour de rôle, chacun des éléments est excité par un Dirac (largeur du signal 0.25  $\mu$ s), et l'écho de fond du plexiglas est mesuré par le même élément (mode pulse écho), avec un gain de 60 dB. Les résultats obtenus sur les différentes sondes (matricielles et linéaire) sont similaires. Celui d'une des deux sondes matricielles est représenté sur la figure 3.13. Le graphique de la figure 3.13.a montre un bon accord entre les données du constructeur et les mesures réalisées pour les fréquences inférieures ou égales à la fréquence de résonance (environ 0.5 MHz) des transducteurs piézoélectriques. Pour les fréquences supérieures, au delà de 0.7 MHz, les mesures montrent un niveau de la bande passante d'au moins 5 dB

Caractéristiques	Valeurs	Valeurs
Type de transducteur	Matrice 2D 7939	Linéaire 9725
Nombre de voies ( $N_L \times N_I$ )	$11 \times 11$ éléments	$128 \times 1$ éléments
Focalisation mécanique	Aucune, partie active plane	Aucune, partie active plane
Pas axe primaire ( $P_L$ )	5 mm	2.5 mm
Pas axe secondaire ( $P_I$ )	5 mm	
Inter éléments axe primaire ( $IE_L$ )	1 mm	0.5 mm
Inter éléments axe secondaire ( $IE_I$ )	1 mm	
Surface active ( $L_L \times L_I$ )	$54 \times 54 \text{ mm}^2$	$319.5 \times 25 \text{ mm}^2$
Adaptation acoustique	Plexiglas (3.2 MRayl)	Plexiglas (3.2 MRayl)
Longueur de pulse (-20 dB)	$\leq 10 \mu s$	$\leq 7 \mu s$
Bande passante (-6 dB)	$\geq 40\%$	$\geq 50\%$
Homogénéité en sensibilité	$\pm 4 \text{ dB}$ pour l'ensemble des éléments	$\pm 4 \text{ dB}$ pour l'ensemble des éléments
Couplage inter éléments	$< -30 \text{ dB}$ entre éléments voisins	$< -30 \text{ dB}$ entre éléments voisins
Echo de fond du backing	$< -60 \text{ dB}$ par rapport à l'écho principal	$< -50 \text{ dB}$ par rapport à l'écho principal
$L \times l \times h$ du boîtier en acier Inoxydable	$60 \times 60 \times 50 \text{ mm}^3$	$350 \times 42 \times 60 \text{ mm}^3$
Fréquence centrale (-6 dB)	$0.5 \text{ MHz} \pm 10\%$	$0.5 \text{ MHz} \pm 10\%$

Table 3.1 : Caractéristiques techniques des transducteurs matriciels 7939 A101-A102 et du transducteur linéaire 9725 A101 de *Imasonic*.

supérieur aux données du constructeur, ce qui tend à légèrement augmenter la bande passante annoncée des sondes, même si la décroissance du niveau est assez rapide à ces fréquences. Sachant que dans le cadre de ce travail on utilise les sondes, principalement, dans la gamme  $0.3\text{-}0.7 \text{ MHz}$ , on reste dans un domaine où l'accord est vérifié. Sur la figure 3.13.b, plusieurs réponses en fréquences (normalisées par rapport à celle ayant le niveau le plus élevé du réseau), correspondant à plusieurs éléments répartis sur différentes positions du réseau (la numérotation des éléments est la même que celle employée sur la figure 3.6), sont juxtaposées et permettent de valider l'homogénéité de la sonde, car l'écart de niveau entre éléments, sur le domaine fréquentiel, qui nous intéresse, ne dépasse pas  $3 \text{ dB}$ . Le couplage électromécanique inter éléments est également évalué en excitant à tour de rôle chacun des éléments du réseau, lorsque le transducteur n'est pas en contact avec la surface d'une structure, et en observant l'énergie des signaux mesurés par les autres éléments. Un exemple de ces mesures est donné en annexe C pour le transducteur matriciel 121 éléments (*Imasonic 7939 A101*). Les résultats obtenus permettent de négliger l'impact de ces couplages électromécaniques inter éléments lors de l'utilisation de ces transducteurs multiéléments matriciel et linéaire.

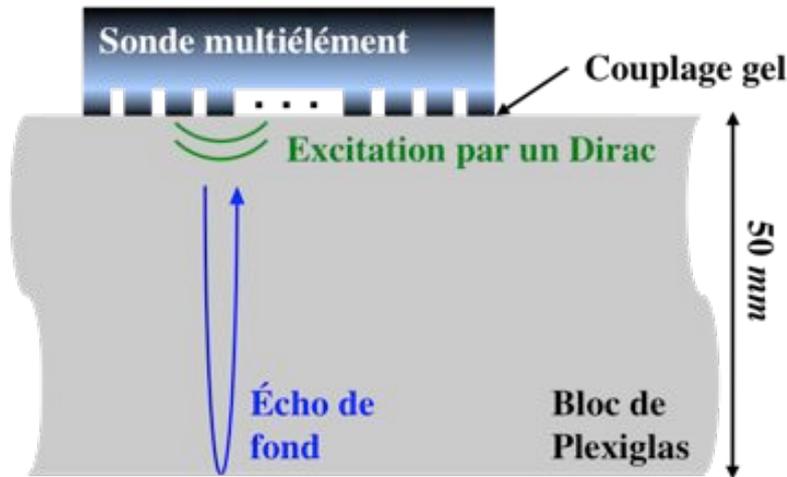


Figure 3.12 : Schéma de la méthode de mesure expérimentale de la réponse en fréquence des différents éléments d'une sonde multiélément.

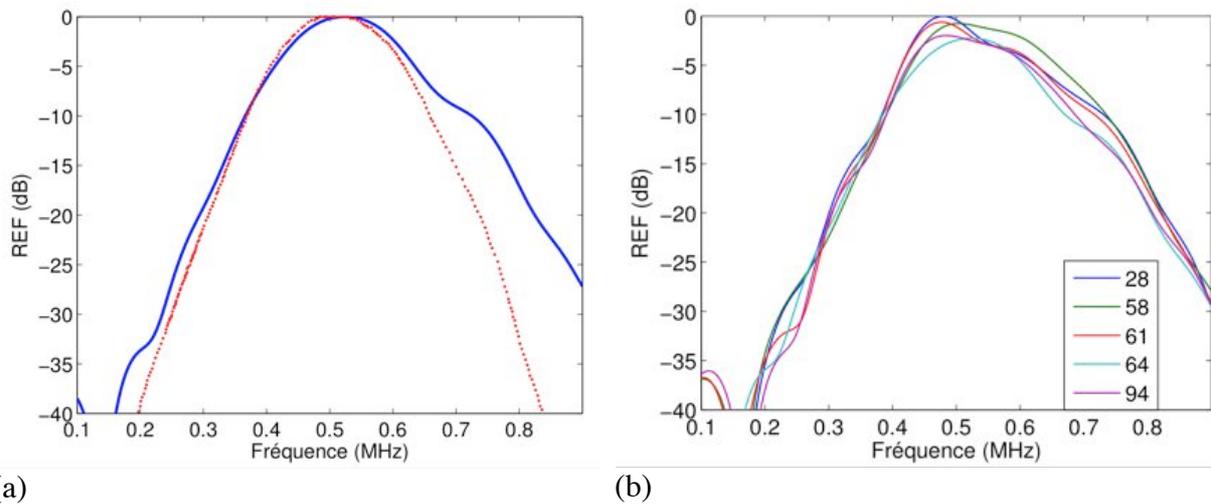


Figure 3.13 : Réponse en fréquence des éléments piézoélectriques du transducteur matriciel 121 éléments *Imasonic 7939 A101* : (a) comparaison, pour l'élément 64, des données mesurées normalisées — et des données constructeur •, (b) comparaison des réponses de différents éléments du réseau normalisées par le niveau maximal.

### 3.3.2 Fonctionnement du système

Une fois les transducteurs connectés au système multivoie, et positionnés sur la structure à étudier, on peut gérer l'ensemble de l'expérimentation via un ordinateur et le logiciel *Matlab*. Le schéma synoptique de la figure 3.14 explique les différentes étapes du procédé et les différentes analyses possibles. Ces dernières ont plusieurs fonctions, à savoir l'observation de la nature des signaux (analyse des spectres, identification des modes, etc.), ou encore la détection et la réalisation d'image d'éventuels défauts. Les capacités de calcul de l'ordinateur et d'acquisition du système *Lecoeur électronique* permettent de réaliser des observations en temps réels qui constituent généralement une première étape dans l'analyse, qui est ensuite approfondie par un post traitement plus poussé. Une fois acquises et éventuellement traitées, les données collectées sont stockées sous forme de fichier *.MAT* lisible par *Matlab*. La capacité de mémoire actuelle des ordinateurs récents ne pose aucune limite au stockage de ces données.

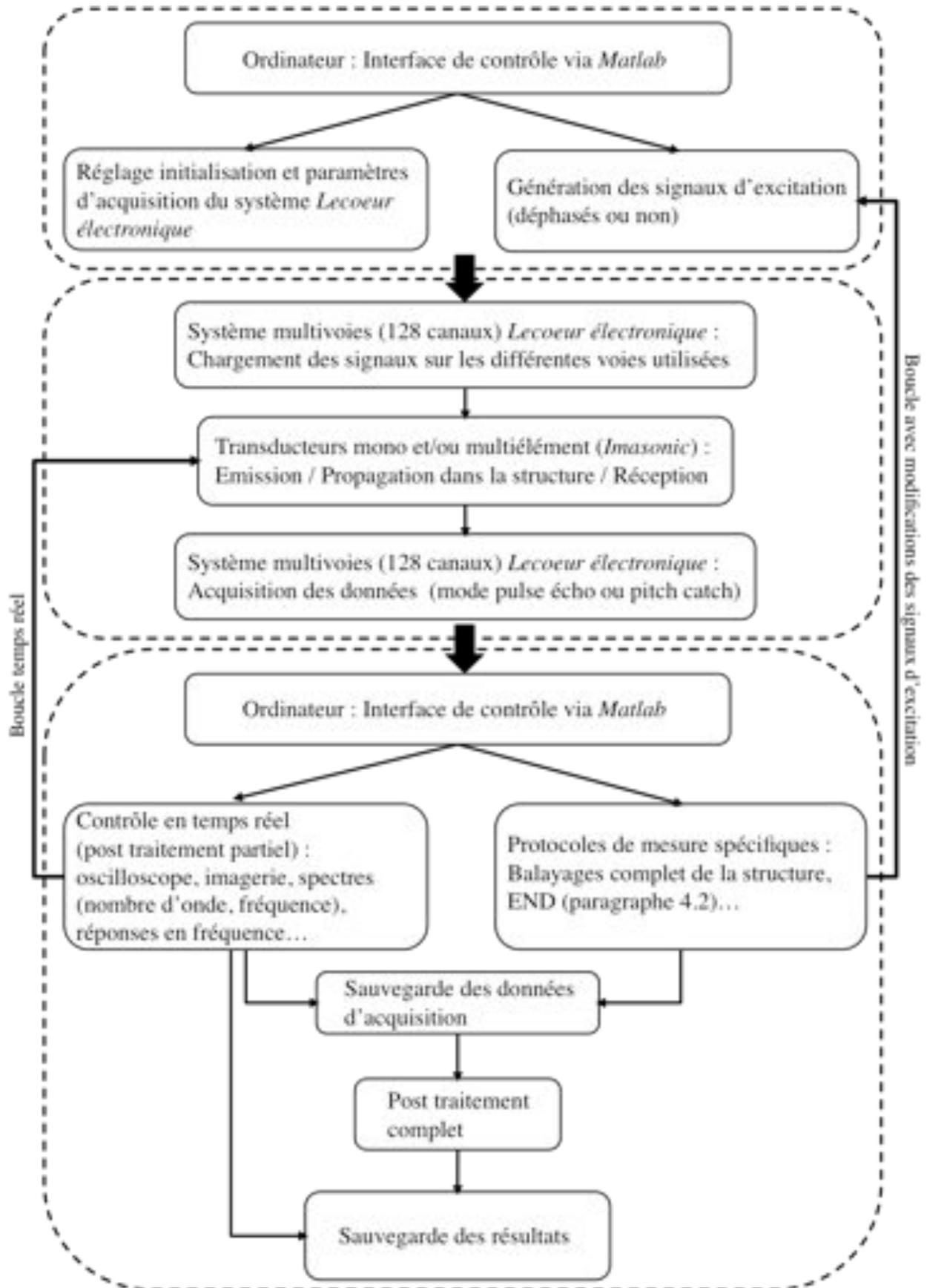


Figure 3.14 : Schéma synoptique du système et de son fonctionnement.

## 3.4 Evaluation expérimentale du procédé

Ce procédé consistant à appliquer le principe du *Phased array* à une sonde multiélément pour la génération-détection d'ondes guidées est évalué expérimentalement sur deux types de structure (aluminium et composite). Ses performances et limites dépendent à la fois des caractéristiques propres du transducteur (géométrie, taille, nombre et répartition des éléments, bande passante, etc.), de la qualité du couplage en surface de la structure (couplage avec du gel), des caractéristiques mécaniques du matériau composant celle-ci, et de la validité de la méthode *Phased array*.

### 3.4.1 Performances et limites du procédé sur aluminium

L'étude réalisée sur l'aluminium, qui est un matériau homogène, isotrope et élastique, permet de considérer un cas simple qui ne fait intervenir, sur la propagation des ondes, aucune influence d'éventuelles symétries (présentes dans le cas de matériaux anisotropes) ou de viscoélasticité. Ceci permet donc de tester les performances et limites liées véritablement au système multiélément et à l'application de la méthode *Phased array*. Deux aspects sont analysés : la sélectivité modale du procédé, c'est à dire la capacité à plus ou moins bien générer ou recevoir, de manière exclusive, un mode de Lamb, et la directivité du procédé, à l'émission ou à la réception, lorsqu'on applique le principe *Phased array* à un réseau 2D d'éléments pour envoyer ou recevoir un mode de Lamb dans ou d'une direction choisie. Une attention particulière est portée sur le couplage entre les transducteurs multiéléments et les différentes structures, à l'aide d'un gel homologué, pour que ce couplage soit toujours considéré homogène et n'ait que peu d'impact sur les mesures réalisées. L'ensemble de ces mesures expérimentales sont effectuées sur une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur dont les caractéristiques mécaniques ont été identifiées (méthodes de caractérisation, paragraphe 2.4.1) et les courbes de dispersion calculées (annexes A et B).

#### 3.4.1.1 Sélectivité modale à l'émission

L'objectif est, dans un premier temps, d'étudier la sélectivité modale à l'émission. Pour cela différents types d'excitation sont effectués en contact sur la plaque d'aluminium. Les sondes multiéléments linéaire et matricielle (table 3.1) sont d'abord utilisées pour générer l'ensemble des modes présents à certaines fréquences (excitation dans la gamme 0.3-0.7 MHz), à savoir les modes de Lamb  $A_0$ ,  $S_0$  et  $A_1$ , via par exemple l'excitation d'un seul de leurs éléments. Puis pour générer, via l'application du principe du *Phased array*, un de ces trois modes. La mesure des signaux est réalisée à l'aide d'une sonde Laser (*Polytec*) fixée sur un support, en translation parallèle au plan de la plaque, pilotée par ordinateur. Ainsi un relevé régulier (tous les 2 mm) du champ de déplacement normal en surface de la plaque est effectué le long de la direction de propagation des ondes (figure 3.15). Grâce à ces mesures il est possible de calculer une transformée de Fourier 2D et de tracer les spectres en nombre d'onde en fonction de la fréquence et d'observer les modes présents [120]. Le pas spatial de mesure est choisi afin de respecter le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, qui requiert au moins trois points de mesure par longueur d'onde, et la longueur de la zone couverte est prise suffisamment grande pour avoir une résolution fine du spectre en nombre d'onde. On a ainsi un nombre d'onde maximal de 1.57 rad/mm, sachant que celui du mode  $A_0$  (ayant la plus petite longueur d'onde), à 0.5 MHz, est de 1.17 rad/mm, et la résolution est de 0.02 rad/mm. Evidemment les mêmes considérations sont à prendre en compte dans le domaine temporel, mais cela ne pose pas de problème sachant que l'on travaille généralement à au moins

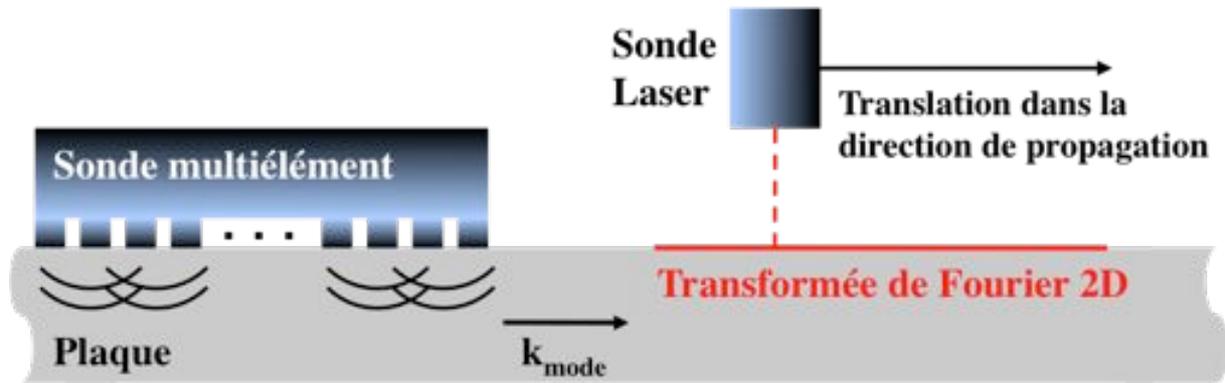


Figure 3.15 : Principe de la mesure de la sélectivité modale d'un système multiélément, à l'émission, appliquant la méthode *Phased array*.

20 MHz de fréquence d'échantillonnage, pour un domaine d'étude compris, au maximum, entre 0.2 et 0.8 MHz, et que la durée des enregistrements est de 200  $\mu s$ . Ces différentes mesures permettent, dans un premier temps, de comparer la sélectivité modale du procédé de génération avec le résultat du cas classique d'un monoélément, excitant l'ensemble des modes. Dans un deuxième temps, grâce à l'emploi des deux types de sonde (linéaire et matricielle) il est possible de comparer des configurations différentes (pour des excitations multiéléments), en terme de répartition, nombre et taille d'éléments et d'en évaluer l'impact sur la sélectivité. Enfin d'analyser l'effet sur la sélectivité de l'implémentation de valeurs inexacts des courbes de dispersion dans le principe du *Phased array*. Il faut noter que dans l'analyse des résultats, une marge de tolérance est à prendre en compte. En effet la répétabilité des mesures n'est pas parfaite. Différentes mesures effectuées, pour un même cas, peuvent présenter des variations d'amplitudes dues à la variabilité du couplage entre chaque mesure. De ce fait, on constate que dans les spectres, normalisés par rapport à l'amplitude du pic le plus élevé (amplitude maximale) à chaque mesure, les amplitudes des pics secondaires peuvent avoir une variation allant jusqu'à 3% de cette amplitude maximale. Cela donnant alors, sur une échelle en décibel entre 0 et -20 dB, une variation allant jusqu'à  $\pm 2$  dB.

Le signal d'excitation employé pour les premières mesures est un burst (sinusoïde modulée par une gaussienne) de 12 cycles, centré à 0.5 MHz, soit ayant une bande fréquentielle de 0.06 MHz à -3 dB. A cette fréquence centrale, les modes de Lamb en présence sont donc  $A_0$  ( $\lambda \approx 5.4$  mm),  $S_0$  ( $\lambda \approx 9.6$  mm) et  $A_1$  ( $\lambda \approx 18.5$  mm). La première mesure consiste à exciter un seul élément de la sonde matricielle afin d'observer l'excitabilité de ces différents modes. Le résultat obtenu (figure 3.16.a), dont les amplitudes sont normalisées par rapport à celle du mode dominant (amplitude du déplacement normal en surface), montre que le mode  $S_0$  a l'excitabilité la plus élevée, le mode  $A_0$  est à -12 dB (4 fois inférieur au mode  $S_0$ ) et le mode  $A_1$  à -18 dB (8 fois inférieur au mode  $S_0$ ). La figure 3.16.b et la figure 3.16.c donnent les composantes normales et tangentielle théoriques des champs de déplacement des modes dans l'épaisseur de la plaque à 0.5 MHz. Ces champs sont comparables car normalisés en puissance, c'est à dire qu'ils représentent le déplacement de chacun des modes dont la puissance surfacique (sur une section du guide d'onde) est de 1 W/mm<sup>2</sup>. On s'intéresse en particulier aux déplacements théoriques normaux en surface du guide (abscisse à 0 ou 4 mm sur la figure 3.16.b), car en les comparant avec les valeurs expérimentales, on peut déterminer les niveaux relatifs des modes en terme de puissance. On constate alors dans le premier cas expérimental (figure 3.16.a), qui sert de référence, que le mode  $S_0$  est 4 fois supérieur, en terme de puissance, au mode  $A_0$ , puisque d'après les courbes théoriques leurs déplacements normaux ont la même amplitude à puissance égale. De même le mode  $S_0$  est 4 fois supérieur en puissance au mode  $A_1$  et le mode  $A_0$  a la même puissance que le mode  $A_1$ . En plus de la

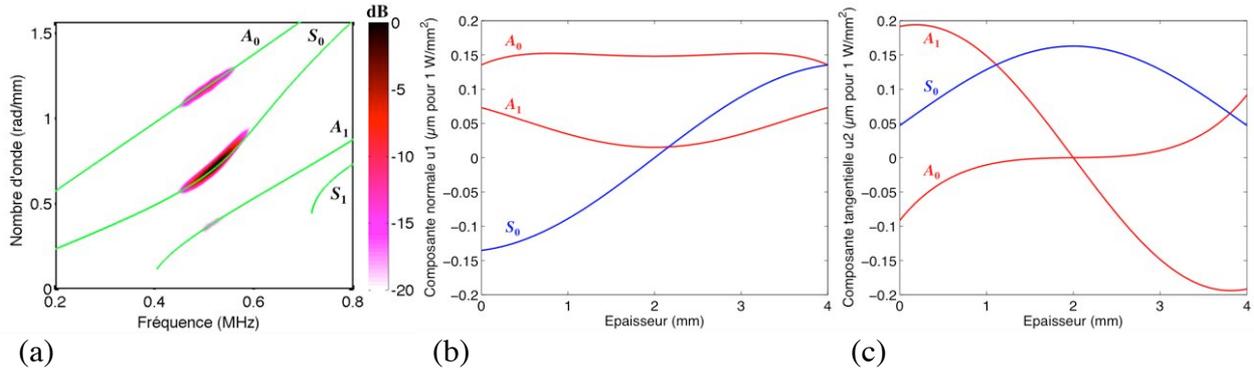


Figure 3.16 : Excitabilité des modes de Lamb, à  $0.5 \text{ MHz}$ , d'une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur : (a) résultat de l'excitation par un élément piézoélectrique en contact, les amplitudes sont normalisées par celle du mode dominant, (b) courbes théoriques de la composante normale des champs de déplacement normalisés en puissance, (c) courbes théoriques de la composante tangentielle des champs de déplacement normalisés en puissance.

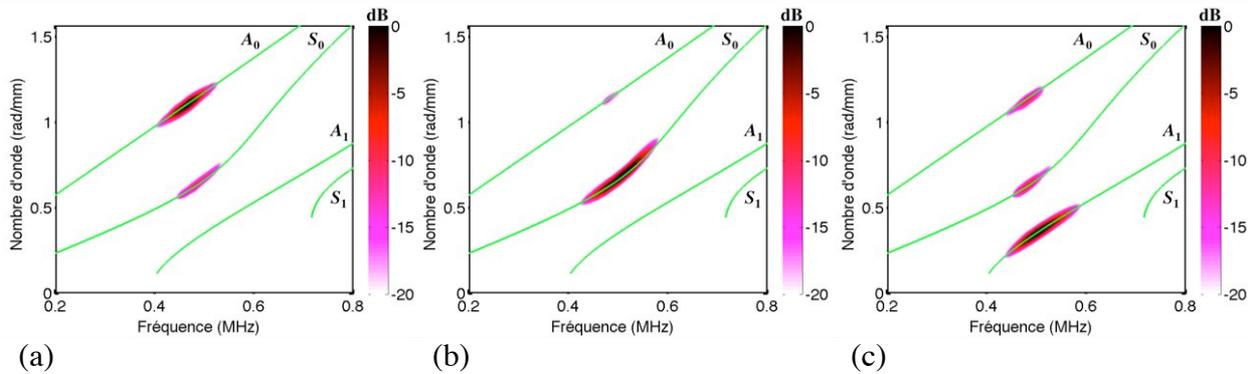
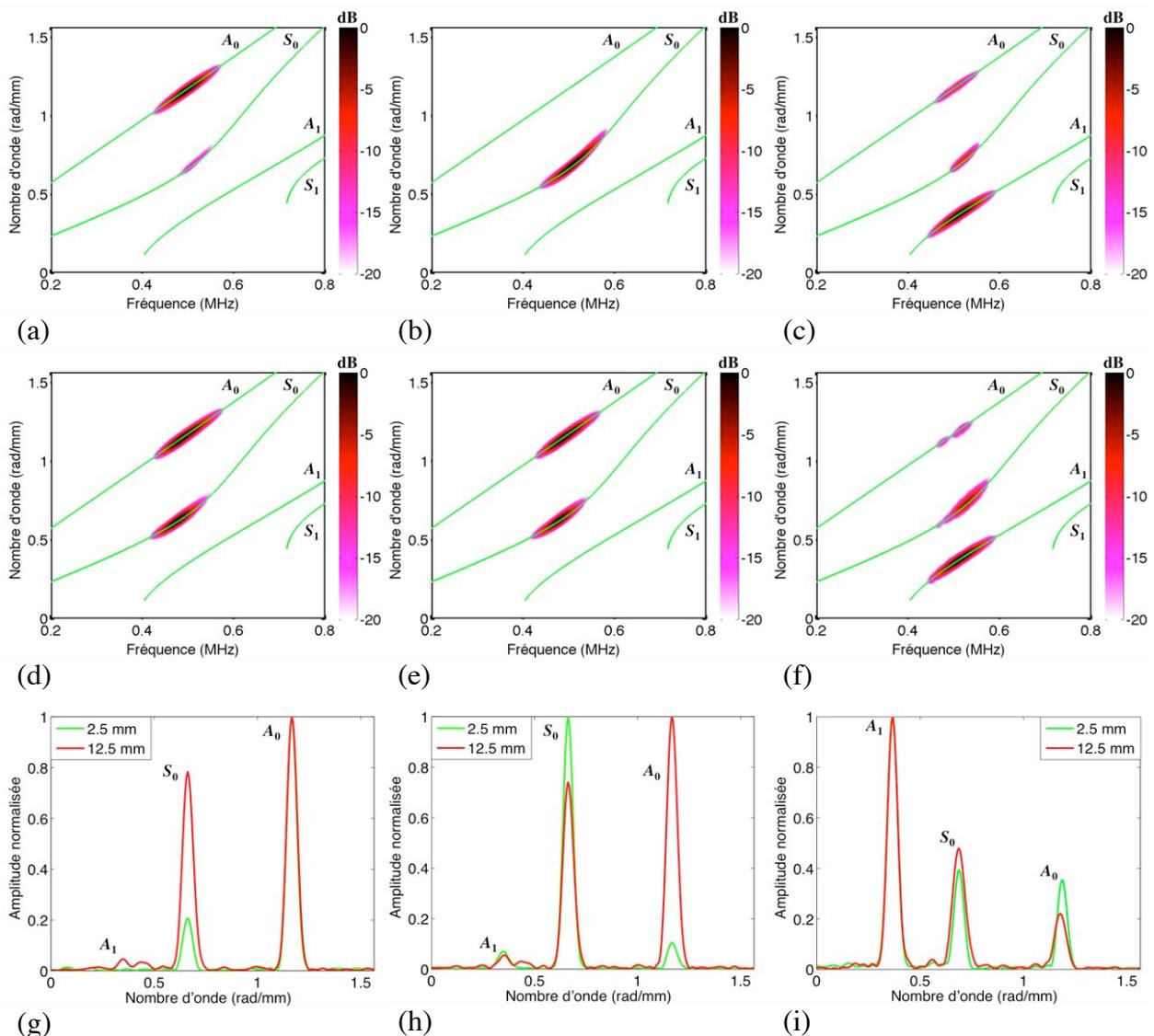


Figure 3.17 : Excitation des modes de Lamb d'une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, à  $0.5 \text{ MHz}$ , par la méthode *Phased array* dans la direction  $0^\circ$  de la sonde multiélément matricielle : (a) mode  $A_0$ , (b) mode  $S_0$ , (c) mode  $A_1$ .

détermination des rapports d'excitabilité des différents modes, ce premier résultat démontre la possibilité pour une sonde en couplage gel, donc ayant une action sur les déplacements normaux, d'exciter l'ensemble des modes de Lamb dans le domaine fréquentiel d'étude. A présent, en utilisant le principe du *Phased array* avec la sonde matricielle, nous allons voir, en comparaison avec le cas précédent, la capacité du système à être sélectif à un mode. La figure 3.17 montre les résultats obtenus lorsque la sonde génère, à  $0.5 \text{ MHz}$ , chacun des trois modes présents, dans la direction  $Y$  (ou  $\theta = 0^\circ$ ) parallèle à l'un des bords de la sonde (voir figure 3.5 pour la définition du repère de la sonde matricielle). La figure 3.17.a, correspondant à l'excitation du mode  $A_0$ , indique que celui-ci est produit avec une amplitude  $12 \text{ dB}$  supérieure à celle du  $S_0$ , qui est le premier mode secondaire (non désiré), et avec une amplitude de  $30 \text{ dB}$  supérieure à celle du  $A_1$ . D'après les courbes théoriques de champs de déplacement, on a donc un mode  $A_0$  qui se retrouve avec une puissance 4 fois supérieure à celle du mode  $S_0$ , c'est à dire le rapport inverse au cas de référence, et une puissance 16 fois supérieure à celle du mode  $A_1$ . La méthode a donc bien permis de fortement diminuer la puissance des mode  $S_0$  et  $A_1$ , et d'augmenter celle du mode  $A_0$ . De la même manière, pour l'excitation du mode  $S_0$  (figure 3.17.b), celui-ci est  $16 \text{ dB}$  supérieur au mode  $A_0$  et  $30 \text{ dB}$  supérieur au mode  $A_1$ , soit respectivement un rapport en puissance de 6.5 et de 16. Enfin pour l'excitation du mode  $A_1$  (figure 3.17.c) celui-ci est  $10$  et  $9 \text{ dB}$  supérieur, respectivement, au mode  $A_0$  et au mode  $S_0$ , soit un rapport en puissance, avec ces deux autres modes, environ égal à 6. Ces résultats, en comparaison avec le cas de référence, montrent clairement que la méthode permet de

fortement amplifier, en terme de puissance, un mode par rapport aux autres, en créant des interactions constructives pour le mode désiré et des interactions destructives pour les autres modes. En terme d'amplitude de déplacement normal, on voit que le mode  $A_1$  est pénalisé du fait d'une faible composante en surface, mais que la méthode permet tout de même de générer ce mode avec une amplitude  $10\text{ dB}$  supérieure à celles des autres modes. On a donc une bonne sélectivité modale dans les trois cas. Même si l'on peut correctement évaluer l'amplification d'un mode, obtenue via la méthode *Phased array*, grâce à l'évaluation des rapports en terme de puissance, expérimentalement on s'intéresse surtout aux rapports direct des amplitudes des signaux mesurés des différents modes. Ainsi pour évaluer la sélectivité modale, on s'appuie principalement sur ce dernier aspect quantitatif.

Nous allons, à présent, comparer des configurations différentes d'excitations multiéléments, en terme de répartition (plus précisément le pas inter éléments dans la direction de propagation), nombre d'éléments actifs et dimension de ces éléments dans la



direction de propagation (grâce aux deux types de sonde qui ont des géométries différentes), et observer l'impact sur la sélectivité. Pour étudier différentes répartitions et faire varier le nombre d'éléments actifs, nous utilisons la sonde linéaire dont le réseau dispose d'un pas spatial égal à  $2.5\text{ mm}$  et d'un grand nombre d'éléments (128) dans une même direction (table 3.1). Les mesures de la figure 3.18 (effectuées avec la sonde Laser) sont réalisées en excitant un même nombre d'éléments de la barrette (13 éléments), mais avec deux pas spatiaux différents :  $2.5\text{ mm}$  et  $12.5\text{ mm}$ . Les graphiques de la figure 3.18.a à la figure 3.18.f montrent le niveau des modes sur l'ensemble du domaine fréquentiel  $[0.4-0.6]\text{ MHz}$  et les graphiques de la figure 3.18.g à la figure 3.18.i montrent plus précisément la différence en terme de rapport d'amplitude (spectre en nombre d'onde du déplacement normal en surface de la plaque) des modes, à  $0.5\text{ MHz}$ , suivant le pas spatial. La première ligne, correspondant au pas de  $2.5\text{ mm}$ , indique que la sélectivité modale de cette sonde est très bonne, avec pour le mode  $A_0$  une amplitude de  $16\text{ dB}$  supérieure aux autres, pour  $S_0$  de  $20\text{ dB}$  et pour  $A_1$  de  $8\text{ dB}$ . La deuxième ligne et la comparaison faite à la troisième ligne montrent une forte perte de

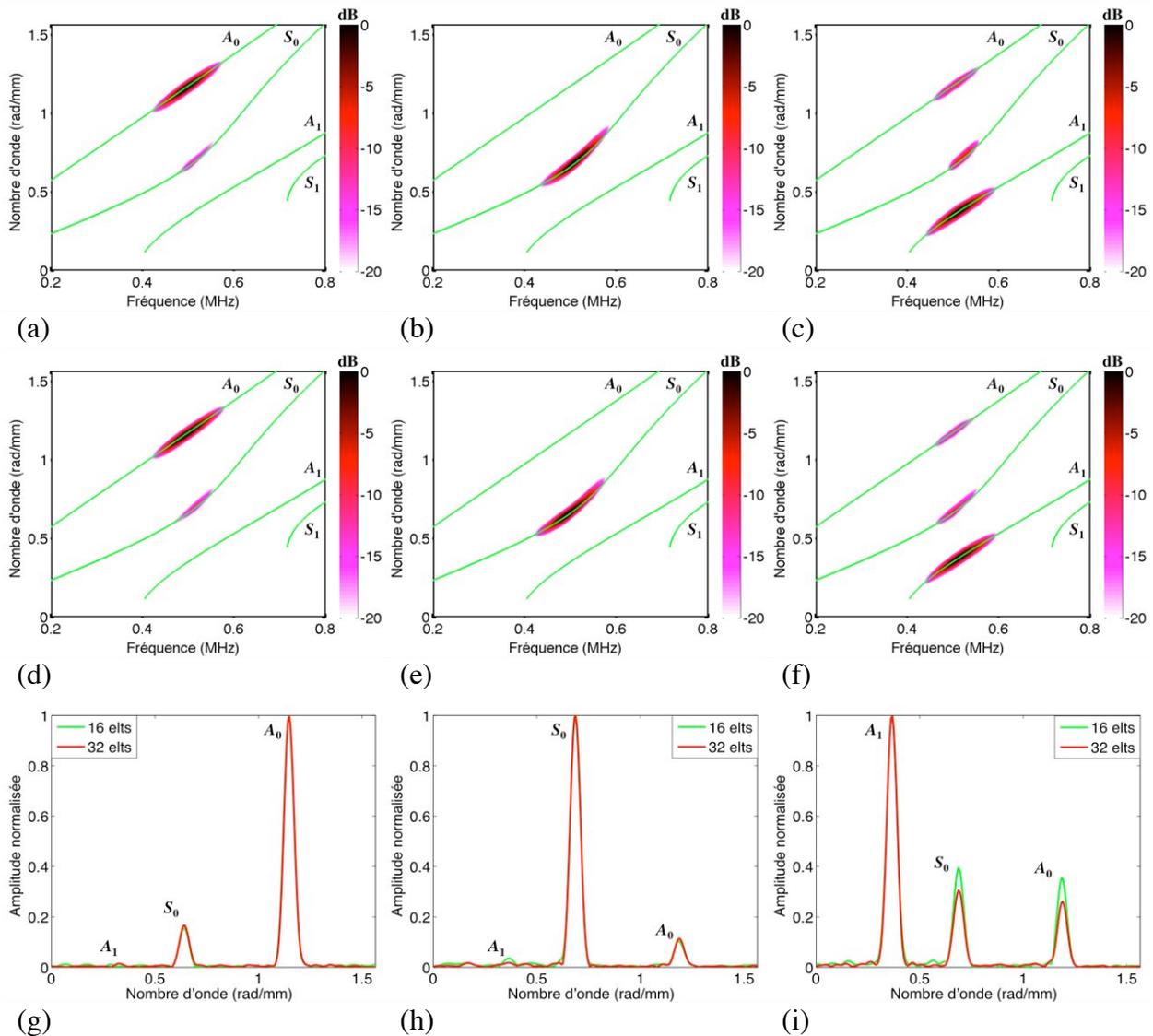


Figure 3.19 : Excitation des modes de Lamb d'une plaque d'aluminium de  $4\text{ mm}$  d'épaisseur, autour de  $0.5\text{ MHz}$ , par la méthode *Phased array* appliquée à la sonde multiélément linéaire, avec pour chaque colonne respectivement le mode  $A_0$ ,  $S_0$  et  $A_1$  : (a) (b) (c) avec 16 éléments actifs, (d) (e) (f) avec 32 éléments actifs, (g) (h) (i) superposition des deux cas pour la fréquence  $0.5\text{ MHz}$ .

sélectivité lorsque le pas inter éléments est augmenté à  $12.5 \text{ mm}$ . En effet, l'amplitude de  $A_0$  est à présent à peine  $2 \text{ dB}$  supérieure à celles des autres modes (figure 3.18.g). Celle de  $S_0$  devient  $2 \text{ dB}$  inférieure à celle du mode dominant (figure 3.18.h). Et celle de  $A_1$  est  $6 \text{ dB}$  supérieure aux autres. La génération des modes  $A_0$  et  $S_0$  est donc fortement perturbée, seul le mode  $A_1$  dont la longueur d'onde est plus grande que le pas spatial conserve une amplitude dominante. On constate donc qu'une synchronisation entre les phases des signaux d'excitation envoyés aux divers éléments n'est pas suffisante, mais qu'un échantillonnage spatial convenable le long de la direction de propagation est nécessaire. Pour obtenir une bonne sélectivité modale le pas spatial entre deux éléments doit être inférieur à la longueur d'onde du mode désiré. En reprenant la figure 3.17 pour le cas de la sonde matricielle dont le pas spatial est de  $5 \text{ mm}$  (la vérification est aussi faite avec la sonde linéaire), on voit que ce critère est suffisant, mais il peut être judicieux de respecter au moins trois éléments par longueur d'onde (principe d'échantillonnage classique), c'est à dire de travailler avec des longueurs d'onde qui tendent à être au moins deux fois plus longues que le pas spatial du réseau.

Les résultats de la figure 3.19 permettent de comparer la sélectivité lorsque l'on utilise 16 puis 32 éléments de la barrette. Le pas spatial est de  $2.5 \text{ mm}$  dans les deux cas et le signal d'excitation est le même que pour les mesures précédentes (avec la sonde Laser à la réception). L'idée est de vérifier si l'on change la qualité de la sélectivité en créant plus ou moins d'interactions avec un nombre différent d'éléments. On constate que l'augmentation du nombre d'éléments actifs n'influence pas la génération des modes  $A_0$  et  $S_0$  et très faiblement celle du  $A_1$ , dont le rapport avec les autres modes augmente de  $2 \text{ dB}$ . Ceci correspond à la marge de tolérance (évoquée plus haut) et ne peut donc pas être pris en compte. Par contre, pour obtenir une qualité optimale, en terme de sélectivité modale, il a été vérifié expérimentalement qu'il est nécessaire d'avoir suffisamment d'éléments (tout en respectant un échantillonnage convenable) pour couvrir l'espace de 2 fois la longueur d'onde du mode en question. Utiliser un nombre plus important d'éléments présente tout de même l'intérêt d'amplifier les modes dans la structure et donc d'augmenter, par exemple, la distance de propagation des modes.

Comparons à présent la sélectivité de deux réseaux dont les éléments ont une dimension dans la direction de propagation qui est différente. Le but est de vérifier si la méthode utilisant un système ayant des éléments dont la dimension proche de la longueur d'onde de certains modes, tout en restant inférieure à celle-ci, peut engendrer une sélectivité moins bonne ou non que celle d'un système avec des éléments plus petits. Pour cela nous utilisons la sonde linéaire, qui possède des éléments de  $2 \text{ mm}$  de long dans cette direction, et la sonde matricielle dont les éléments mesurent  $4 \text{ mm}$ . Le signal d'excitation demeure le même que pour les cas précédents, et le pas spatial inter éléments adopté est de  $5 \text{ mm}$  pour les deux sondes. La matrice n'ayant que 11 éléments piézoélectriques dans sa longueur, nous n'utilisons, pour la barrette, que 11 éléments. Les résultats obtenus sur la figure 3.20 montrent, en tenant compte de la marge de tolérance (variation de  $\pm 2 \text{ dB}$ ), qu'il n'y a quasiment aucune différence pour la génération des modes  $S_0$  et  $A_1$ . La différence notable concerne la génération du mode  $A_0$ , et plus précisément de son rapport d'amplitude avec le mode  $S_0$  qui varie de  $4 \text{ dB}$ . Malgré un pas spatial inférieur à la longueur d'onde ( $\lambda \approx 5.4 \text{ mm}$ ), la dimension de l'élément ( $4 \text{ mm}$ ), qui est proche de celle-ci, perturbe quelque peu l'application du principe du *Phased array*. En effet, plus cette dimension est proche de la longueur d'onde et plus le mode risque d'être atténué. On obtient alors une sélectivité moins performante.

Ces premières mesures ont permis de vérifier l'influence, sur la sélectivité modale, de certains paramètres d'un système multiélément auquel est appliquée la méthode *Phased array*, à l'émission. Pour réaliser une étude plus approfondie sur le degré d'impact de ces

différents paramètres sur la sélectivité modale, une étude paramétrique numérique, basée par exemple sur un modèle éléments finis est nécessaire, et permettrait une optimisation du procédé. C'est à dire que l'on pourrait trouver les paramètres optimaux qui permettraient d'obtenir la meilleure sélectivité modale. L'élaboration d'un tel modèle numérique est l'objet du chapitre 5.

Les mesures suivantes effectuées sur la sélectivité modale, à l'émission, permettent de voir l'impact d'une variation des courbes de dispersion sur le principe du *Phased array*. Deux types de variations sont observés correspondant soit à des erreurs commises sur la détermination des modules de viscoélasticité (décalage en vitesse, figure 3.22) des matériaux étudiés, soit à des erreurs de mesure de l'épaisseur de la plaque (décalage en fréquence, figure 3.23). En effet, un manque de précision sur ces grandeurs, peut engendrer des erreurs significatives sur les courbes de vitesses de phase (figure 3.21).

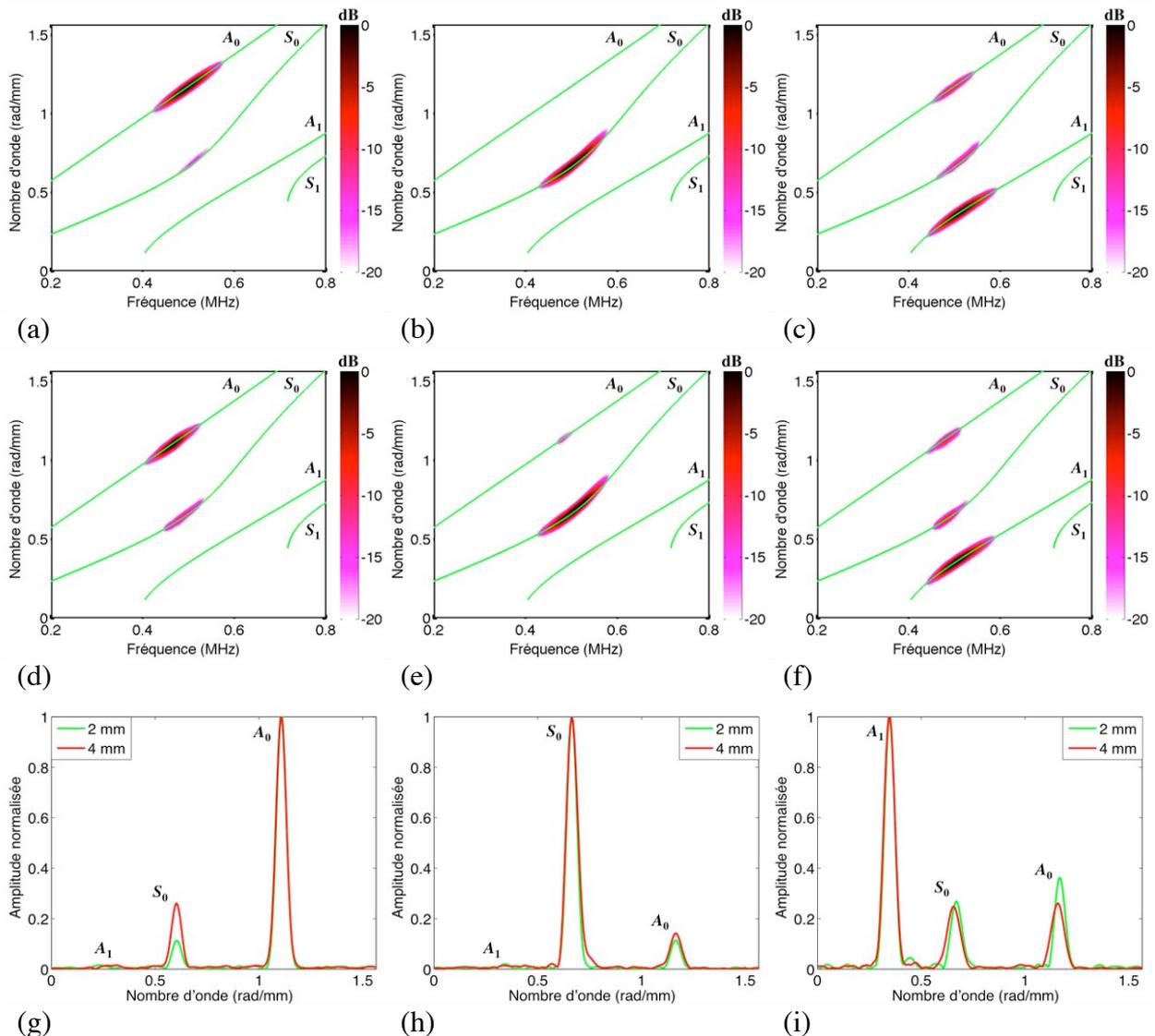


Figure 3.20 : Excitation des modes de Lamb d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, autour de 0.5 MHz, par la méthode *Phased array*, avec pour chaque colonne respectivement le mode  $A_0$ ,  $S_0$  et  $A_1$  : (a) (b) (c) avec des éléments de 2 mm, (d) (e) (f) avec des éléments de 4 mm, (g) (h) (i) superposition des deux cas pour la fréquence 0.5 MHz.

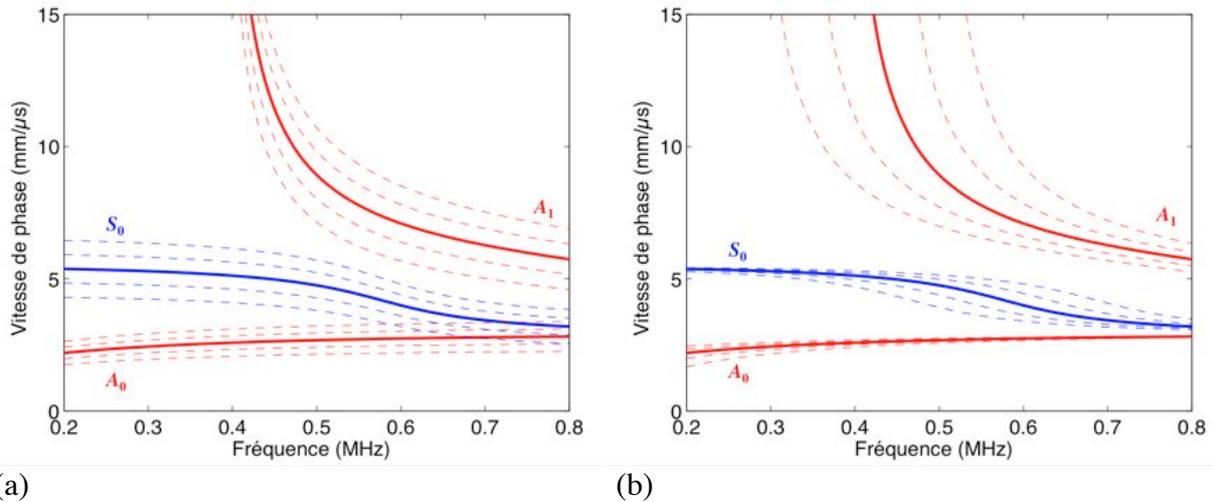


Figure 3.21 : Courbes de dispersion des vitesses de phase des modes de Lamb d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, avec décalages possibles dus aux erreurs de mesures sur les caractéristiques de la plaque : (a) décalage en vitesse (-20 à 20%), erreur sur les modules de viscoélasticité, (b) décalage en fréquence (-20 à 20%), erreur sur l'épaisseur de la plaque.

La figure 3.22 montre les résultats de l'étude de variation des valeurs des vitesses de phase des courbes de dispersion (figure 3.21.a). Les différents modes ont été générés avec une excitation de type burst de 24 cycles, centrée à 0.55 MHz, ayant une bande fréquentielle très étroite de 0.03 MHz à -3 dB. Pour ce faire, la méthode *Phased array* a été appliquée à 32 éléments de la sonde linéaire. Les différents cas observés pour chaque mode sont réalisés en décalant les valeurs de la vitesse de phase de -20, -10, 0, +10 et +20% de la valeur établie lors de la caractérisation. Les résultats sont présentés sous forme de spectres en nombre d'onde à la fréquence 0.55 MHz. D'une part ils sont normalisés pour chaque cas d'étude (-10%, 0%, 10%, etc.), ce qui permet de comparer la sélectivité modale, c'est à dire pour chaque cas le niveau relatif des différents modes entre-eux (exemple figure 3.22.a). D'autre part ils sont normalisés sur l'ensemble des trois cas réunis dans chaque graphique, ce qui permet de comparer cette fois l'amplitude des modes entre les trois différents cas (exemple figure 3.22.d). Comme on le voit de la figure 3.22.a à c, une variation de  $\pm 10\%$  sur la vitesse de phase ne modifie la sélectivité d'aucun des trois modes, par contre, on voit une variation sensible des amplitudes des modes (figure 3.22.d à f). Ainsi, même si la sélectivité demeure identique à cette fréquence, on perd de l'énergie sur les modes, par rapport au cas sans variation (0%). Seule exception, la variation à +10% du mode  $S_0$  qui donne une amplitude plus élevée que le cas de référence. Comme le montrent également les variations étudiées par la suite avec les décalages en fréquence (figure 3.23.e et figure 3.23.k), cette exception pourrait être due à une erreur éventuelle sur la mesure de l'épaisseur lors de la caractérisation ou à une non homogénéité de l'épaisseur sur l'ensemble de la structure, à laquelle le mode  $S_0$  est très sensible du fait que l'on travaille sur une zone fréquentielle où il est très dispersif. Une variation de  $\pm 20\%$  sur la vitesse de phase a, par contre, un impact assez fort sur la sélectivité (figure 3.22.g à i) des modes  $A_0$  et  $S_0$ . Ce phénomène se remarque lorsque les valeurs des vitesses de phase employée pour un mode se rapprochent de celles d'un autre mode. Au niveau des amplitudes (figure 3.22.j à l), on voit une nette décroissance des modes, également pour le cas +20% du mode  $S_0$ , qui n'est pas perturbé au niveau de la sélectivité (figure 3.22.h), mais qui commence à chuter en amplitude (figure 3.22.k). Pour conserver à la fois une bonne sélectivité modale et une forte amplitude du signal, il faut donc se fixer un intervalle de tolérance inférieur à  $\pm 10\%$ , voir plus strict encore si les courbes de vitesses de phase des différents modes ont des valeurs proches.

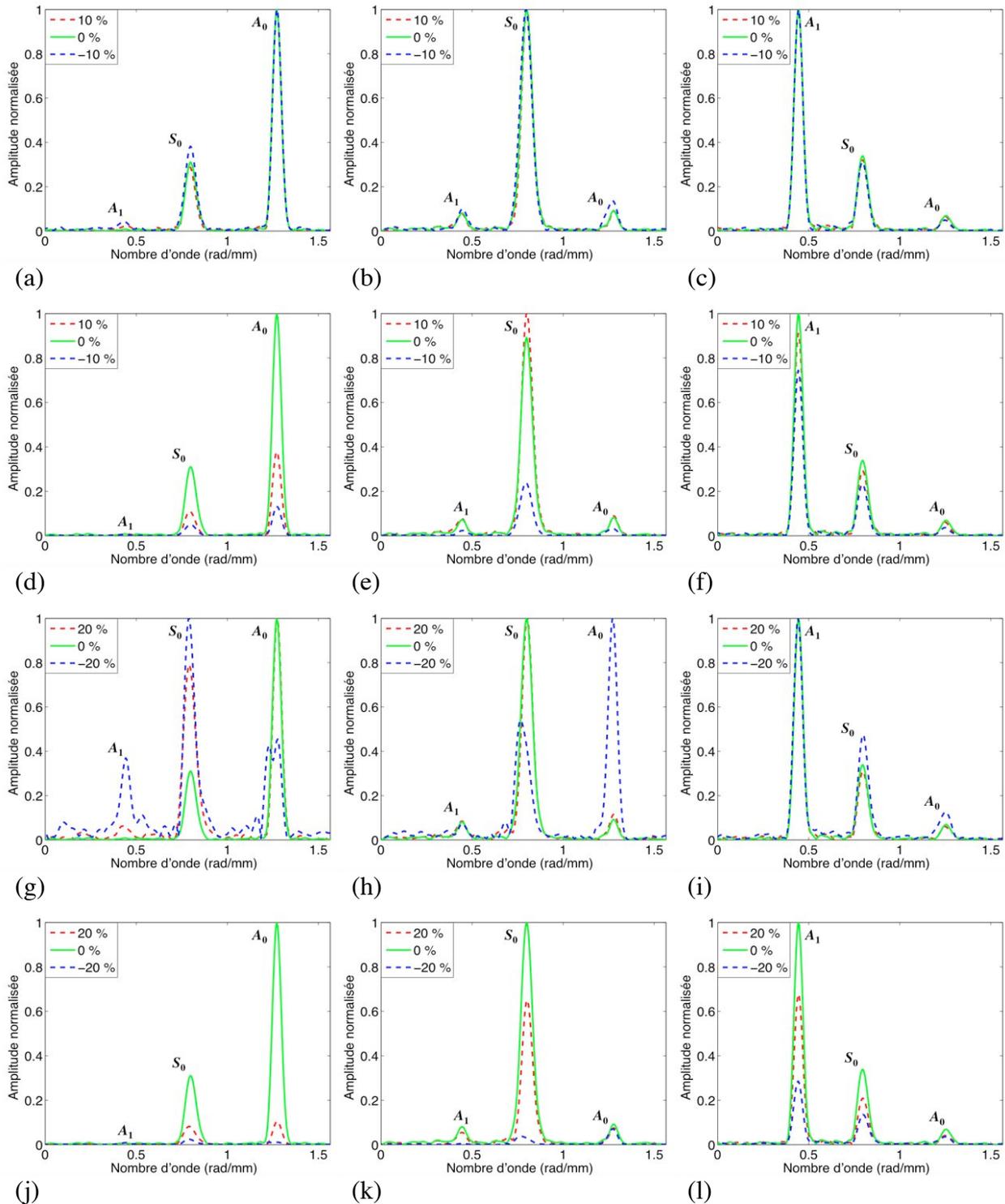


Figure 3.22 : Excitation des modes de Lamb d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, à 0.55 MHz, par la méthode *Phased array* (colonne gauche :  $A_0$ , centre :  $S_0$ , droite :  $A_1$ ), avec variation de l'amplitude des vitesses de phase (-20 à 20%) : (a) (b) (c) (g) (h) (i) amplitudes normalisées sur chacun des trois cas, (d) (e) (f) (j) (k) (l) amplitudes normalisées sur l'ensemble des trois cas.

L'étude de la variation en fréquence a été réalisée de la même manière que précédemment, mais cette fois les différents cas observés pour chaque mode sont réalisés en décalant les valeurs de la vitesse de phase, en fréquence, de -20, -10, 0, +10 et +20% de la valeur de la fréquence centrale d'excitation (figure 3.21.b). On voit immédiatement que cette variation n'a que peu d'effet sur le mode  $A_0$  (figure 3.23.a, d, g, j), que ce soit sur la sélectivité

modale ou l'amplitude des modes. Cela est dû au fait que ce mode est très peu dispersif sur le domaine fréquentiel observé, et que quel que soit le décalage en fréquence appliqué, les valeurs de la vitesse de phase de ce mode restent les mêmes. Le mode  $A_1$  a une sélectivité

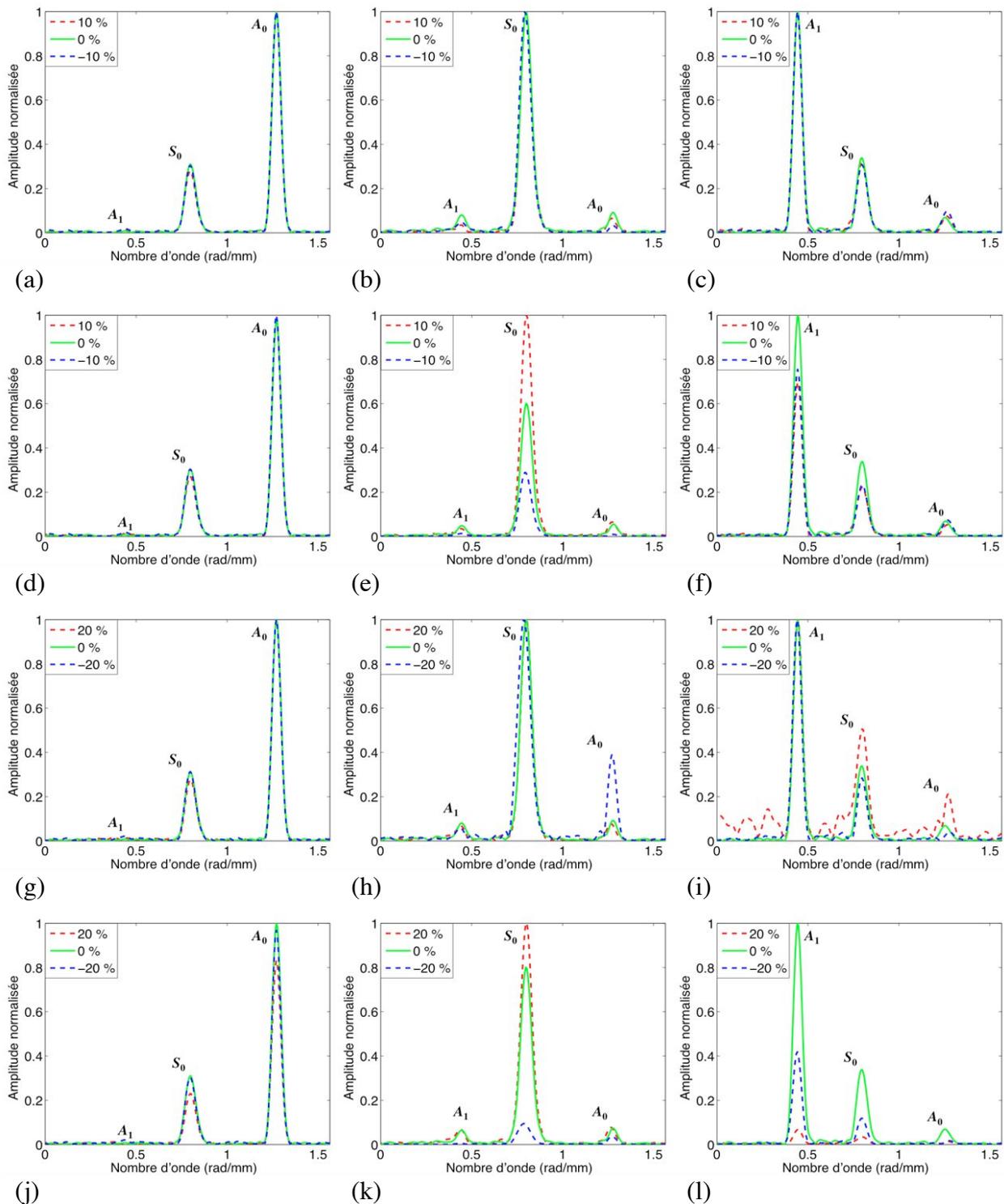


Figure 3.23 : Excitation des modes de Lamb d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, à 0.55 MHz, par la méthode *Phased array* (colonne gauche :  $A_0$ , centre :  $S_0$ , droite :  $A_1$ ), avec décalage en fréquence des vitesses de phase (-20 à 20%) : (a) (b) (c) (g) (h) (i) amplitudes normalisées sur chacun des trois cas, (d) (e) (f) (j) (k) (l) amplitudes normalisées sur l'ensemble des trois cas.

modale perturbée pour le cas  $+20\%$  (figure 3.23.i), car les valeurs de la vitesse de phase, correspondant à la fréquence de coupure de ce mode, sont décalées au niveau de la fréquence centrale d'excitation ( $0.55 \text{ MHz}$ ). On se retrouve avec une variation de la vitesse de phase par rapport au cas de référence qui est plus importante que pour le cas  $-20\%$ , d'où l'impact plus important sur la sélectivité modale. Par contre les amplitudes (figure 3.23.f et figure 3.23.l) sont là encore très sensibles même à  $\pm 10\%$ . Pour le mode  $S_0$ , on retrouve l'augmentation d'amplitude (figure 3.23.e), évoquée dans l'étude des décallages en vitesse pour le cas  $+10\%$  (figure 3.22.e), correspondant certainement, comme il a été dit précédemment, à une variation de l'épaisseur. Là aussi les amplitudes sont très sensibles aux variations de la vitesse de phase (figure 3.23.e et figure 3.23.k). La sélectivité de ce mode est influencée surtout au cas  $-20\%$  (figure 3.23.h), car on franchit la zone de dispersion et les valeurs de la vitesse de phase sont alors très différentes de celles du cas de référence et proches de celles du mode  $A_0$ . Ainsi, comme pour le cas des variations en vitesse, pour avoir une bonne sélectivité des modes et une forte amplitude du signal, il faut se fixer un intervalle de tolérance inférieur à  $\pm 10\%$ .

Le dernier point consiste à voir l'impact sur la prise en compte (ou non) de la dispersion dans la méthode *Phased array*, pour une excitation modale, dans une large bande fréquentielle. En effet, pour un mode guidé très dispersif, lorsque l'on travaille sur un domaine fréquentiel large, la génération du mode, sur l'ensemble de ce domaine, peut être altérée si l'on ne prend pas correctement en compte la variation de sa vitesse de phase dans la méthode du *Phased array*. Pour cela le mode  $S_0$  a été généré par un burst de 3 cycles (bande fréquentielle de  $0.32 \text{ MHz}$  à  $-3 \text{ dB}$ ) à  $0.6 \text{ MHz}$ . Une première mesure (avec sonde Laser) a été réalisée en tenant compte de la variation de la vitesse de phase en fonction de la fréquence (figure 3.24.a), et une deuxième en prenant comme vitesse de phase la valeur à la fréquence centrale (figure 3.24.b). Les amplitudes de ces deux graphiques sont normalisées par rapport à l'amplitude la plus élevée sur l'ensemble des deux mesures. On voit bien que seul le premier cas permet de générer le mode  $S_0$  sur l'ensemble du domaine fréquentiel d'excitation. Les amplitudes du mode à  $0.6 \text{ MHz}$  sont cependant identiques dans les deux cas, et on observe une hausse de l'amplitude aux fréquences proches de la fréquence de résonance du transducteur ( $0.5 \text{ MHz}$ ). La figure 3.24.c montre la bonne sélectivité à la fréquence centrale dans les deux cas. Ne pas prendre en compte la dispersion du mode ne permet donc pas, excepté à proximité de la fréquence centrale, de générer efficacement (avec une amplitude suffisamment élevée) le mode sur l'ensemble du domaine fréquentiel. Un autre risque, qui n'est pas visible ici, est que le fait de prendre une même valeur de la vitesse pour tout le domaine fréquentiel pourrait

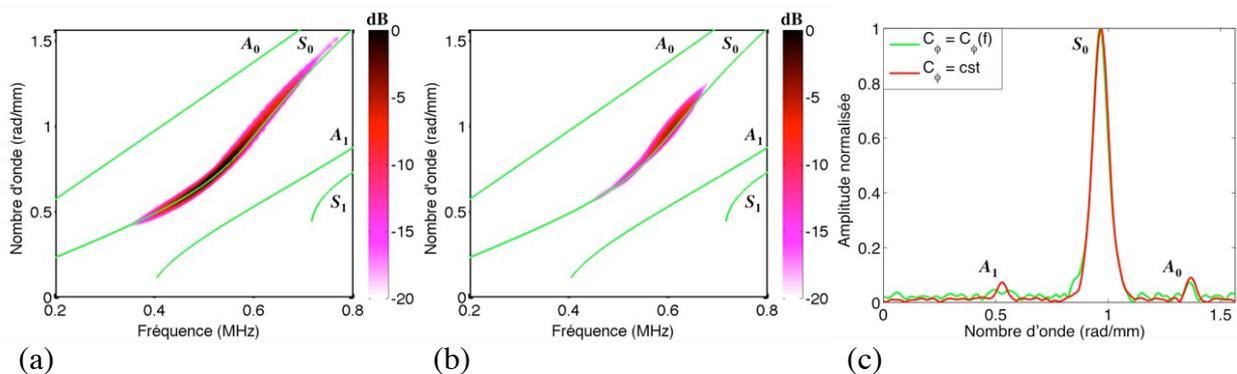


Figure 3.24 : Excitation large bande du mode de Lamb  $S_0$  d'une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, à la fréquence centrale  $0.6 \text{ MHz}$ , par la méthode *Phased array* : (a) avec prise en compte de la dispersion, (b) sans prise en compte de la dispersion (amplitudes normalisées sur l'ensemble des deux cas), (c) superposition des deux cas, à  $0.6 \text{ MHz}$ , avec des amplitudes normalisées sur chacun des cas.

entraîner l'excitation d'autres modes si les courbes de dispersions sont proches, comme on l'a constaté sur l'étude précédente des variations des courbes.

### 3.4.1.2 Sélectivité modale à la réception

L'objectif de cette partie est d'évaluer la sélectivité modale à la réception, c'est à dire la capacité d'une sonde multiélément associée à un traitement basé sur la méthode *Phased array* à distinguer, à la réception, les différents modes excités par une source multimodale (exemple : monoélément piézoélectrique en contact surfacique). De même qu'à l'émission, il s'agit d'appliquer des déphasages entre les divers signaux reçus par les éléments de la sonde pour créer des interactions constructives qui mettent en valeur un mode, et des interactions destructives qui masquent les autres modes. Par contre, cette fois, réalisé après la mesure de tous les signaux (on parle donc de post traitement) par le biais d'une sommation de ces signaux déphasés les uns par rapport aux autres. En isolant un mode et plus particulièrement l'enveloppe de son signal, on peut ainsi, en connaissant les vitesses de propagation (énergie), remonter à la position d'un éventuel réflecteur dans le guide. Cette méthode est donc pertinente pour réaliser la localisation voire l'imagerie d'un défaut. En ce qui concerne une éventuelle étude quantitative des rapports d'amplitude entre les différents modes, on choisirait plutôt de faire une transformée de Fourier 2D, comme celles réalisées au paragraphe précédent. La transformée donnerait des résultats plus fiables, par le biais d'une décomposition du signal, que la sommation de signaux déphasés. Il faut noter qu'il est également possible d'employer la transformée de Fourier 2D avec une sonde multiélément à condition de respecter le critère d'échantillonnage de Nyquist-Shannon (paragraphe 4.2.1). Le principe de déphasage étant le même qu'à l'émission, on ne fera pas d'étude de l'impact des différents facteurs vu à l'émission (nombre d'éléments actifs, pas inter éléments, taille des éléments et variations des courbes de dispersion). Le but est d'observer la performance du procédé pour différentes excitations, en utilisant les deux types de sondes multiéléments (linéaire et matricielle). Pour cela on positionne, sur la plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, les sondes multiéléments face à un transducteur monoélément piézoélectrique (*Olympus*), large bande fréquentielle, en contact, couplé avec du gel, de 25 mm de diamètre et de fréquence centrale 0.5 MHz. L'élément central de la sonde linéaire est à 225 mm du transducteur et celui de la sonde matricielle à 160 mm. On excite le monoélément avec un burst de 24 cycles (très étroit en fréquence) à deux fréquences centrales, à savoir 0.35 et 0.45 MHz. La première manipulation permet d'exciter uniquement  $A_0$  et  $S_0$ , et la deuxième d'exciter  $A_0$ ,  $S_0$  et  $A_1$ . Les fréquences choisies et l'étroitesse des bandes fréquentielles d'excitation permettent de minimiser les phénomènes de dispersion lors de la propagation des modes. Ceci dans le but de pouvoir plus facilement identifier les paquets d'ondes correspondant à chacun des modes et de mieux évaluer la sélectivité à la réception. Les graphiques, de la figure 3.25.a, b, e, f, montrent les signaux mesurés par l'élément central des deux sondes pour les deux fréquences d'excitation. Et ceux, de la figure 3.25.c, d, g, h, montrent les résultats obtenus après application de la méthode *Phased array*, sur l'ensemble des éléments de chaque sonde. Les courbes représentées sont les enveloppes (normalisées) des signaux (pour plus de clarté) résultant de la sommation des différents signaux déphasés de chaque élément. Pour les mesures à 0.35 MHz, il est plus aisé de distinguer les deux modes en présence dans le signal temporel, ce qui permet de constater que la sélectivité modale fonctionne bien. On retrouve, pour chaque mode, des enveloppes de signaux non déformées et dont la position du maximum, dans le temps, coïncide avec la distance et la vitesse de propagation. Les signaux mesurés à 0.45 MHz ne permettent pas de distinguer les trois modes, mais une fois le post traitement réalisé, on obtient à nouveau trois enveloppes régulières dont les maxima coïncident avec les positions estimées dans le temps des trois modes. Les

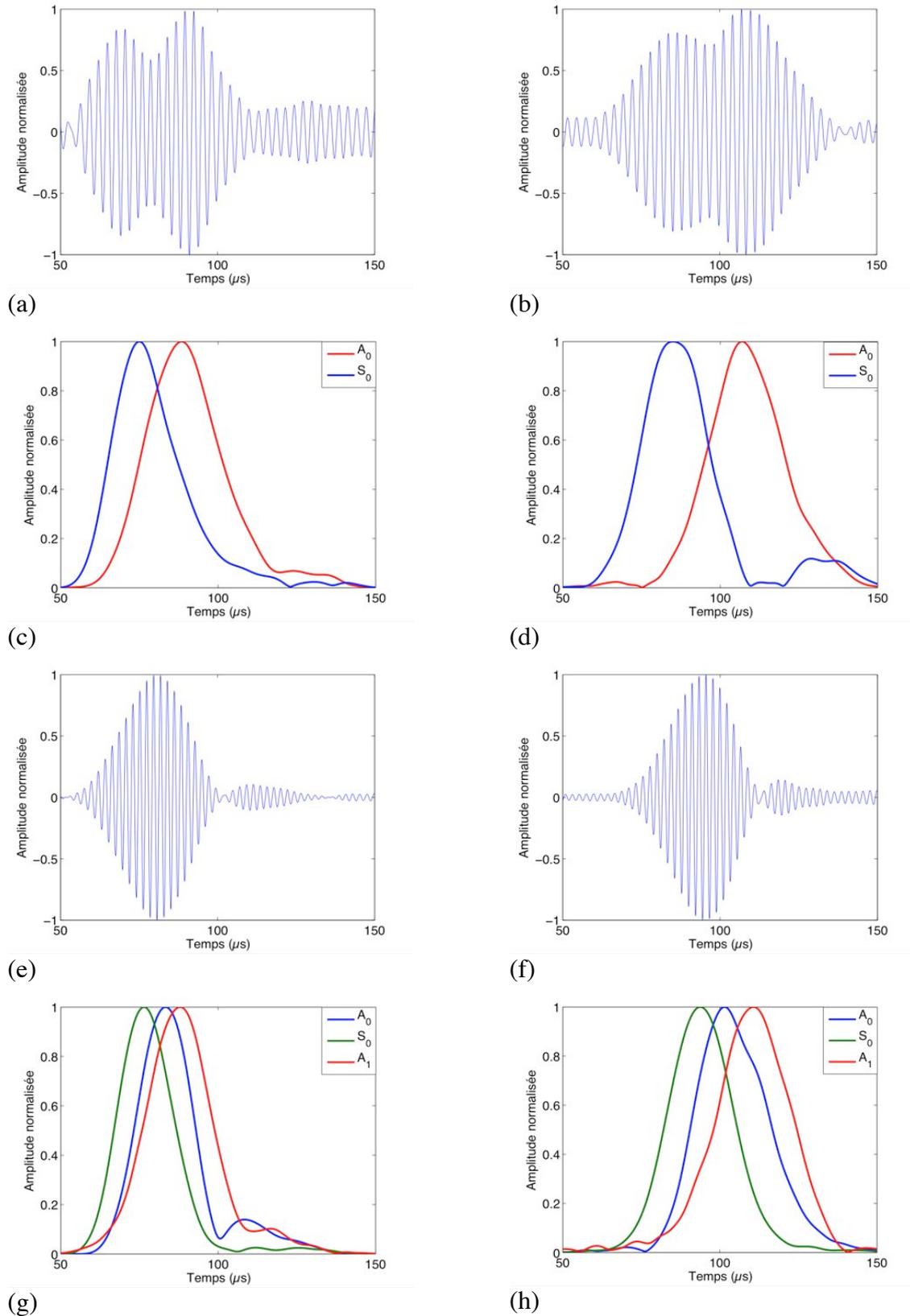


Figure 3.25 : Sélectivité à la réception, sur une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, de la méthode *Phased array* appliquée aux sondes matricielle (colonne de gauche) et linéaire (colonne de droite) : (a) (b) et (e) (f) signaux temporels filtrés et normalisés, à 0.35 et 0.45 MHz, mesurés par l'élément central, (c) (d) et (g) (h) enveloppes des signaux, des modes  $A_0$ ,  $S_0$  et  $A_1$ , obtenues par la méthode, pour les deux cas à 0.35 et 0.45 MHz.

amplitudes résultantes des sommations (amplitudes non normalisées des enveloppes) ne sont pas identiques, car dépendent des interactions plus ou moins constructives et destructives des signaux, et de l'excitabilité des modes, mais une fois normalisées, on voit dans les deux cas un bon rapport, entre le signal du mode et les signaux secondaires parasites, qui est de 18 dB. Pour les deux configurations multiéléments (linéaire et matricielle), l'application de la méthode *Phased array* à la réception permet d'avoir de bons résultats en terme de sélectivité modale.

### 3.4.1.3 Directivité à l'émission

Nous allons aborder à présent le deuxième aspect de l'étude sur les limites et performances du procédé, à savoir la directivité à l'émission et à la réception, lorsque l'on applique le principe *Phased array* à un réseau 2D d'éléments pour envoyer ou recevoir un mode de Lamb dans ou d'une direction particulière. Les mesures expérimentales sont toutes réalisées avec la sonde matricielle piézoélectrique de 121 éléments (table 3.1). Pour l'instant nous nous intéressons à la directivité à l'émission ; le but est de vérifier que la sonde, correctement excitée par la technique *Phased array*, peut générer le faisceau ultrasonore d'un mode dans n'importe quelle direction avec une ouverture angulaire similaire malgré sa géométrie carrée. Les interactions constructives et destructives des signaux appliqués aux différents éléments tendent à favoriser la propagation dans une direction spécifique et l'ouverture du faisceau dépend de la qualité de ces interactions (grâce à un bon couplage et à un bon échantillonnage de la longueur d'onde, du mode excité, qui doit respecter le critère de Nyquist-Shannon, sous peine de voir des faisceaux parasites émis dans d'autres directions), de l'ouverture plus ou moins importante du réseau (liée à sa largeur) et de l'apodisation spatiale employée (figure 3.6). La directivité est donc liée à la sélectivité modale, vue au paragraphe

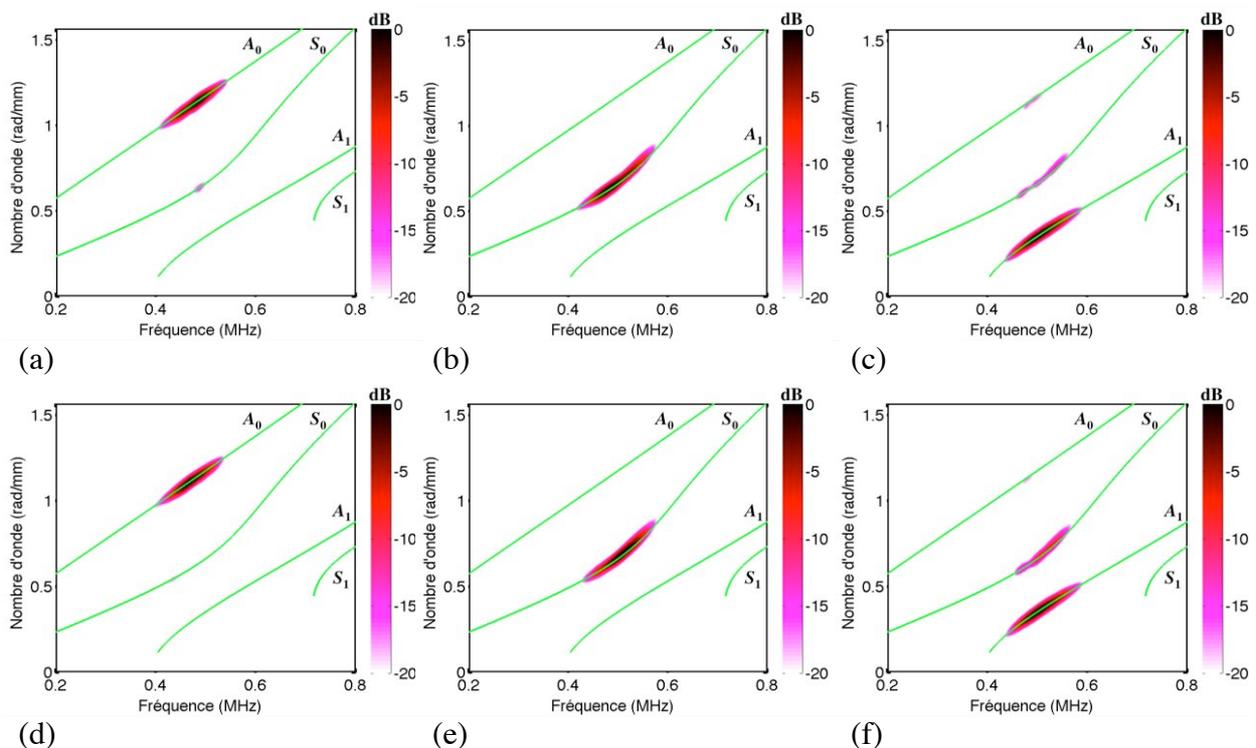
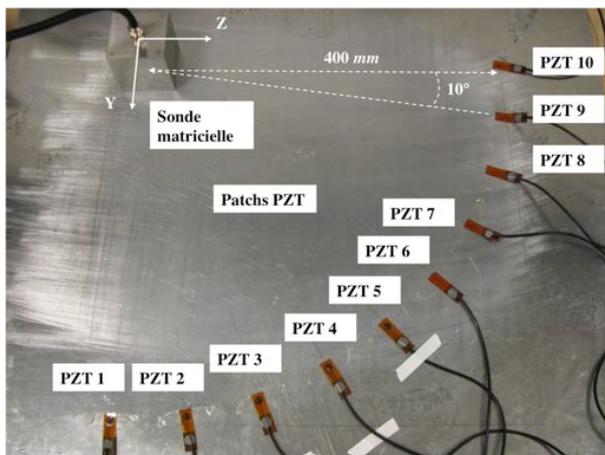


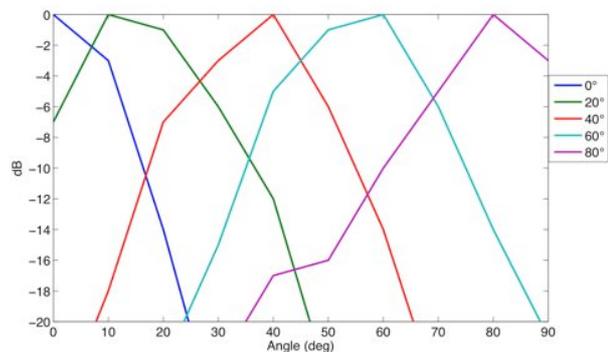
Figure 3.26 : Excitation des modes de Lamb d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, autour de 0.5 MHz, par la méthode *Phased array* appliquée à la sonde matricielle de 121 éléments, dans la direction 45° (première ligne) et 22° (deuxième ligne) de la sonde : (a) (d) mode  $A_0$ , (b) (e) mode  $S_0$ , (c) (f) mode  $A_1$ .

précédent. Préalablement, il est donc nécessaire de vérifier si un réseau matriciel (comme la sonde de forme carrée) conserve une bonne sélectivité modale pour d'autres directions de propagation que celles parallèles à ses axes (figure 3.5). Pour ce faire des mesures des spectres, réalisées le long des directions de propagation avec la sonde Laser, similaires à celles de l'étude sur la sélectivité, sont réalisées pour une excitation des différents modes à  $0.5\text{ MHz}$  (burst de 12 cycles), dans les directions à  $22^\circ$  et  $45^\circ$  de l'axe  $Y$  de la sonde. Les résultats sont regroupés sur la figure 3.26. On constate que les rapports d'amplitude (donc la sélectivité), dans chacun des cas, sont similaires, voire meilleurs que dans le cas d'un tir à  $0^\circ$ . Les modes  $A_0$  et  $S_0$  sont au moins  $18\text{ dB}$  supérieurs aux modes secondaires et le mode  $A_1$  est  $10$  à  $12\text{ dB}$  supérieur. Cette amélioration est due, à un échantillonnage spatial plus fin. En effet, dans la direction à  $45^\circ$  par exemple, l'arrangement en quinconce des éléments a pour effet de réduire la distance inter éléments, par rapport à la direction à  $0^\circ$  par exemple. Ceci tend à améliorer la sélectivité modale.

On a donc bien vérifié que la sélectivité reste performante pour différentes directions. Pour observer les capacités de directivité à l'émission, on travaille dans le cas de la génération du mode  $S_0$  à  $0.35\text{ MHz}$ ; cela permet de considérer un cas où l'ouverture angulaire est importante du fait d'une longueur d'onde plus grande ( $\lambda \approx 15\text{ mm}$ ), mais qui dans le même temps permet d'avoir un bon échantillonnage du mode, ne générant aucun faisceau parasite. La sonde multiélément matricielle est positionnée à l'origine d'un repère cartésien défini sur la plaque d'aluminium de  $4\text{ mm}$  d'épaisseur. Une dizaine de patches (*Acellent*) circulaires piézoélectriques PZT (Titano-Zirconiate de Plomb), sont collés en surface de la plaque sur un quart de cercle autour de la sonde (tous les  $10^\circ$ ) à une distance de  $400\text{ mm}$  (figure 3.27.a). Du fait d'un nombre limité de capteurs identiques, les patches numérotés de 1 à 10 sont pour la moitié (1 à 5) de diamètre  $1/4$  de pouce ( $6.35\text{ mm}$ ) et pour l'autre moitié (6 à 10) de diamètre  $1/8$  de pouce ( $3.17\text{ mm}$ ). Une mesure préliminaire avec une source monoélément est réalisée afin de calibrer les mesures pour l'ensemble des patches. Ceux-ci sont positionnés dans la zone de champ lointain (fronts d'onde plans), dont la limite, définie par la formule (3.1), est d'environ  $100\text{ mm}$  pour la longueur d'onde du mode  $S_0$ . Ainsi pour des directions de tir allant de  $0^\circ$  à  $80^\circ$  par pas de  $20^\circ$ , ce mode est généré par la sonde multiélément excitée via la méthode *Phased array*, par un burst de 12 cycles (bande passante de  $0.05\text{ MHz}$  à  $-3\text{ dB}$ ). Les



(a)



(b)

Figure 3.27 : Directivité à l'émission de la sonde multiélément matricielle excitée par la méthode *Phased array* pour générer le mode  $S_0$  à la fréquence centrale de  $0.35\text{ MHz}$  dans différentes directions de propagation d'une plaque d'aluminium de  $4\text{ mm}$  d'épaisseur : (a) photographie du montage expérimental pour la mesure de la directivité, (b) diagrammes de directivité normalisés en amplitude, pour 5 directions de tir, espacées de  $20^\circ$ , et 10 points de mesure (patches) espacés de  $10^\circ$ .

patches jouent le rôle de récepteurs et le traitement des signaux permet d'identifier les maxima d'amplitude et de créer les diagrammes de directivité. Les résultats de la figure 3.27.b montrent ainsi la similarité, en terme d'ouverture entre les 5 diagrammes obtenus en fonction de la position angulaire de chaque patch, et donc le fait que les faisceaux ultrasonores du mode  $S_0$  ont des fronts d'onde similaires, en champ lointain, quelle que soit la direction du tir de ce mode par la sonde multiélément. Les lobes principaux coïncident avec les directions du tir. Pour certaines directions de tir ( $20^\circ$  ou  $60^\circ$ ), le sommet est plus évasé, car l'amplitude des fronts d'onde est plus irrégulière, du fait, d'un moins bon alignement des éléments du réseau, par rapport aux fronts, à ces angles. Les lobes secondaires sont, quant à eux, au moins  $20\text{ dB}$  inférieurs en amplitude. L'ouverture angulaire du lobe principal est, dans le cas du mode  $S_0$  à  $0.35\text{ MHz}$ , de  $30^\circ$  à  $-6\text{ dB}$ .

L'objectif de ce paragraphe était d'évaluer l'aptitude du procédé à générer un mode de manière quasi identique dans différentes directions autour de la sonde matricielle. Pour cela un cas respectant le critère d'échantillonnage de Nyquist-Shannon a été considéré. En effet, dans d'autres cas, il faut noter que même si la sélectivité modale est bonne, la directivité ne l'est pas forcément car des faisceaux parasites apparaissent si l'on ne respecte pas ce critère de Nyquist-Shannon. Ceci n'est pas abordé ici, mais l'est dans le paragraphe 5.3.3.1, où la comparaison de certaines mesures expérimentales avec des résultats de simulations numériques par éléments finis apporte une bonne illustration de ce phénomène.

### 3.4.1.4 Directivité à la réception

A la réception, le principe *Phased array* est appliqué lors du post traitement. De la même manière que pour la sélectivité, un mode est privilégié, et le déphasage tient également compte de l'angle variable de l'auscultation. Ainsi le système se comporte comme un radar, faisant une inspection sur  $360^\circ$  afin d'identifier la direction de provenance du mode guidé. Le dispositif expérimental utilisé est le même qu'au paragraphe 3.4.1.3, excepté que les rôles de la sonde matricielle et des patches sont inversés. Chacun des patches, positionnés à des directions espacées de  $10^\circ$  les uns par rapport aux autres le long d'un arc de cercle centré sur la sonde multiélément (figure 3.27.a), émet une onde omnidirectionnelle sous l'effet d'un signal d'excitation de 12 cycles et de fréquence centrale  $0.35\text{ MHz}$ . Le post traitement consiste à appliquer, pour chaque tir d'un patch, la méthode *Phased array* à la sonde multiélément réceptrice, en balayant de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ . Cela permet de tracer les diagrammes de directivité, composé des maxima d'amplitude, pour la réception du mode  $S_0$  (figure 3.28.a). On obtient une très bonne similarité entre les différents diagrammes angulaires mesurés, dont les lobes principaux coïncident avec la position angulaire de chaque source. Comme à l'émission, le moins bon alignement des éléments du réseau par rapport aux fronts d'onde, pour certains angles, peut induire un décalage des maxima de  $1^\circ$  ou  $2^\circ$  maximum (par exemple à  $20^\circ$  ou  $30^\circ$ ). L'ouverture angulaire des lobes obtenus pour les différentes directions est également, dans ce cas, de  $30^\circ$  à  $-6\text{ dB}$  d'amplitude. Cette invariance de l'ouverture, pour différentes directions des sources, permet si celle-ci n'est pas trop importante, de détecter et de distinguer différentes sources. Nous voyons dans ce cas de la détection du  $S_0$  que l'ouverture à  $-3\text{ dB}$  est de  $18^\circ$  à  $400\text{ mm}$ .

Les trois patches 1, 4 et 7 sont excités simultanément. La connaissance des vitesses d'énergie permet, en post traitement, de créer une image des sources dans le plan de la plaque ( $Y, Z$ ). Comme on le voit sur la figure 3.28.b, les trois sources sont bien distinguées et leurs positions respectives, par rapport à la sonde, coïncident bien avec la réalité. Les amplitudes de l'image sont normalisées par rapport à la source la plus puissante. L'image établie à l'aide de la sonde multiélément a cependant des limites de résolution, ici à  $-3\text{ dB}$ . En effet l'image de

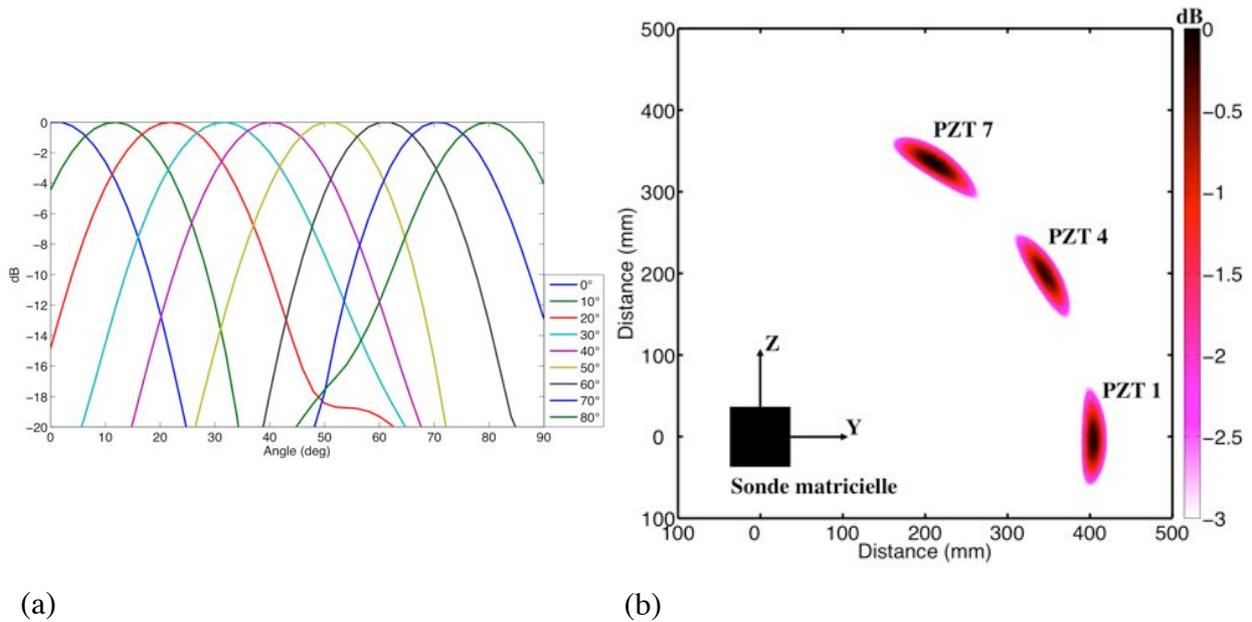


Figure 3.28 : Directivité angulaire d'un sonde multiélément matricielle réceptrice avec application de la méthode *Phased array* pour détecter le mode  $S_0$  à la fréquence centrale de  $0.35 \text{ MHz}$  dans une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur pour différentes directions de propagation : (a) diagrammes de directivité (normalisés en amplitude) pour différentes positions angulaires de la source, (b) image, via la détection du mode  $S_0$ , de trois sources émettant simultanément.

chaque source a une dimension de  $100 \text{ mm}$  dans le sens transverse à la direction de propagation et de  $20 \text{ mm}$  dans le sens de la propagation. Ceci est dû respectivement à l'ouverture du faisceau et à la longueur d'onde du mode.

### 3.4.2 Performances et limites du procédé sur composite

Après avoir analysé les capacités du procédé sur un matériau métallique isotrope, regardons à présent si ses performances demeurent sur une structure composite. En travaillant avec ce type de matériau, les principales limites qui risquent d'affecter le procédé sont la viscoélasticité, qui atténue plus ou moins fortement la propagation des modes, et l'anisotropie du matériau qui privilégie certaines directions de propagation de l'énergie. Comme il a été expliqué au paragraphe 3.2.1.3, on ne travaille que dans les directions où les vecteurs de la vitesse de phase et de la vitesse d'énergie sont colinéaires. Pour éviter une atténuation trop forte de certains modes, la connaissance des courbes de dispersion est essentielle, et le domaine fréquentiel d'excitation est choisi judicieusement pour avoir à la fois des longueurs d'onde échantillonnables et des atténuations faibles. L'objectif de cette partie est de vérifier si le procédé, tout comme pour l'aluminium, permet d'avoir une bonne sélectivité et une bonne directivité avec des matériaux composites plus ou moins anisotropes dans le plan de la structure. Cette étude est réalisée sur des plaques en carbone-époxy, formées d'empilements de plis unidirectionnels orientés dans différentes directions :  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de  $2.1 \text{ mm}$  d'épaisseur, considéré très anisotrope (pour certains modes) dans le plan, et  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$  de  $1 \text{ mm}$  d'épaisseur, considéré quasi isotrope. Les modules de viscoélasticité et les courbes de dispersion de ces plaques sont en annexes A et B.

### 3.4.2.1 Sélectivité modale à l'émission

Pour vérifier cette sélectivité, l'expérience avec la sonde Laser, décrite au paragraphe 3.4.1.1, est reproduite pour le composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de  $2.1 \text{ mm}$ . L'excitation d'un mode est opérée via la sonde matricielle et la réception est réalisée via le Laser dans les directions où la vitesse de phase et la vitesse d'énergie sont colinéaires (figure 3.4.c), à savoir  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$  (angles définis dans le repère principal du matériau visible sur la figure 2.1). L'observation des courbes de dispersion du composite (annexe B), nous fait opter pour un domaine fréquentiel étroit, centré sur  $0.45 \text{ MHz}$ . Ce choix est conditionné par le fait d'avoir deux modes possibles exploitables,  $S_0$  ( $\lambda \approx 14 \text{ mm}$ ) et  $A_1$  ( $\lambda \approx 25 \text{ mm}$ ), avec un bon échantillonnage de chacun, d'être dans une zone où il n'y a pas trop de dispersion et surtout où les deux modes sont peu atténués (l'expérience n'est pas menée sur le quasi isotrope car seul le mode  $S_0$  est mesurable dans le domaine de fréquence exploitable par la sonde). Pour cela un burst de 24 cycles à  $0.45 \text{ MHz}$  (bande fréquentielle de  $0.03 \text{ MHz}$  à  $-3 \text{ dB}$ ) est utilisé comme signal d'excitation.

Il faut cependant noter que, dans la direction  $45^\circ$ , l'excitation des modes s'avère particulièrement difficile du fait d'une forte atténuation, ce qui rend les amplitudes de signaux trop faibles pour être correctement mesurables. De plus, pour les matériaux ayant une forte anisotropie, peu d'énergie se propage dans certaines directions, ceci est dû à un phénomène de canalisation de l'énergie des modes de Lamb. Sur les composites multicouches anisotropes, il a été démontré par Chapuis et al. [119] qu'un facteur (le facteur de Maris) qui apparait dans la fonction de propagation en champ lointain des modes guidés, rayonnés par une source tridimensionnelle, et qui dépend de l'allure des courbes de lenteur (figure 3.29.a), influence la propagation de l'énergie. Ce phénomène, qui a également été observé expérimentalement pour des composites croisés comme des  $[0^\circ/90^\circ]_s$ , favorise la propagation de l'énergie des modes tels que le mode  $S_0$  dans les directions des fibres et tend donc à diminuer l'énergie qui se propage en dehors de ces directions. La génération du mode  $A_0$ , qui est moins sensible à l'anisotropie, s'avère impossible, car requiert de travailler à des fréquences beaucoup plus basse (moins d'atténuation). Ceci nous contraint donc, pour ce type de composites, constitués

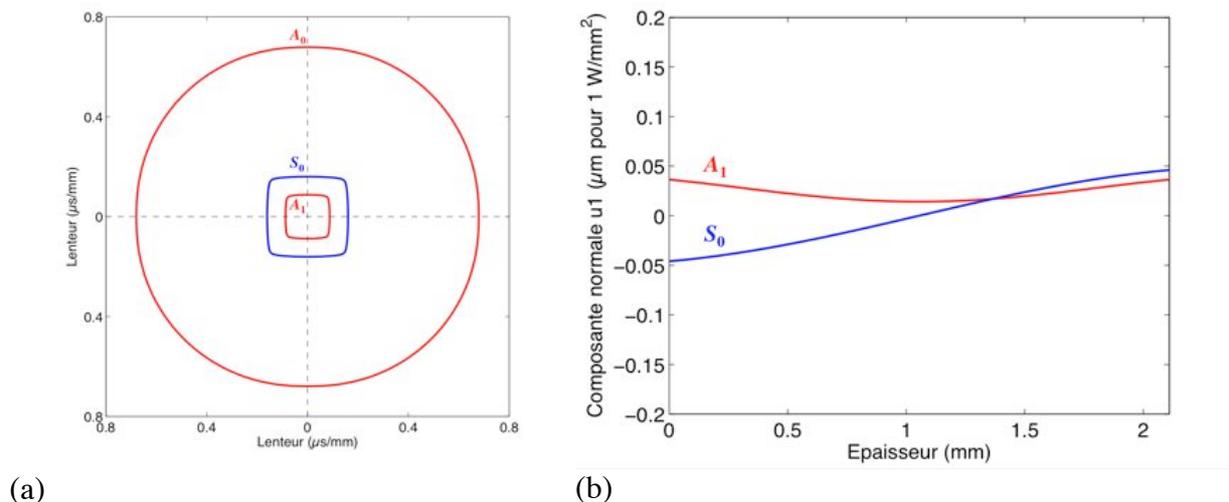


Figure 3.29 : Caractéristiques des modes de Lamb de la plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de  $2.1 \text{ mm}$  d'épaisseur, à la fréquence  $0.45 \text{ MHz}$  : (a) courbes de lenteur des 3 premiers modes, (b) composantes normales du champ de déplacement dans l'épaisseur.

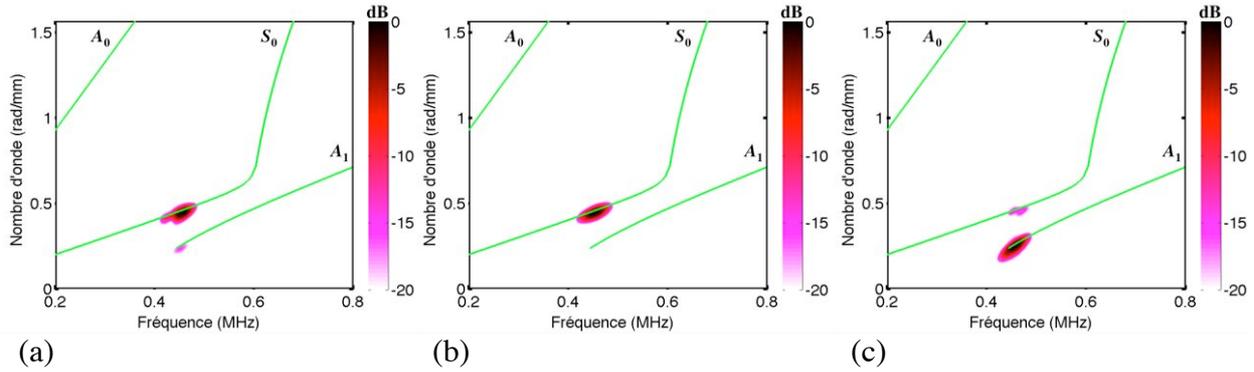


Figure 3.30 : Excitation des modes de Lamb d'une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur, dans une des deux directions des fibres, à 0.45 MHz : (a) génération de tous les modes avec une source monoélément, (b) génération du mode  $S_0$ , (c) génération du mode  $A_1$ .

d'un empilement croisé de plis unidirectionnels, à limiter l'utilisation du procédé dans les directions des fibres. Dans le cas du  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  la sélectivité est donc étudiée dans les directions  $0^\circ$  et  $90^\circ$ .

De la même manière que pour l'étude sur l'aluminium, une première mesure consiste à exciter un seul élément de la sonde afin d'observer l'excitabilité des différents modes, qui sert de référence pour évaluer la sélectivité. A noter que les axes de la sonde sont alignés avec les directions principales du composite (directions des fibres). Les résultats normalisés obtenus (figure 3.30.a) montrent, dans la direction  $0^\circ$  par rapport aux axes de la sonde, la forte excitabilité du mode  $S_0$  par rapport à celle du mode  $A_1$ , qui est 16 dB inférieur. En comparant avec les valeurs du champ de déplacement normal en surface (figure 3.29.b), ce dernier est, en terme de puissance, 6 fois inférieur au  $S_0$ . La figure 3.30.b et la figure 3.30.c montrent la génération, respectivement, des modes  $S_0$  et  $A_1$ , grâce à la méthode *Phased array* appliquée à la sonde multiélément matricielle. Lors de son excitation, le mode  $S_0$  est au moins 25 dB supérieur au mode  $A_1$ , soit un rapport de puissance égal à 18, d'après les champs de déplacement normés en puissance de la figure 3.29.b. Le mode  $A_1$  est, quant à lui, 15 dB supérieur au mode  $S_0$ , soit un rapport de puissance de seulement 5.5. Malgré une excitabilité plus faible du mode  $A_1$ , on obtient, pour les deux cas, une sélectivité modale très satisfaisante. Ceci montre que tant que l'on reste dans un domaine fréquentiel où les modes ne sont pas trop atténués, et pour des directions dans lesquelles ils peuvent se propager, la sélectivité modale à l'émission est réalisable.

### 3.4.2.2 Sélectivité modale à la réception

Les mesures à la réception sont là encore réalisées de la même manière que dans le cas de l'aluminium. Le burst d'excitation de 24 cycles centré à 0.45 MHz est appliqué à une source monoélément pour générer le maximum de modes, et la sonde multiélément est positionnée à 250 mm, dans la direction des fibres par rapport à la source. Le post traitement basé sur la méthode du *Phased array* est alors appliqué aux signaux mesurés par l'ensemble des 121 éléments de cette sonde, de manière à sélectionner un à un les modes générés, et à évaluer les performances en terme de sélectivité modale. L'étroitesse et le domaine de la bande spectrale minimisent les phénomènes de dispersion et permettent une reconnaissance plus facile des modes. La figure 3.31.a révèle la mesure réalisée par l'élément central de la matrice et la figure 3.31.b montre les résultats de deux post traitements avec les tracés de deux enveloppes normalisées, pour les modes  $S_0$  et  $A_1$ . Dans le cas du composite, on vérifie bien une bonne sélectivité dans les directions des fibres, en mode réception de la sonde, avec des

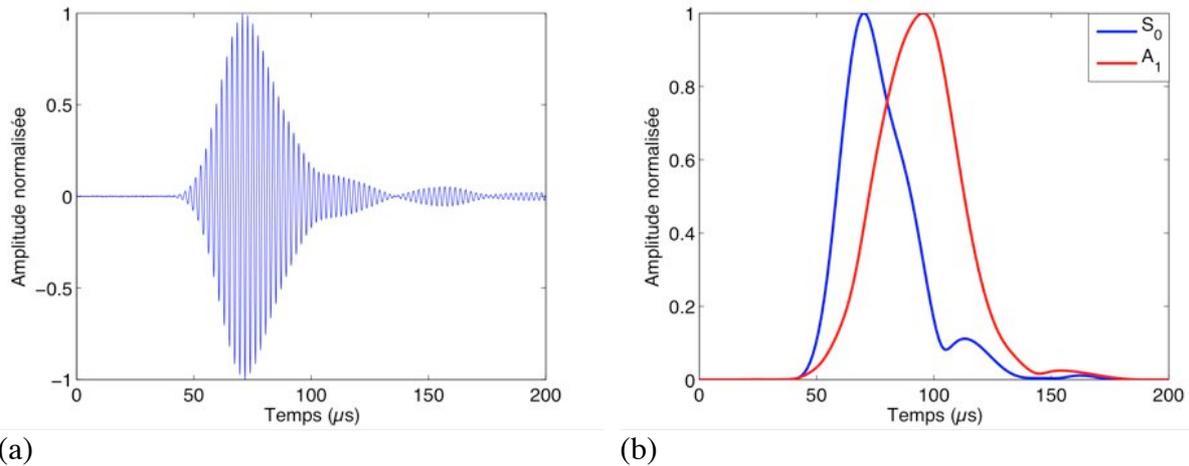


Figure 3.31 : Sélectivité à la réception, sur une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur, de la sonde matricielle multiélément avec post traitement par la méthode *Phased array* : (a) signal temporel filtré et normalisé, à 0.45 MHz, mesuré par l'élément central de la sonde, (b) enveloppes des signaux des modes  $S_0$  et  $A_1$ , obtenus après post traitement.

enveloppes non déformées des paquets d'onde, dont les maxima coïncident bien avec la distance et les vitesses de propagation des deux modes.

### 3.4.2.3 Directivité à l'émission

Comme il a été évoqué précédemment, la directivité des modes dans les composites est fortement influencée par les symétries des matériaux, dont dépendent les surfaces d'onde. Pour les matériaux fortement anisotropes, l'énergie des modes de Lamb est canalisée dans certaines directions, ici celles des fibres pour le cas du composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$ . Les directions d'auscultation du procédé sont, de plus, limitées, pour ce type de matériau (paragraphe 3.2.1.3). Par contre pour le composite quasi isotrope dans le plan de la plaque ( $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ ), toutes les directions du plan peuvent être auscultées. En effet la courbe de lenteur calculée du mode  $S_0$  est quasi circulaire (figure 3.32). L'objectif de cette partie est de vérifier qu'à l'émission le système génère bien un faisceau d'ondes planes dans la direction des fibres du composite croisé, et un faisceau suffisamment directif dans le cas du quasi isotrope. Pour observer cela, une mesure spatiale plus précise, que celle obtenue par le biais des patchs PZT, des champs de déplacement en surface de la plaque est nécessaire. On utilise à nouveau le banc d'essai expérimental permettant une mesure point par point à l'aide d'une

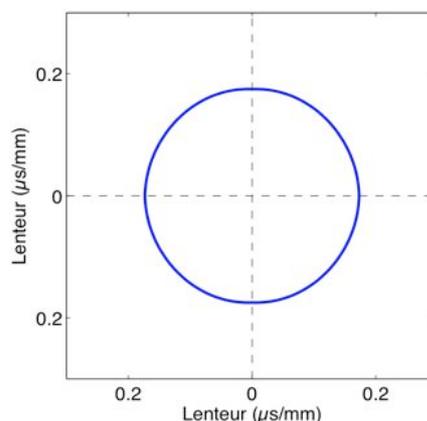


Figure 3.32 : Courbe de lenteur du mode  $S_0$  à 0.45 MHz dans le composite carbone-époxy  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$  de 1 mm d'épaisseur.

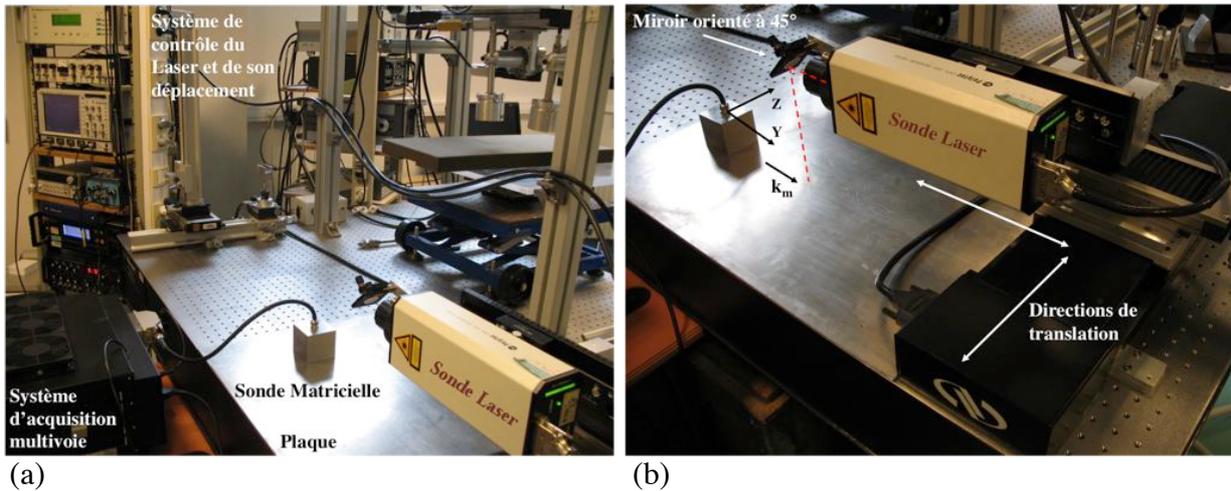


Figure 3.33 : Photographies du montage expérimental utilisé pour la réalisation des scans : (a) ensemble du dispositif, (b) zoom sur les axes de translation de la sonde Laser.

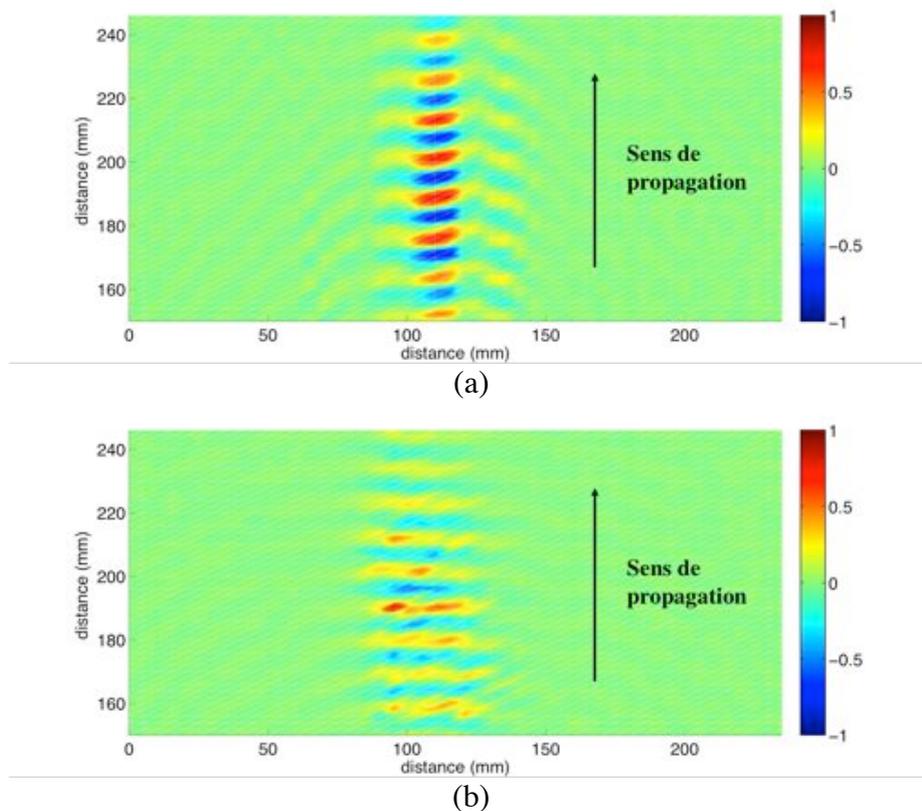


Figure 3.34 : Image à un instant  $t$  de la propagation du mode  $S_0$  à  $0.45 \text{ MHz}$  (composante normale de déplacement dont l'amplitude est normalisée) dans la direction des fibres (du bas vers le haut) : (a) cas du composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de  $2.1 \text{ mm}$  d'épaisseur, (b) cas du composite carbone-époxy  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$  de  $1 \text{ mm}$  d'épaisseur.

sonde Laser. Le dispositif est cependant modifié pour permettre le déplacement suivant les deux axes du plan de la plaque grâce également à un système motorisé et contrôlé par ordinateur (figure 3.33). La position horizontale de la sonde Laser contraint à employer un miroir orienté à  $45^\circ$  afin de rediriger le faisceau Laser vers la surface de la plaque. On peut ainsi réaliser un scan de la composante normale du champ de déplacement sur une zone délimitée en surface de la plaque. Après un post traitement des données, on peut reconstruire

l'image de la propagation des ondes. Il faut noter que la mesure par Laser, habituellement réalisée à l'aide d'un papier réfléchissant, collé en surface de la structure, a dû être réalisée sans ce papier à cette occasion, car celui-ci atténue trop les modes du composite. La sensibilité du Laser (rapport signal sur bruit) est donc plus faible, ce qui entraîne une baisse de qualité des signaux mesurés comparativement aux mesures faites pour les plaques en aluminium. Le mode  $S_0$  étant le plus excitable, il est l'objet de cette étude à l'émission. La sonde matricielle est alignée dans la direction des fibres, et l'application du *Phased array* permet de générer le mode  $S_0$ , avec une excitation centrée à  $0.45 \text{ MHz}$  (burst de 24 cycles). La sonde Laser réalise un scan de la propagation ultrasonore de ce mode sur une zone rectangulaire, située de  $150$  à  $250 \text{ mm}$  de la sonde, avec une largeur de  $235 \text{ mm}$ . La sonde est centrée par rapport à cette zone. Les résultats (figure 3.34) représentent la distribution spatiale du déplacement normal mesuré à un instant  $t$ . On voit bien la propagation du mode  $S_0$  dans la direction des fibres (du bas vers le haut de l'image), dans les composites carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de  $2.1 \text{ mm}$  d'épaisseur et  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$  de  $1 \text{ mm}$  d'épaisseur. Le signal se propage uniquement dans la direction choisie, avec une amplitude maximale au moins  $20 \text{ dB}$  supérieure à celles mesurées dans le reste du plan. Pour le composite croisé la propagation peut s'effectuer soit à  $0^\circ$  soit à  $90^\circ$ , et pour le  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$  elle peut s'effectuer dans toutes les directions et le scan de la propagation du  $S_0$  ( $\lambda \approx 12 \text{ mm}$ ) montre une ouverture angulaire de  $20^\circ$  à  $-6 \text{ dB}$  d'amplitude. Le principe du *Phased array* permet bien de diriger le faisceau dans une direction particulière mais est limité, en cas de forte anisotropie du matériau, à certaines directions, comme celles des fibres pour ce type de composite. Le phénomène de canalisation des ondes de Lamb a cependant l'avantage de conserver la largeur du faisceau lors de sa propagation.

#### 3.4.2.4 Directivité à la réception

Voyons à présent, dans les différents cas de composites, si le procédé identifie correctement la direction de propagation lorsque les modes de Lamb sont générés par une source monoélément (située à  $200 \text{ mm}$ ). Pour l'échantillon  $[0^\circ/90^\circ]_4s$ , l'énergie se propageant quasiment exclusivement dans les deux directions des fibres, on aligne la sonde et la source dans une de ces deux directions (c'est à dire à  $0^\circ$ ). Pour le  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ , on place la sonde tel que son axe  $Y$  (figure 3.5) coïncide avec la direction  $0^\circ$  de la plaque. On positionne alors la source successivement dans les directions  $0^\circ$ ,  $-25^\circ$  et  $-50^\circ$  par rapport à l'axe  $Y$  de la

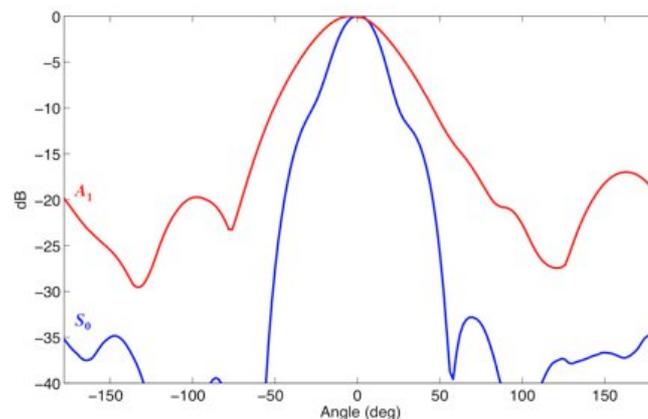


Figure 3.35 : Diagrammes de directivité, normalisés en amplitude, à la réception de la sonde multiélément matricielle utilisant la méthode *Phased array* pour filtrer les modes  $S_0$  et  $A_1$  à la fréquence centrale de  $0.45 \text{ MHz}$  dans une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de  $2.1 \text{ mm}$  d'épaisseur. La source est positionnée à  $200 \text{ mm}$ , et son alignement avec la sonde est parallèle à l'une des deux directions des fibres.

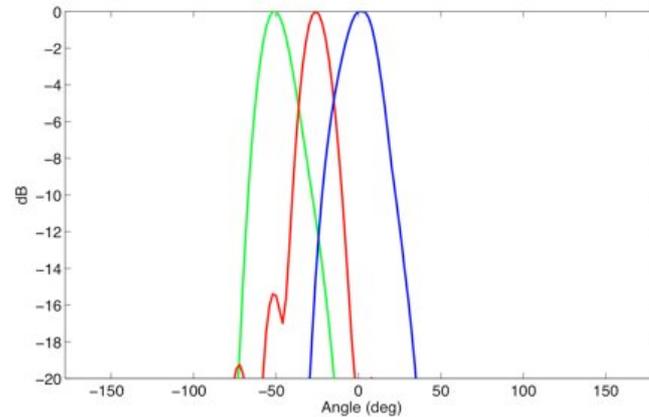


Figure 3.36 : Diagrammes de directivité, normalisés en amplitude, à la réception de la sonde multiélément matricielle utilisant la méthode *Phased array* pour filtrer le mode  $S_0$  à la fréquence centrale de  $0.45 \text{ MHz}$  dans une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$  de  $1 \text{ mm}$  d'épaisseur. La source est à  $200 \text{ mm}$ , et est positionnée successivement à  $0^\circ$ ,  $-25^\circ$ ,  $-50^\circ$  par rapport à l'axe  $Y$  de la sonde, qui coïncide avec la direction  $0^\circ$  de la plaque.

sonde. L'excitation est un burst de 24 cycles à  $0.45 \text{ MHz}$  dans les deux cas. La figure 3.35, relative au composite croisé, indique que l'on peut bien identifier la direction de la source en considérant soit le mode  $S_0$  ( $\lambda \approx 14 \text{ mm}$ ), soit le mode  $A_1$  ( $\lambda \approx 25 \text{ mm}$ ), avec des lobes principaux au moins  $18 \text{ dB}$  supérieurs en amplitude. L'ouverture angulaire de ces derniers,  $30^\circ$  et  $70^\circ$  à  $-6 \text{ dB}$ , respectivement, pour  $S_0$  et  $A_1$ , est d'autant plus petit que la longueur d'onde est petite. Pour des niveaux d'amplitude plus bas, il devient impossible d'identifier correctement la direction de propagation. Pour le composite quasi isotrope, on observe une bonne directivité à la réception du mode  $S_0$  ( $\lambda \approx 12 \text{ mm}$ ), pour les trois positions angulaires de la source autour de la sonde, et permettant de les distinguer à partir de  $-4 \text{ dB}$  d'amplitude (figure 3.36). On retrouve des résultats similaires à ceux obtenus sur l'aluminium, du fait de la quasi isotropie. L'ouverture angulaire des lobes principaux est de  $25^\circ$  à  $-6 \text{ dB}$ .

### 3.5 Conclusion

Au travers de ce chapitre, l'explication de la méthode *Phased array* a été donnée et son implémentation expérimentale a été décrite. L'ensemble du dispositif permettant son application a été présenté, puis une campagne de tests a été menée et a permis de montrer les capacités du procédé à sélectionner, à l'émission et à la réception, un mode de Lamb particulier dans une direction donnée. En effet, que ce soit sur un matériau métallique (aluminium) ou sur un composite (carbone-époxy), on obtient de bons rapports d'amplitude entre le mode désiré et les modes parasites. Cela reste valable tant que l'on respecte certaines conditions d'échantillonnage (dépendantes de la géométrie de la sonde multiélément) des longueurs d'onde des modes guidés. Au travers d'autres mesures, la directivité des faisceaux ultrasonores produits via la méthode a également été observée, ainsi que la capacité à identifier la direction d'une source. Les diagrammes de directivité obtenus montrent un bon accord avec les directions considérées, cependant l'ouverture angulaire (dépendant des dimensions de la sonde et des longueurs d'onde employées), parfois importante, limite la capacité à distinguer convenablement d'éventuelles sources proches. Malgré cela cette méthode offre la possibilité, d'une part, de contrôler les modes guidés qui se propagent, et d'autre part, de réaliser un balayage angulaire, plus ou moins important suivant le matériau étudié, permettant l'inspection globale d'une structure. Le chapitre suivant permet de voir les différentes applications de cette méthode.



# Chapitre 4

## Applications du procédé

### Sommaire

<b>4.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>102</b>
<b>4.2</b>	<b>Caractérisation de la raideur via un système multiélément .....</b>	<b>102</b>
4.2.1	Conditions de validité .....	102
4.2.2	Méthodes de mesure employées .....	103
<b>4.3</b>	<b>Utilisation du procédé <i>Phased array</i> pour la détection de défauts .....</b>	<b>105</b>
4.3.1	Compensation de la dispersion .....	105
4.3.2	Localisation et imagerie de défauts .....	107
4.3.2.1	Type corrosion dans plaque d'aluminium .....	108
4.3.2.2	Type délaminage 3D dans composite .....	109
4.3.2.3	Type endommagement par impact sur composite courbé avec raidisseur .....	112
4.3.3	Confrontation avec d'autres procédés.....	114
4.3.3.1	Les différentes méthodes CND employées .....	115
4.3.3.2	Bilan comparatif .....	121
<b>4.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>124</b>

## 4.1 Introduction

Cette partie explique et montre deux applications de la méthode *Phased array*. La première est l'emploi du procédé pour une méthode de caractérisation de la raideur des matériaux. La seconde est son utilisation pour la détection et l'imagerie de différents types de défauts dans des matériaux métalliques ou composites, isotropes ou anisotropes, élastiques ou viscoélastiques. Enfin une comparaison est faite des performances et limites du procédé avec d'autres méthodes de contrôle non destructif, employées à l'I2M ou au CETIM.

## 4.2 Caractérisation de la raideur via un système multiélément

Au paragraphe 2.4.1, nous avons expliqué les différentes méthodes de caractérisation employées pour définir les modules de viscoélasticité des matériaux utilisés, et décrit les dispositifs expérimentaux. Nous avons vu que pour la détermination expérimentale des courbes de dispersion, lors de l'analyse de plaques par ondes guidées, on procédait à une mesure point par point le long de la direction de propagation afin de pouvoir effectuer une transformée de Fourier 2D. Les dispositifs employés sont souvent contraignants de part la place qu'ils occupent et du déplacement qu'il faut mettre en oeuvre pour le transducteur ultrasonore ou éventuellement la sonde Laser. Il est alors intéressant d'utiliser les capacités et la configuration des transducteurs multiéléments compacts qui forment des réseaux réguliers d'éléments dans une direction. Ces éléments peuvent réaliser des mesures équivalentes à celles faites lors du déplacement pas à pas d'un seul récepteur (capteur US ou Laser). Pour cela, il suffit d'exciter les modes guidés d'une plaque puis de positionner, à la réception, tout ou partie des éléments d'une sonde compacte le long du chemin de propagation. Evidemment seuls les modes ayant une composante normale à la structure sont détectables par ce récepteur couplé avec du gel. Une fois les acquisitions faites par tous les éléments récepteurs de la sonde, un post traitement classique basé sur la transformée de Fourier bidimensionnelle (2D FFT), identique à celui pratiqué lors de l'emploi d'un seul récepteur déplacé, permet de construire les graphiques de dispersion (nombres d'onde en fonction de la fréquence) [71] puis d'utiliser les valeurs obtenues comme données d'entrée pour les procédés d'optimisation, qui calculent les valeurs approchées des modules d'élasticité [97, 98]. Ce procédé est un moyen alternatif, facile à mettre en oeuvre, mais qui, cependant, ne permet pas de réaliser une caractérisation complète, car il est difficile pour la sonde multiélément en contact avec la structure de réaliser une mesure précise de l'atténuation, lors de la propagation, sans fausser les résultats. Il n'est donc pas possible d'évaluer les termes de viscoélasticité, c'est à dire la partie imaginaire des coefficients  $C_{ij}$ . Les courbes de dispersion (nombres d'onde, vitesses de phase, vitesses de groupe) peuvent ainsi être déterminées, à partir de cette méthode expérimentale, excepté les courbes d'atténuation.

### 4.2.1 Conditions de validité

Pour pouvoir utiliser un système multiélément afin d'exécuter une transformée de Fourier 2D, il faut tenir compte des contraintes géométriques des transducteurs. La distribution spatiale des éléments, composant les réseaux, et leurs dimensions peuvent en effet limiter les conditions d'échantillonnage nécessaires à cette transformée. Comme il a été indiqué au paragraphe 3.4.1.1 sur le principe de la transformée de Fourier 2D, il faut respecter le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, et avoir une longueur de mesure suffisante pour obtenir une bonne résolution du spectre en nombre d'onde. Ainsi pour satisfaire ces deux critères, on utilise de préférence des sondes avec des éléments de petites

dimensions, proches les uns des autres, et en plus grand nombre possible selon la direction de propagation. C'est pour cela que la sonde linéaire de 128 éléments est utilisée (table 3.1).

En théorie, on ne peut pas travailler avec des longueurs d'onde qui seraient inférieures à deux fois le pas spatial des éléments du transducteur. Si de telles longueurs d'onde étaient présentes, il y aurait alors un phénomène de recouvrement qui parasiterait les résultats de la transformée de Fourier 2D. Mais étant donné que les éléments ont une dimension finie dans la direction de propagation, qui est proche de celle du pas inter éléments, ceux-ci agissent comme des filtres. En effet les éléments piézoélectriques atténuent les longueurs d'onde proches de leur dimension, dans la direction de propagation ; ils agissent comme des filtres passe bas, en terme de fréquence (et passe haut en terme de longueur d'onde). Un système multiélément dont la dimension et le pas entre ses éléments sont proches, peut donc être utilisé pour effectuer une transformée de Fourier 2D des ondes à condition que l'échantillonnage soit respecté. L'effet de recouvrement dû à d'éventuelles petites longueurs d'onde est alors minimisé. En général, dans le domaine de fréquence étudié, les caractéristiques spatiales de la sonde linéaire permettent de conserver un bon échantillonnage des longueurs d'onde des modes guidés présents, excepté pour le mode  $A_0$  de certains composites.

#### 4.2.2 Méthodes de mesure employées

Deux méthodes de mesure, utilisant les capacités de la sonde linéaire, ont été mises au point. La première consiste à utiliser la sonde uniquement en réception et à générer l'ensemble des modes sur le domaine fréquentiel 0.2-0.8 MHz via un autre transducteur en contact (large bande passante centrée à 0.5 MHz) auquel est appliqué un Dirac. La sonde multiélément, orientée dans la direction de propagation et uniformément couplée à la structure, détecte la propagation des modes au niveau de l'ensemble de ses éléments. On peut ainsi procéder à la transformée de Fourier 2D de l'ensemble des signaux mesurés. La sonde linéaire, de part sa configuration, permet d'échantillonner une longueur d'onde minimale de 5 mm (au moins trois éléments par longueur d'onde) et donc d'avoir un domaine des nombres d'onde allant jusqu'à 1.2 rad/mm ( $2\pi/\lambda_{\min}$ ) avec une résolution de 0.02 rad/mm (liée à la longueur L de la zone de mesure de la sonde,  $2\pi/L$ ). Un exemple est réalisé sur une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur. Une seule acquisition est nécessaire pour les 128 éléments simultanément. Les spectres établis dans le domaine des nombres d'onde en fonction de la fréquence, sont normalisés en amplitude et superposés aux courbes de dispersion théoriques connues pour ce matériau (figure 4.2.a). Les résultats obtenus sont limités par l'excitabilité de certains modes qui provient de leur couplage avec les transducteurs émetteur et récepteur, via une composante de déplacement normal, en surface de la plaque, plus ou moins élevée à certaines fréquences. Ceci peut constituer une bonne base de départ pour l'identification des modes et éventuellement le calcul des modules d'élasticité, mais il est intéressant de compléter le plus possible les courbes de dispersion sur l'ensemble du domaine fréquentiel afin de correctement tenir compte des variations des vitesses et d'obtenir, via les procédés d'optimisation, des valeurs plus précises des modules d'élasticité.

La seconde méthode utilise le principe du *Phased array* (paragraphe 3.2.2) à l'émission. La sonde linéaire est en fait divisée en deux parties et est utilisée à la fois pour l'émission et la réception. Il s'agit de balayer, à l'émission, en fréquence et en nombre d'onde, un ensemble d'excitations qui permettent de générer divers modes individuellement dans un certain domaine de fréquences. Pour ce faire, on crée un signal d'excitation de bande fréquentielle étroite (12 cycles), puis on applique les règles de déphasage en fonction des valeurs de la vitesse de phase. Du fait du grand nombre d'éléments et de la dimension de la sonde, il est

possible d'affecter suffisamment d'éléments à l'émission et à la réception sans diminuer la qualité de la résolution en nombre d'onde. On utilise donc, pour l'émission et la réception, respectivement 32 et 96 éléments (figure 4.1). Cette configuration permet toujours d'avoir un domaine des nombres d'onde allant jusqu'à  $1.2 \text{ rad/mm}$  avec, cette fois, une résolution de  $0.05 \text{ rad/mm}$ . L'émission ne s'effectue que dans une seule direction et est restreinte à une seule ligne d'éléments, de même que la réception, et la largeur des éléments ( $25 \text{ mm}$  dans le sens transverse à la direction de propagation) est importante. De ce fait, les fronts d'ondes peuvent être considérés plans. Une procédure effectuée ainsi le balayage modal à l'émission, l'acquisition des données (qui peut prendre quelques minutes) et le post traitement (tri des informations, normalisation, et calcul des spectres). La plaque d'aluminium sert d'échantillon de référence pour la validation de cette méthode. La figure 4.2.b compare les résultats de mesures aux courbes de dispersion théoriques. On peut voir que l'on obtient un ensemble quasi complet des courbes des nombres d'onde dans le domaine de fréquence investigué. Un tel jeu de données peut constituer une base très avantageuse pour un procédé d'inversion et d'optimisation de  $C_{ij}$ .

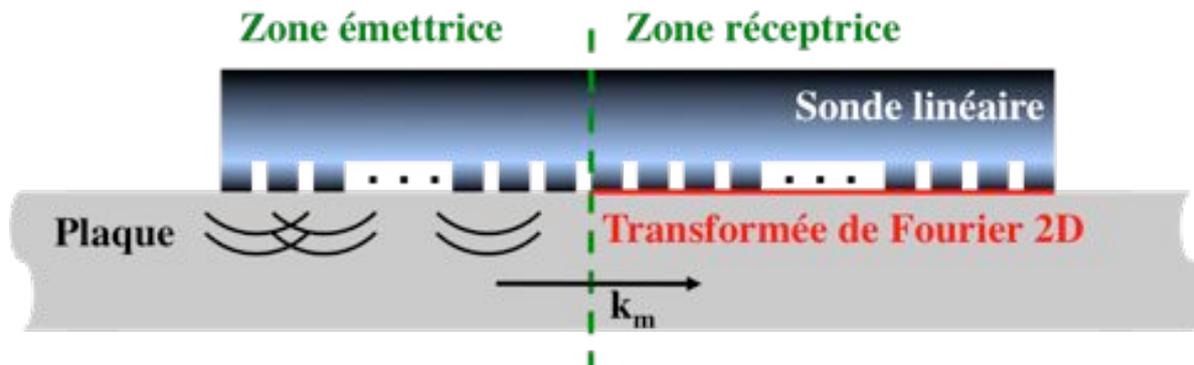


Figure 4.1 : Schéma de la sonde linéaire dont une partie est employée comme émetteur (application de la méthode *Phased array*) et une partie comme récepteur (les données mesurées permettent le calcul d'une transformée de Fourier 2D).

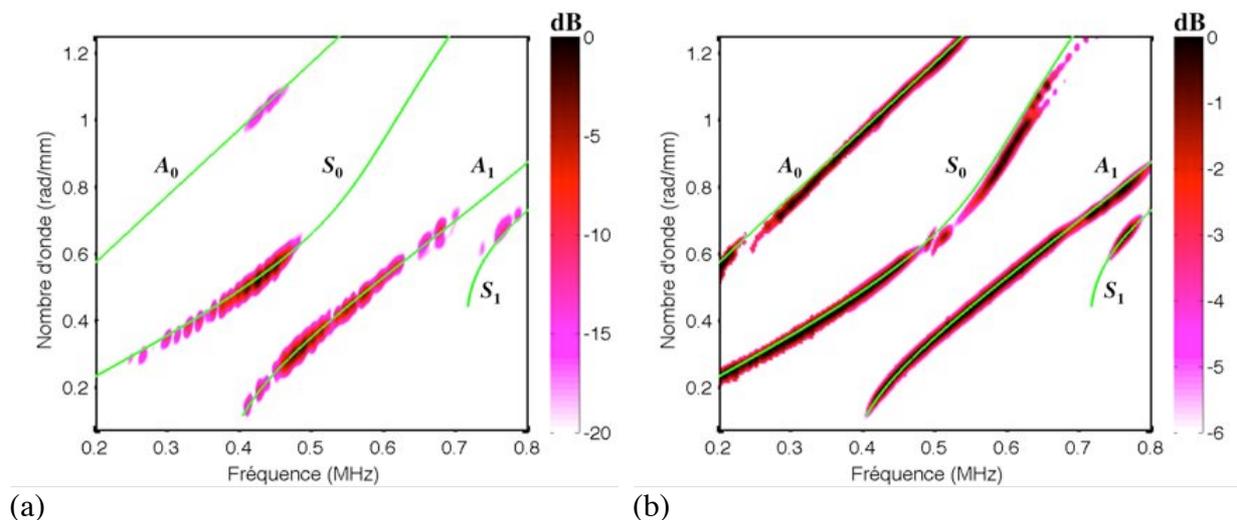


Figure 4.2 : Diagrammes  $(k, f)$  pour une plaque en aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur obtenus via l'utilisation d'une sonde multiélément linéaire à la réception, permettant le calcul d'une transformée de Fourier 2D. Les résultats expérimentaux sont normalisés et comparés aux courbes de dispersion simulées — : (a) émetteur séparé excité par un Dirac, (b) sonde linéaire divisée en une partie émettrice, pilotée par la méthode *Phased array*, et une partie réceptrice.

## 4.3 Utilisation du procédé *Phased array* pour la détection de défauts

Les paragraphes précédents ont permis de démontrer les capacités de sélection modale et de directivité du procédé. Dans cette partie, celles-ci sont mises à l'épreuve pour réaliser la détection et l'imagerie de certains types de défauts présents dans les plaques en aluminium ou en composite étudiées, à l'aide des ondes guidées (ondes de Lamb). Avant d'aborder une série d'exemples, composée d'imageries de défauts d'impacts ou de délaminages dans des zones plus ou moins accessibles, une méthode de compensation de la dispersion des ondes de Lamb, durant leur propagation, améliorant la précision du positionnement du défaut, est expliquée pour le cas d'une sonde matricielle fonctionnant en pulse écho. Pour finir, le procédé est comparé à d'autres méthodes de contrôle non destructif.

### 4.3.1 Compensation de la dispersion

La principale difficulté, lorsque l'on utilise les ondes de Lamb comme vecteur d'information dans la détection de défauts, est de gérer leur comportement dispersif. L'imagerie repose sur la qualité du signal mesuré et la connaissance des vitesses de propagation (vitesses de groupe ou d'énergie). Si le signal obtenu est trop déformé par le caractère dispersif d'un mode, l'image et le positionnement d'un éventuel défaut auront une grande imprécision. L'objectif étant d'inspecter des structures de grandes dimensions, ces effets de dispersion, lors de la propagation des modes de Lamb, sont d'autant plus importants. Pour palier à cet inconvénient, une méthode de compensation de la dispersion, développée par Wilcox [120] est appliquée en post traitement, à la suite du principe de *Phased array*. Ceci permet de réduire cette imprécision sur la position spatiale d'un défaut et améliore la résolution de l'image.

Un transducteur, fonctionnant en pulse écho, émet une onde de Lamb, qui se propage dans la plaque et est réfléchi par un ou plusieurs défauts. Puis ce même transducteur mesure le signal  $g(t)$  des ondes qui reviennent du ou des défauts. Sous l'effet de la conversion modale, plusieurs modes peuvent être réfléchis (ou transmis) par un défaut, même si l'onde incidente est pure. En supposant d'abord que la réflexion des ondes ne produit aucune conversion de mode, l'expression du signal mesuré s'écrit :

$$g(t) = \sum_j \int_{-\infty}^{+\infty} A_j(f) F(f) e^{i(k(f)d_j - 2\pi ft)} df \quad (4.1)$$

où  $A_j$  est le coefficient de réflexion de chaque réflecteur  $j$  (il peut être complexe et dépendre de la fréquence),  $d_j$  est la distance de propagation et  $F$  est la transformée de Fourier du signal d'excitation  $f(t)$ . On suppose que ce signal correspond au champ de déplacement normal  $u$  du mode incident au niveau du transducteur ( $u(x=0, t) = f(t)$ ). En temps normal, sans dispersion, le signal  $g(t)$  peut être converti en fonction de la distance, par une simple multiplication du temps et de la vitesse de groupe, usuellement mesurée à la fréquence centrale. Avec la dispersion, il est nécessaire de prendre en compte la dépendance en fréquence de la vitesse, car sinon le signal mesuré est déformé par ce phénomène (figure 4.3.a). Le but est de transformer directement le signal temporel mesuré en une fonction de la distance de propagation, qui « reconstruit » le signal dispersé. Cela revient à effectuer, artificiellement, une rétropropagation du signal qui atteint un minimum, en terme de longueur spatiale, lorsque le temps  $t$  se retrouve à 0. Si on poursuit cette rétropropagation, le signal divergera à nouveau. En prenant l'expression du signal rétropropagé jusqu'à  $t = 0$ , on obtient le signal en fonction

de la distance, dont la dispersion est compensée. Cette formule, dans le cas plus simple d'un réflecteur, s'écrit :

$$h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f)e^{-ik(f)x} df \quad (4.2)$$

où  $G$  est la transformée de Fourier du signal mesuré et  $h$  est le signal spatial, dont la dispersion est compensée. Cette méthode permet à la fois de compenser cet effet et d'identifier directement la distance de propagation depuis le réflecteur (figure 4.3.b). A noter cependant, que cette méthode ne peut pas corriger des déformations qui seraient dues à la dépendance en fréquence des coefficients de réflexion (caractéristiques des réflecteurs). Le calcul de l'équation (4.2) est assez difficile à réaliser car exige de résoudre une intégrale pour chaque point de l'espace, ce qui est long en temps de calcul et difficile à réaliser. L'idée est alors de modifier cette équation en transformée de Fourier inverse, qui peut être calculée rapidement par des algorithmes existants. En utilisant les relations entre le nombre d'onde  $k$ , la fréquence  $f$  et les vitesses de groupe et de phase, on peut la réécrire de la manière suivante :

$$h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(k)e^{-ikx} dk \quad (4.3)$$

avec

$$H(k) = G(f)v_g(f) \quad (4.4)$$

où  $f$  s'exprime en fonction du nombre d'onde  $k$ . Cette formulation nécessite que la vitesse de groupe  $v_g$  soit définie, donc ne fonctionne que pour les matériaux qui ne sont pas trop absorbants. Du point de vue numérique, certaines conditions sur l'échantillonnage spatial ou encore l'interpolation des fonctions doivent être respectées. Pour le détail de l'implémentation, voir l'article de Wilcox [120]. Cette méthode peut également être employée dans le cas d'une conversion modale (un ensemble de mesures expérimentales est présenté en illustration dans l'annexe D). La formule du signal spatial compensé est alors :

$$h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f)e^{-I(k_1(f)+k_2(f))x/2} df \quad (4.5)$$

où  $k_1$  et  $k_2$  sont les nombres d'onde du mode incident et réfléchi. Dans tous les cas, l'utilisation de cette méthode suppose la génération et la réception d'un mode pur, c'est pour cela qu'elle est particulièrement intéressante à implémenter avec le procédé *Phased array* pour l'imagerie de défauts. Un exemple expérimental est présenté sur la figure 4.4. Il s'agit de la mesure de l'écho d'un bord de la plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur. La sonde multiélément est positionnée à 300 mm de ce bord (soit une distance de 600 mm de propagation aller-retour) et génère le mode  $S_0$  dans sa direction, avec un signal d'excitation de 3 cycles (large bande fréquentielle) à 0.5 MHz. Le mode subit la dispersion durant sa propagation et le signal obtenu, après l'application du principe *Phased array* à la réception (pour filtrer les modes qui peuvent apparaître lors de la réflexion), est déformé (figure 4.4.a). L'imagerie sans compensation consiste à simplement passer du domaine temporel au domaine spatial en multipliant par la vitesse de groupe de la fréquence centrale d'excitation, on obtient alors un signal en fonction de la distance qui, à cause de la dispersion, n'est pas suffisamment précis sur la position du bord, du fait d'un maximum d'amplitude mal localisé et d'une largeur de signal importante (figure 4.4.a). L'utilisation de la compensation, en partant du principe que la méthode *Phased array* isole bien chaque mode, permet donc de « compresser » le signal et de localiser directement et précisément tout réflecteur dans

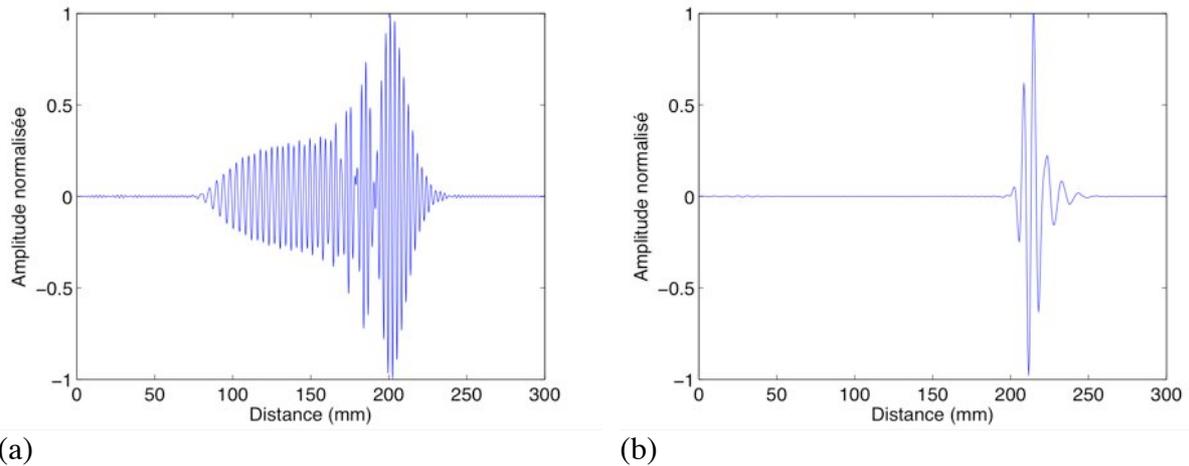


Figure 4.3 : Exemple numérique de la compensation de la dispersion du mode  $S_0$  à  $0.6\text{ MHz}$  dans une plaque d'aluminium de  $4\text{ mm}$  d'épaisseur après une propagation du mode sur  $200\text{ mm}$ , le signal d'excitation est un burst de 6 cycles : (a) signal obtenu en multipliant simplement la base en temps par la vitesse de groupe à la fréquence centrale, (b) signal compensé correctement positionné (début du signal) dans l'espace à  $200\text{ mm}$ .

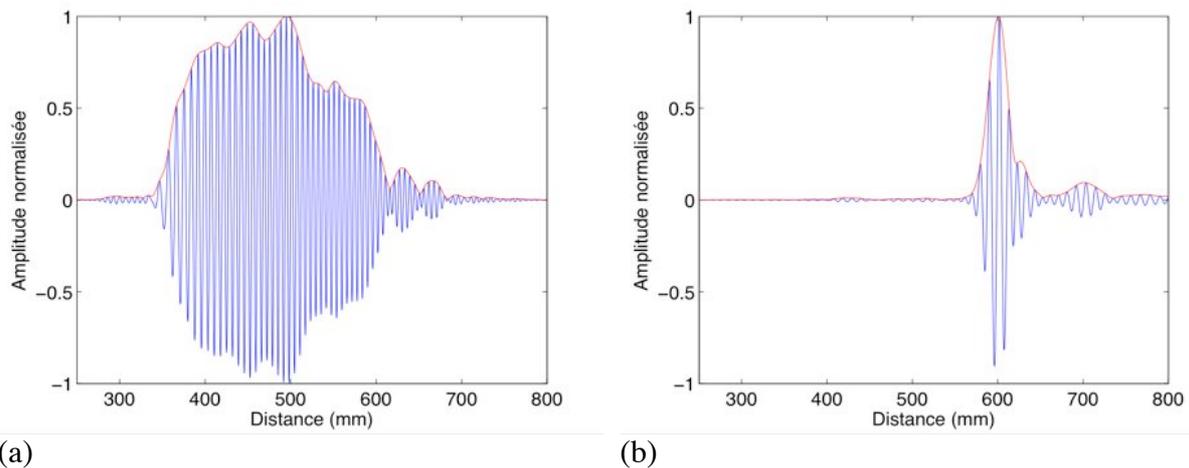


Figure 4.4 : Application expérimentale de la méthode *Phased array* et de la compensation de la dispersion du mode  $S_0$  à  $0.5\text{ MHz}$  dans une plaque d'aluminium de  $4\text{ mm}$  d'épaisseur. On mesure l'écho d'un des bords (distance de propagation de  $600\text{ mm}$ ), avec une excitation de type burst de 3 cycles : (a) signal et son enveloppe sans compensation, (b) signal et son enveloppe avec compensation.

l'espace. La figure 4.4.b montre bien le gain en précision de l'application de cette méthode. A noter qu'une correction, qui tient compte de la forme du signal d'excitation, est appliquée afin de faire coïncider le maximum d'amplitude avec l'origine en temps, et non plus le début du signal. Le réflecteur (maximum de l'enveloppe) est ainsi correctement positionné.

### 4.3.2 Localisation et imagerie de défauts

Il existe plusieurs configurations possibles pour réaliser une détection de défaut en utilisant le principe du *Phased array* avec un ou deux transducteurs multiéléments. La première consiste à utiliser un émetteur et un récepteur distincts (mode pitch catch), positionnés à deux endroits spécifiques. L'émetteur peut être un transducteur piézoélectrique monoélément classique, ou une sonde matricielle. Cette dernière permet alors éventuellement de choisir une direction pour le signal ultrasonore et d'exciter un mode spécifique. Le

récepteur est une sonde multiélément qui identifie la direction de provenance d'un signal (un mode de Lamb), diffracté par un défaut, ainsi que le temps de propagation. En connaissant la position des deux transducteurs, il est possible d'identifier la position du défaut. Cette configuration requiert donc deux sondes disposées dans des zones différentes. Dans le cadre industriel, la zone d'accès peut être limitée et il est préférable de recourir à un dispositif le plus réduit possible, pour faire une inspection plus rapide, plus facile à mettre en place et entraînant moins de complications liées au couplage. Pour cette raison, la configuration adoptée est celle d'un seul transducteur multiélément fonctionnant en mode pulse écho. On contrôle la sélectivité et la direction de propagation d'un mode donné, à la fois à l'émission et à la réception. Ceci permet d'identifier, autour de la sonde, tout réflecteur (bord de pièce, défaut, raidisseur, etc.) susceptible de renvoyer des échos directs vers elle. A partir des enveloppes de signaux issus du post traitement, pour les différentes directions d'auscultation, une image 2D du plan de la plaque peut être construite, permettant la localisation spatiale des défauts ou autres réflecteurs. Les détections de plusieurs types de défauts sur différentes plaques sont présentées ci-après.

#### 4.3.2.1 Type corrosion dans plaque d'aluminium

Dans la plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, un trou de 5 mm de diamètre a été percé de part en part. La sonde est positionnée à mi chemin entre un bord de la plaque et le trou (placé au centre). Comme le matériau est isotrope, l'orientation de la sonde n'a aucune importance. Toutefois, elle est disposée de telle sorte que le trou se trouve dans la direction 0° de son axe Y (figure 4.6.a). Afin de réaliser des mesures optimales, on choisit de travailler avec le mode  $S_0$  à 0.35 MHz. Ainsi on garantit un bon échantillonnage du mode, qui conserve à cette fréquence une forte excitabilité. La figure 4.5 montre la sélectivité améliorée des modes  $A_0$  ( $\lambda \approx 7.1$  mm) et  $S_0$  ( $\lambda \approx 15$  mm) à cette fréquence, pour un réseau ayant un pas spatial de 5 mm. Les rapports d'amplitude avec les modes secondaires sont respectivement de 25 et 28 dB. Cependant on n'utilise pas le mode  $A_0$  car sa longueur d'onde ne permet pas de respecter le critère de Nyquist-Shannon, ce qui entraîne l'apparition d'un faisceau parasite dans la direction opposée à celle désirée (paragraphe 5.3.3.1). Un signal de 12 cycles est utilisé (bande fréquentielle de 0.05 MHz à -3 dB), et un faisceau ultrasonore balaie toutes les directions de 0° à 360° autour de la sonde. Progressivement, pour chacune des directions, on sélectionne à la réception le mode  $S_0$  (d'autres modes peuvent exister du fait de conversion de mode à la réflexion), et on compense éventuellement sa dispersion. Il en résulte des enveloppes de signaux de faible étendue spatiale et dont les positions dans les directions

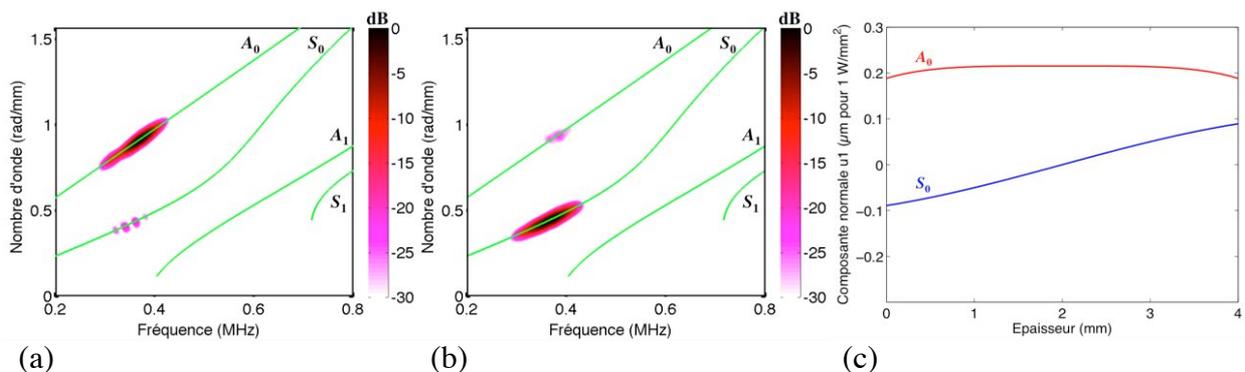


Figure 4.5 : Excitation des modes de Lamb d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, à 0.35 MHz, par la méthode *Phased array* dans la direction 0° de la sonde multiélément matricielle : (a) mode  $A_0$ , (b) mode  $S_0$ , (c) courbes théoriques de la composante normale des champs de déplacement normalisés en puissance.

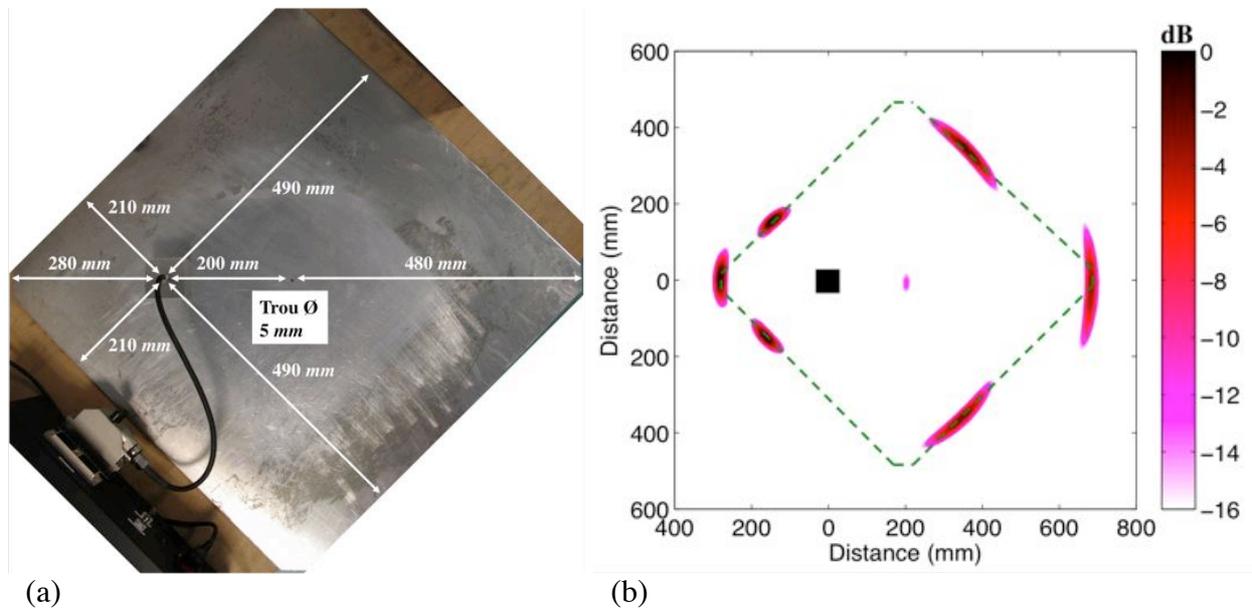


Figure 4.6 : Détection, par émission et réception du mode  $S_0$  à  $0.35 \text{ MHz}$  (sonde matricielle en mode pulse écho), des bords d'une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur et d'un trou de  $5 \text{ mm}$  de diamètre percé en son centre : (a) photographie de la sonde positionnée sur la structure, (b) image, normalisée en amplitude, des bords de la plaque et du trou, obtenue après post traitement. La sonde (carré noir) et le contour de la plaque (pointillés verts) sont indiqués sur l'image.

d'auscultation correspondent précisément aux positions des réflecteurs. L'ensemble des enveloppes ainsi obtenues pour tous les réflecteurs permet de construire une image de la plaque et de ses éléments qui réfléchissent une partie de l'onde incidente en direction de la sonde. La figure 4.6.b montre la distribution spatiale 2D des enveloppes obtenues pour la plaque en aluminium. Les bords de la plaque qui ont renvoyé un écho directement à la sonde, ainsi que le trou situé au centre sont parfaitement imagés et positionnés. Les positions estimées coïncident avec les distances réelles avec un écart maximal de  $\pm 5 \text{ mm}$ . Les dimensions des images en largeur et en profondeur (respectivement dans les directions transverses et parallèles à la direction de propagation), reflètent la résolution spatiale, qui est conditionnée par la longueur d'onde du mode utilisé, la directivité du faisceau ultrasonore et la qualité du post traitement (compensation de la dispersion). Dans cet exemple l'image du trou a une limite de résolution de  $15 \text{ mm}$  dans la direction de propagation et de  $35 \text{ mm}$  dans le sens transverse. La largeur et la forme légèrement incurvée des images des bords de plaque sont aussi dues à la limite de la directivité. La résolution dépend évidemment de la longueur d'onde, qui doit cependant rester suffisamment grande pour garantir la bonne sélectivité modale par la sonde. La qualité de l'imagerie dépend également d'autres facteurs comme la bande fréquentielle exploitable (bande passante des transducteurs), l'excitabilité des modes, leur atténuation, leur sensibilité aux défauts présents ou encore la bonne connaissance des courbes de dispersion, qui a un impact sur la performance de la méthode *Phased array* et sur la compensation de la dispersion.

#### 4.3.2.2 Type délaminage 3D dans composite

La sonde multiélément est positionnée tour à tour sur deux plaques, à savoir une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de  $1.6 \text{ mm}$  d'épaisseur et une plaque carbone-époxy unidirectionnelle de  $2.7 \text{ mm}$  d'épaisseur. A l'intérieur de ces deux plaques (entre le 3<sup>ème</sup> et le 4<sup>ème</sup> pli pour la première composée de 12 plis croisés, et entre le 5<sup>ème</sup> et le 6<sup>ème</sup> pli pour la seconde composée de 20 plis alignés), se trouvent deux composants circulaires. L'un est

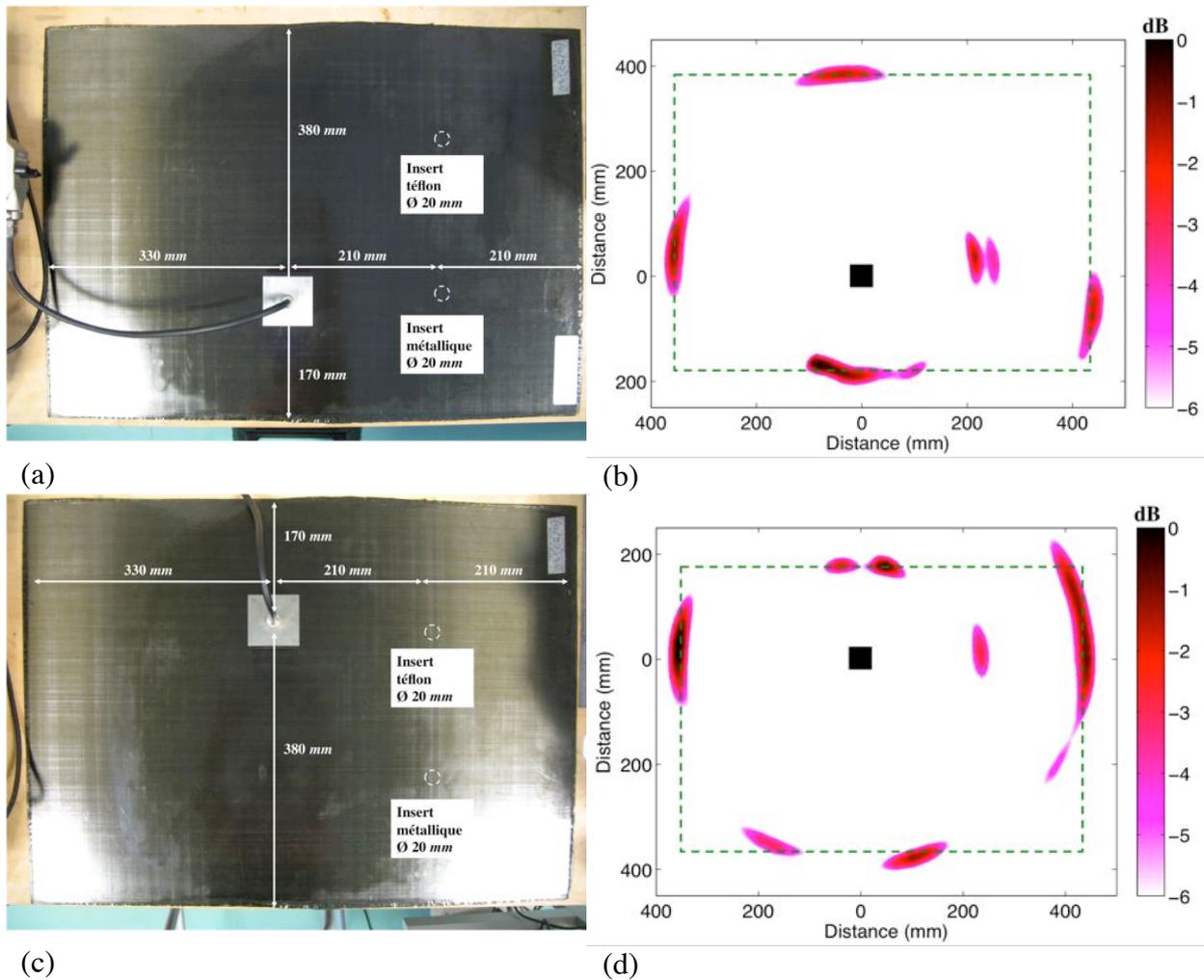


Figure 4.7 : Détection, par émission et réception du mode  $S_0$  à  $0.35 \text{ MHz}$ , des bords d'une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de  $1.6 \text{ mm}$  d'épaisseur et de deux inserts de  $20 \text{ mm}$  de diamètre ; l'un métallique (1<sup>ère</sup> ligne), l'autre en téflon (2<sup>ème</sup> ligne) : (a) (c) photographies de la sonde positionnée sur la structure, (b) (d) images, normalisées en amplitude, obtenues après post traitement. La sonde (carré noir) et le contour de la plaque (pointillés verts) sont indiqués sur les images.

métallique et l'autre en téflon (polymère). Tous deux font  $20 \text{ mm}$  de diamètre avec une épaisseur de  $0.13 \text{ mm}$  (équivalent à l'épaisseur d'un pli). Ils ont été introduits dans les deux plaques afin de simuler un délaminage de dimension finie dans le plan de la plaque. La nature différente des deux inserts permet de tester la sensibilité de la méthode.

Le premier cas étudié est celui du composite croisé. Les axes de la sonde sont alignés avec les directions des fibres du composite. Tout d'abord, la sonde est positionnée de telle manière que son alignement avec l'insert métallique soit parallèle à la direction des fibres dans le sens de la longueur de la plaque (figure 4.7.a). Le mode  $S_0$  est choisi et excité par un burst de 12 cycles à  $0.35 \text{ MHz}$  ( $\lambda \approx 18 \text{ mm}$ ) car il possède une forte excitabilité, peut être bien échantillonné et a une atténuation limitée. Le mode incident est envoyé dans les directions principales entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ . Le fait que la sonde soit, par rapport à l'insert, dans la direction des fibres n'est pas anodin, car comme il a été dit précédemment, dans ce type de composite les ondes de Lamb, comme le mode  $S_0$ , sont fortement canalisées le long des fibres. Les zones qui peuvent être les plus facilement auscultées, dans ce cas, sont situées dans ces directions du matériau. Dans chacune des directions possibles d'inspection, un faisceau ultrasonore du mode  $S_0$  est généré, puis les données collectées à la réception pour chaque cas permettent de

localiser un éventuel réflecteur dans la direction considérée. Une image du réflecteur peut être obtenue en effectuant une reconnaissance de la direction de propagation du mode sur un certain domaine angulaire. Les images obtenues pour chacune des directions d'inspection sont alors assemblées pour former une image globale. La figure 4.7.b montre l'image obtenue après le post traitement des données. Les bords de plaque et l'insert métallique sont bien détectés et positionnés dans l'image. Par contre, il est impossible à  $45^\circ$  de détecter le second insert en téflon, à cause de la forte atténuation du mode  $S_0$  dans cette direction. Les positions estimées des bords de la plaque et de l'insert détecté coïncident avec les positions réelles, avec un écart maximal de  $\pm 10 \text{ mm}$  (ceci peut être dû à une plus grande imprécision sur les courbes de vitesses d'énergie, que dans le cas de l'aluminium). On note cependant que l'insert cache une partie du bord de la plaque du fait d'une forte réflexion de l'onde incidente. La résolution spatiale permet ici de distinguer les deux bords de l'insert métallique dans la direction de propagation, car la longueur d'onde est suffisamment petite. Comme précédemment observé, la largeur des images et la forme légèrement incurvée sont dues à la longueur d'onde et l'ouverture angulaire de la sonde. Ainsi l'image de l'insert métallique a une limite de résolution de  $100 \text{ mm}$  de largeur et  $40 \text{ mm}$  en profondeur. Toutefois, la double réflexion de l'onde, dans la direction sonde-insert, par les deux bords de l'insert, permet de dimensionner ce dernier dans cette direction.

Pour détecter le second insert en téflon, la sonde est déplacée jusqu'à ce que le faisceau ultrasonore, canalisé par les fibres, puisse l'atteindre (figure 4.7.c). La figure 4.7.d montre l'image obtenue après le post traitement des données acquises lors de cette deuxième mesure, elle aussi réalisée sur  $360^\circ$ . On retrouve des résultats similaires à ceux de la première mesure. Les bords de plaque et l'insert en téflon sont bien détectés et positionnés dans l'image. Par contre, il est impossible de détecter l'insert métallique. On parvient à détecter l'insert en téflon, mais on peut voir que l'amplitude de l'onde réfléchi est plus faible que pour le métallique et que seul l'écho du premier bord de l'insert (par rapport au faisceau incident) est détecté. On a donc une différence de sensibilité du mode  $S_0$  du fait des caractéristiques physiques différentes de ces deux inserts. On peut également noter que la détection de certains bords de la plaque (haut et bas de l'image) est discontinue. On le constate aussi quelque peu sur la première mesure (figure 4.7.b). Ceci peut être dû à un mauvais alignement des fibres localement, ou alors à un endommagement de celles-ci, qui provoque la non régularité de l'amplitude du front d'onde durant la propagation du mode guidé dans cette direction.

Le deuxième cas est celui du composite unidirectionnel. La démarche est similaire à celle employée pour le composite croisé. La sonde est d'abord positionnée dans l'alignement de l'insert métallique, par rapport à la direction des fibres (figure 4.8.a). Pour les mêmes raisons que pour le composite croisé, le mode  $S_0$  est choisi et excité par un burst de 12 cycles à  $0.35 \text{ MHz}$  ( $\lambda \approx 25 \text{ mm}$ ). Le mode incident est envoyé dans toutes les directions principales entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ . Dans ce cas, l'atténuation et l'effet de canalisation dominant et le mode guidé ne se propage qu'au voisinage de la direction des fibres. Les caractéristiques de ce composite unidirectionnel (courbes de dispersion, annexe B) ne permettent pas de travailler à des fréquences plus élevées (atténuation et chute de la vitesse de phase du mode  $S_0$ ) pour avoir une longueur d'onde plus petite. De ce fait la qualité, en terme de résolution, de l'image est très limitée, avec en plus une grande ouverture angulaire. La figure 4.8.b montre la détection des bords de la plaque situés à l'avant et à l'arrière de la sonde (par rapport à la direction des fibres), et celle de l'insert métallique. Leur position est correctement déterminée avec un écart maximal de  $\pm 10 \text{ mm}$ . La résolution spatiale ne permet pas ici de distinguer les deux bords de l'insert métallique dans la direction de propagation, car la longueur d'onde est trop grande. Ainsi l'image de l'insert métallique a une limite de résolution plus importante :

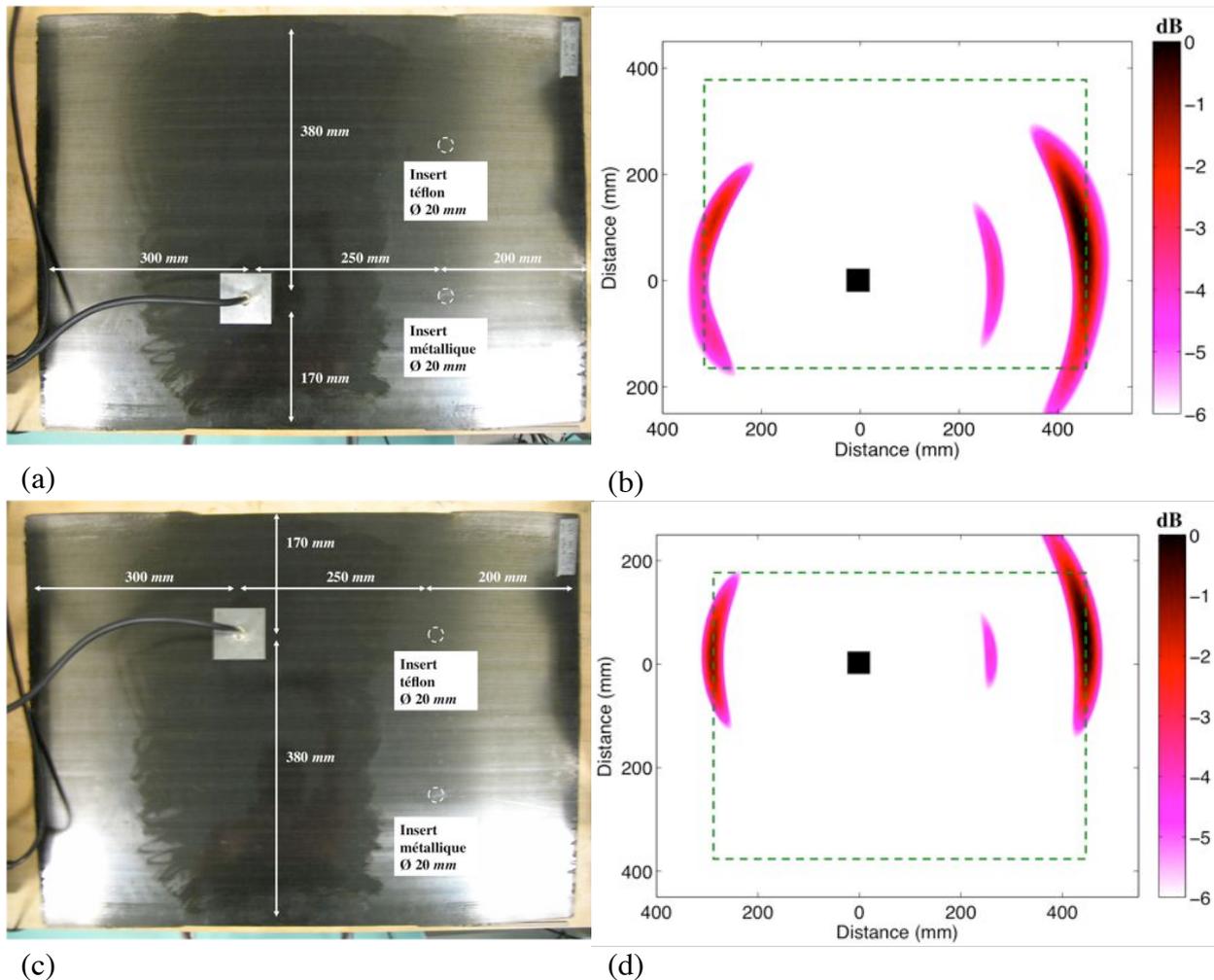


Figure 4.8 : Détection, par émission et réception du mode  $S_0$  à  $0.35 \text{ MHz}$ , des bords d'une plaque composite unidirectionnelle de  $2.7 \text{ mm}$  d'épaisseur et de deux inserts de  $20 \text{ mm}$  de diamètre ; l'un métallique (1<sup>ère</sup> ligne), l'autre en téflon (2<sup>ème</sup> ligne) : (a) (c) photographies de la sonde positionnée sur la structure, (b) (d) images, normalisées en amplitude, obtenues après post traitement. La sonde (carré noir) et le contour de la plaque (pointillés verts) sont indiqués sur les images.

200 mm de largeur et environ 25 mm de profondeur.

La sonde est à nouveau déplacée afin de détecter, cette fois, l'insert en téflon (figure 4.8.c). Les bords de la plaque (dans la direction des fibres) et l'insert sont bien détectés et bien positionnés dans l'image (figure 4.8.d). Là aussi le mode  $S_0$  montre une sensibilité moindre à cet insert (amplitude du signal plus faible que pour l'insert métallique).

#### 4.3.2.3 Type endommagement par impact sur composite courbé avec raidisseur

Le procédé est à présent testé pour détecter un endommagement causé par un impact sur un échantillon composite de l'aéronautique (Airbus) de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur présentant une légère courbure et qui est munie de 4 raidisseurs composites (figure 4.9). Le défaut est causé par un impact calibré réalisé entre deux raidisseurs, avec un impacteur dont la masse est de  $3.36 \text{ kg}$ , la vitesse de  $2.46 \text{ m/s}$  et pendant une durée de  $5.8 \text{ ms}$ . Ce type de matériau est vulnérable aux impacts, car même à faible énergie, ils peuvent produire des délaminages internes et des fissurations de la matrice sans laisser de trace visuelle en surface. Deux mesures sont réalisées. Pour la première, la sonde et l'endommagement sont alignés parallèlement à la direction des raidisseurs (il n'y a pas de raidisseur entre la sonde et

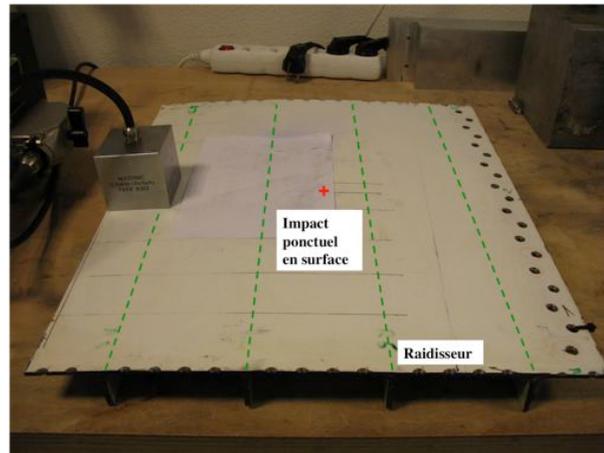


Figure 4.9 : Photographie de la sonde multiélément positionnée sur la structure composite courbée, composée de 4 raidisseurs, et sur laquelle un impact calibré a été réalisé.

l'endommagement) et on exécute une auscultation sur  $360^\circ$  de la structure (figure 4.10.a). Dans la deuxième mesure, l'alignement de la sonde et du défaut est perpendiculaire à la direction des raidisseurs, et le défaut est dissimulé derrière l'un d'eux (figure 4.11.a). Les caractéristiques de la plaque étant inconnues, une évaluation des courbes de dispersion de la structure par le procédé utilisant la méthode *Phased array* (paragraphe 4.2) est réalisée (les courbes obtenues doivent rester confidentielles). Cette évaluation est seulement exécutée dans la direction parallèle aux raidisseurs pour ne pas être perturbée par leur présence. Le matériau étant probablement anisotrope, cette évaluation reste approximative pour les autres directions. Les résultats obtenus, décrits dans la suite, montrent tout de même un bon accord sur les vitesses de phase et de groupe dans la direction perpendiculaire aux raidisseurs. Le mode  $S_0$  se révèle, là encore, le mieux adapté dans la bande fréquentielle exploitable. Le mode  $A_0$ , dont la longueur d'onde est trop petite pour être correctement échantillonnée, nécessiterait de travailler à plus basse fréquence, autour de  $0.1 \text{ MHz}$ . Le mode  $S_0$  est excité à la fréquence centrale de  $0.5 \text{ MHz}$  ( $\lambda \approx 14 \text{ mm}$ ) par un burst de 12 cycles. Lors de la première mesure, le résultat (figure 4.10.b) montre la détection du défaut et du bord arrière de la plaque, et sur les côtés, des bords de la plaque et des raidisseurs. Les deux raidisseurs proches de la sonde ne sont pas distingués car ils se trouvent dans la « zone morte » de la sonde, c'est à dire que le signal réfléchi par ces raidisseurs a une durée de propagation inférieure au temps limite minimal d'acquisition, qui est fixé par la durée de l'émission et par une durée (distance) jugée trop faible pour respecter le principe des ondes planes (fixé à une dizaine de longueurs d'onde). On note également la détection, sur le côté supérieur de l'image, d'une des perforations de  $5 \text{ mm}$  de diamètre réalisées par le constructeur. Elle est visible même si elle ne se distingue pas complètement de l'écho du raidisseur dont elle est proche. Cette mesure nous permet de constater que le mode  $S_0$  est à la fois sensible à la présence des raidisseurs et à l'endommagement par impact. Cependant on ne parvient à collecter des informations que dans les directions parallèle et perpendiculaire aux raidisseurs. Ceci peut être expliqué soit par une anisotropie qui empêche une bonne propagation du mode dans d'autres directions, soit par le fait qu'une incidence oblique des faisceaux ultrasonores sur les raidisseurs dévie ces derniers et empêche toute réflexion dans la direction de la sonde. On peut également penser que la courbure de la plaque (perpendiculaire à la direction des raidisseurs) favoriserait la propagation des ondes dans ces deux directions. Comme on peut le voir sur l'image (figure 4.10.b), l'endommagement et les différentes parties (raidisseurs, trou, bords de plaque) du composite sont correctement positionnées avec un écart maximal de  $\pm 10 \text{ mm}$ . La dimension de l'image de l'endommagement est de  $50 \text{ mm}$  de largeur par  $20 \text{ mm}$  de profondeur (direction de propagation). La résolution est donc limitée par la longueur d'onde et la directivité de la

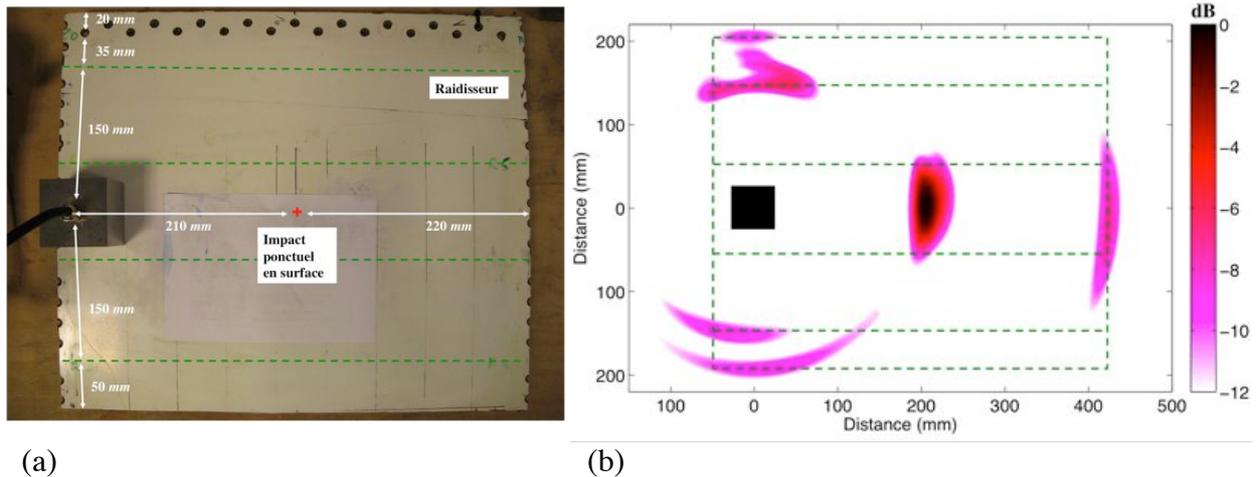


Figure 4.10 : Détection, par émission et réception du mode  $S_0$  à  $0.5\text{ MHz}$ , des bords et raidisseurs d'une plaque composite de  $4\text{ mm}$  d'épaisseur, d'un trou de  $5\text{ mm}$  de diamètre et d'un impact ponctuel : (a) photographie de la sonde positionnée sur la structure, (b) image, normalisée en amplitude, obtenue après post traitement. La sonde (carré noir), le contour de la plaque et les raidisseurs (pointillés verts) sont indiqués sur l'image.

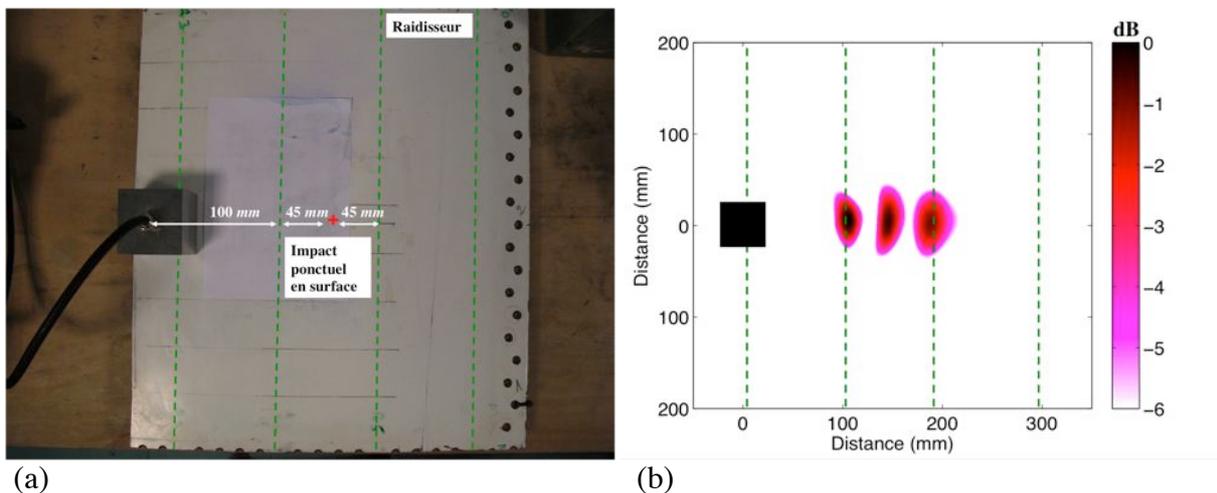


Figure 4.11 : Détection, par émission et réception du mode  $S_0$  à  $0.5\text{ MHz}$ , de deux raidisseurs d'une plaque composite de  $4\text{ mm}$  d'épaisseur et d'un impact ponctuel situé entre les deux : (a) photographie de la sonde positionnée sur la structure, (b) image, normalisée en amplitude, obtenue après post traitement. La sonde (carré noir) et les raidisseurs (pointillés verts) sont indiqués sur l'image.

sonde qui cause une certaine courbure des images. Lors de la deuxième mesure, on ausculte uniquement la direction dans laquelle se trouve l'endommagement, perpendiculairement aux raidisseurs. La figure 4.11.b indique les positions de la sonde, des deux raidisseurs et de l'endommagement situé entre ces deux raidisseurs. Le mode  $S_0$  et la fréquence employée ( $0.5\text{ MHz}$ ) permettent de visualiser la présence de l'endommagement qui est pourtant dissimulé derrière le raidisseur par rapport à la sonde. La résolution de l'endommagement est meilleure car plus proche de la sonde avec une largeur de  $30\text{ mm}$  et une profondeur de  $20\text{ mm}$ .

### 4.3.3 Confrontation avec d'autres procédés

Dans le cadre de ce travail, une campagne de mesures est réalisée afin de confronter les résultats, les performances et les limites de la méthode MEOG *Phased array*, appliquée au système multiélément matriciel, avec ceux d'autres techniques de contrôle non destructif pour

l'auscultation de structures type plaque. Les différentes techniques sont comparées selon des critères en rapport avec la facilité d'utilisation, la rapidité, la qualité de détection, la résolution, etc. En illustration, des résultats d'imagerie des composites carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  et unidirectionnel (UD), avec leurs deux inserts de 20 mm de diamètre, l'un métallique et l'autre en téflon (paragraphe 4.3.2.2), sont montrés. Les techniques employées, thermiques et ultrasonores, sont utilisées au sein du laboratoire I2M et de l'entreprise CETIM.

#### 4.3.3.1 Les différentes méthodes CND employées

La première méthode utilisée est celle de la thermographie infrarouge active [7]. Il s'agit d'une technique de mesure des températures de surface qui met essentiellement en œuvre les transferts de chaleur par conduction et rayonnement thermique. Elle permet d'obtenir, au moyen d'une caméra thermique, une carte de luminance de la scène thermique observée dans le domaine spectral de l'infrarouge. Grâce à la caméra thermique, on obtient donc une image thermique d'une scène thermique. La technologie interne de la caméra et les programmes intégrés permettent de rendre ce rayonnement visible au travers d'une image reconstituée. L'opération de transcription de température permettra alors d'obtenir un thermogramme. Le contrôle de pièce par mesure de température permet une observation des effets thermiques de surface, et donne donc des informations sur la structure interne d'un matériau comme la mise en évidence des inhomogénéités. On parle alors de thermographie infrarouge passive. Elle est classiquement utilisée pour le contrôle d'installation électrique ainsi que le contrôle d'isolation thermique des bâtiments. Toutefois, pour des applications CND, où généralement le composant à contrôler ne génère pas spontanément de la chaleur, il existe une alternative qui consiste à lui apporter une stimulation thermique extérieure bien maîtrisée afin de provoquer l'apparition d'un gradient. Cela consiste à chauffer de manière contrôlée la surface du matériau inspecté et à mesurer l'évolution de température résultante (propagation de la chaleur) grâce à la caméra infrarouge qui analyse des séquences d'images. On parle alors de thermographie infrarouge active. En fonction du matériau à analyser, de son épaisseur, de la nature et de la taille du défaut recherché, différentes sources d'excitation sont utilisées afin d'échauffer la pièce à contrôler. On retrouve des excitations par lampes halogènes, par lampes flashes, par ondes ultrasonores ou encore par induction électrique.

Lors des mesures sur le composite croisé, c'est l'excitation par lampes flashes qui est réalisée (figure 4.12). Une face de l'échantillon est soumise à une importante impulsion de chaleur par rayonnement et on observe le phénomène de barrière thermique situé au niveau des zones endommagées. L'excitation et la mesure se déroulent du même côté de la plaque (mesure en réflexion). L'air étant un très bon isolant, la propagation de la chaleur se limite à la pièce testée. On utilise une caméra SC7600 refroidie de *FLIR systems*, ainsi qu'un objectif de 35 mm. L'acquisition des images est réalisée grâce au logiciel *DisplayImg*. Le dispositif d'excitation est composé de deux lampes flashes, de son générateur, et d'un boîtier de synchronisation permettant de synchroniser la détection avec l'excitation. Il est possible d'analyser la séquence d'images enregistrées dans le domaine temporel, pour distinguer une variation de propagation de chaleur au sein du matériau. Une soustraction de l'image initiale, à tout le reste de la séquence d'images, est également réalisée afin de visualiser les variations de température dans le temps. Une analyse fréquentielle de l'évolution temporelle des températures peut être réalisée. A partir de la série de thermogrammes enregistrés durant la phase d'excitation et de refroidissement de la pièce, une transformée de Fourier de cette évolution est calculée pour chaque pixel. Il est donc possible d'obtenir des images en représentant la phase et l'amplitude en fonction de la fréquence pour chaque pixel de la matrice. L'intérêt de travailler dans le domaine fréquentiel réside dans le fait que les variations d'émissivité en surface, les réflexions dues à l'environnement extérieur,

l'inhomogénéité du chauffage et les variations de la géométrie de la pièce n'affectent guère la phase. Ainsi en diagramme de phase, le contraste d'un défaut est considérablement amélioré, par rapport à une analyse temporelle de la séquence d'images. Pour exciter la pièce à contrôler on fixe une fréquence d'acquisition d'images de  $50 \text{ Hz}$ , une durée d'excitation

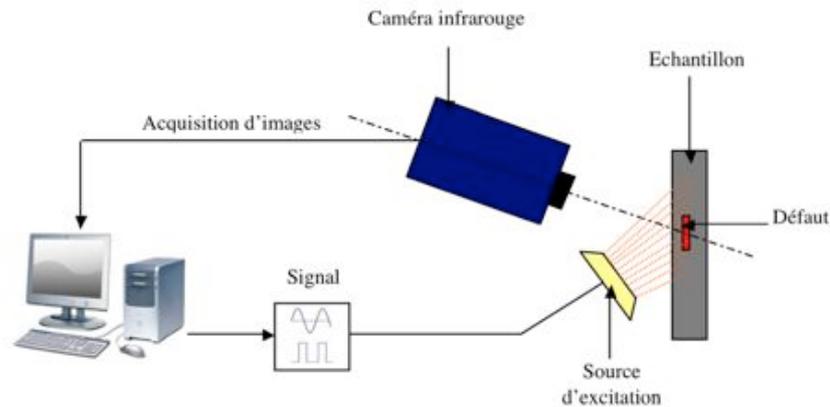


Figure 4.12 : Schéma du montage de la technique de thermographie infrarouge active, avec excitation par lampe flash.

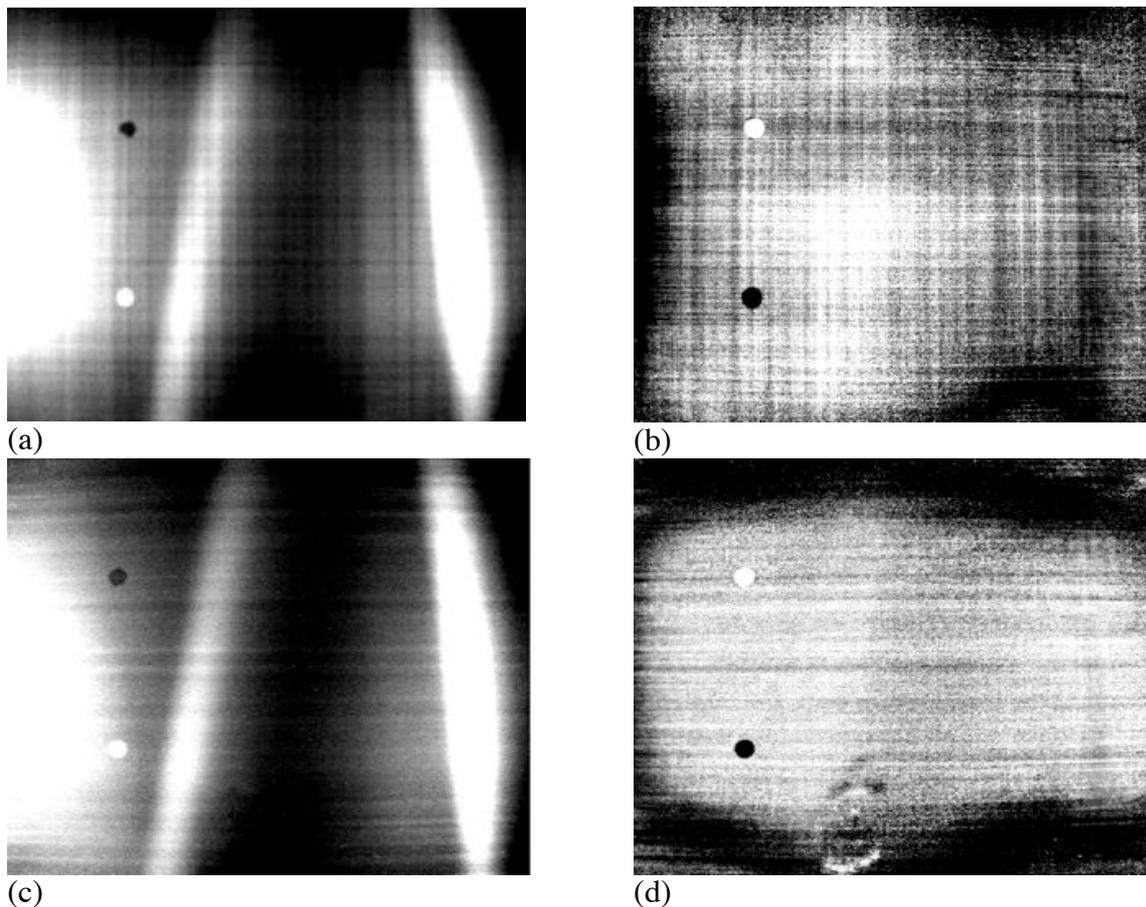


Figure 4.13 : Images obtenues par thermographie infrarouge active, détection d'un insert métallique (en haut) et d'un insert en téflon (en bas) de  $20 \text{ mm}$  de diamètre dans un composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de  $1.6 \text{ mm}$  d'épaisseur (1<sup>ère</sup> ligne) et dans un composite carbone-époxy unidirectionnel de  $2.7 \text{ mm}$  d'épaisseur (2<sup>ème</sup> ligne) : (a) (c) image temporelle, avec soustraction de l'image initiale,  $0.2 \text{ s}$  après le flash, (b) (d) image de phase avec une fréquence d'analyse de  $0.7 \text{ Hz}$ .

environ égale à la durée du flash, une durée d'acquisition de 10 secondes et une fréquence d'analyse des images comprise entre  $0.1\text{ Hz}$  et  $12.5\text{ Hz}$ . On peut voir les images réalisées sur la figure 4.13.

La deuxième méthode est celle du scan par ultrason en onde volumique à haute fréquence ( $5\text{ MHz}$ ). Une barrette multiélément linéaire (*Imasonic*), composée de 64 éléments piézoélectriques (avec un pas spatial de  $0.8\text{ mm}$ ), est fixée sur un sabot en réxolite de  $20\text{ mm}$  d'épaisseur (vitesse de propagation longitudinale de  $2.35\text{ mm}/\mu\text{s}$ ), qui est positionné en contact surfacique avec la structure étudiée. Un couplage gel est utilisé entre la barrette et le sabot, et entre le sabot et la plaque. L'objectif est de réaliser plusieurs séquences avec un certain nombre d'éléments afin de balayer la zone située sous la barrette. On focalise, à l'aide de lois de retard, un faisceau ultrasonore généré par 8 ou 12 éléments successifs (équilibre à choisir entre le nombre de mesures possibles et la qualité de la focalisation), à l'interface sabot/plaque. Un décalage des éléments excitateurs est réalisé le long de la barrette pour inspecter toute la zone que cette dernière couvre (figure 4.14). L'onde excitée en surface de la plaque se propage dans l'épaisseur et les échos sont réceptionnés par les mêmes éléments de la sonde (fonctionnement pulse écho). Par la mesure des temps de vol des signaux, un C-scan est progressivement construit en déplaçant le sabot, grâce à un système automatisé en translation dans le plan ou à la main, sur la surface de la plaque (figure 4.15.a).

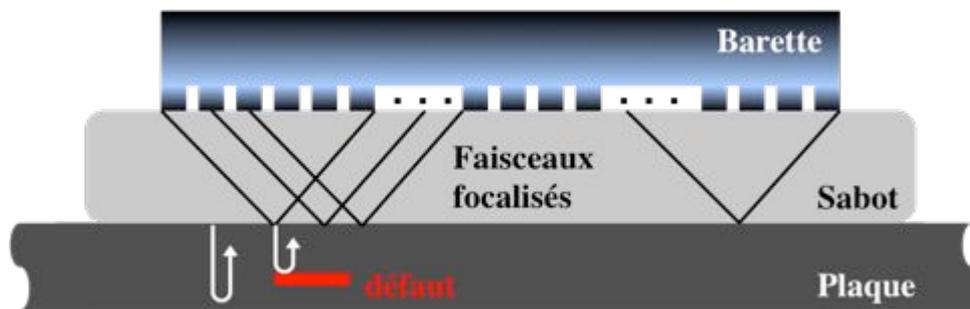


Figure 4.14 : Schéma du principe de scan par ultrason volumique à haute fréquence avec une barrette multiélément réalisant un balayage en translation dans la zone qu'elle couvre. La création du scan se fait par l'analyse des temps de vol.

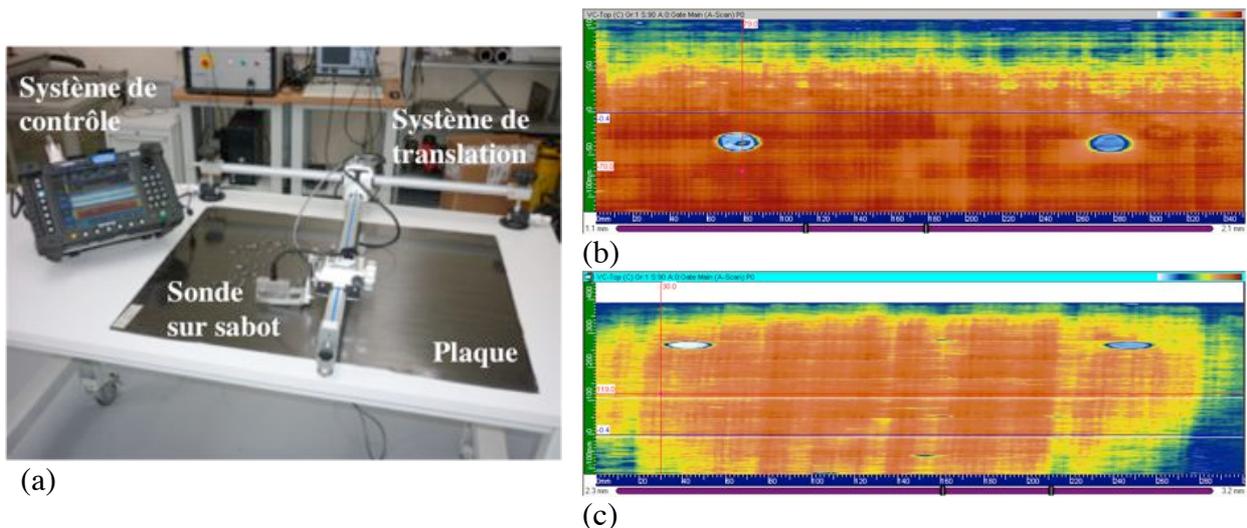


Figure 4.15 : Réalisation du C-scan et détection de l'insert métallique (à droite) et de l'insert en téflon (à gauche) de  $20\text{ mm}$  de diamètre dans les deux composites carbone-époxy : (a) photographie du dispositif de mesure et de translation de la sonde, (b) image du C-scan pour le  $[0^\circ/90^\circ]_3\text{s}$  de  $1.6\text{ mm}$  d'épaisseur, (c) image du C-scan pour l'unidirectionnel de  $2.7\text{ mm}$  d'épaisseur.

Un signal d'excitation de quelques cycles (2-3) à 5 MHz est envoyé sur les différents éléments excitateurs, qui sont plus ou moins retardés afin de focaliser l'onde en surface de la plaque. Les lois de retard prennent en compte la position des éléments, celle du point de focalisation et la vitesse de propagation des ondes longitudinales dans le réxolite. On utilise le système *Omniscan* d'*Olympus* permettant, tout en effectuant les mesures (scan sous la sonde), une translation automatisée de la sonde, sur les 2 axes du plan de la plaque (il faut veiller à ce que le couplage gel reste constant). Pour chaque position de la sonde, 53 séquences (focalisations + réceptions correspondantes) sont réalisées (de 12 éléments chacune), avec un décalage de 0.8 mm à chaque fois, couvrant ainsi une zone d'environ 42 mm sous la sonde. La figure 4.15.b et la figure 4.15.c montrent une partie du C-scan obtenu pour les plaques composites carbone-époxy [0°/90°]3s et unidirectionnelle, où se trouvent les inserts métallique et polymère. On obtient des images dont les dimensions correspondent à la réalité.

Enfin, une autre méthode ayant recours aux ondes guidées (ondes de Lamb) est également employée. Cette méthode utilise l'inclinaison du transducteur (loi de Snell-Descartes) par rapport au plan de la surface de la plaque pour générer et recevoir certains modes de Lamb spécifiques. Elle emploie des transducteurs capacitifs à couplage air vus lors des méthodes de caractérisation du paragraphe 2.4.1. Une photographie du montage est visible sur la figure 1.7.f. Les sondes capacitives employées ont une large bande fréquentielle (environ 50 à 450 kHz). Lors des mesures, elles sont utilisées entre 0.1 et 0.3 MHz. Elles fonctionnent en mode pitch catch, et sont disposées en vis à vis (même inclinaison, grâce à un système automatisé, *Newport*). Ainsi seule la zone située entre les deux sondes est auscultée. On peut soit faire varier manuellement l'inclinaison des sondes pour identifier des maxima d'amplitude correspondant aux modes guidés, qui se propagent entre l'émetteur et le récepteur, soit calculer les angles d'incidence nécessaires (via les lois de Snell-Descartes) si l'on connaît les courbes de dispersion de la plaque. Il faut cependant être attentif car cette méthode est particulièrement sensible aux imprécisions d'angle (paragraphe 2.4.1.3), la mesure sur différentes zones peut parfois se compliquer à cause d'éventuelles variations d'épaisseur de la structure ou si la plaque n'est pas parfaitement plane. Les sondes employées sont suffisamment larges (50 mm) pour considérer que leur ouverture angulaire est réduite (évite de générer d'autres modes) et que les fronts d'onde émis dans l'air sont plans, ce qui permet de positionner les sondes à environ 50 mm de la plaque. L'excitation de la sonde émettrice se fait à l'aide d'un générateur de signal (*WaveMaker Duet*), puis à la réception les signaux sont filtrés et amplifiés (*Ampli NF Electronic Instruments* + ampli de charges *Cooknell*) avant d'être visualisés à l'oscilloscope (*LeCroy*). On observe la présence du défaut par une éventuelle chute d'amplitude du signal mesuré, par rapport au signal obtenu dans une zone saine. Les sondes sont ensuite déplacées (en translation le long d'un axe perpendiculaire à la direction de propagation) pour couvrir d'autres zones, et ainsi élaborer un scan de la structure (figure 4.16). Durant la réalisation des mesures, il s'avère difficile, avec ce système à couplage air, d'avoir une bonne excitation de tous les modes, comme le mode  $S_0$  (couplage réduit de ce mode avec l'air et aux fréquences employées). Mais il est tout à fait possible de générer et détecter le mode  $A_0$ .

L'inspection commence par le composite [0°/90°]3s. Le dispositif est d'abord aligné dans la direction  $e_3$  sur la figure 4.16 (une des deux directions des fibres), et la translation s'effectue selon  $e_2$ . On excite le mode  $A_0$  ( $\lambda \approx 10.6$  mm) à 0.1 MHz (signal gaussien de 10 cycles). La sonde réceptrice est située à environ 100 mm derrière les inserts et les deux sondes sont espacées de 540 mm, ce qui permet de scanner une zone très étendue de la plaque. Ceci est possible grâce à la faible atténuation du mode  $A_0$  à cette fréquence dans la plaque composite et à l'emploi de capteurs ultrasonores air de dernière génération (fabrication I2M) qui garantissent un rapport signal sur bruit d'environ 4.5. De plus un moyennage sur une

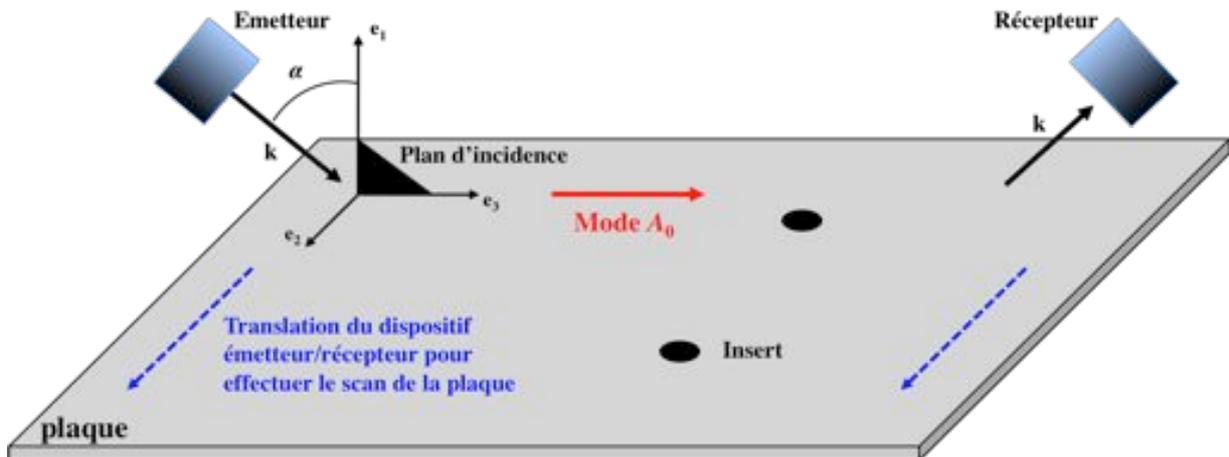


Figure 4.16 : Schéma du principe du scan par onde guidée via un système de transducteurs ultrasonores capacitifs inclinés à couplage air.

trentaine d'acquisition est réalisé. Les amplitudes (crête à crête) des signaux (correspondant au mode se propageant) sont alors relevées sur l'oscilloscope et notées en fonction de la position du dispositif dans la direction de translation. La figure 4.17.a montre le résultat obtenu du scan. On s'aperçoit que lorsque la propagation du faisceau ultrasonore passe par la position des défauts, il y a bien une décroissance d'amplitude. Ceci est particulièrement visible avec l'insert en téflon, pour lequel la chute d'amplitude du signal coïncide avec la position centrale de l'insert. Ce qui est beaucoup moins net pour l'insert métallique. Il faut noter qu'il est possible de mesurer, au niveau des bords d'un défaut, des chutes d'amplitude, et au niveau du centre un pic d'amplitude. Ce phénomène est dû à des interférences constructives des ondes qui passent des deux côtés du défaut, et dépend de la taille de ce dernier, de la longueur d'onde et de la taille des transducteurs. Ce phénomène a été étudié en détail et confirmé par des simulations numériques [121]. La largeur spatiale de la variation d'amplitude mesurée peut donner une approximation de la largeur du défaut [122]. Il faut cependant tenir compte de l'ouverture et de la largeur du faisceau ultrasonore (dépendant de la taille du capteur et de la longueur d'onde) qui s'ajoute à celle du défaut. Le résultat obtenu montre aussi quelques variations d'amplitude qui peuvent provenir de défauts inconnus, de variations d'épaisseur de la plaque, d'une courbure de celle-ci ou encore d'un mauvais alignement des fibres.

La deuxième mesure consiste à effectuer le scan dans la direction perpendiculaire à la précédente (dispositif aligné selon  $e_2$  et translation suivant  $e_3$ ). Les sondes sont placées aux deux extrémités de la plaque (espacées de 360 mm). On emploie la même excitation à la même fréquence que précédemment. La figure 4.17.b montre bien le positionnement des inserts, qui dans ce cas sont alignés. On peut également visualiser une autre chute d'amplitude, mais dont l'origine reste inconnue. La décroissance observée vers le bord de la plaque est due à l'augmentation de son épaisseur dans cette zone, modifiant les caractéristiques du mode guidé. On termine cette mesure en rapprochant les sondes de façon à scanner un défaut à la fois, et on en profite pour augmenter la fréquence (0.3 MHz,  $\lambda \approx 4.4$  mm) afin d'avoir une ouverture plus faible du faisceau et une longueur d'onde plus petite, tout en veillant à ne pas être trop gêné par l'atténuation du mode qui augmente. Les deux transducteurs étant proches, on place un écran entre eux pour éviter les parasites dus à la transmission directe des ondes par l'air. Les résultats pour les deux inserts (figure 4.17.c et d) montrent une bonne détection et un bon positionnement des inserts, avec une meilleure estimation de la largeur dans le cas du téflon.

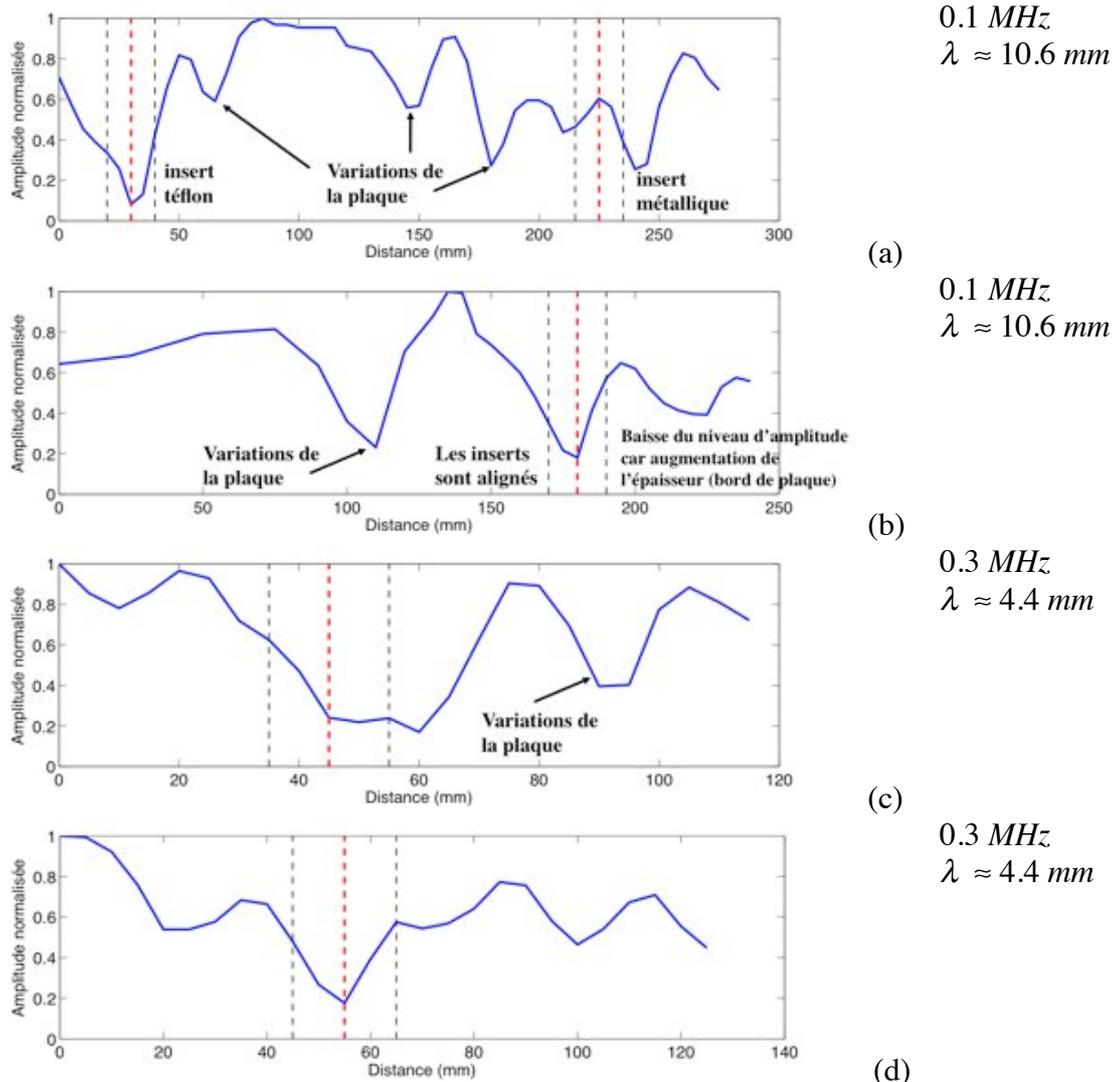


Figure 4.17 : Scans par onde guidée ( $A_0$ ) du composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_3s$  de  $1.6 \text{ mm}$  d'épaisseur via les transducteurs à couplage air : (a) translation suivant  $e_2$ , (b) translation suivant  $e_3$ , (c) translation suivant  $e_3$  autour de l'insert métallique, (d) translation suivant  $e_3$  autour de l'insert en téflon. Les axes sont définis sur la figure 4.16. La ligne pointillée rouge et épaisse indique la position centrale des inserts et les deux lignes pointillées noires et fines indiquent la position des deux extrémités des inserts.

L'inspection du composite unidirectionnel se déroule de la même manière avec les mêmes réglages en excitation et le même protocole. La direction des fibres coïncide ici avec la direction  $e_3$  (figure 4.16). Avec ce composite qui atténue plus fortement le mode  $A_0$ , il faut tout de même, lors du premier scan (translation suivant  $e_2$ ), rapprocher les sondes ( $360 \text{ mm}$ ). Et pour le scan dans la direction perpendiculaire (translation suivant  $e_3$ ), les sondes sont localisées à proximité de chacun des inserts, car l'atténuation du mode empêche une propagation sur toute la largeur de la plaque. L'ensemble des résultats (figure 4.18.a, b et c) montre une bonne localisation des deux inserts, une bonne évaluation de la largeur des deux inserts et des amplitudes qui ne sont pas perturbées par des variations diverses (peut-être grâce à une fabrication plus facile de ce composite).

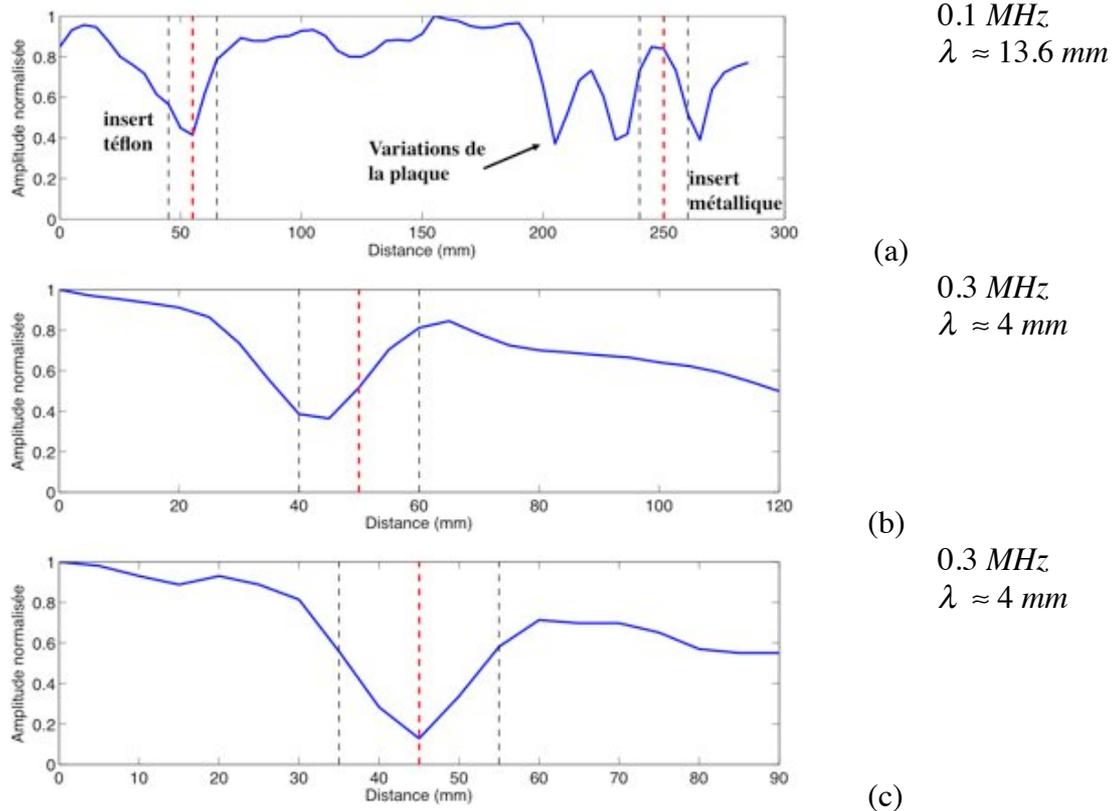


Figure 4.18 : Scans par onde guidée ( $A_0$ ) du composite carbone-époxy UD de  $2.7 \text{ mm}$  d'épaisseur via les transducteurs à couplage air : (a) translation suivant  $\mathbf{e}_2$ , (b) translation suivant  $\mathbf{e}_3$  autour de l'insert métallique, (c) translation suivant  $\mathbf{e}_3$  autour de l'insert en téflon. Les axes sont définis sur la figure 4.16. La ligne pointillée rouge et épaisse indique la position centrale des inserts et les deux lignes pointillées noires et fines indiquent la position des deux extrémités des inserts.

### 4.3.3.2 Bilan comparatif

L'ensemble des remarques sur les limites ou capacités des trois méthodes employées précédemment et de celles du procédé MEOG étudié, est regroupé dans la table 4.1. Ces informations sont classées selon certains critères pratiques et physiques, dont il est important de tenir compte dans l'application de ces techniques :

- ✓ La mise en place et la flexibilité du dispositif.
- ✓ L'étendue des zones inspectées.
- ✓ Les temps de mesures.
- ✓ Les contraintes sur la qualité des mesures.
- ✓ La sensibilité aux défauts, leur identification et leur dimensionnement.
- ✓ La reproductibilité des mesures.

Dispositif expérimental	Zones auscultées	Contraintes liées aux paramètres physiques	Sensibilité au défaut
<p><b>Thermographie infrarouge active avec lampe flash</b></p> <p>Système, à accès unilatéral, imposant avec caméra et sources d'excitation volumineuses, qui sont plus ou moins adaptées suivant le type de défauts et de matériaux étudiés.</p>	<p>Zone visible par la caméra (dépend de l'objectif), puis nécessite un déplacement du dispositif pour éventuellement compléter les mesures.</p>	<p>Nécessite une bonne conduction thermique du matériau et un bon rayonnement infrarouge. Les variations d'émissivité en surface, les réflexions dues à l'environnement extérieur, l'inhomogénéité du chauffage et les variations de la géométrie de la pièce peuvent affecter les résultats si on fait une analyse en temps plutôt qu'en phase.</p>	<p>Le défaut doit provoquer une discontinuité dans la propagation de la chaleur.</p>
<p><b>US volumique</b></p> <p>Système à accès unilatéral, imposant avec sonde et sabot couplés avec du gel, et système de translation.</p>	<p>Balayage sous la sonde à chaque mesure, puis déplacement de la sonde pour compléter les mesures.</p>	<p>Nécessite une longueur d'onde suffisamment grande (fréquence basse) pour ne pas être perturbée par les réflexions des différentes couches du matériau, si composite. Cependant l'analyse des temps de vol doit distinguer les différents échos (fréquence pas trop basse). Sensible à la viscoélasticité, aux variations d'épaisseur du matériau et aux variations du couplage par gel lors du déplacement de la sonde.</p>	<p>La longueur d'onde doit être suffisamment petite pour détecter le défaut (au plus, de l'ordre de la taille du défaut).</p>
<p><b>US Lamb couplage air</b></p> <p>Système à accès unilatéral, imposant avec sondes, bras de fixation et système de translation.</p>	<p>Zone située entre les deux sondes, émettrice et réceptrice, sur l'axe de propagation, puis déplacement du dispositif pour compléter les mesures.</p>	<p>Sensible aux variations angulaires des sondes dues à l'ouverture du faisceau ou, selon les modes, à la variation d'épaisseur de la plaque. Sensible à la viscoélasticité du matériau. Faiblesse de l'excitation de certains modes, due au couplage air.</p>	<p>Dépend de la longueur d'onde du mode de Lamb par rapport à la taille du défaut, de la nature du défaut et de sa position dans l'épaisseur de la plaque (il faut tenir compte du champ de contrainte du mode dans l'épaisseur).</p>
<p><b>Procédé MEOG Phased array multilatéral</b></p> <p>Système, à accès unilatéral, léger avec seulement une sonde.</p>	<p>Sur 360° autour de la sonde matricielle. La zone visible peut cependant varier suivant l'anisotropie du matériau et le mode employé. Possibilité d'ausculter des zones inaccessibles par la sonde.</p>	<p>Sensible à la configuration du réseau d'éléments, à la précision des courbes de dispersion qui doivent être connues. Sensible à la viscoélasticité du matériau et à la qualité du couplage, mais la puissance du mode incident permet la propagation sur de longues distances (de l'ordre du mètre)</p>	<p>Idem. Sensibilité augmentée grâce à un rapport signal sur bruit élevé par l'utilisation de plusieurs éléments en contact. Le phénomène de conversion modale sur un défaut peut être plus facilement exploité comme information supplémentaire par rapport aux autres techniques utilisant les ondes guidées.</p>

Résolution et dimension de l'image	Identification du type de défaut	Reproductibilité	Temps de l'auscultation
La résolution dépend de celle de la caméra. La dimension de l'image du défaut, dans le plan observé, correspond à la taille réelle. La dimension dans l'épaisseur n'est pas mesurable.	Non identifiable.	Bonne car sans contact.	Quelques minutes pour chaque zone inspectée (une seule mesure a suffi pour la plaque composite 750 x 550 mm). Cela dépend de la vitesse d'évolution de la température et du type de post traitement appliqué (travail en temps ou en phase).
La résolution dépend du pas spatial de la sonde multiélément, du balayage électronique appliqué (focalisation) et de son déplacement. La dimension de l'image du défaut correspond à la taille réelle. La dimension dans l'épaisseur est mesurable si l'on distingue les échos des extrémités du défaut.	Non identifiable.	Difficile car nécessite un couplage gel, devant rester performant durant le déplacement de la sonde.	Plusieurs dizaines de minutes pour ausculter la plaque composite 750 x 550 mm, du fait d'un long balayage dans les deux axes du plan.
Dimensionnement uniquement possible perpendiculairement à la direction de propagation (direction de translation du dispositif). La résolution dépend de l'ouverture du faisceau et du pas spatial de translation. Les dimensions dans la direction de propagation (à moins de réaliser un scan également dans cette direction) et dans l'épaisseur ne sont pas mesurables.	Suivant la nature des modes transmis, possibilité d'identifier la nature du défaut.	Bonne car sans contact.	Chaque mesure est courte et ausculte toute la zone, entre les sondes, grâce aux ondes guidées, mais nécessite une translation du dispositif assez longue (plusieurs dizaines de minutes).
La résolution, dans la direction de propagation, dépend de la longueur d'onde du mode de Lamb, et la distinction de deux réflecteurs proches, dans la direction perpendiculaire, de l'ouverture angulaire de la sonde. La dimension dans l'épaisseur n'est pas mesurable. Mais ceci peut être développé en analysant les amplitudes des modes réceptionnés et les conversions modales.	Suivant la nature des modes réfléchis, possibilité d'identifier la nature du défaut.	Bonne car ne nécessite un couplage gel qu'en une seule position fixe.	Le balayage complet de la structure peut se faire, suivant l'anisotropie, sans déplacement de la sonde et une zone importante (de l'ordre du mètre, voire plus selon la fréquence) est auscultée grâce aux ondes guidées (inspection partielle en temps réel et balayage complet avec imagerie en quelques minutes).

Table 4.1 : Comparaison des différentes méthodes CND employées pour la détection de défauts dans des structures type plaque.

## 4.4 Conclusion

Différentes applications du procédé, en caractérisation de matériaux et détection de défauts et imagerie, ont été décrites et réalisées. Ceci a permis, entre autre, de comparer les résultats obtenus avec ceux de méthodes de contrôle non destructif connues. L'emploi d'un système multiélément pour la génération et la réception d'ondes guidées a montré qu'il s'agissait d'une technique facile d'utilisation et efficace pour une détection rapide de défauts, et qui, bénéficiant des propriétés avantageuses des ondes guidées à se propager sur de grandes distances, permet également d'ausculter des zones inaccessibles pour la sonde. Au delà de la simple détection de défaut, la configuration d'un réseau multiélément peut permettre à la réception, comme dans le cas de la caractérisation du paragraphe 4.1, de mesurer certaines parties des courbes de dispersion et de visualiser l'ensemble des modes en présence. Ceci est un bon outil pour étudier les conversions de modes et apporter des informations supplémentaires qui aideraient à reconnaître la nature, la taille et la position dans l'épaisseur d'un réflecteur observé [123, 124]. Il pourrait également être possible de quantifier ces défauts grâce à des comparaisons avec des résultats obtenus sur des échantillons servant de références, qui constitueraient une base de données exploitables pour des mesures de défauts de même type sur des matériaux similaires. Même si la détection et le positionnement des défauts mesurés sont performants, la dimension des images obtenues (liée à l'ouverture angulaire des faisceaux et aux longueurs d'onde employées) peut gêner la distinction de réflecteurs proches. Les performances du système varient principalement avec la configuration et les caractéristiques de la sonde multiélément (taille, géométrie, répartition des éléments, etc.), ainsi qu'en fonction de la nature de la structure étudiée (anisotropie, viscoélasticité, dimensions, etc.). Une étude d'optimisation du procédé serait donc utile pour maîtriser ses performances et connaître ses limites dans différentes situations. Le recours aux simulations numériques (EF) s'avère donc nécessaire. Il est important de développer un modèle de référence qui puisse servir de base pour ce genre d'étude. La conception et la validation de ce modèle constituent l'objet du chapitre 5.

# Chapitre 5

## Développement numérique par éléments finis

### Sommaire

<b>5.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>126</b>
<b>5.2</b>	<b>Le modèle numérique .....</b>	<b>126</b>
5.2.1	Apport de la modélisation par EF .....	126
5.2.2	Description des différents composants du modèle .....	127
5.2.2.1	Sonde multiélément .....	127
5.2.2.2	Plaque .....	129
5.2.2.3	Zones absorbantes.....	130
5.2.2.4	Symétries du modèle .....	131
5.2.3	Définition de la physique appliquée .....	132
5.2.4	Définition du maillage et du solveur.....	133
5.2.5	Exploitation des résultats et traitement sous <i>Matlab</i> .....	134
<b>5.3</b>	<b>Validation du modèle.....</b>	<b>134</b>
5.3.1	Réponse en fréquence de la sonde multiélément .....	135
5.3.2	Sélectivité modale.....	136
5.3.2.1	A l'émission.....	137
5.3.2.2	A la réception.....	139
5.3.3	Directivité .....	140
5.3.3.1	A l'émission.....	141
5.3.3.2	A la réception.....	144
<b>5.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>145</b>

## 5.1 Introduction

Grâce aux progrès informatiques, en terme de puissance de calcul, et aux développements de logiciels de calculs par éléments finis toujours mieux optimisés, la simulation numérique fait désormais partie de la grande majorité des travaux menés sur les contrôles non destructifs [125]. Les modèles analytiques développés pour les systèmes multiéléments [126], ou ceux basés sur la méthode des éléments finis pour la propagation d'ondes ultrasonores, volumiques ou guidées [127], ont permis le développement de modèles numériques en 2D ou 3D [121]. Il existe déjà de nombreuses méthodes de simulation, qui ont été utilisées pour prédire la génération, la transmission et la réception d'ondes ultrasonores, volumiques ou guidées, par des systèmes multiéléments, que ce soit des méthodes basées sur les différences finies [128] ou les éléments finis [129, 130]. En parallèle, de nombreuses méthodes hybrides (semi-analytiques) ont été développées, telles que la méthode SAFE (*Semi Analytical Finite Element*) ou encore le couplage éléments finis - expansion modale [34], mieux adapté pour la prise en compte d'une source d'excitation spécifique. Pour réduire encore les temps de calculs ou de traitement des données simulées, des techniques ont été élaborées, comme la méthode de post-traitement basée sur les relations d'orthogonalité [131, 132]. Ces phases de simulations numériques permettent de recourir à moins d'expérimentations coûteuses pour préparer et optimiser des procédures de contrôle non destructif. Elles deviennent de plus en plus systématiques dans l'élaboration de nouveaux procédés.

Le chapitre présent décrit la conception et l'évaluation d'un modèle basé sur la méthode des éléments finis, conçu pour reproduire l'application de la méthode *Phased array* à une sonde multiélément matricielle, ainsi que les phénomènes mécaniques de propagation des ondes guidées dans une structure de type plaque. L'objectif est d'élaborer un modèle qui aiderait à mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu lors de la génération-détection des modes de Lamb par la sonde, à anticiper les résultats expérimentaux, et servirait de base à une étude d'optimisation du procédé, permettant ainsi une conception des transducteurs multiéléments et une application de la méthode *Phased array* plus performantes pour le contrôle des ondes guidées dans les matériaux métalliques et composites. Dans la première partie, nous justifions plus en détail l'apport de ce modèle et détaillons ses différents éléments, ainsi que la résolution des équations de la mécanique et de la piézoélectricité. Dans la deuxième partie, nous évaluons la validité du modèle, c'est à dire sa capacité à reproduire les résultats expérimentaux du point de vue de la sélectivité modale et de la directivité des faisceaux ultrasonores de la sonde multiélément.

## 5.2 Le modèle numérique

La réalisation de cette modélisation est accomplie par la méthode des éléments finis, avec le logiciel *Comsol Multiphysics* [109], qui permet d'élaborer des conceptions en 1D, 2D ou 3D. La définition et l'exploitation des modèles (récupération des données et post traitement) nécessitent d'utiliser conjointement le logiciel *Matlab* [110], et le poids important des calculs, notamment en trois dimensions, requiert souvent de travailler avec un cluster (*Avakas*) présent à l'université Bordeaux 1.

### 5.2.1 Apport de la modélisation par EF

L'objectif étant de créer des modèles de base du procédé sur des structures de type plaque, reflétant au mieux son comportement réel, l'ensemble des phénomènes physiques

(mécaniques et piézoélectriques) doivent être pris en compte. C'est pour cela que le choix de la technique de simulation s'est porté sur la méthode des éléments finis. Le modèle reproduit l'application du principe *Phased array* à des sondes multiéléments en contact avec une plaque, en mode émission ou réception. Les dimensions des différentes parties des systèmes multiéléments et la nécessité d'étudier le comportement plus ou moins directif et anisotrope des ondes guidées ultrasonores, générées ou détectées par des sondes de forme matricielle, nous poussent à adopter une modélisation complète 3D. De plus il est décidé de travailler avec une modélisation discrétisée dans l'épaisseur des plaques, plutôt qu'avec des modèles coques, afin de laisser la liberté dans une éventuelle étude d'optimisation de pouvoir simuler des milieux multicouches ou de prendre en compte la présence de défauts. Cette discrétisation dans l'épaisseur permet aussi de considérer l'excitation et la propagation de l'ensemble des modes guidés possibles. En effet les champs de déplacement, plus complexes, des modes d'ordre supérieur à 0 ne peuvent pas être estimés par des modèles coques.

La modélisation des transducteurs multiéléments piézocomposites a pour but de recréer les phénomènes piézoélectriques et électromécaniques qui déterminent le comportement (variable selon la réponse en fréquence) des éléments et l'action des sondes durant les mesures expérimentales. En effet pour reproduire correctement la propagation des modes dans la plaque, il faudrait d'abord reproduire l'excitation en surface de la plaque, en connaissant les champs de contrainte et de déplacement. Il n'est malheureusement pas envisageable de déterminer ces champs appliqués par les transducteurs en surface de la plaque. Il est donc plus facile de contrôler l'excitation du système piézocomposite, qui à son tour agit, en contact, sur la surface de la plaque. De plus, il est possible grâce à ces modèles d'injecter, à l'excitation, des signaux électriques similaires à ceux utilisés lors des expérimentations, et de calculer, à la réception, des signaux qui peuvent être comparés directement aux mesures réelles.

Tout cela permet ainsi d'étudier la génération, la propagation et la réception par une sonde multiélément des ondes ultrasonores guidées dans des milieux isotropes ou anisotropes. Ces simulations sont réalisées dans le domaine fréquentiel car la résolution en temporel est extrêmement coûteuse en mémoire et temps de calcul, voire impossible à réaliser en 3D avec les systèmes informatiques disponibles. Outre un gain de temps significatif en calcul, la résolution en fréquentiel permet de modéliser la viscoélasticité des matériaux étudiés en définissant le tenseur de viscoélasticité complexe (paragraphe 2.2.1) dont les parties réelles représentent la rigidité et les parties imaginaires la viscoélasticité. De plus, il est également possible de définir, sur les bords du domaine d'étude, des zones d'absorption de type ALID (Absorbing layer using increasing damping) ou PML (Perfectly matched layer) [129], afin d'assurer une simulation sans réflexion de bord (espace infini). Ceci permet de minimiser les tailles des modèles et donc d'alléger les calculs et le besoin en mémoire. Les signaux temporels peuvent être reconstruits, si nécessaire, en combinant, en post traitement, plusieurs simulations effectuées à différentes fréquences.

## 5.2.2 Description des différents composants du modèle

Dans le modèle éléments finis, on définit tout d'abord la géométrie de chacune des parties. Il s'agit généralement d'un assemblage d'éléments dont les formes sont cylindriques ou parallélépipédiques. On affecte alors à chaque élément les paramètres et variables physiques correspondants, définissant ainsi la nature et le comportement des matériaux.

### 5.2.2.1 Sonde multiélément

L'ensemble des composants de la sonde multiélément est énoncé au paragraphe 3.3.1.2 et la description de la géométrie et des caractéristiques techniques se trouve dans la table

3.1. On rappelle que certaines valeurs des caractéristiques mécaniques utilisées dans ce modèle ont été fournies par *Imasonic* [117] pour les besoins de cette étude, et ne peuvent donc être divulguées pour des raisons de confidentialité. On commence par implémenter le piézocomposite (anisotrope) défini par une masse volumique en  $kg/m^3$ , un tenseur de rigidité d'ordre 4 (mesuré sous condition de champ électrique constant) exprimé en  $Pa$ , un tenseur de couplage électromécanique d'ordre 3 (ou tenseur piézoélectrique) exprimé en  $C/m^2$  et un tenseur de permittivité diélectrique relative d'ordre 2 (mesuré sous condition de déformation constante) adimensionné. Ce sont des tenseurs équivalents du matériau piézocomposite homogénéisé, qui est en fait formé d'éléments piézocéramiques insérés dans une matrice polymère. Comme nous travaillons dans le domaine fréquentiel, le tenseur de rigidité peut être complexe, nous avons donc introduit une partie imaginaire, aux différents modules d'élasticité, correspondant à un terme d'amortissement. On choisit d'exprimer la partie imaginaire en pourcentage de la partie réelle, qui représente l'élasticité. Bien que le polymère constituant le composite ait un effet atténuant sur la réponse de ce dernier, ce terme supplémentaire (environ 3% de la partie réelle) permet de mieux prendre en compte les phénomènes réels à la fois en diminuant les interactions électromécaniques entre les éléments voisins et en participant, avec le backing (expliqué ci-après), à l'atténuation de la réponse en fréquence du piézocomposite. Le tenseur de couplage électromécanique donne, quant à lui, des informations auxquelles il faut être attentif, sur la polarisation des éléments piézoélectriques et donc sur la direction du champ électrique à exercer en excitation, pour avoir une contrainte appliquée dans la direction normale au plan de la plaque. Pour achever la modélisation du piézocomposite, des zones sont délimitées, sur sa surface supérieure, pour représenter les électrodes cuivrées (comme sur le schéma de la figure 3.11), et un potentiel électrique  $y$  est appliqué. De même sur la surface opposée, sont définies les électrodes reliées à la masse.

Sur la face arrière du piézocomposite est fixé un backing absorbant d'impédance acoustique faible. Le rôle du backing est de jouer sur les caractéristiques plus ou moins résonantes du transducteur. En utilisant par exemple un matériau dont l'impédance est similaire à celle de l'élément actif, mais avec un fort pouvoir absorbant (matériau diffusant et/ou viscoélastique) on obtient une atténuation importante de la résonance en fréquence, ce qui donne alors une bande passante fréquentielle large au transducteur, augmentant sa sensibilité. Si au contraire l'impédance est très différente, la résonance de l'élément actif sera plus importante, permettant alors au transducteur de générer des ondes dont la pénétration dans les matériaux observés est plus importante (plus d'énergie), mais dans une bande passante étroite. La présence du backing permet également, en limitant le phénomène de résonance, de réduire la durée temporelle du signal électrique, à l'excitation ou à la réception, permettant d'avoir ainsi une meilleure résolution. La composition du backing n'étant pas connue, on choisit de lui affecter dans le modèle une fraction des valeurs des caractéristiques mécaniques du piézocomposite, et pour éviter les échos de fond on implémente une absorption supplémentaire graduelle, par le biais d'un terme rajouté dans la partie imaginaire des modules d'élasticité (en fonction de l'éloignement, à l'intérieur du backing, avec l'interface backing/piézocomposite), sur le même principe que celle des zones absorbantes entourant le modèle (paragraphe 5.2.2.3). De ce fait on adopte une dimension du backing, en hauteur, égale à au moins 3 fois la longueur d'onde à la fréquence nominale.

Sur la face avant du piézocomposite est située une lame d'adaptation élastomère qui est en contact avec la surface de la plaque. On utilise cette lame d'adaptation, dont l'impédance est généralement à mi-chemin entre celles des deux milieux qui sont de part et d'autre, pour transférer le plus d'énergie possible du transducteur vers la plaque. L'impédance optimale est obtenue en dimensionnant l'épaisseur de cette lame de telle sorte qu'elle soit égale au quart de la longueur d'onde, à la fréquence nominale du transducteur. Cela permet de conserver en

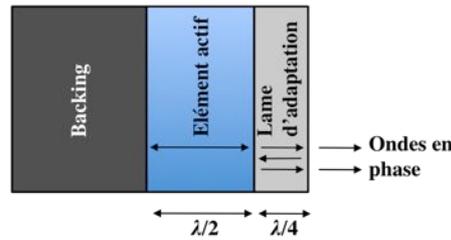


Figure 5.1 : Schéma du dimensionnement d'un élément piézoélectrique et de lame d'adaptation dans un transducteur générant une longueur d'onde  $\lambda$  à sa fréquence nominale.

phase, à leur sortie, les ondes qui sont réfléchies à l'intérieur de la lame (figure 5.1). Le matériau composant la lame est isotrope et défini par sa masse volumique ( $kg/m^3$ ), son module d'Young ( $Pa$ ) et son coefficient de Poisson. Ces données sont calculées à partir des vitesses longitudinale et transversale connues du matériau. Pour se rapprocher, là encore, de la réalité et prendre en compte d'éventuels phénomènes dissipatifs dans la lame, un terme d'atténuation est introduit dans le modulé d'Young par le biais d'une partie imaginaire exprimée également en pourcentage de la partie réelle (environ 5%).

Dans ce modèle, la liaison entre le système multiélément et la plaque est parfaite (continuité des déplacements et des contraintes). Cette modélisation reste valable car la résonance du piézocomposite tend à favoriser la composante normale de déplacement en surface à l'émission, et y est plus sensible à la réception. On peut donc négliger l'apport des composantes tangentielles et se passer de la prise en compte le couplage gel dans la simulation.

### 5.2.2.2 Plaque

Les plaques modélisées sont composées de matériaux isotropes (aluminium, plexiglas) ou anisotropes (composites carbone-époxy), élastiques ou viscoélastiques. Ces derniers peuvent être représentés par des empilements de couches ou par un milieu homogène équivalent. Les caractéristiques mécaniques de ces plaques sont composées de leur masse volumique ( $kg/m^3$ ) et du tenseur de viscoélasticité  $\mathbf{C}$  ( $Pa$ ) complexe (modèle en fréquence) dont la partie imaginaire (viscoélasticité) est exprimée en pourcentage de la partie réelle (élasticité). Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.2.2, ce tenseur est défini dans le repère principal du matériau,  $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$  avec  $\mathbf{e}_1$  normal au plan de la plaque (figure 2.1). La définition générale (adoptée dans ce modèle) d'un matériau au plus orthotrope, permettant de considérer une orientation différente du matériau dans le repère d'étude de la simulation, est celle d'un matériau monoclinique (2.8) dans une base  $(\mathbf{e}_1' = \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2', \mathbf{e}_3')$  qui est obtenue par rotation de la base principale autour de l'axe  $\mathbf{e}_1$  perpendiculaire au plan de la plaque. Cela est particulièrement utile en 3D pour une modélisation multicouche, dont chacune est orientée différemment des autres, ou encore lorsque l'on désire changer l'orientation de la source d'excitation par rapport à la plaque sans avoir à changer la géométrie du modèle. Pour faciliter la simulation, le repère adopté pour la plaque est  $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  avec  $\mathbf{z}$  normal au plan de la plaque. Sachant que l'on utilise la notation de Voigt pour exprimer le tenseur de viscoélasticité sous une forme matricielle plus simple :

$$\begin{pmatrix} 11 \\ 22 \\ 33 \\ 23,32 \\ 13,31 \\ 12,21 \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ yz \\ xz \\ xy \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

la forme générale monoclinique de  $\mathbf{C}'$  (2.8) définie dans la base  $(\mathbf{e}_1', \mathbf{e}_2', \mathbf{e}_3')$  doit se réécrire dans la base  $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  :

$$\mathbf{C}' = \begin{pmatrix} C'_{22} & C'_{23} & C'_{12} & 0 & 0 & C'_{24} \\ & C'_{33} & C'_{13} & 0 & 0 & C'_{34} \\ & & C'_{11} & 0 & 0 & C'_{14} \\ & & & C'_{55} & C'_{56} & 0 \\ \text{Sym.} & & & & C'_{66} & 0 \\ & & & & & C'_{44} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

### 5.2.2.3 Zones absorbantes

Dans les simulations, les zones absorbantes utilisées sont de type ALID (Absorbing layer using increasing damping). L'utilisation de ce type de région absorbante est pratique, et facile à mettre en œuvre dans un modèle en fréquence, tout en gardant un sens « physique » car correspondant à une augmentation de la viscoélasticité du matériau de la plaque. Cette augmentation doit se faire le plus régulièrement possible afin d'éviter toute rupture forte d'impédance qui provoquerait des réflexions. Cela est contrôlé par la fonction d'atténuation employée et la qualité du maillage. A la différence des PML (Perfectly matched layer), toute réflexion, sur les bords du domaine, d'ondes résiduelles insuffisamment atténuées, continuerait d'être absorbée durant la traversée de retour avec une région de type ALID. Ce qui n'est pas le cas avec l'utilisation de PML, où ces ondes seraient réamplifiées [129]. Ainsi l'absorption peut être contrôlée en modifiant la partie imaginaire des modules de viscoélasticité, qui s'écrivent alors :

$$C_{ij}^{abs} = C_{ij} (1 + I * Absorb) \text{ et } I^2 = -1 \quad (5.3)$$

Le terme *Absorb* rajouté est défini comme un pourcentage de la valeur réelle du module. La méthode la plus simple [133] est de le représenter par une fonction polynomiale spatiale d'ordre 3 (allant de 0 à 1), qui selon son application, soit sur les bords longeant le domaine (dont la largeur est par exemple définie dans l'axe des  $x$ ) ou soit sur un coin du domaine (figure 5.2), s'écrit respectivement :

$$\left\{ \begin{array}{l} Absorb = \left( \frac{|x - x_{abs}|}{L_{abs}} \right)^3 \text{ si } x \in \Omega_{abs} \\ Absorb = 0 \text{ si } x \notin \Omega_{abs} \end{array} \right. \quad (5.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Absorb = \left( \frac{\sqrt{(x - x_{abs})^2 + (y - y_{abs})^2}}{L_{abs}} \right)^3 \text{ si } x, y \in \Omega_{abs} \\ Absorb = 0 \text{ si } x, y \notin \Omega_{abs} \end{array} \right. \quad (5.5)$$

avec  $x_{abs}$  et  $y_{abs}$  les coordonnées des limites du domaine, où commencent les zones d'absorption,  $L_{abs}$  la largeur des zones et  $\Omega_{abs}$  leur espace géométrique. Dans cet exemple la

définition des fonctions est faite dans le plan  $(x, y)$  car la propagation ultrasonore des ondes guidées a lieu dans ce plan. Une simulation de propagation dans un volume nécessite de rajouter la variable  $z$ .

En adoptant cette définition du terme d'atténuation, les largeurs des zones absorbantes doivent être trois fois la longueur d'onde maximale présente. Ainsi elles garantiront une absorption totale des ondes. Dans le souci de toujours chercher à diminuer la taille des modèles, pour économiser la mémoire et raccourcir les temps de calcul, des formulations différentes ont été mises au point pour les fonctions d'atténuation de ces zones absorbantes. Ke et al [121] a démontré qu'il était possible de réduire la largeur de ces zones de 3 fois la longueur d'onde maximale à 1.5 fois, en définissant leurs caractéristiques mécaniques de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{ij}^{abs} = C_{ij}'(1 - D(r)) + I(C_{ij}'' + C_{ij}'D(r)) \\ \rho_{abs} = \frac{\rho}{(1 - D(r) + ID(r))} \\ D(r) = A \left( \frac{r}{L_{abs}} \right)^3, C_{ij} = C_{ij}' + IC_{ij}'' \end{array} \right. \quad (5.6)$$

où  $\rho$  représente la masse volumique,  $r$  est la distance parcourue dans la zone absorbante depuis son interface avec le domaine d'étude et  $A$  est un coefficient ajustable pour minimiser la rupture d'impédance entre ces deux milieux.

#### 5.2.2.4 Symétries du modèle

Suivant l'excitation appliquée au système multiélément et l'orientation des matériaux, le modèle peut présenter des symétries, dont la prise en compte permet de réduire par 2 ou plus sa taille ou d'augmenter, par la même occasion, celle de la zone d'investigation (par exemple la dimension de la plaque). Pour cela des conditions aux limites, imposant une symétrie, sont

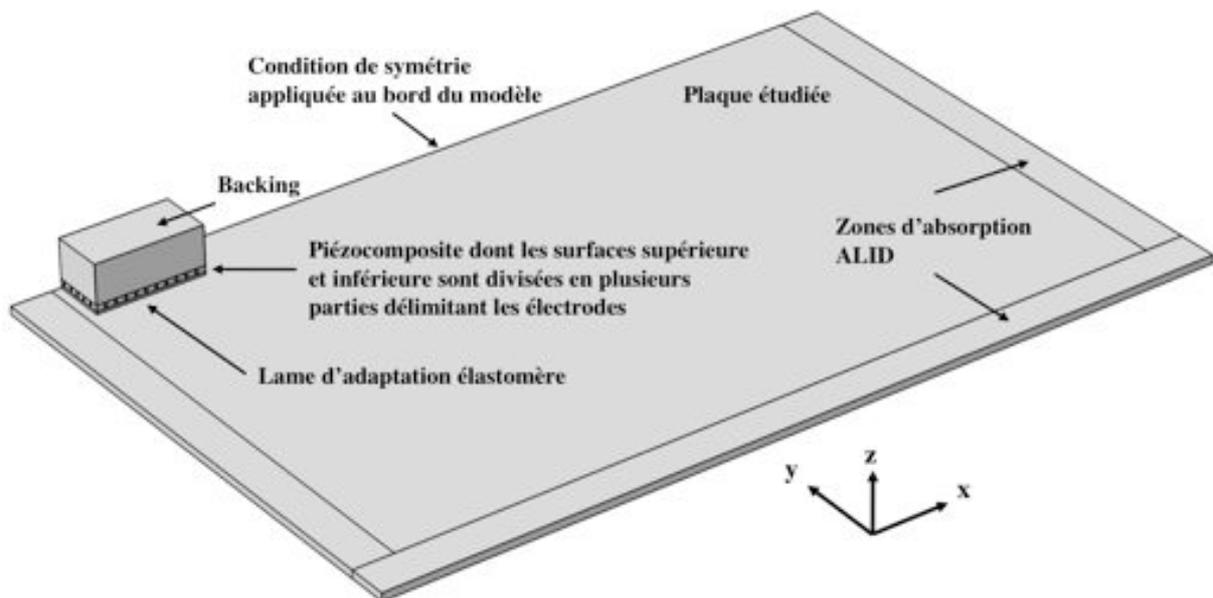


Figure 5.2 : Exemple de modèle géométrique du système multiélément en contact avec la plaque, muni de zones absorbantes et simplifié par une condition de symétrie.

appliquées sur certaines surfaces du domaine. Cela consiste à considérer que la composante, normale à ces surfaces, du champ de déplacement est nulle. La figure 5.2 montre un modèle, regroupant l'ensemble des éléments évoqués précédemment, auquel a été appliqué une condition de symétrie qui permet de couper en deux la sonde, la plaque et les zones d'absorption.

### 5.2.3 Définition de la physique appliquée

La simulation consiste à coupler le problème de la piézoélectricité, présent à l'excitation ou à la réception, avec celui de la propagation d'ondes (visco)élastiques dans un solide (ondes guidées dans une plaque). Les différents composants du modèle sont associés à un système d'équations, regroupant les équations d'équilibre dynamique, les relations de comportement (linéaires) et les conditions aux limites. L'ensemble de ces systèmes est exprimé dans le domaine fréquentiel et permet de calculer les champs de déplacements et de contraintes, grâce à la méthode des éléments finis qui s'appuie sur une formulation faible du problème aux dérivées partielles (les fonctions sont supposées continues et différentiables) pour rechercher des solutions approchées sur le domaine géométrique discrétisé.

Les éléments non piézoélectriques ont un système d'équation défini par l'équation de mouvement, la loi de comportement de Hooke entre la contrainte et la déformation et une condition aux limites de type Neumann, qui décrit dans notre cas des conditions de bords libres (contrainte normale nulle aux surfaces) représentatives de la réalité (interface solide/air). Ce système s'écrit de la manière suivante [17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\rho\omega^2 \mathbf{u} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f}_v \text{ dans } \Omega \\ \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \mathbf{s} \text{ avec } \mathbf{s} = \frac{1}{2}(\nabla^T \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}) \\ \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0} \text{ sur } \partial\Omega \end{array} \right. \quad (5.7)$$

avec  $\mathbf{u}$  le vecteur champ de déplacement,  $\boldsymbol{\sigma}$  le tenseur des contraintes,  $\rho$  la masse volumique,  $\omega$  la pulsation,  $\mathbf{f}_v$  la force volumique, considérée nulle dans le modèle,  $\Omega$  le domaine,  $\mathbf{C}$  le tenseur de viscoélasticité,  $\mathbf{s}$  le tenseur des déformations et  $\mathbf{n}$  le vecteur unitaire normal en surface.

Le piézocomposite, dans lequel a lieu l'ensemble des phénomènes physiques, est défini en y rajoutant les lois de comportement de la piézoélectricité définies, dans leur formulation en contrainte, par le système suivant [17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \boldsymbol{\sigma} = -\mathbf{e} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{C}^E : \mathbf{s} \\ \mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}^s \cdot \mathbf{E} + \mathbf{e} : \mathbf{s} \end{array} \right. \quad (5.8)$$

avec  $\mathbf{e}$  le tenseur de couplage électromécanique,  $\mathbf{E}$  le champ électrique,  $\mathbf{C}^E$  le tenseur d'élasticité pour un champ électrique constant,  $\mathbf{D}$  le vecteur de déplacement électrique (combinaison du champ électrique et du vecteur de polarisation électrique,  $\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{P}$ ), et  $\boldsymbol{\varepsilon}^s$  le tenseur de permittivité pour une déformation constante. Au final le système d'équations, dans le domaine fréquentiel, implémenté sous *Comsol*, pour la résolution de ce problème est :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\rho\omega^2\mathbf{u} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f}_v \text{ dans } \Omega \\ \nabla \cdot (\mathbf{D} + \mathbf{J}(I\omega)^{-1}) = \rho_v \text{ dans } \Omega \\ \boldsymbol{\sigma} = -\mathbf{e} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{C}^E : \mathbf{s} \\ \mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}^s \cdot \mathbf{E} + \mathbf{e} : \mathbf{s} \\ \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} = 0 \text{ sur } \partial\Omega \\ \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0} \text{ sur } \partial\Omega \end{array} \right. \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} \mathbf{s} = \frac{1}{2}(\nabla^T \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}) \\ \mathbf{E} = -\nabla V \\ \boldsymbol{\varepsilon}^s = \boldsymbol{\varepsilon}_0 \boldsymbol{\varepsilon}_r^s \end{array} \quad (5.9)$$

où intervient l'équation dynamique du mouvement, la conservation de la charge, les relations de piézoélectricité et les conditions aux limites de bords libres et de charge nulle (pas de charge extérieure). Avec  $\mathbf{J}$  le vecteur densité de courant,  $\rho_v$  la densité volumique de charge,  $V$  le potentiel électrique,  $\boldsymbol{\varepsilon}_0$  et  $\boldsymbol{\varepsilon}_r^s$  respectivement la permittivité du vide et le tenseur de permittivité relative du milieu pour une déformation constante. A noter que les conditions aux frontières entre composants en contact sont parfaites (continuité des contraintes et des déformations) et les potentiels, ainsi que la masse électrique, sont fixés sur les surfaces représentant les électrodes. La résolution étant effectuée en fréquence, les valeurs des potentiels électriques sont complexes et tiennent compte des déphasages appliqués dans le cadre de la méthode *Phased array*.

#### 5.2.4 Définition du maillage et du solveur

La taille du maillage dépend des paramètres physiques du modèle, à savoir principalement de la longueur d'onde minimale des modes présents (il faut généralement au moins 3-4 mailles par longueur d'onde, composées d'éléments quadratiques), de la distribution des champs de déplacements et de contraintes dans l'épaisseur de la plaque et/ou de la lame d'adaptation, et également de la qualité de la représentation des phénomènes piézoélectriques au niveau des éléments du transducteur. Le maillage est également paramétré en fonction des capacités du système informatique, c'est à dire que l'on ne peut définir qu'un nombre limité de mailles sous peine d'avoir un nombre de degrés de liberté trop important, entraînant des durées de calcul rédhibitoires. Cela a une conséquence sur la taille des structures que l'on peut modéliser.

On commence par définir les dimensions et types de mailles utilisées. Les mailles 2D triangulaires (voire carrées) sont d'abord adoptées pour mailler certaines surfaces du domaine. Un procédé d'extrusion est ensuite appliqué pour mailler tout le volume du domaine. Différentes qualités de maillage sont appliquées aux différentes parties du modèle. Il est plus fin (taille maximale d'une maille entre 0.5 et 1 mm pour le piézocomposite et la lame d'adaptation, 2 mm pour le backing) à l'intérieur et autour des transducteurs (dimensions plus petites des éléments et précision nécessaire sur les phénomènes électromécaniques), et plus grossier dans la plaque et les zones absorbantes (entre 1 et 2 mm suivant la longueur d'onde minimale des modes de Lamb, qui est relativement grande). De ce fait on implémente une variation progressive de la taille des mailles au niveau des zones intermédiaires, pour éviter toute discontinuité (figure 5.3).

Le choix du maillage généré permet ensuite, suivant le nombre de mailles obtenues, de considérer la résolution du problème à l'aide d'un solveur direct ou itératif. Le solveur direct est plus stable et plus rapide (10-15 minutes pour une simulation en 3D de 25000 éléments (mailles) avec un ordinateur de 8 cœurs avec 8 Go de RAM) mais exige d'avantage de mémoire vive que le solveur itératif, qui lui est relativement long et peut avoir des problèmes de convergence vers une solution. Dans cette étude on privilégie l'utilisation du solveur direct (*Pardiso* sous *Comsol*). Le problème de la limitation en taille des modèles est résolu grâce à

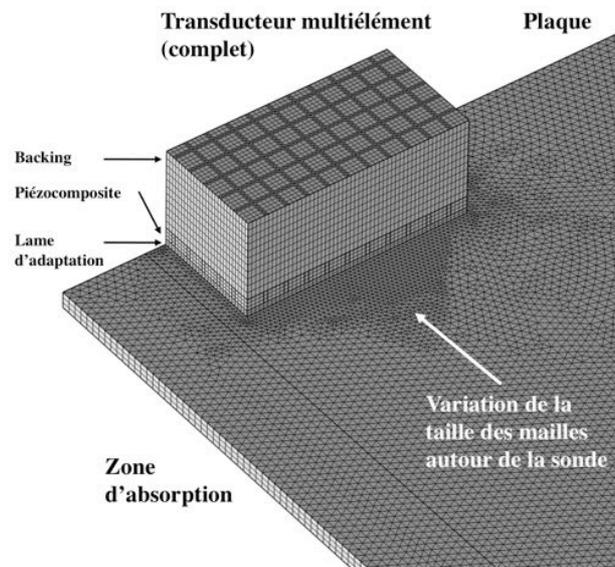


Figure 5.3 : Exemple de maillage avec variation progressive de la taille des éléments.

l'utilisation d'un cluster (*Avakas*) de l'université Bordeaux 1 (Mésocentre), disposant de 264 nœuds, chacun muni de 12 cœurs, soit 48 Go de RAM par nœud. Ce système permet de lancer, en résolution directe (pour 5 nœuds en parallèle), des simulations de 100000 à 150000 éléments, soit environ 2.3 millions de degrés de liberté, pour un temps de calcul d'environ 1 heure.

### 5.2.5 Exploitation des résultats et traitement sous *Matlab*

Une fois le modèle résolu, il est possible dans un premier temps de visualiser graphiquement, sur n'importe quelle partie du domaine, les variables physiques intéressantes telles que les champs de déplacement, de déformation, de contrainte, etc. On peut observer le comportement du système en représentation 3D ou 2D, ou en particulier la distribution des champs dans l'épaisseur de la plaque et leur comportement selon la direction de propagation. Ces premières observations sont réalisées directement avec *Comsol*. Son utilisation devient par contre contraignante lorsqu'il faut générer des modèles à paramètres variables (fréquence, excitation, constantes physiques, dimensions du modèle, maillage, etc.). De plus le post traitement nécessaire pour des études paramétriques n'est pas réalisable avec ce logiciel seul. Pour ces raisons, on exploite la compatibilité de ce logiciel avec *Matlab*, afin de créer directement dans le formalisme de ce dernier les modèles numériques, qui sont ensuite envoyés et résolus sur *Comsol* (pour bénéficier de l'ensemble de ses algorithmes). Les données obtenues sont rapatriées vers *Matlab* et l'ensemble du post traitement y est réalisé, dont, entre autres, les calculs et tracés des courbes de dispersion et des diagrammes de directivité, ou encore la reconstruction des signaux temporels.

## 5.3 Validation du modèle

Afin de valider le modèle, une comparaison entre les simulations numériques et les résultats expérimentaux est réalisée. Les critères retenus pour vérifier la validité du modèle sont les mêmes que ceux analysés au paragraphe 3.4 (sélectivité modale et la directivité). Cette validation repose sur l'évaluation numérique des performances de la sonde. Avant cela,

un réglage des paramètres (termes d'atténuation et caractéristiques du backing) de la sonde multiélément, est réalisé en observant la réponse en fréquence du système.

### 5.3.1 Réponse en fréquence de la sonde multiélément

Pour étudier cette réponse en fréquence, un modèle, reprenant l'expérimentation réalisée au paragraphe 3.3.1.2 avec le bloc de plexiglas, est conçu (sonde en contact sur le bloc, délimité par des zones absorbantes). Il est possible, grâce à ce modèle, résolu dans le domaine fréquentiel, de déterminer le comportement des éléments de la sonde en calculant l'admittance électrique (inverse de l'impédance) aux bornes des électrodes du piézocomposite. Les éléments piézoélectriques, fonctionnant à des fréquences inférieures au  $MHz$ , peuvent être considérés comme capacitifs et s'apparentent alors à des condensateurs plans. Le comportement unidimensionnel du mode d'épaisseur de ces éléments est représenté par un schéma électrique équivalent classique de Cady-Van Dyke [134]. Ce circuit (figure 5.4) est composé d'une capacité statique  $C_0$  et d'une impédance mécanique  $Z_m$  en parallèle, qui est souvent modélisée par un circuit RLC en série traduisant l'inertie ( $L$ ) des éléments, l'élasticité ( $1/C$ ) et les pertes internes ( $R$ ). En régime fréquentiel, le spectre de l'admittance, que l'on cherche, est équivalent à celui du courant  $i_m$  (le module de la tension est fixé à 1). Ce courant est calculé par la loi des nœuds donnant la relation suivante, en notation complexe :

$$|\tilde{i}_m| = |\tilde{i} - \tilde{i}_c| \quad (5.10)$$

On identifie alors les deux termes de droite. La relation entre le courant et la densité de charge en surface des électrodes est donnée par :

$$\tilde{i} = I\omega S\tilde{\rho}_s \text{ et } I^2 = -1 \quad (5.11)$$

avec  $S$  la surface de l'électrode,  $\omega$  la pulsation, et  $\rho_s$  la densité de charge surfacique. Le courant de la branche capacitive est obtenu en considérant le modèle du condensateur :

$$\tilde{i}_c = I\omega C_0\tilde{U} \quad (5.12)$$

avec  $C_0$  la capacité et  $U$  la tension. Pour un condensateur, la densité de charge sur les plaques est égale à la valeur du champ de déplacement électrique  $\mathbf{D}$  entre celles ci (loi de Gauss). On obtient alors l'égalité suivante :

$$\frac{Q}{S} = \varepsilon E \quad (5.13)$$

où  $Q$  représente la charge,  $S$  la surface de l'électrode,  $\varepsilon$  la permittivité diélectrique et  $E$  la valeur du champ électrique. Cette formule permet d'identifier l'expression de la capacité :

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{h} \quad (5.14)$$

dans laquelle on retrouve la permittivité du vide et la permittivité relative, ainsi que la hauteur  $h$  séparant les deux surfaces du condensateur (épaisseur de l'élément piézoélectrique). On en déduit la formulation du module de l'expression complexe de  $i_m$  :

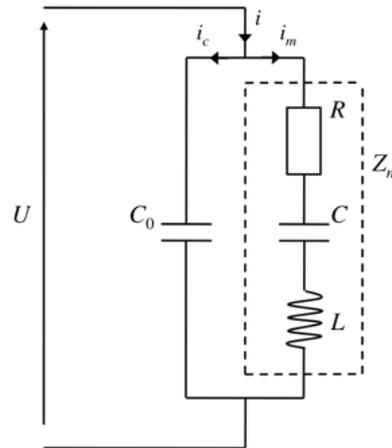


Figure 5.4 : Schéma électrique équivalent du mode d'épaisseur des éléments piézoélectriques.

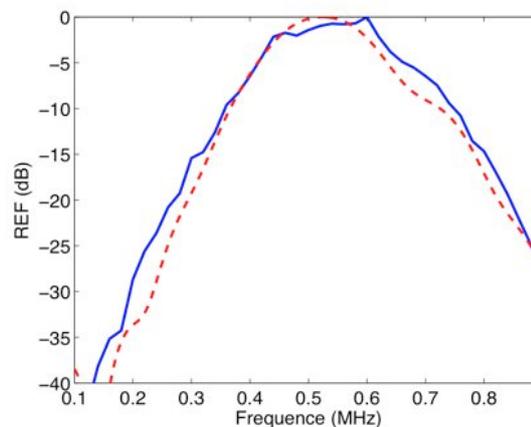


Figure 5.5 : Réponse en fréquence des éléments de la sonde matricielle multiélément. Superposition du résultat de simulation (EF) — et de la mesure expérimentale ---.

$$|\tilde{i}_m| = \left| I\omega S\tilde{\rho}_s - \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r S}{h} I\omega\tilde{U} \right| \quad (5.15)$$

On fixe le module de l'expression complexe de  $U$  égal à 1 et sa phase initiale à zéro. L'inconnue est ici la densité de charge surfacique qui est déterminée par le calcul éléments finis. Les autres termes correspondent aux paramètres du modèle.

Le réglage des termes d'atténuation des différents composants du système multiélément et des caractéristiques du backing permet d'obtenir une réponse en fréquence proche de celle mesurée expérimentalement au paragraphe 3.3.1.2. La superposition des deux courbes est montrée sur la figure 5.5. On retrouve la résonance autour de  $0.5 \text{ MHz}$  et un comportement similaire aux fréquences inférieures et supérieures.

### 5.3.2 Sélectivité modale

Une fois les paramètres du modèle fixés, permettant d'obtenir un bon accord sur la réponse en fréquence des éléments la sonde, il est possible d'appliquer, de la même manière que pour le procédé expérimental, un déphasage adéquat à chacun des éléments du réseau, afin de soit créer à l'excitation, soit réceptionner un mode guidé dans une direction spécifique. Certaines conditions et paramètres expérimentaux utilisés au paragraphe 3.4 sont reproduits lors de la simulation. Après la résolution du problème, les données sont extraites (champs de

déplacement) et les calculs sont réalisés en post traitement. Pour l'étude en émission, une transformée de Fourier 2D est réalisée le long de la direction de propagation, en surface de la plaque. Le nombre de points et le pas spatial utilisés pour cette transformée sont les mêmes que ceux pris pour la mesure avec la sonde Laser (paragraphe 3.4.1.1). Les courbes de dispersion et les spectres en nombre d'onde sont ainsi comparés avec les résultats expérimentaux, obtenus dans le cas de l'aluminium et du composite croisé, afin de juger de la reproductibilité de la sélectivité modale. Pour l'étude en réception, les signaux temporels sont recréés, le principe du *Phased array* est appliqué sur l'ensemble des éléments, et l'enveloppe des signaux, correspondant à chaque mode, est extraite.

### 5.3.2.1 A l'émission

La sonde multiélément matricielle (11×11 éléments) est d'abord simulée sur une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur. Le principe du *Phased array* est appliqué à l'émission, c'est à dire que l'on implémente dans le modèle des signaux d'excitation déphasés pour les différents éléments de la sonde (au niveau des potentiels électriques). On cherche donc à générer, à tour de rôle, différents modes de Lamb. Dans une première série de mesures on génère autour de 0.5 MHz les modes  $A_0$  ( $\lambda \approx 5.4$  mm),  $S_0$  ( $\lambda \approx 9.6$  mm) et  $A_1$  ( $\lambda \approx 18.5$  mm). Puis dans une deuxième série, autour de 0.35 MHz, les modes  $A_0$  ( $\lambda \approx 7.1$  mm) et  $S_0$  ( $\lambda \approx 15$  mm). Le signal de base de l'excitation dans les deux séries de mesures, est un burst (sinusoïde modulée par une gaussienne) de 24 cycles, centré soit à 0.5 MHz soit à 0.35 MHz, ayant respectivement une bande fréquentielle de 0.03 et 0.02 MHz à -3 dB. La résolution des modèles s'effectuant dans le domaine fréquentiel (un calcul par fréquence, avec plusieurs dizaines de fréquences), ce sont les amplitudes des composantes fréquentielles des signaux d'excitation qui sont appliquées aux éléments. On observe en particulier les résultats obtenus pour la génération de chacun des modes aux deux fréquences 0.5 et 0.35 MHz. Le relevé des valeurs de la composante normale du champ de déplacement le long de la direction de propagation permet de réaliser la transformée de Fourier 2D (figure 5.6). Les spectres en nombre d'onde, aux deux fréquences centrales correspondant à l'excitation de chacun des modes, sont superposés à ceux obtenus expérimentalement. Les graphiques sont présentés sur la figure 5.7. L'ensemble des graphiques montre une bonne reproductibilité de la sélectivité modale sur les deux domaines fréquentiels étudiés. Seul le cas de l'excitation du mode  $A_1$  à 0.5 MHz (figure 5.7.c) montre un écart de niveau des modes secondaires (3 dB pour le mode  $S_0$  et 6 dB pour le mode  $A_0$ ). Cet écart pourrait être dû, lors de la mesure expérimentale, à une excitation moins bonne du mode  $A_1$  (couplage moins performant), et/ou à la prise en compte

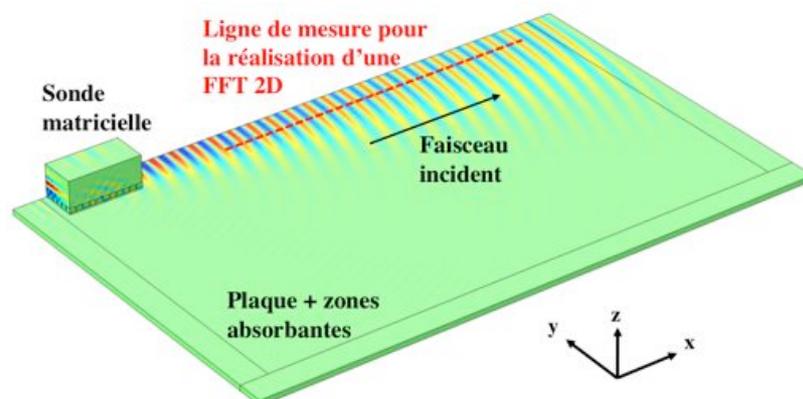


Figure 5.6 : Distribution de la composante normale du champ de déplacement (pour une fréquence). La ligne pointillée rouge indique l'ensemble des valeurs relevées dans la direction de propagation, afin de réaliser le calcul d'une transformée de Fourier 2D.

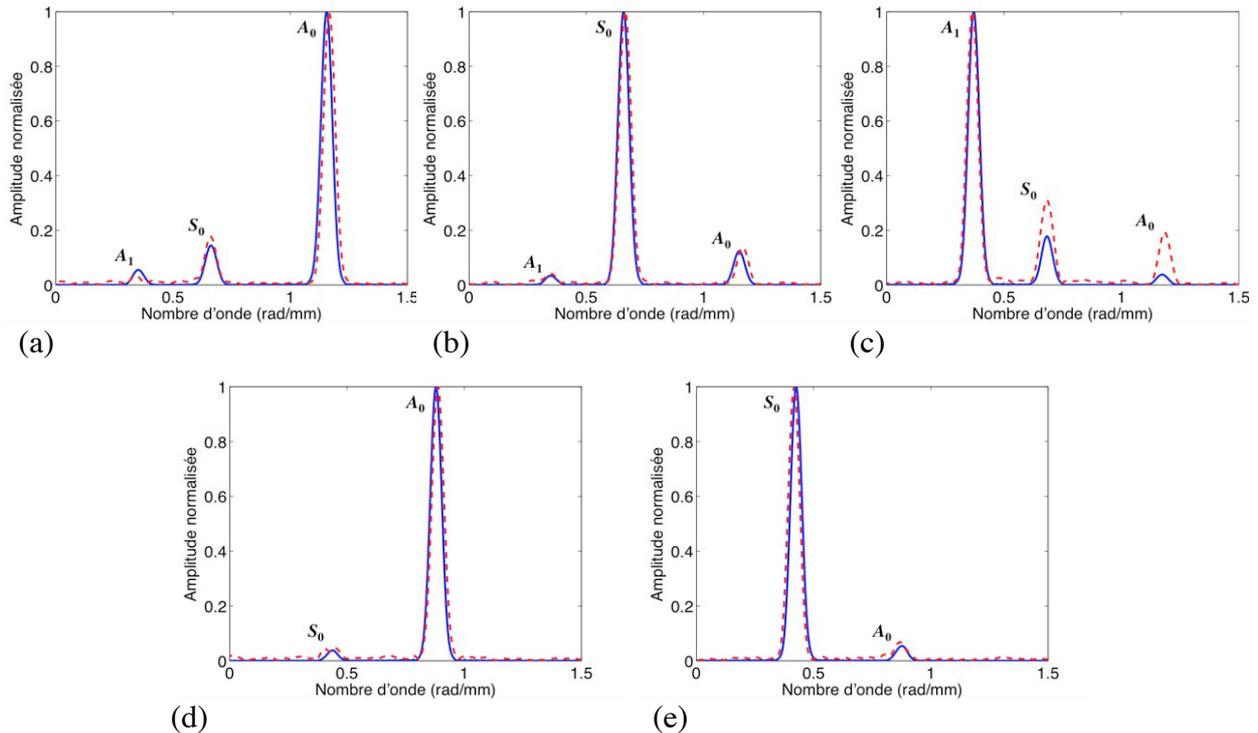


Figure 5.7 : Spectres en nombre d'onde (amplitudes normalisées) obtenus après l'excitation de chacun des modes (méthode *Phased array* appliquée à la sonde matricielle piézoélectrique) d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur : (a)  $A_0$  à 0.5 MHz, (b)  $S_0$  à 0.5 MHz, (c)  $A_1$  à 0.5 MHz, (d)  $A_0$  à 0.35 MHz, (e)  $S_0$  à 0.35 MHz. Résultats de simulation EF — et mesures expérimentales ---.

dans la simulation d'une raideur de l'aluminium légèrement différente de la raideur réelle de la plaque ayant servi lors des mesures.

Une simulation du composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur est réalisée avec un signal d'excitation centré à 0.45 MHz (burst de 24 cycles). Les modes  $S_0$  et  $A_1$  sont générés chacun leur tour. Le milieu modélisé est un milieu homogène équivalent et la direction de propagation se fait dans l'une des deux directions des fibres du matériau. Les résultats obtenus pour le mode  $S_0$  et  $A_1$  sont présentés sur la figure 5.8.a et la figure 5.8.b. La simulation et l'expérimentation coïncident bien pour l'excitation du mode  $S_0$ . Dans le cas de ce composite, l'excitation du mode  $A_1$  est assez difficile car la bande de fréquence exploitable est étroite autour de 0.45 MHz. En effet sa fréquence de coupure est très proche (0.4 MHz) et à proximité l'atténuation du mode est très importante et empêche une bonne sélectivité modale. La simulation (figure 5.8.b) tient bien compte de l'excitation du mode  $A_1$ , mais le niveau relatif du mode  $S_0$  est surestimé par rapport à l'expérimentation. Afin de vérifier la qualité de la simulation, d'autres excitations du mode  $A_1$  sont exécutées à des fréquences supérieures. Un exemple à 0.5 MHz est montré sur la figure 5.8.c. Autour de cette fréquence, la variation d'atténuation est faible. La bonne concordance à ces fréquences tend à montrer que le comportement viscoélastique du matériau est tout de même bien pris en compte. Il pourrait donc s'agir d'un problème de décalage des solutions (nombres d'ondes) par rapport aux fréquences. On voit en effet, sur la figure 5.8.c, un léger décalage entre les nombres d'onde calculé et mesuré de  $S_0$  (3% d'écart) qui peut être dû à une forte sensibilité aux erreurs d'approximation des modules d'élasticité et/ou à la non prise en compte de variations de l'épaisseur de la plaque. La forte surestimation du mode secondaire à 0.45 MHz pourrait être due à une sous estimation de l'excitabilité du mode  $A_1$  dans cette bande étroite proche de la fréquence de coupure, à cause du décalage induit par ces approximations.

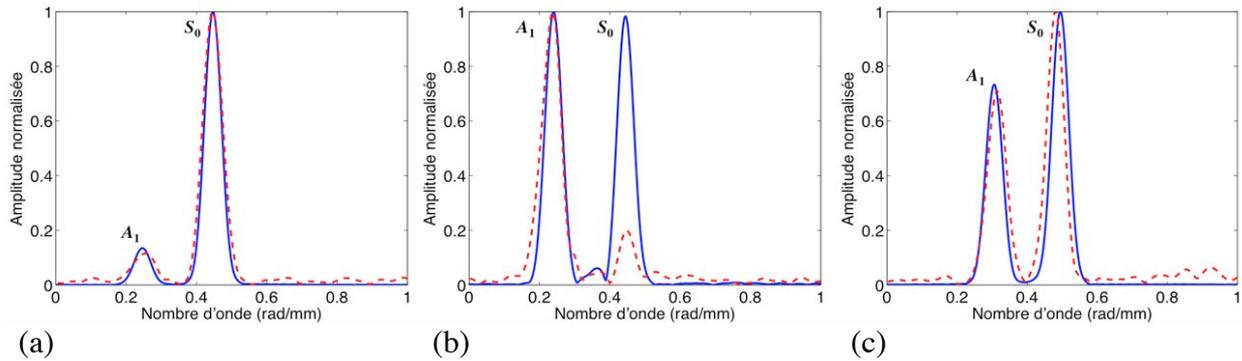


Figure 5.8 : Spectres en nombre d'onde (amplitudes normalisées) obtenus après l'excitation de chacun des modes (méthode *Phased array*) d'une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur, dans la direction des fibres : (a)  $S_0$  à 0.45 MHz, (b)  $A_1$  à 0.45 MHz, (c)  $A_1$  à 0.5 MHz. Résultats de simulation EF — et mesures expérimentales ---.

### 5.3.2.2 A la réception

Le modèle positionne, sur une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, deux sondes multiéléments matricielles (11×11 éléments) en vis à vis, une à la réception et l'autre à l'émission. Seule une ligne des éléments piézoélectriques de cette dernière est utilisée comme source d'excitation (figure 5.9). Les signaux appliqués sur cette ligne d'éléments sont tous en phase. Le cas du composite n'est pas traité ici, du fait de la difficulté rencontrée, au paragraphe précédent, à simuler convenablement la propagation du mode  $A_1$  autour de 0.45 MHz, qui est, si l'on veut avoir les deux modes présents, la seule bande de fréquence exploitable. La ligne d'éléments excitateurs et le centre du récepteur sont placés à une distance de 160 mm l'un de l'autre. Le signal (burst de 24 cycles) est à la fréquence centrale de 0.35 MHz, permettant ainsi de travailler avec seulement les modes  $A_0$  et  $S_0$ . Une fois le modèle résolu en fréquentiel, les potentiels électriques des différents éléments du récepteur matriciel sont récupérés. Grâce à ces données, on peut d'une part calculer les signaux temporels (en reconstituant les spectres, puis en appliquant une transformée de Fourier inverse) et d'autre part appliquer la méthode *Phased array*. Cette dernière permet d'identifier les enveloppes des signaux de chacun des deux modes. Le dispositif expérimental équivalent a été mis en place et des mesures, avec les mêmes signaux d'excitation, ont été réalisées. Ainsi il est possible de comparer les signaux temporels de l'élément central de la sonde réceptrice, et les enveloppes obtenues dans les deux cas. L'étude effectuée étant qualitative, tous les signaux sont normalisés par rapport à leur amplitude maximale.

Sur la figure 5.10.a, on voit une bonne correspondance (en amplitude et en phase) entre le signal expérimental mesuré par l'élément central et le signal simulé correspondant, recréé à partir des différentes simulations réalisées en fréquence. On peut voir une différence apparaître après une durée de 100  $\mu s$ , du fait de signaux expérimentaux parasites, provenant de réflexions de bords de la plaque, qui ne sont pas pris en compte dans le modèle numérique. La figure 5.10.b montre que la sélectivité modale à la réception fonctionne pour la simulation et l'expérimentation, car on retrouve les enveloppes des deux modes de Lamb, avec une position en temps correspondant bien aux vitesses de propagation de ces ondes guidées. Pour le mode  $S_0$ , les résultats calculés et mesurés sont très similaires, et pour le mode  $A_0$ , les maxima des enveloppes correspondent bien, mais on constate que le résultat du post traitement des mesures expérimentales présente plus de signaux parasites à -10 dB (30%) de l'amplitude maximale. Cela est dû au rapport signal sur bruit expérimental du mode  $A_0$ , dont l'amplitude est plus faible que celle du mode  $S_0$ , car son excitation par les éléments de la sonde est plus faible que dans le cas de ce dernier (figure 3.16). On constate que l'impact de

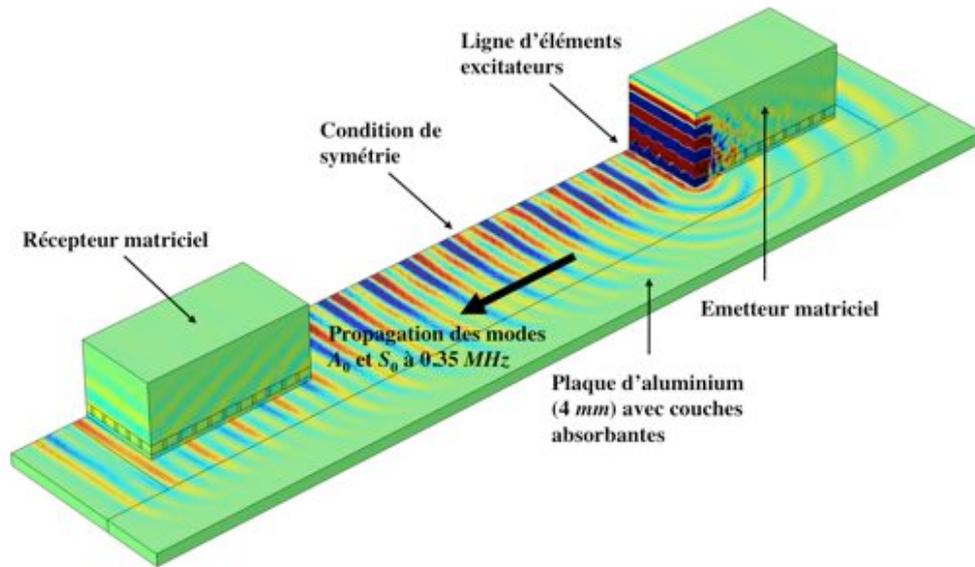


Figure 5.9 : Résolution et affichage du champ de déplacement normal du model EF de l'excitation des modes de Lamb, par une ligne d'éléments d'une sonde matricielle, à  $0.35 \text{ MHz}$ , dans une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, et réception des signaux par une autre sonde matricielle située à  $160 \text{ mm}$ .

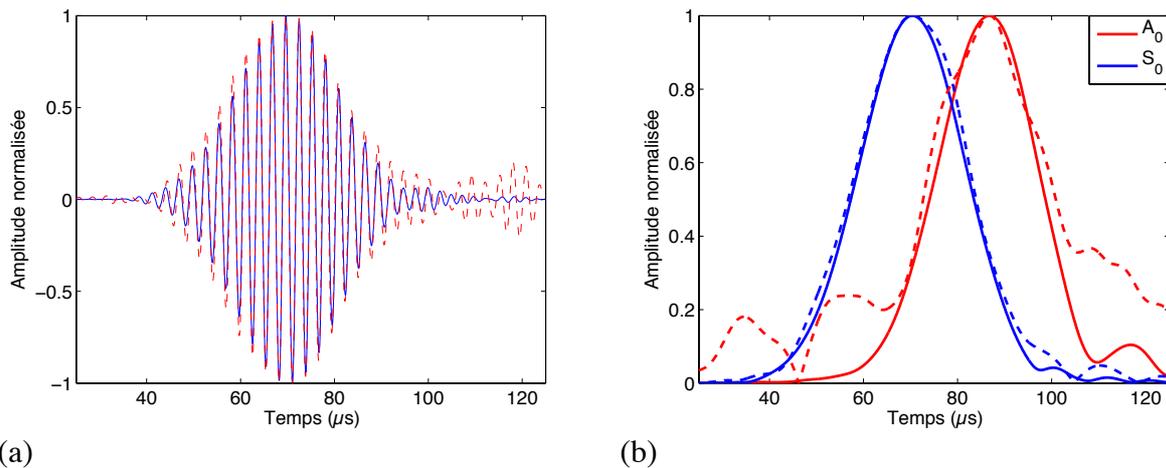


Figure 5.10 : Sélectivité modale à la réception, sur une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, de la méthode *Phased array* appliquée à une sonde matricielle (résultats de simulation — et d'expérimentation ---) : (a) signaux temporels normalisés, à  $0.35 \text{ MHz}$ , mesurés par l'élément central, (b) enveloppes des signaux, des modes  $A_0$  et  $S_0$ , obtenus par la méthode.

la présence des réflexions de bords de la plaque est plus important sur le mode  $A_0$  du fait également que son amplitude est plus basse que celle du mode  $S_0$ . Le modèle numérique n'est pas perturbé, quant à lui, par le bruit de mesure et les réflexions parasites.

### 5.3.3 Directivité

Grâce à la dimension des modèles, respectant les distances de mesures expérimentales (jusqu'à  $400 \text{ mm}$ ), il est possible, dans le cas de l'étude numérique en émission, d'observer et de relever les amplitudes des champs de déplacement à des positions spatiales similaires à celles des expériences, effectuées en champ lointain (fronts d'onde plans), et ainsi pouvoir construire et comparer des diagrammes de directivité. Pour la comparaison de la directivité

obtenue à la réception, des modèles similaires à ceux utilisés pour l'étude de la sélectivité à la réception (figure 5.9), sont mis au point. Ils permettent de recréer les signaux mesurés par chaque élément de la sonde matricielle réceptrice, et d'appliquer le principe du *Phased array* pour différents angles « d'écoute » afin de repérer la direction du signal propagé depuis la source.

### 5.3.3.1 A l'émission

A cette occasion des mesures expérimentales supplémentaires sont réalisées afin d'obtenir des diagrammes plus précis (avec d'avantage de points de mesure qu'au paragraphe 3.4.1.3). Ces mesures requièrent l'utilisation du dispositif décrit au paragraphe 3.4.1.1 et utilisant la sonde Laser qui, dans ce cas, est déplacée le long d'un arc de cercle. Ce déplacement du dispositif est cependant plus compliqué à réaliser, et les mesures sont donc plus longues à accomplir. Il faut également noter que les mesures faites avec ce type de capteur sont plus sensibles aux perturbations (plus ou moins bonne réflectivité à la surface entraînant un rapport signal sur bruit très variable). Enfin, le déplacement limité, dans l'espace, de la sonde Laser et la taille de la zone de mesure ne permettent de couvrir qu'un domaine angulaire de  $0^\circ$  à  $45^\circ$ . Les premières comparaisons entre la simulation et l'expérimentation sont réalisées pour l'aluminium à  $0.5$  et  $0.35$  MHz (burst 24 cycles). Chacun des modes présents est excité un à un pour se propager dans la direction  $0^\circ$  (direction de propagation choisie), et les mesures sont effectuées le long d'un arc de cercle (tous les  $2^\circ$ ) situé à une distance de  $350$  mm du centre de la sonde matricielle. La résolution des simulations permet d'obtenir la distribution du champ de déplacement en surface de la plaque. La direction de propagation des modes générés ( $0^\circ$ ) est fixée dans la direction x (figure 5.11). Les valeurs de la composante normale de déplacement, pour les différentes fréquences de la bande d'excitation, sont relevées le long d'un arc de cercle (domaine angulaire de  $45^\circ$ ) à une distance identique à celle prise lors des mesures expérimentales. Ces valeurs permettent de calculer les signaux temporels et de prélever leur maximum d'amplitude. La comparaison avec les mesures expérimentales est présentée sur la figure 5.12. La non régularité de données mesurées, et le bruit présent à environ  $-15$  dB (18%) de l'amplitude maximale, proviennent du rapport signal sur bruit parfois faible dû aux problèmes de réflectivité (très variable) de la surface. On note cependant une bonne correspondance entre l'ouverture du faisceau prédite et celle mesurée. Le lobe principal qui est dans la direction de propagation ciblée ( $0^\circ$ ) est supérieur aux reste des signaux mesurés, qui sont en moyenne à environ  $-20$  dB (10%) de l'amplitude de ce dernier, sur quasiment tout le demi espace avant, inspecté, de la sonde

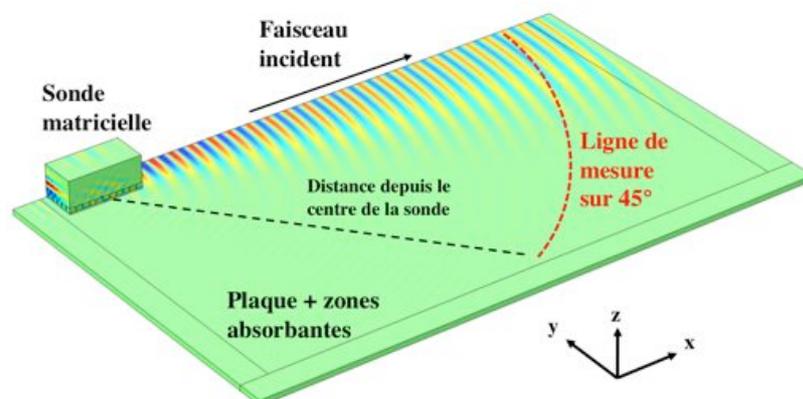


Figure 5.11 : Distribution de la composante normale du champ de déplacement (pour une fréquence). La ligne pointillée rouge indique l'ensemble des valeurs relevées le long d'un arc de cercle (domaine angulaire de  $0^\circ$  à  $45^\circ$ ), afin de réaliser des diagrammes de directivité des faisceaux ultrasonores produits par la méthode *Phased array*.

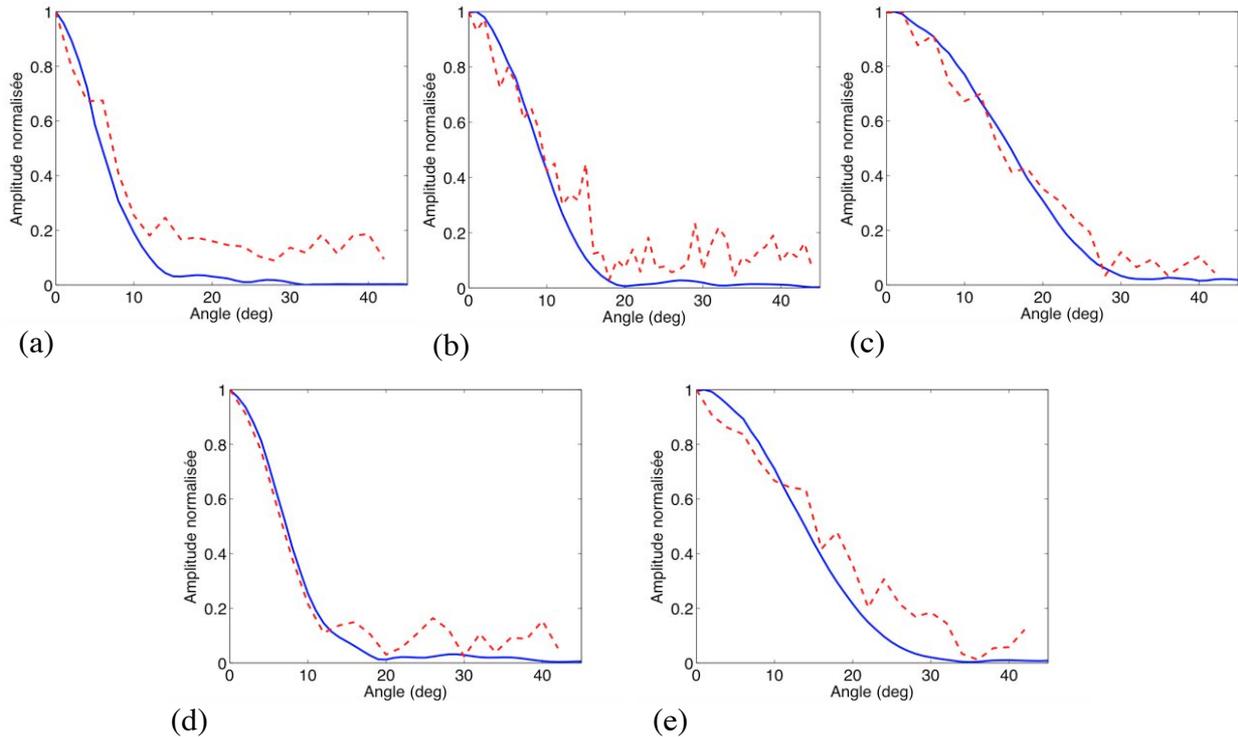


Figure 5.12 : Diagrammes de directivité (amplitudes normalisées) obtenus pour l'excitation de chacun des modes (méthode *Phased array*) d'une plaque en aluminium de 4 mm d'épaisseur : (a)  $A_0$  à 0.5 MHz, (b)  $S_0$  à 0.5 MHz, (c)  $A_1$  à 0.5 MHz, (d)  $A_0$  à 0.35 MHz, (e)  $S_0$  à 0.35 MHz. Résultats de simulation — et mesures expérimentales ---.

matricielle, dans la direction de propagation voulue. A noter qu'il faut rester avec un échantillonnage convenable des longueurs d'onde (critère de Nyquist-Shannon), grâce à la disposition des éléments de la sonde, pour que le faisceau ultrasonore émis, comme lors de l'étude faite au paragraphe 3.4.1.3, se propage principalement dans la direction choisie. Pour les cas où l'échantillonnage n'est pas suffisant, comme par exemple celui du mode  $A_0$ , dont la longueur d'onde est petite, des faisceaux de signaux parasites peuvent également être émis dans différentes directions en plus de celle choisie.

Cette apparition de faisceaux ultrasonores parasites, constatée expérimentalement, peut être correctement mise en évidence par les modèles de simulation employés. On reprend une expérimentation similaire à la précédente ; dans une plaque d'aluminium chacun des modes ( $A_0$ ,  $S_0$  et  $A_1$ ) est généré aux deux fréquences centrales 0.35 et 0.5 MHz dans une direction fixée à  $0^\circ$ , à l'aide de la méthode *Phased array* employant une excitation de type burst de 12 cycles. Les signaux ultrasonores sont alors mesurés dans 5 directions ( $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $-135^\circ$  et  $-180^\circ$ ) autour de la sonde à l'aide d'un transducteur monoélément piézoélectrique (*Olympus*, en contact couplé avec du gel, de 25 mm de diamètre et de fréquence centrale 0.5 MHz), à environ 180 mm du centre de la sonde matricielle émettrice. Ces mesures s'ajoutent à celles réalisées précédemment par le Laser, qu'il n'a pas été possible d'utiliser sur tout le contour de la sonde. Le but ici n'est pas d'évaluer finement l'ouverture des faisceaux (difficile à faire avec ce type de capteurs) mais de comparer les amplitudes des signaux mesurés dans les différentes directions avec l'amplitude du faisceau mesuré dans la direction désirée ( $0^\circ$ ). Ces mesures permettent d'avoir un bon aperçu de la propagation des ondes dans les différentes directions autour de la sonde. Il faut cependant veiller, durant l'expérimentation, à avoir un couplage identique du récepteur pour les différentes positions de mesure, sous peine d'avoir une mauvaise estimation des amplitudes. Les mesures expérimentales réalisées sont indiquées dans l'annexe E. On modélise ensuite ces expérimentations avec cette fois une zone plus

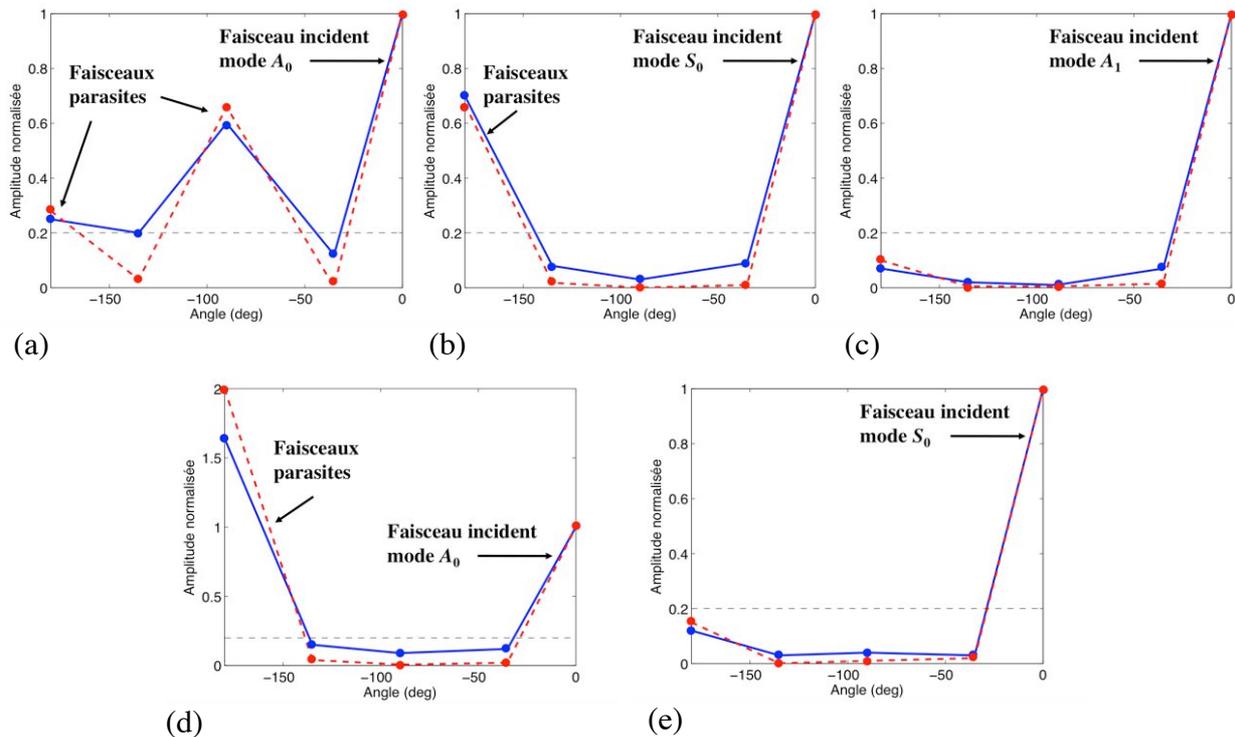


Figure 5.13 : Mesures en cinq positions autour de la sonde matricielle ( $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $-135^\circ$  et  $-180^\circ$ ) de l'amplitude maximale des ondes ultrasonores émises par la sonde lorsque celle-ci excite, via la méthode *Phased array*, un mode guidé particulier dans la direction  $0^\circ$  dans une plaque d'aluminium de  $4\text{ mm}$  d'épaisseur : (a)  $A_0$  à  $0.5\text{ MHz}$ , (b)  $S_0$  à  $0.5\text{ MHz}$ , (c)  $A_1$  à  $0.5\text{ MHz}$ , (d)  $A_0$  à  $0.35\text{ MHz}$ , (e)  $S_0$  à  $0.35\text{ MHz}$ . Résultats de simulation — et mesures expérimentales ----. Pour chaque cas, les amplitudes sont normalisées par celle du faisceau incident désiré. La ligne pointillée horizontale est la « limite de tolérance ».

étendue du contour de la sonde matricielle. La résolution de ces modèles nous donne la distribution de la composante normale du champ de déplacement pour les différentes fréquences. Les distributions de la composante normale aux fréquences centrales, pour les différents cas, sont données dans l'annexe E. Ces résultats de simulation permettent de bien visualiser la présence ou non des faisceaux parasites. Pour finir on relève les valeurs aux 5 positions spatiales correspondant à celles qu'occupait le capteur monoélément durant les expérimentations. Ces valeurs permettent de calculer les signaux temporels et de prélever leur maximum d'amplitude. Ces maxima sont alors comparés à celui du faisceau mesuré dans la direction désirée ( $0^\circ$ ). Ces rapports d'amplitude obtenus durant les expérimentations et les simulations sont comparés sur la figure 5.13. On retrouve entre les simulations et les résultats expérimentaux des résultats proches pour les valeurs des amplitudes des faisceaux parasites, qui apparaissent pour le cas des modes  $A_0$  ( $\lambda \approx 5.4\text{ mm}$ ) et  $S_0$  ( $\lambda \approx 9.6\text{ mm}$ ) à  $0.5\text{ MHz}$  et pour le mode  $A_0$  ( $\lambda \approx 7.1\text{ mm}$ ) à  $0.35\text{ MHz}$ , respectivement sur la figure 5.13.a, la figure 5.13.b et la figure 5.13.d. On choisit de définir un faisceau d'onde comme parasite lorsque son amplitude maximale est supérieure à 20% de l'amplitude du faisceau incident désiré (soit supérieure à  $-14\text{ dB}$ ). Au delà cette « tolérance limite » le niveau des ondes non désirées (mélanges des différents modes de Lamb) risque de perturber sensiblement les mesures si celles-ci sont réfléchies par divers réflecteurs (bords de plaque, etc.). Ainsi il est possible d'observer l'impact de l'échantillonnage sur la directivité et de voir clairement les effets lorsque le critère de Nyquist-Shannon n'est pas respecté, comme pour les trois cas évoqués précédemment. Dans les deux autres, c'est à dire  $A_1$  ( $\lambda \approx 18.5\text{ mm}$ ) à  $0.5\text{ MHz}$  et  $S_0$  ( $\lambda \approx 15\text{ mm}$ ) à  $0.35\text{ MHz}$ , respectivement sur la figure 5.13.c, la figure 5.13.e, la simulation comme

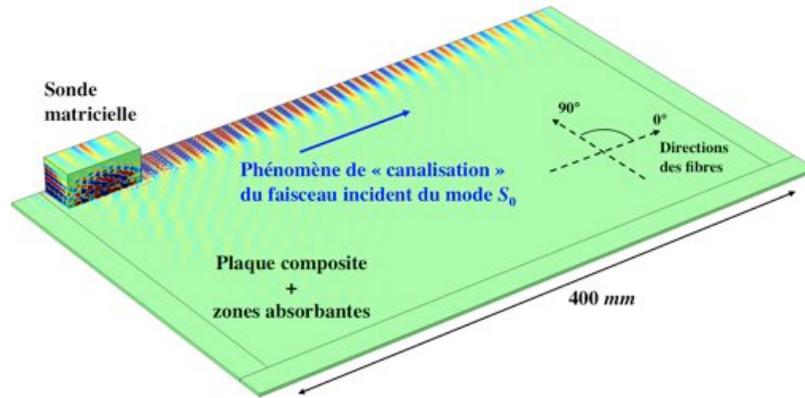


Figure 5.14 : Simulation par EF 3D de la génération, par la méthode *Phased array*, et propagation du mode  $S_0$  à 0.45 MHz dans une des deux directions des fibres du composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur. Composante normale du champ de déplacement.

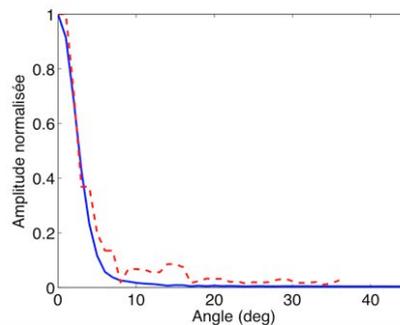


Figure 5.15 : Diagrammes de directivité (amplitudes normalisées) obtenus après l'excitation à 0.45 MHz, dans plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur, du mode  $S_0$  dans la direction des fibres (méthode *Phased array*). Résultats de simulation — et mesures expérimentales ---.

l'expérimentation montrent que le mode généré dans la direction  $0^\circ$  est environ 20 dB supérieur aux autres signaux, dans toutes directions confondues.

Pour la comparaison de la directivité dans le cas du composite, le mode  $S_0$  (plus facilement mesurable car le plus excitable) est généré à 0.45 MHz dans une des deux directions des fibres (fixée à  $0^\circ$ ). Le relevé des déplacements normaux avec la sonde Laser s'effectue à 250 mm du centre de la sonde (le long d'un arc de cercle de  $0^\circ$  à  $45^\circ$ ). Le phénomène de canalisation du faisceau ultrasonore pour le composite croisé, le long des fibres est visible dans le résultat, à la fréquence centrale (figure 5.14), de la simulation par éléments finis. Après le traitement des données de la simulation identique à celui fait pour le cas de l'aluminium, on obtient le diagramme de directivité et l'ouverture observée correspond bien aux mesures expérimentales (figure 5.15). Le faisceau est presque uniquement généré dans la direction choisie du fait d'un bon échantillonnage du mode  $S_0$  ( $\lambda \approx 14$  mm).

### 5.3.3.2 A la réception

On étudie le cas de la réception du mode  $S_0$  à 0.35 MHz dans la plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, du fait que la longueur d'onde de ce mode est suffisamment grande pour respecter le critère d'échantillonnage, contrairement au mode  $A_0$  comme il a été observé au paragraphe précédent. Le non respect de ce critère peut faire apparaître des lobes secondaires dans d'autres directions donnant alors une identification erronée de la direction d'un éventuel réflecteur. On récupère donc tout d'abord les données expérimentales et celles du modèle numérique, qui ont été obtenues au paragraphe 5.3.2.2. En post traitement, à partir des

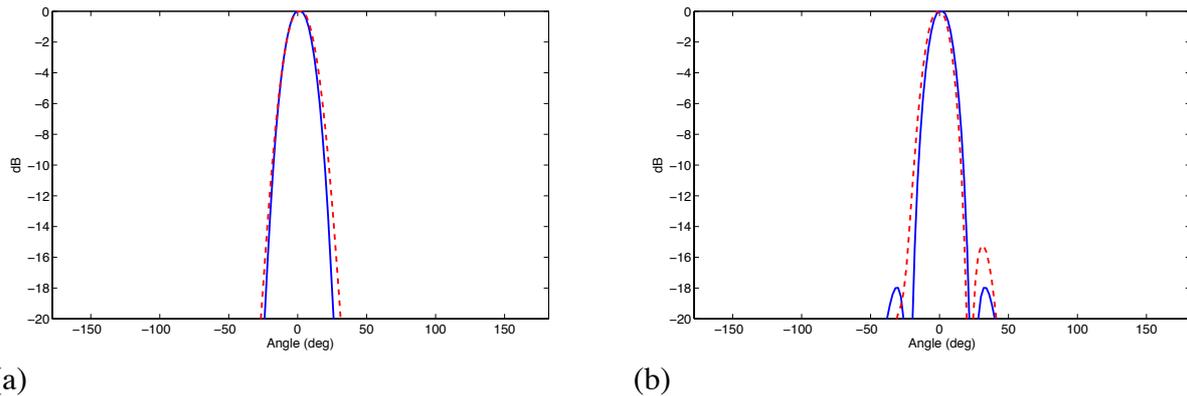


Figure 5.16 : Diagramme de directivité, normalisé en amplitude, à la réception d'un système multiélément matriciel utilisant la méthode *Phased array* pour recevoir le modes  $S_0$  provenant d'une source à 160 mm : (a) à 0.35 MHz dans une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, (b) à 0.45 MHz dans une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur. Résultats de simulation — et mesures expérimentales ---.

signaux électriques mesurés ou calculés sur chaque élément piézoélectrique de la sonde réceptrice, la méthode *Phased array* est appliquée pour filtrer le mode  $S_0$  et repérer sa direction de propagation, par une « écoute » sur 360° dans le plan de la plaque. Ainsi le même procédé est appliqué pour la simulation et l'expérimentation, permettant de tracer et de comparer les diagrammes de directivité, composés des maxima d'amplitude pour la réception du mode  $S_0$  (figure 5.16.a). On obtient ainsi deux diagrammes (un simulé et un mesuré), qui sont similaires, et dont le lobe principal coïncide avec la direction de la source et dont l'ouverture angulaire est de 30° à -6 dB d'amplitude.

De la même manière que précédemment, avec un dispositif composé de deux sondes matricielles à l'émission et à la réception (espacées de 160 mm), on observe la directivité à la réception du mode  $S_0$  pour le composite  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur. Le mode est excité par une ligne d'éléments du transducteur émetteur à 0.45 MHz (24 cycles). On récupère les données issues de l'expérimentation et de la simulation (le modèle de la plaque composite est un modèle homogène équivalent) afin de déterminer et tracer les diagrammes de directivités, qui sont ensuite comparés. Le résultat (figure 5.16.b) montre une très grande similarité des ouvertures angulaire (30° à -6 dB d'amplitude) et le positionnement correct de la direction de la source (à 0°).

## 5.4 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de présenter des modèles éléments finis du système multiélément (transducteur matriciel piézoélectrique), piloté par la méthode *Phased array*, en contact sur différents types de plaque, afin de générer ou recevoir des modes de Lamb dans différentes directions. Ils ont été élaborés pour aider à mieux comprendre les phénomènes physiques et servir de base à une étude d'optimisation du procédé. L'ensemble des éléments employés dans ces modèles numériques a été décrit dans un premier temps, en expliquant la conception de la sonde matricielle et la modélisation dans le domaine fréquentiel. Les méthodes utilisées pour réduire la taille des simulations, comme le recours à des zones absorbantes, à des conditions de symétrie, ou encore à l'emploi d'un maillage adapté, ont été rappelées. Enfin a également été expliquée la nécessité du couplage de la piézoélectricité, présente à l'excitation et à la réception, avec la propagation d'ondes élastiques dans un solide (ondes guidées dans une plaque). Dans un deuxième temps, les résultats obtenus lors des

simulations ont été comparés avec des mesures expérimentales. Le but était de valider les modèles numériques en montrant leur capacité à reproduire les phénomènes de génération, propagation et réception, qui sont produits avec le système réel. Ainsi ont été comparés les réponses en fréquence des éléments de la sonde, les capacités de sélectivité modale et de directivité. Pour ces différents aspects de bons accords ont été observés dans le cas du matériau isotrope (plaque d'aluminium). Certains résultats sur composite croisé ont aussi montré une bonne reproduction des mesures expérimentales, principalement pour le cas du mode  $S_0$ . Cependant la restriction du domaine fréquentiel exploitable, proche de certaines fréquences de coupures dans le cas de ce type de composite, a limité l'étude à un seul mode de Lamb ( $S_0$ ). Les caractéristiques des autres modes n'ont pas permis d'avoir des résultats satisfaisants dans leur cas. L'étude de la validité des modèles numériques sur composites nécessiterait des campagnes de mesures expérimentales et de simulations supplémentaires, avec différents types de composites et avec plusieurs modes guidés exploitables.

# Conclusions générales et perspectives

Ce travail de thèse, qui s'inscrit dans un partenariat entre l'institut I2M de Bordeaux et le CETIM de Senlis, avait pour objectif le développement d'un procédé de CND par ultrasons alternatif aux techniques couramment employées dans l'industrie. L'idée de ce procédé vient de l'intérêt grandissant, dans l'industrie, d'employer les ondes ultrasonores guidées pour ausculter des structures composites de grandes dimensions. En effet les ondes guidées de type Lamb ou SH, par exemple, sont réputées pour leur forte potentialité à se propager sur de grandes distances, tout en produisant des déformations réversibles dans toute l'épaisseur du guide. Elles constituent ainsi un moyen largement reconnu pour inspecter rapidement et intégralement de grandes pièces ou des zones d'accès difficile. Il est donc intéressant de développer des techniques performantes pour la génération et la détection de ces modes guidés, et plus particulièrement celui des modes de Lamb dans les structures de type plaque. Les progrès réalisés depuis quelques années dans la conception de capteurs multiéléments piézoélectriques et dans l'élaboration des systèmes électroniques d'acquisition multivoie ont motivé ce projet de thèse. Le but était le développement d'un procédé de génération et détection d'ondes de Lamb par une sonde multiélément matricielle (2D) en contact, permettant l'inspection et l'imagerie de grandes plaques métalliques ou composites, à partir d'un nombre minimal de positions de la sonde. Les méthodes employées actuellement dans le domaine industriel ont souvent des contraintes liées à la lourdeur du dispositif, à l'étendue spatiale d'inspection limitée (avec parfois des contraintes d'orientation angulaire pour certaines méthodes ultrasonores employant les ondes guidées) et aux durées d'acquisition des mesures. La technique proposée ici doit être capable, grâce à une méthode de déphasage entre les signaux envoyés ou reçus par les éléments piézoélectriques (technique du *Phased array*), de scanner l'ensemble d'une structure autour de la sonde matricielle, par l'émission et la réception dans des directions choisies, de modes guidés sélectionnés. L'avantage est de pouvoir ausculter rapidement un large domaine spatial sans modifier la position de la sonde, donc sans avoir à changer son couplage (gel) en surface de la structure étudiée. Ce travail avait donc pour but l'élaboration de ce procédé, qui a fait l'objet d'une évaluation expérimentale et a été testé pour la détection de défauts dans des plaques métalliques et composites. L'objectif était également de développer un modèle basé sur la méthode des éléments finis, pour la simulation numérique du procédé. Un tel outil permet d'optimiser la conception des sondes multiéléments en fonction du type de matériau inspecté, ou encore de perfectionner les procédures de contrôle de pièces par ondes guidées, avec ce type de sonde.

La première partie de ce travail a rappelé les besoins industriels en terme de contrôle non destructif, positionné le projet dans le contexte scientifique et expliqué le principe de fonctionnement du procédé. Par la suite l'emploi de différentes méthodes ultrasonores de caractérisation (par ondes de volume ou ondes guidées) a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques, plus précisément les modules de (visco)élasticité du tenseur de rigidité, des matériaux utilisés. Grâce à ces données, il a été possible de calculer l'ensemble

des courbes de dispersion (vitesses de phase, vitesses d'énergie, atténuation, etc.) des modes de Lamb pour les deux types de plaques étudiées (métallique et composite), dont la connaissance est nécessaire pour maîtriser la génération et la réception des modes guidés dans les différentes directions des matériaux. Ceci a été réalisé grâce à l'implémentation et à l'utilisation de la méthode SAFE, qui permet également les calculs des champs, des surfaces d'onde, etc.

La deuxième étape de ce travail a consisté à définir les domaines de validité de la méthode *Phased array*, qui permet de piloter la sonde multiélément pour la génération et la réception de modes guidés dans différentes directions (balayage angulaire des faisceaux ultrasonores : *Beam steering*). Dans cette méthode on considère la propagation de fronts d'onde plans dans des matériaux isotropes ou anisotropes. Ceci a permis d'établir les limites du procédé pour l'inspection de certains matériaux composites. En effet la première restriction venait du fait que l'on n'a pu travailler que dans les directions où les vecteurs de la vitesse de phase et de la vitesse d'énergie sont colinéaires, en dehors desquelles il a été expérimentalement difficile d'avoir des résultats fiables. La seconde restriction pour certains matériaux, comme les composites croisés, était due aux phénomènes d'atténuation de certains modes guidés et de la canalisation de leur énergie le long des fibres [119].

Le dispositif expérimental mis en place est constitué d'un système multivoie *Lecoeur électronique* [116], et de sondes multiéléments *Imasonic* [117]. La méthode *Phased array* a été implémentée et le pilotage des sondes multiéléments pour la génération-détection d'ondes de Lamb a été mis au point. Le procédé a été automatisé et des applications en temps réel ont été développées permettant l'analyse des signaux, l'étude des modes guidés ou encore la détection et l'imagerie d'éventuels défauts. Après la mise au point du système, une campagne de mesures a permis l'évaluation du procédé. Celui-ci a été testé sur ses capacités à privilégier la nature d'un mode et/ou la direction de propagation du faisceau ultrasonore correspondant, et cela aussi bien en mode « émission » qu'en mode « réception ». L'ensemble de l'évaluation réalisée sur des matériaux métalliques ou composites a montré à l'émission, pour différentes configurations d'excitation, les bons rapports d'amplitude obtenus entre le mode désiré et les modes parasites, tant que certaines conditions sont respectées, à savoir, principalement, celle de l'échantillonnage des longueurs d'onde des modes guidés souhaités et la bonne connaissance des courbes de dispersion utilisées pour le procédé. Le contrôle des directions de propagation, conditionné par les mêmes critères, a montré aussi l'aptitude du procédé à balayer tout ou partie du domaine angulaire, suivant l'anisotropie, autour de la sonde multiélément. Sur ce dernier aspect, la précision de l'orientation du faisceau a bien été vérifiée. Du point de vue de la réception, le procédé a montré une bonne capacité à identifier le signal d'un mode spécifique au sein de paquets de signaux produits par la propagation de plusieurs modes différents, et à reconnaître la direction de propagation, permettant ainsi la localisation de sources ultrasonores. L'utilisation de la sonde matricielle employée lors de ce travail a montré de bons résultats de génération-détection de modes guidés pour différentes directions. Cependant sa géométrie carrée et la répartition de ses éléments ont tout de même un impact sur la régularité de ces performances pour différentes directions autour de la sonde (l'échantillonnage spatial varie et les fronts d'onde peuvent être moins réguliers). C'est avant tout une limite technologique, qui sera repoussée lors de la fabrication de sondes circulaires et basses fréquences formées d'éléments de petites dimensions (eux mêmes pouvant être circulaires), dont le pas inter éléments est faible et la répartition régulière. Cette phase d'évaluation a permis de définir des conditions de travail optimales pour l'inspection de plaques en aluminium ou en carbone-époxy.

Le procédé a été employé pour deux types d'application. La première est la caractérisation des raideurs d'un échantillon en combinant, avec un même transducteur multiélément linéaire, la méthode *Phased array* (à l'émission) et la transformée de Fourier 2D

(à la réception). Cette application permet de mesurer une partie des courbes de dispersion des modes guidés (nombres d'onde/fréquences), en respectant évidemment le critère d'échantillonnage de Nyquist-Shannon. Grâce à cela il est possible d'obtenir les caractéristiques mécaniques (modules de rigidité) du matériau. La deuxième application est la détection de défauts (dimension de l'ordre du *mm*) grâce à un scan complet des plaques inspectées à partir d'une unique position de la sonde multiélément. Plusieurs échantillons comportant des défauts de type trou simulant la corrosion, insert simulant un délaminage ou encore dommage causé par un impact ont été testés. Afin d'améliorer la précision des mesures, une méthode de compensation de la dispersion des ondes guidées [120], particulièrement adaptée au principe de ce procédé, a été implémentée. Celle-ci s'effectue durant le post traitement des données, et permet de compenser la déformation du paquet d'onde provoquée par les effets dispersifs des modes guidés. Elle permet donc d'améliorer très significativement la précision de la localisation d'un réflecteur. Les résultats obtenus ont montré de bonnes performances du procédé pour détecter les différents types de défauts et les positionner correctement dans les plaques. Des limites demeurent cependant sur la précision des images obtenues qui dépend de la longueur d'onde employée et de la dimension de la sonde. Ces deux paramètres sont déterminants sur la précision de l'image et la capacité à distinguer deux sources proches. Il est intéressant de noter également que, même si le procédé ne peut pas actuellement dimensionner les défauts et les positionner dans l'épaisseur de la plaque, il serait tout de même possible d'obtenir ces informations en collectant les données véhiculées par les ondes guidées (amplitudes, conversions modales, etc.) [123, 124]. Ceci est réalisable du fait de la capacité du procédé à émettre un mode particulier et à effectuer, à la réception, des mesures régulières le long de la direction de propagation (transformée de Fourier 2D). Pour les matériaux isotropes et les composites ne présentant pas de forte anisotropie (restrictions évoquées précédemment), l'auscultation totale de la structure avec les modes guidés utilisés peut s'effectuer à partir d'une seule position de la sonde. Sinon un déplacement de celle-ci en quelques positions est nécessaire, ce qui exige une surveillance de la qualité du couplage. Pour palier à cette contrainte, l'emploi de modes moins sensibles à l'anisotropie du matériau est essentiel. Enfin on peut noter que l'étendue de la zone inspectée dépend de la capacité des modes guidés à se propager sur de longues distances sans être trop fortement atténués. A cela est lié également la capacité de la sonde à générer un signal de qualité, permettant d'avoir des niveaux de rapport signal sur bruit élevés. Dans le domaine de fréquence employé lors de ce travail avec des matériaux métalliques et composites (carbone-époxy), l'étendue observée est de l'ordre du mètre, avec encore une bonne qualité du signal. Cette capacité à inspecter des zones éloignées permet la détection d'éventuels défauts dans des zones inaccessibles à la sonde.

Après avoir obtenu ces résultats, et plus particulièrement ceux pour les plaques composites, d'autres méthodes de CND (ultrasons et thermographie infrarouge), utilisées à l'I2M ou au CETIM, ont été employées pour la détection des défauts sur ces mêmes plaques. Les performances et limites de ces méthodes ont ainsi été comparées avec celles du procédé. Les différents critères de comparaison s'appuyaient sur la mise en place et la flexibilité du dispositif, l'étendue des zones inspectées, les temps de mesures, les contraintes sur la qualité des mesures, la sensibilité aux défauts, leur identification, leur dimensionnement et la reproductibilité des mesures. En est ressorti, en particulier, que le procédé permet de réaliser plus rapidement l'inspection des plaques et peut même effectuer des analyses en temps réel. De plus, le recours à une seule sonde, à accès unilatéral, et sa simplicité d'utilisation et de mise en place le rendent particulièrement flexible.

Enfin le dernier aspect du projet a été l'élaboration de modèles 3D pour la simulation numérique par éléments finis du procédé. C'est à dire l'application de la méthode *Phased array* à une sonde multiélément matricielle pour la génération et la détection des ondes de

Lamb dans différents types de matériaux (plaques métalliques et composites). L'obtention de certaines données du constructeur des transducteurs multiéléments a permis la réalisation de ces modèles. Ceux-ci prennent en compte, entre autres, la géométrie des composants des sondes, et en particulier celle des éléments piézoélectriques, leur répartition et leur comportement électromécanique. Une fois le modèle réalisé, l'objectif a été de le valider en comparant les résultats obtenus par les simulations avec ceux de mesures expérimentales. La validation reposait sur la capacité à reproduire numériquement la sélectivité modale du procédé, ainsi que la directivité, à l'émission et à la réception. L'ensemble des comparaisons a montré un très bon accord entre les simulations et l'expérimentation pour le cas d'un matériau métallique isotrope (aluminium). Ceci a même permis de visualiser plus finement la conséquence d'un mauvais échantillonnage des longueurs d'onde sur la directivité, qui est la génération de faisceaux parasites dans des directions non désirées. De bons résultats ont aussi été obtenus pour le cas d'un composite et ont permis de visualiser l'effet de canalisation de l'énergie le long des fibres du matériau. Les contraintes liées aux caractéristiques de ces plaques composites ont cependant limité l'étude à un seul mode de Lamb ( $S_0$ ). L'étude de la validité des modèles numériques sur composites nécessiterait des campagnes de mesures expérimentales et de simulations numériques supplémentaires, pour différents types de composites et avec plusieurs modes guidés exploitables.

En perspective, il serait intéressant de poursuivre l'évaluation expérimentale du procédé avec d'autres échantillons composites formés de matériaux différents (pour la matrice et le renfort) et avec des variations de structuration. Chaque type de composite pourrait également être fabriqué avec différentes épaisseurs, le but étant de pouvoir travailler, dans un domaine de fréquence, avec des modes guidés différents et dans des conditions de propagation différentes (anisotropie, viscoélasticité). Ainsi on pourrait vérifier les capacités de sélectivité et de directivité du procédé, suivant les modes employés, sur un large panel d'échantillons représentatifs des structures industrielles existantes. De la même manière, des essais avec des échantillons différents dans lesquels des défauts calibrés auraient été introduits permettraient de vérifier la possibilité de les dimensionner en analysant les amplitudes mesurées pour les différents modes diffractés, avec éventuellement l'analyse de conversions modales (un exemple de ce type de mesure est présenté en annexe F). L'emploi d'autres composites permettrait peut-être également de mettre au point l'inspection des directions anisotropes, grâce à la mesure de signaux de meilleures qualités durant les expérimentations, puisque en théorie la connaissance des relations entre les directions des vitesses de phase et d'énergie permet de contrôler la direction de propagation d'un faisceau ultrasonore et d'identifier dans la même direction un faisceau réfléchi.

A cet aspect expérimental, s'ajoute l'emploi des modèles de simulation numérique qui nécessitent également une validation plus poussée pour le composite. Cependant, les bons résultats obtenus avec ces modèles permettent d'ores et déjà d'envisager la réalisation d'une étude paramétrique d'optimisation du procédé. Ceci afin d'obtenir les meilleures configurations possibles des sondes multiéléments (géométrie, taille, disposition, composition des éléments, etc.), en terme de performance vis à vis du contrôle par ondes guidées de différents types de matériaux. Les modèles pourraient également servir à prédire les capacités et les limites du procédé à détecter certains défauts, qu'il reste à introduire dans la modélisation.

En ce qui concerne le traitement du signal, la programmation pourrait éventuellement être optimisée afin de réduire les temps de calcul, et d'améliorer le traitement en temps réel. La méthode de déphasage appliquée ici part du principe que les éléments d'une sonde ont la même réponse en fréquence (ceci a d'ailleurs été vérifié expérimentalement). Si tel n'était pas le cas (défaut de fabrication), les amplitudes des modes obtenus par la méthode ne seraient

pas optimales, du fait d'une variation de comportement (amplitude et phase) entre les éléments non homogènes. Pour compenser ce problème, il suffirait de mesurer cette différence de réponse sur un signal de référence (par exemple un écho de bord) et de l'implémenter [92]. Enfin il serait également intéressant de comparer le traitement des signaux à la réception avec d'autres techniques déjà développées en SHM et d'évaluer le gain en terme de rapidité et de qualité d'image. On peut citer la méthode de déconvolution angulaire [86] permettant de déconvoluer le signal obtenu par la méthode *Phased addition algorithm* (employée à la réception dans le procédé) avec le signal simulé pour un défaut de référence. Ou encore celle intitulée *Steered covariance matrix* (pour les matériaux isotropes) [89], qui focalise en différents points de l'espace étudié les signaux mesurés par les différents éléments d'un réseau, et mesure à chaque focalisation leur covariance.



# Annexe A

## Caractéristiques des plaques

Propriétés	Aluminium
Dimensions ( <i>mm x mm</i> )	700 x 700
Density ( <i>g/cm<sup>3</sup></i> )	2.78 ± 0.02
Average thickness ( <i>mm</i> )	4 ± 0.05
$C_{ij}(GPa) = C_{ij}' + IC_{ij}''$	$C_{ij}'$
$C_{11}$	112 ± 4
$C_{22}$	112 ± 2
$C_{66}$	27 ± 0.5
$C_{12}$	58 ± 1
$C_{33}$	112 ± 2
$C_{55}$	27 ± 0.5
$C_{13}$	58 ± 1
$C_{23}$	58 ± 7
$C_{44}$	27 ± 3
	$C''_{ij} \approx 0$

Propriétés	Carbone-époxy UD
Dimensions ( <i>mm x mm</i> )	750 x 550
Density ( <i>g/cm<sup>3</sup></i> )	1.42 ± 0.02
Average thickness ( <i>mm</i> )	2.7 ± 0.06
$C_{ij}(GPa) = C_{ij}' + IC_{ij}''$	$C_{ij}'$
$C_{11}$	10 ± 0.5
$C_{22}$	10 ± 0.2
$C_{66}$	2.9 ± 0.1
$C_{12}$	3.6 ± 0.2
$C_{33}$	115 ± 2
$C_{55}$	4.6 ± 0.1
$C_{13}$	3.6 ± 0.5
$C_{23}$	3.6 ± 1
$C_{44}$	4.6 ± 0.1
	$C''_{ij} \approx 2.5\% C'_{ij}$

Propriétés	Carbone-époxy [0°/90°]3s
Dimensions (mm x mm)	750 x 550
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.47 ± 0.02
Average thickness (mm)	1.6 ± 0.07
$C_{ij}(GPa) = C'_{ij} + IC''_{ij}$	$C'_{ij}$
$C_{11}$	10 ± 0.5
$C_{22}$	58 ± 1
$C_{66}$	3.8 ± 0.05
$C_{12}$	3.2 ± 0.5
$C_{33}$	58 ± 1
$C_{55}$	3.8 ± 0.05
$C_{13}$	3 ± 0.5
$C_{23}$	3.5 ± 0.5
$C_{44}$	5.5 ± 0.5
	$C''_{ij} \approx 2.5\% C'_{ij}$

Propriétés	Carbone-époxy [0°/90°]4s
Dimensions (mm x mm)	750 x 550
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.47 ± 0.02
Average thickness (mm)	2.1 ± 0.07
$C_{ij}(GPa) = C'_{ij} + IC''_{ij}$	$C'_{ij}$
$C_{11}$	10 ± 0.5
$C_{22}$	60 ± 1
$C_{66}$	3.5 ± 0.05
$C_{12}$	3.5 ± 0.5
$C_{33}$	60 ± 1
$C_{55}$	3.8 ± 0.05
$C_{13}$	3.5 ± 0.5
$C_{23}$	3.5 ± 0.5
$C_{44}$	5.5 ± 0.5
	$C''_{ij} \approx 2.5\% C'_{ij}$

# Annexe B

## Courbes de dispersion des plaques

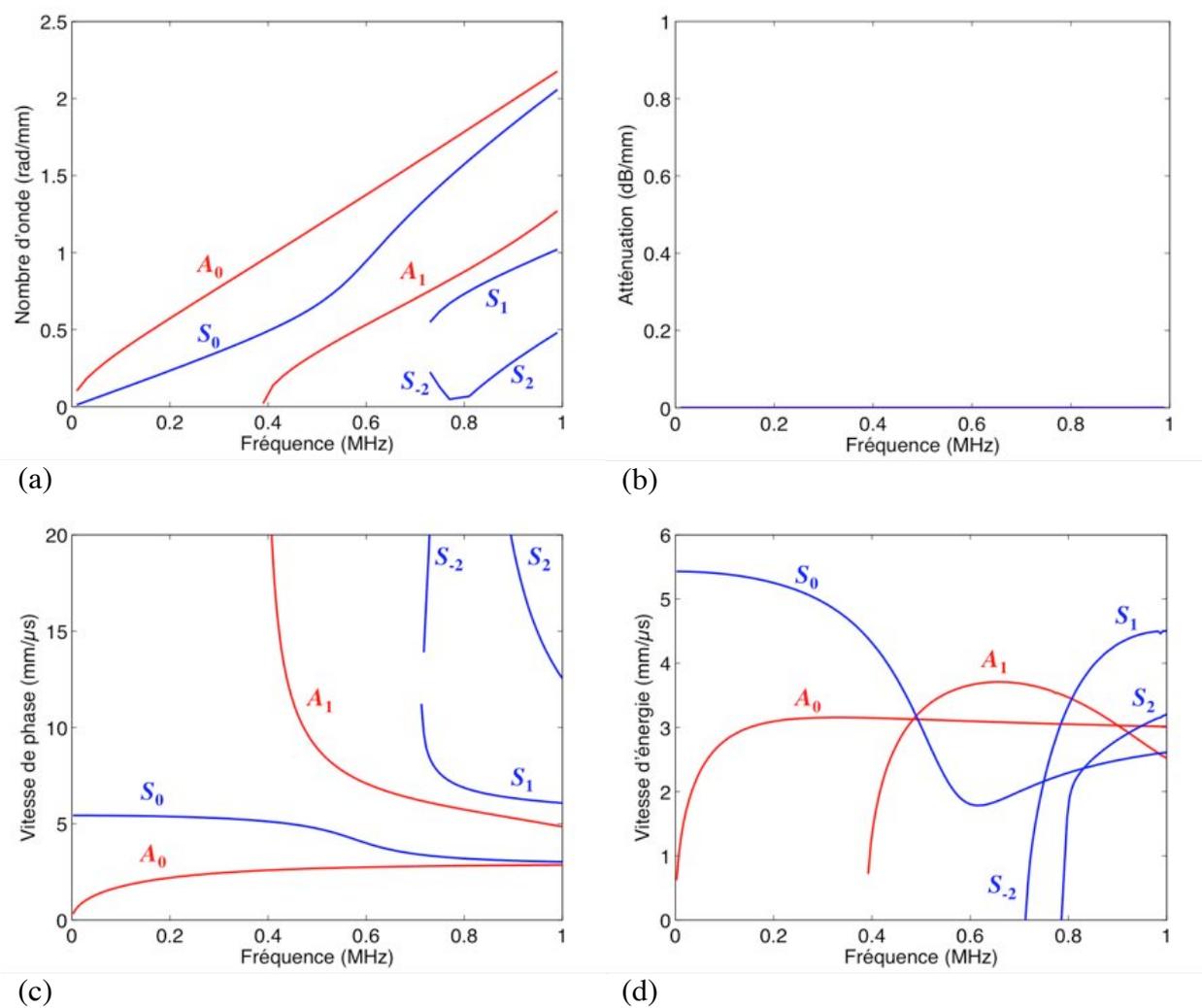


Figure B.1 : Courbes de dispersion des modes de Lamb d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur : (a) le nombre d'onde  $k$ , (b) l'atténuation  $k''$  (dB/mm), (c) la vitesse de phase  $V_\phi$ , (d) la vitesse d'énergie  $V_e$ .

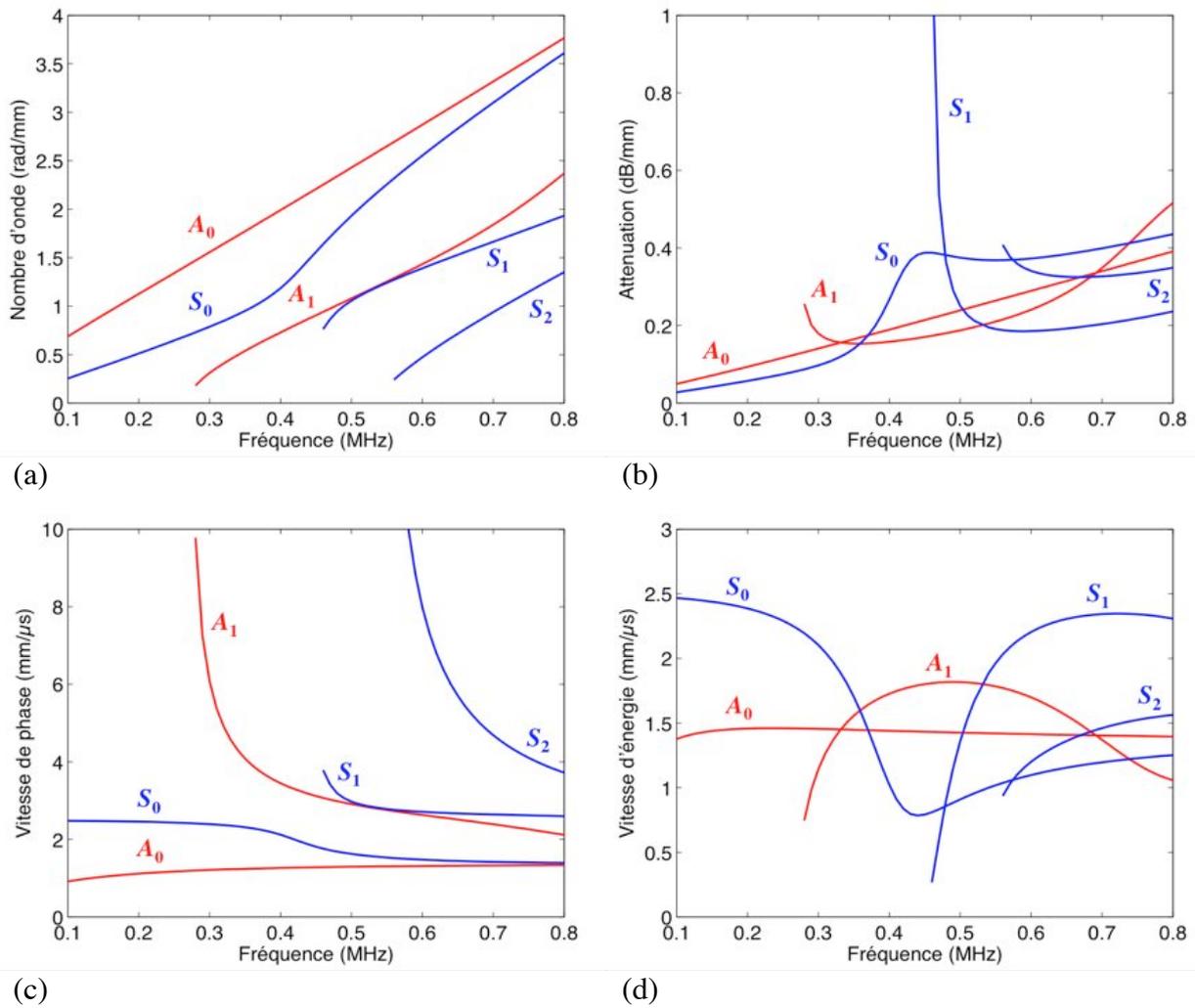


Figure B.2 : Courbes de dispersion des modes de Lamb d'une plaque composite carbone-époxy UD de  $2.7 \text{ mm}$  d'épaisseur dans la direction perpendiculaire à celle des fibres : (a) le nombre d'onde  $k$ , (b) l'atténuation  $k''_{dB/mm}$ , (c) la vitesse de phase  $V_\phi$ , (d) la vitesse d'énergie  $V_e$ .

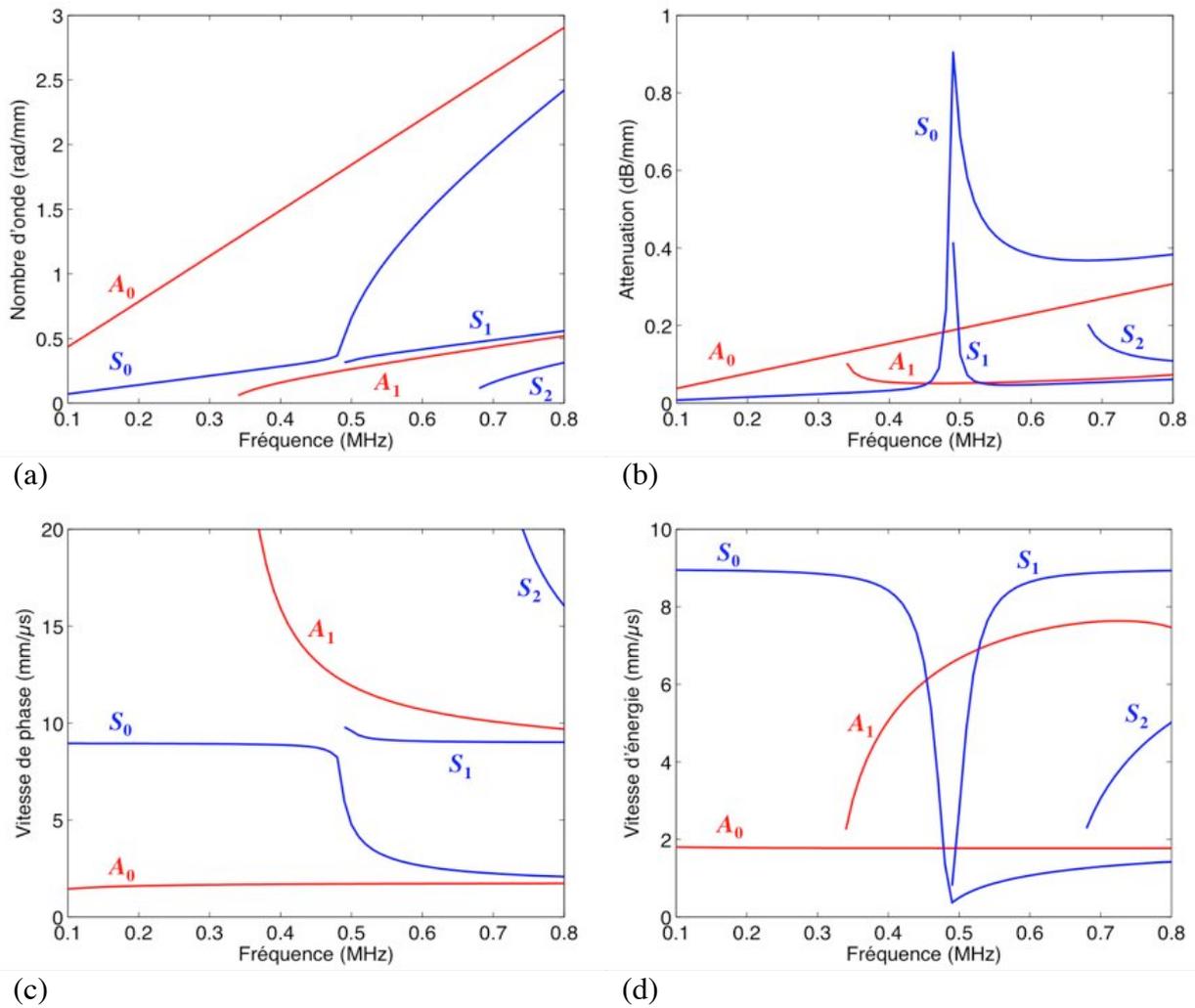


Figure B.3 : Courbes de dispersion des modes de Lamb d'une plaque composite carbone-époxy UD de 2.7 mm d'épaisseur dans la direction parallèle à celle des fibres : (a) le nombre d'onde  $k$ , (b) l'atténuation  $k''$   $_{dB/mm}$ , (c) la vitesse de phase  $V_\phi$ , (d) la vitesse d'énergie  $V_e$ .

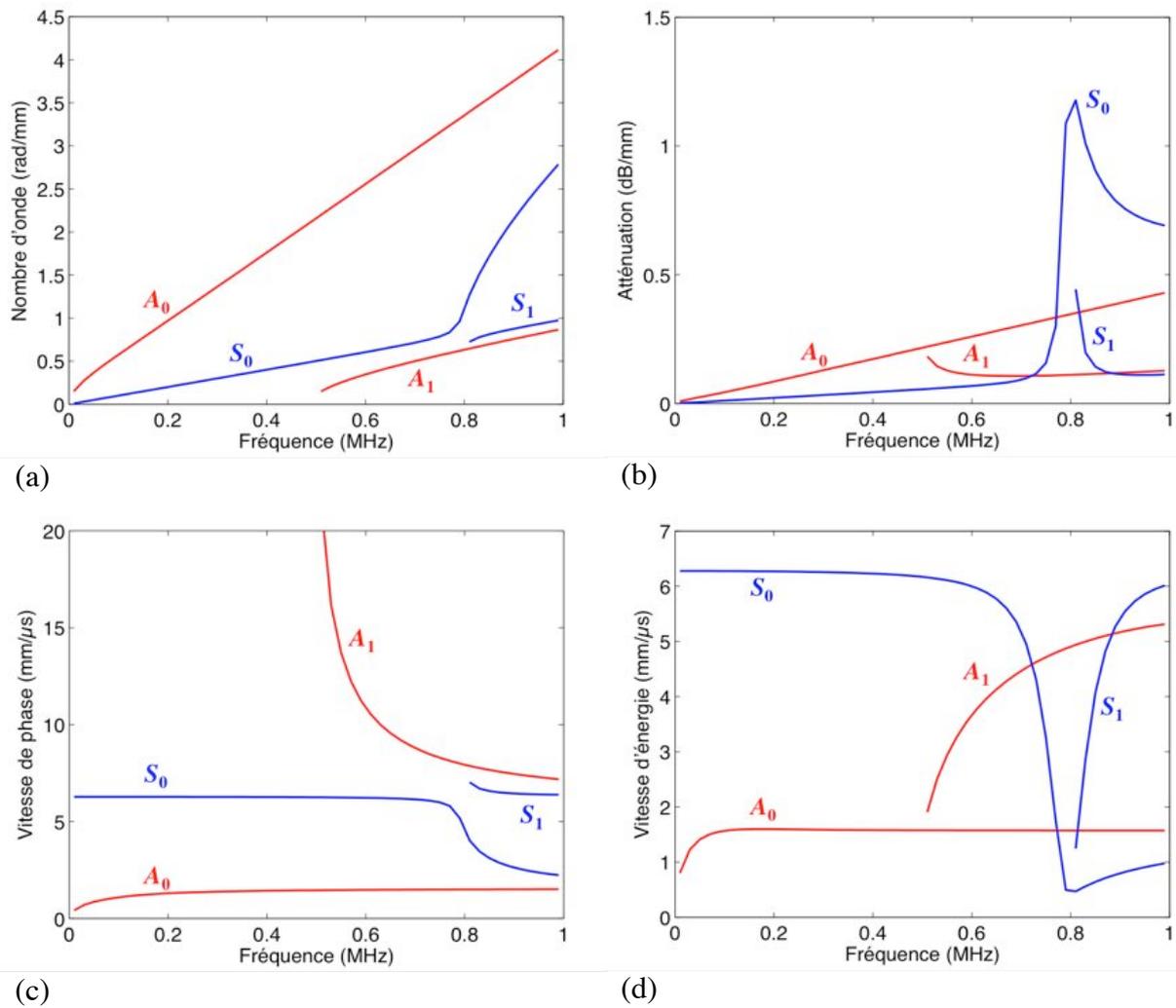


Figure B.4 : Courbes de dispersion des modes de Lamb d'une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_3$ s de 1.6 mm d'épaisseur dans la direction des fibres : (a) le nombre d'onde  $k$ , (b) l'atténuation  $k''$  dB/mm, (c) la vitesse de phase  $V_\varphi$ , (d) la vitesse d'énergie  $V_e$ .

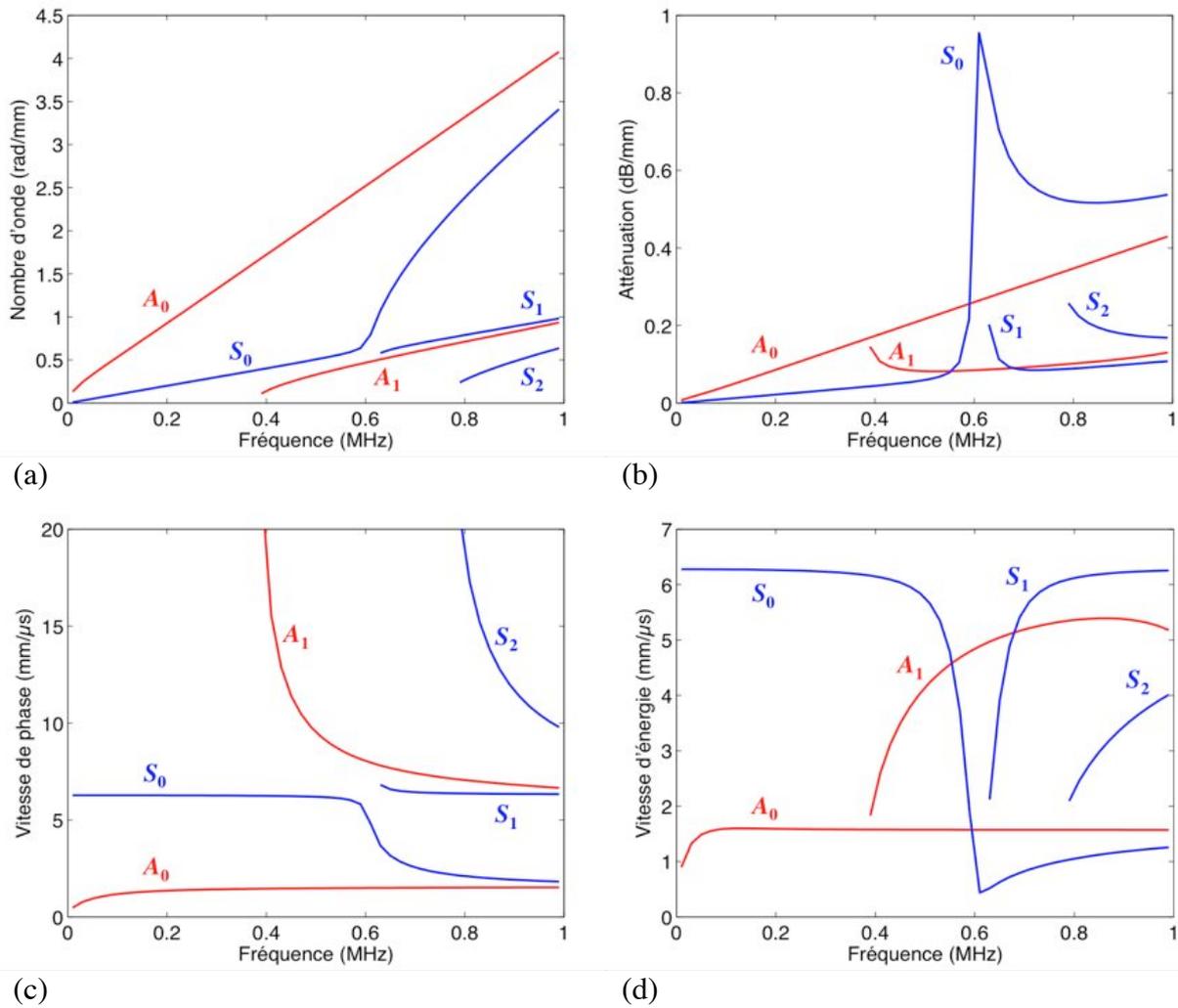


Figure B.5 : Courbes de dispersion des modes de Lamb d'une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/90^\circ]_4s$  de 2.1 mm d'épaisseur dans la direction des fibres : (a) le nombre d'onde  $k$ , (b) l'atténuation  $k''_{dB/mm}$ , (c) la vitesse de phase  $V_\phi$ , (d) la vitesse d'énergie  $V_e$ .

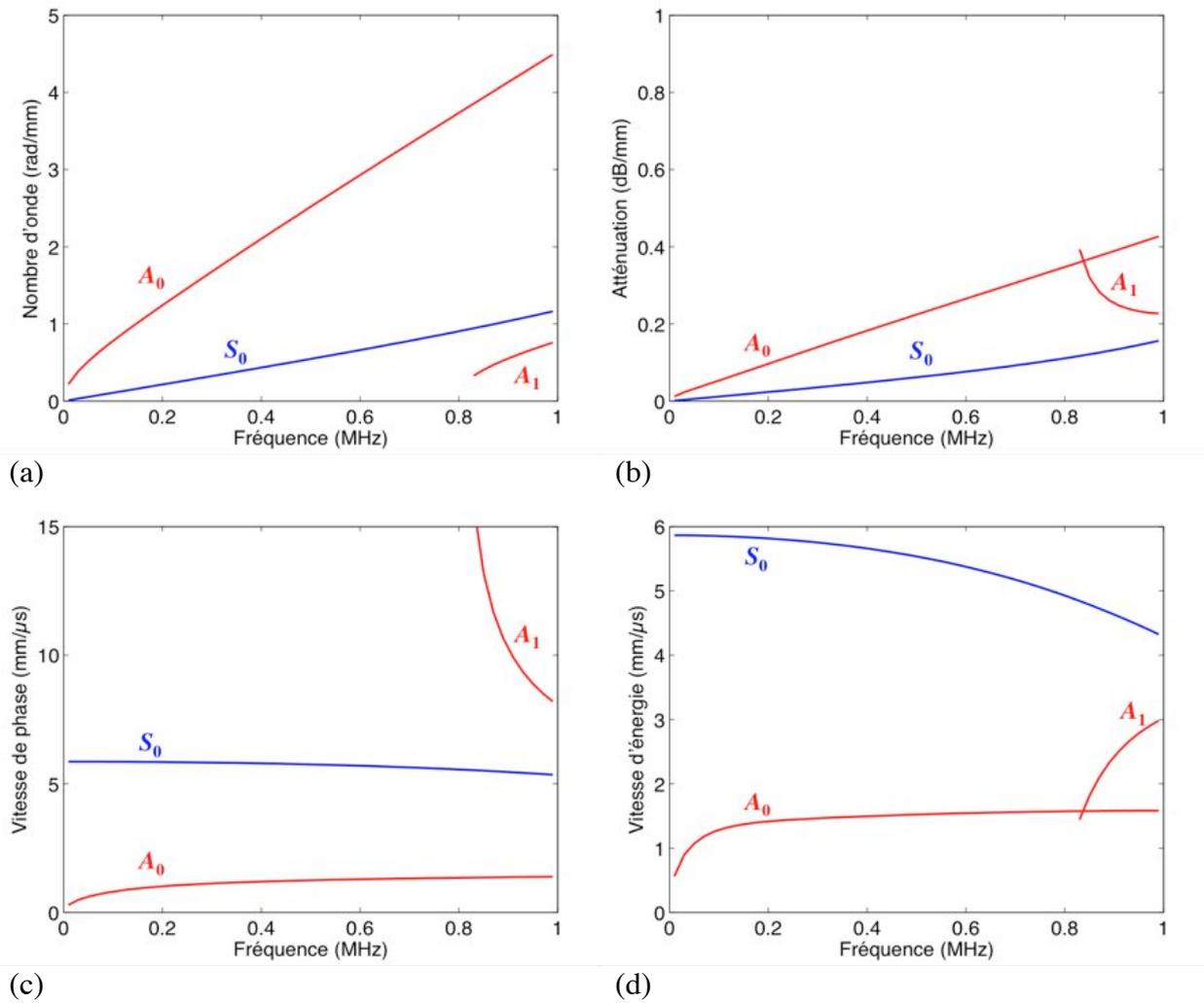


Figure B.6 : Courbes de dispersion des modes de Lamb d'une plaque composite carbone-époxy  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$  de 1 mm d'épaisseur (quasi isotrope) : (a) le nombre d'onde  $k$ , (b) l'atténuation  $k''_{dB/mm}$ , (c) la vitesse de phase  $V_\phi$ , (d) la vitesse d'énergie  $V_e$ .

# Annexe C

## Mesure du couplage électromécanique inter éléments

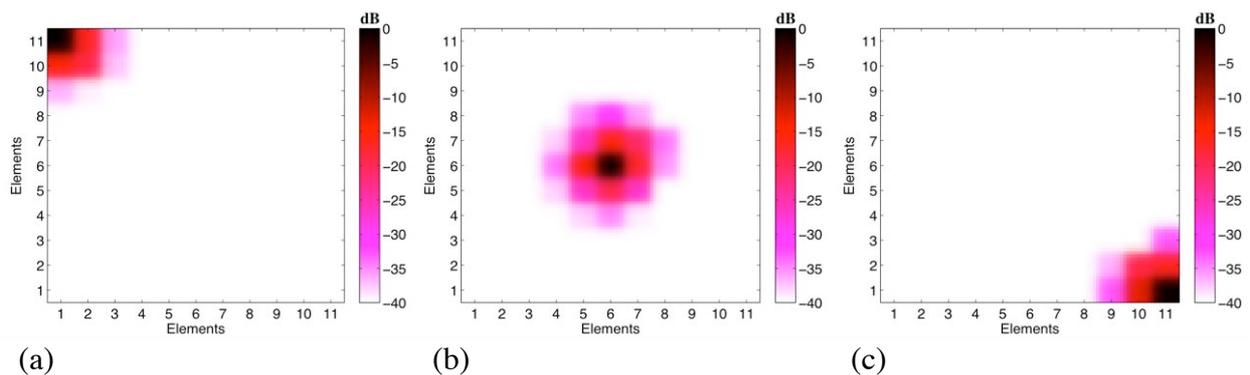


Figure C.1 : Représentation de l'énergie des signaux (amplitudes normalisées) mesurés par l'ensemble des éléments du transducteur matriciel (*Imasonic 7939 A101*) lorsqu'un seul élément du réseau est excité par un burst de 6 cycles à 0.3 MHz : (a) excitation de l'élément 111, (b) excitation de l'élément 61, (c) excitation de l'élément 11.

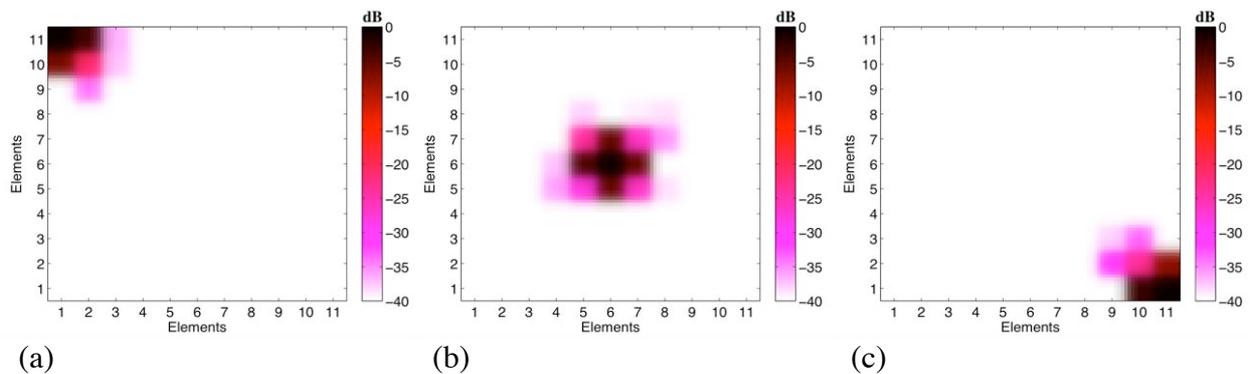


Figure C.2 : Représentation de l'énergie des signaux (amplitudes normalisées) mesurés par l'ensemble des éléments du transducteur matriciel (*Imasonic 7939 A101*) lorsqu'un seul élément du réseau est excité par un burst de 6 cycles à 0.4 MHz : (a) excitation de l'élément 111, (b) excitation de l'élément 61, (c) excitation de l'élément 11.

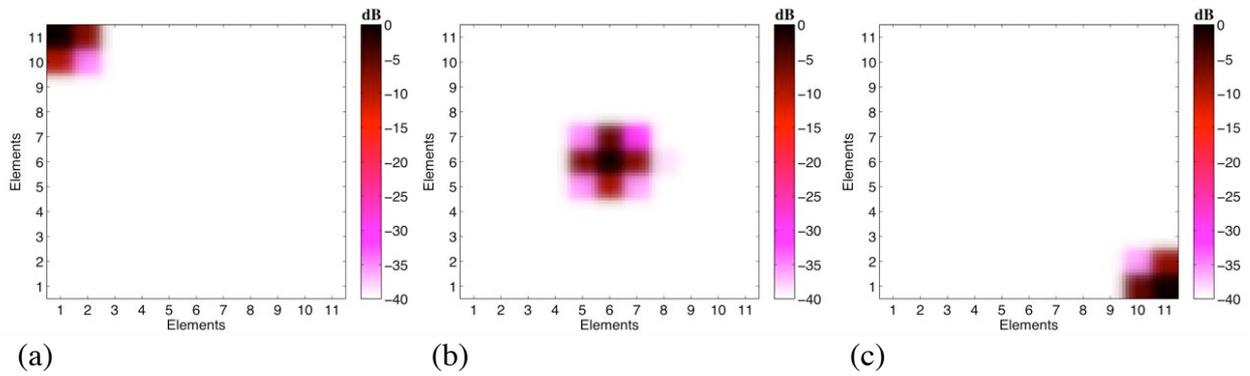


Figure C.3 : Représentation de l'énergie des signaux (amplitudes normalisées) mesurés par l'ensemble des éléments du transducteur matriciel (*Imasonic 7939 A101*) lorsqu'un seul élément du réseau est excité par un burst de 6 cycles à 0.5 MHz : (a) excitation de l'élément 111, (b) excitation de l'élément 61, (c) excitation de l'élément 11.

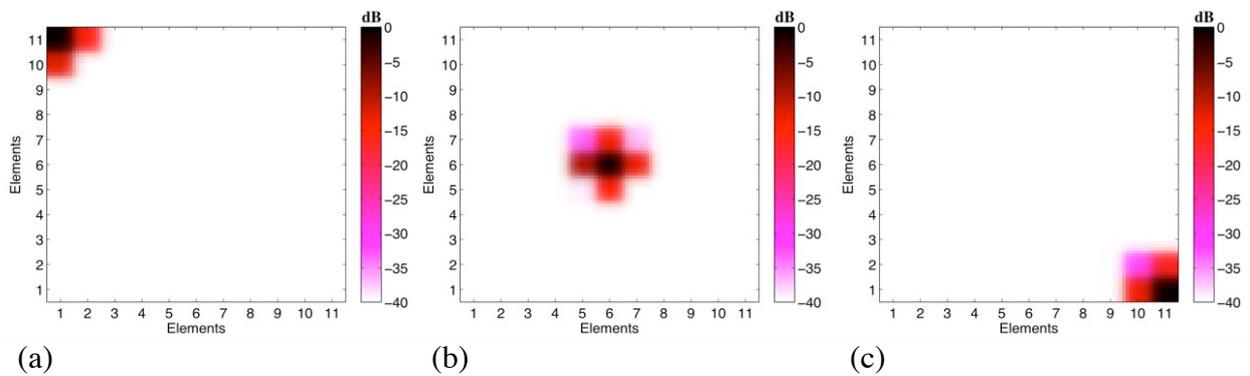


Figure C.4 : Représentation de l'énergie des signaux (amplitudes normalisées) mesurés par l'ensemble des éléments du transducteur matriciel (*Imasonic 7939 A101*) lorsqu'un seul élément du réseau est excité par un burst de 6 cycles à 0.6 MHz : (a) excitation de l'élément 111, (b) excitation de l'élément 61, (c) excitation de l'élément 11.

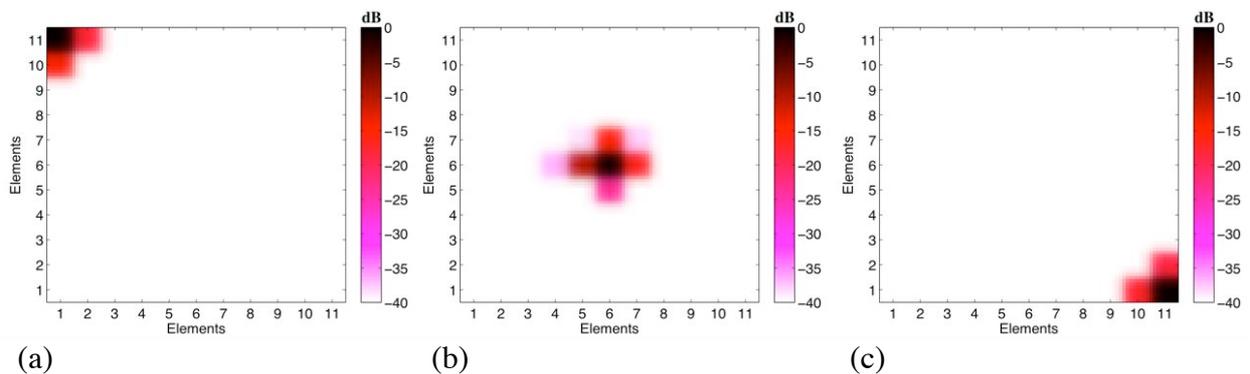


Figure C.5 : Représentation de l'énergie des signaux (amplitudes normalisées) mesurés par l'ensemble des éléments du transducteur matriciel (*Imasonic 7939 A101*) lorsqu'un seul élément du réseau est excité par un burst de 6 cycles à 0.7 MHz : (a) excitation de l'élément 111, (b) excitation de l'élément 61, (c) excitation de l'élément 11.

# Annexe D

## Compensation de dispersion avec conversion modale

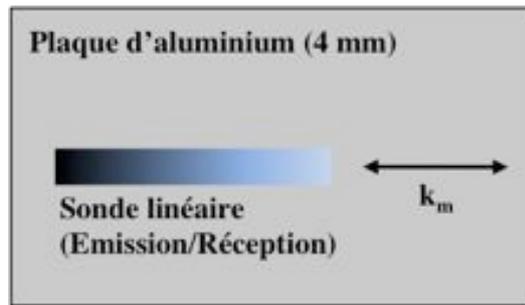


Figure D.1 : Localisation du bord (situé à 453 mm du transducteur multiélément) d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur. La sonde linéaire permet de générer, via la méthode *Phased array*, différents modes de Lamb et d'identifier à la réception tous les modes réfléchis (via une transformée de Fourier 2D).

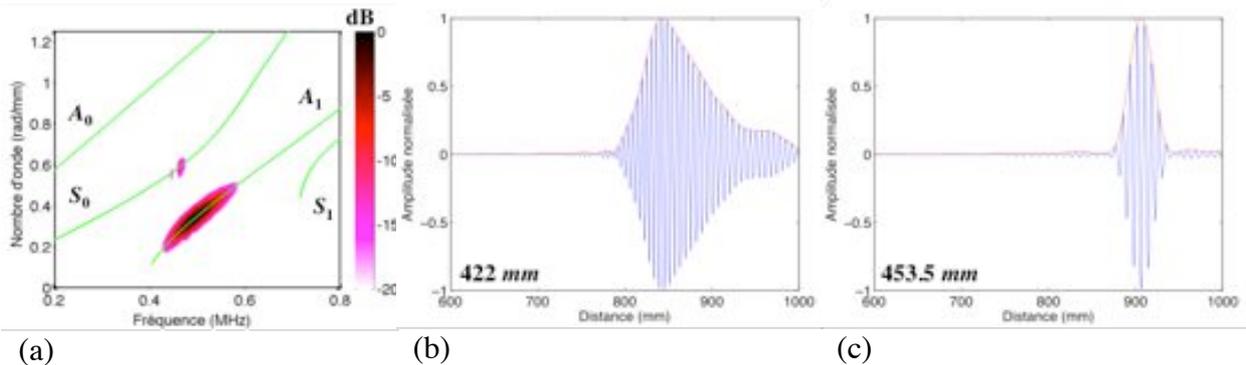


Figure D.2 : Excitation du mode  $A_0$  ( $\lambda = 5.4$  mm) à 0.5 MHz (burst de 12 cycles) : (a) modes réfléchis, (b)  $A_1$  ( $\lambda = 18.5$  mm) reçu non compensé, (c)  $A_1$  ( $\lambda = 18.5$  mm) reçu compensé.

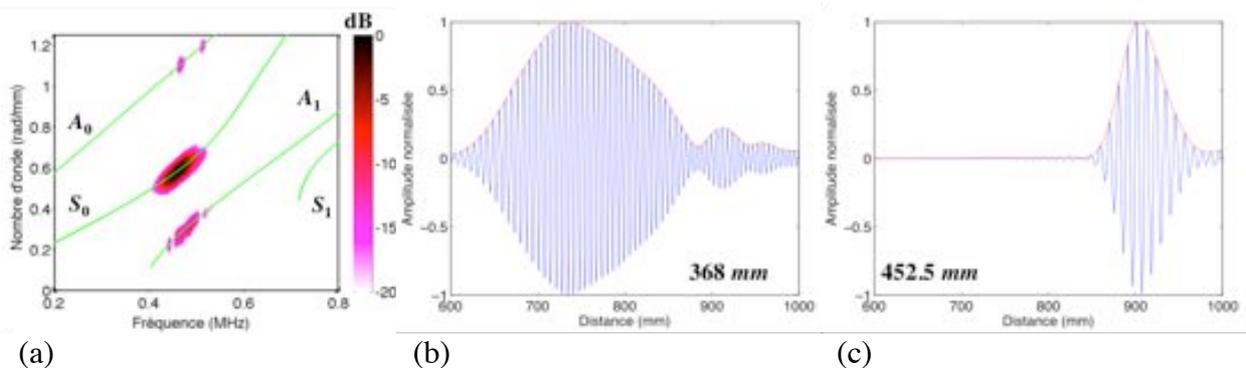


Figure D.3 : Excitation du mode  $S_0$  ( $\lambda = 9.6$  mm) à 0.5 MHz (burst de 12 cycles) : (a) modes réfléchis, (b)  $S_0$  ( $\lambda = 9.6$  mm) reçu non compensé, (c)  $S_0$  ( $\lambda = 9.6$  mm) reçu compensé.

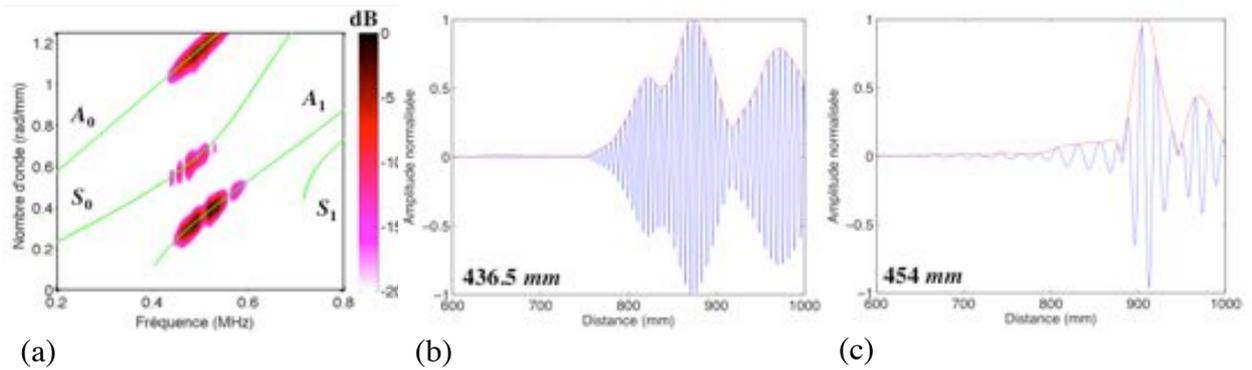


Figure D.4 : Excitation du mode  $A_1$  ( $\lambda = 18.5 \text{ mm}$ ) à  $0.5 \text{ MHz}$  (burst de 12 cycles) : (a) modes réfléchis, (b)  $A_1$  ( $\lambda = 18.5 \text{ mm}$ ) reçu non compensé, (c)  $A_1$  ( $\lambda = 18.5 \text{ mm}$ ) reçu compensé.

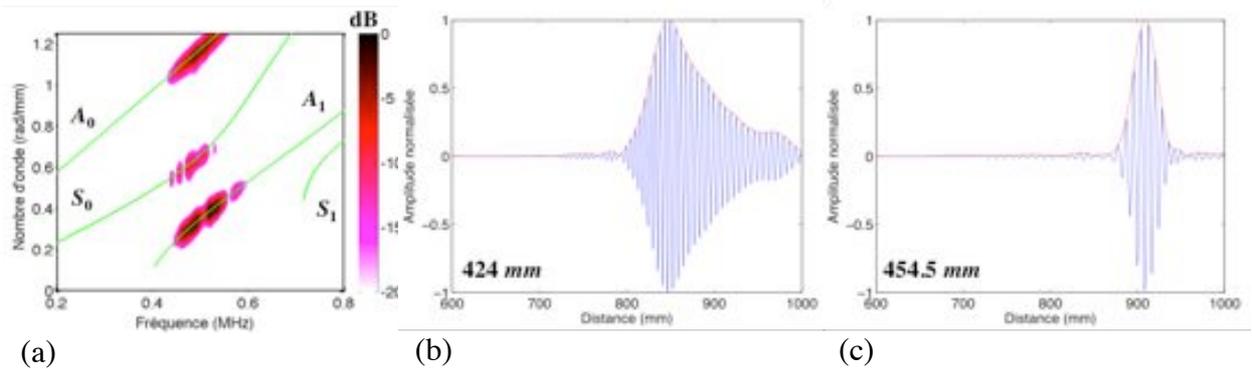


Figure D.5 : Excitation du mode  $A_1$  ( $\lambda = 18.5 \text{ mm}$ ) à  $0.5 \text{ MHz}$  (burst de 12 cycles) : (a) modes réfléchis, (b)  $A_0$  ( $\lambda = 5.4 \text{ mm}$ ) reçu non compensé, (c)  $A_0$  ( $\lambda = 5.4 \text{ mm}$ ) reçu compensé.

# Annexe E

## Observation de directivité à l'émission (aluminium)

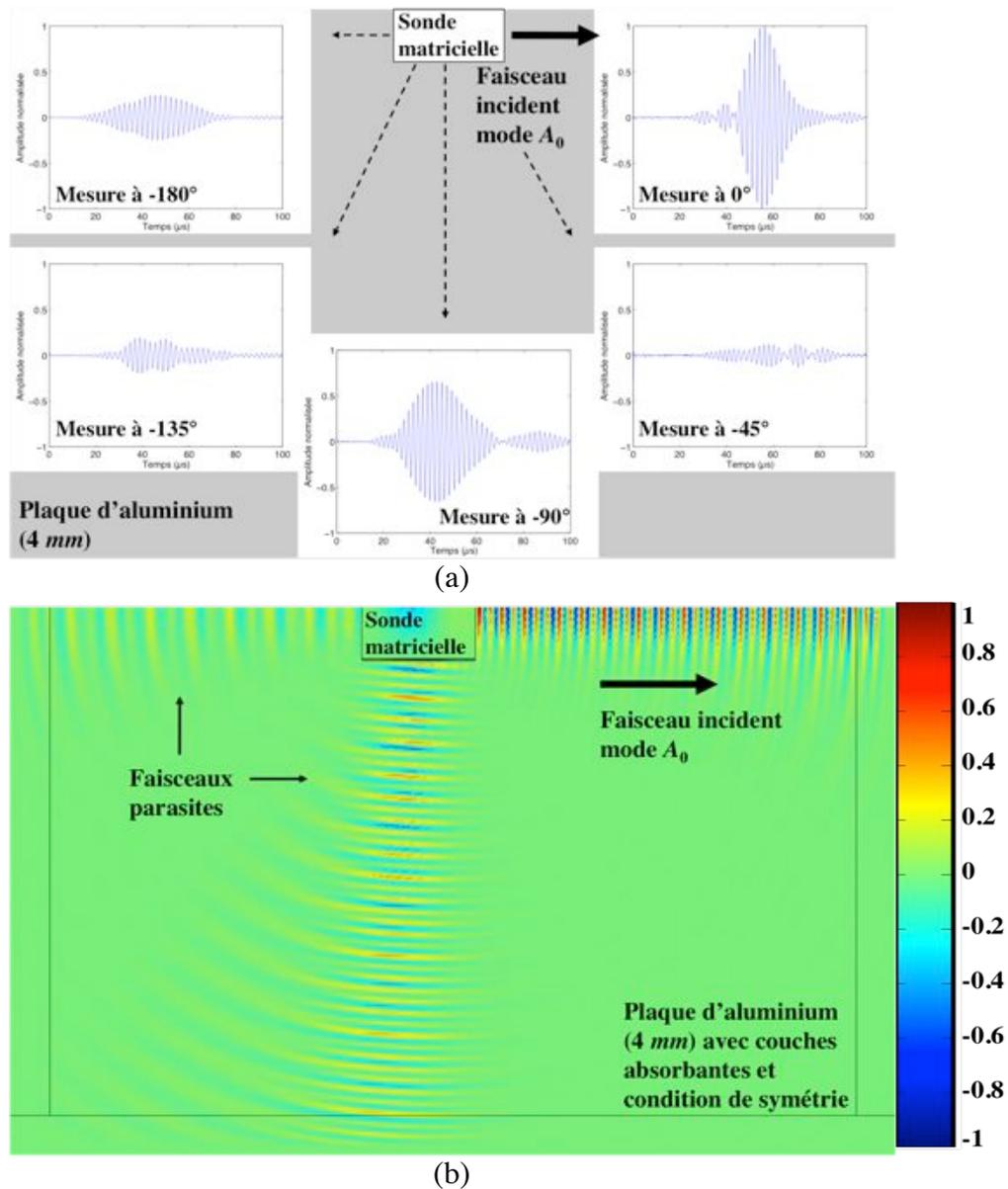
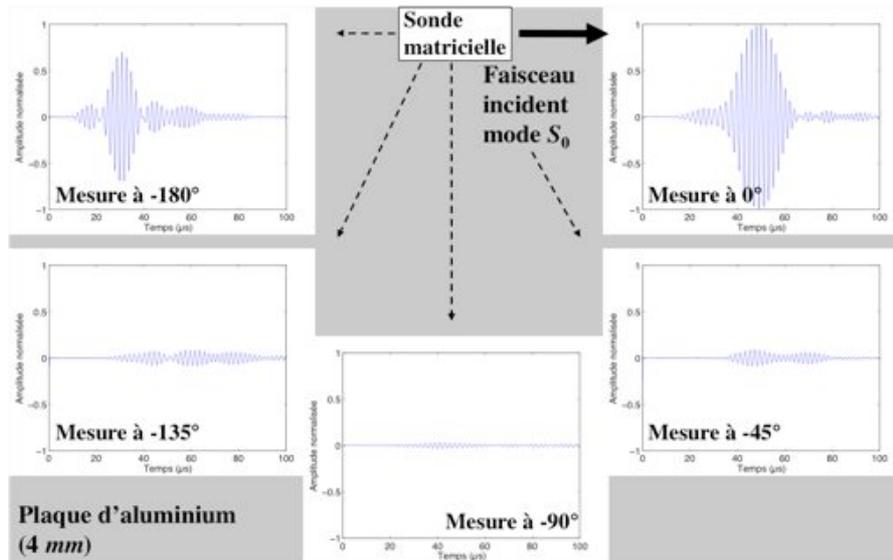
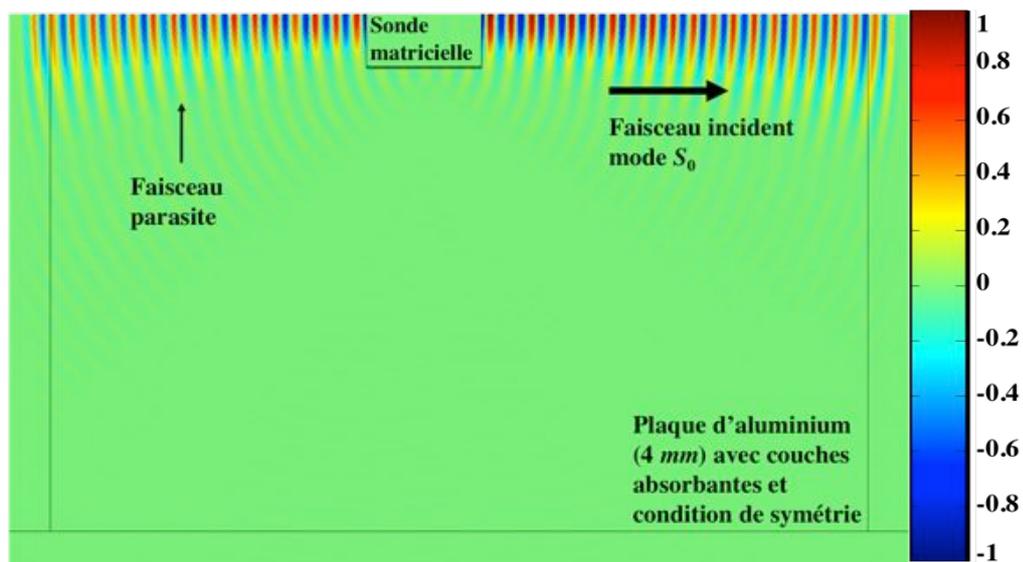


Figure E.1 : Observation de la génération de faisceaux ultrasonores à  $0.5 \text{ MHz}$  par la sonde multiélément matricielle à laquelle est appliquée la méthode *Phased array* pour générer le mode de Lamb  $A_0$  dans une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, dans une direction spécifique ( $0^\circ$ ) : (a) Mesures expérimentales en cinq positions autour de la sonde matricielle ( $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $-135^\circ$  et  $-180^\circ$ ) à  $180 \text{ mm}$  de son centre, (b) Distribution à la fréquence centrale de la composante normale du champ de déplacement obtenue par simulation EF. Les amplitudes sont normalisées par l'amplitude maximale du faisceau incident désiré.

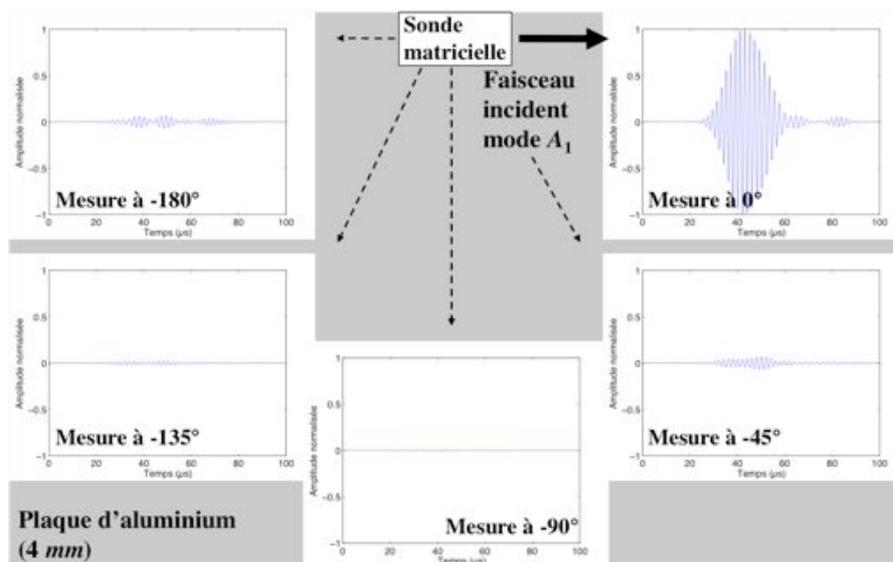


(a)

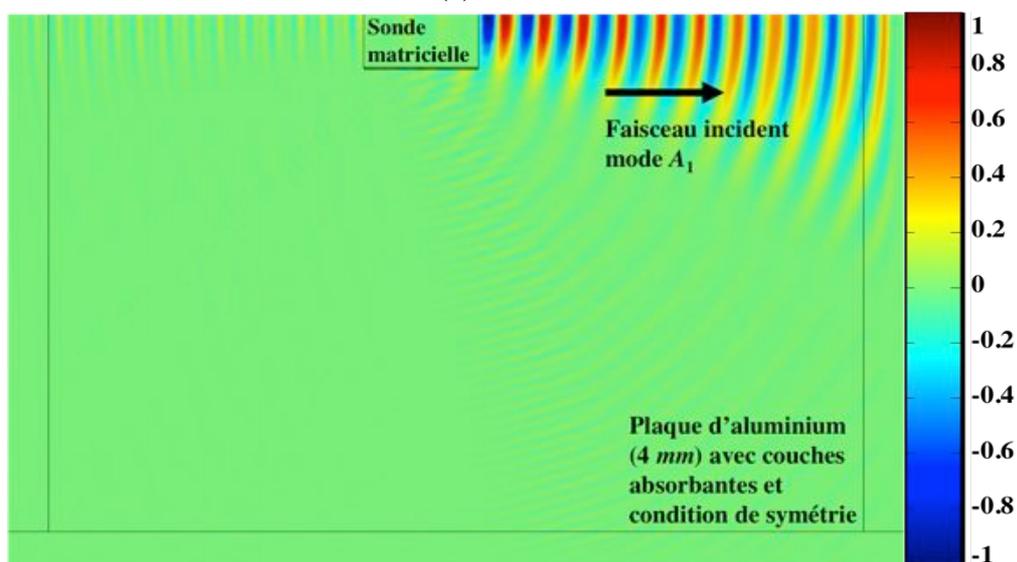


(b)

Figure E.2 : Observation de la génération de faisceaux ultrasonores à 0.5 MHz par la sonde multiélément matricielle à laquelle est appliquée la méthode *Phased array* pour générer le mode de Lamb  $S_0$  dans une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur, dans une direction spécifique ( $0^\circ$ ) : (a) Mesures expérimentales en cinq positions autour de la sonde matricielle ( $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $-135^\circ$  et  $-180^\circ$ ) à 180 mm de son centre, (b) Distribution à la fréquence centrale de la composante normale du champ de déplacement obtenue par simulation EF. Les amplitudes sont normalisées par l'amplitude maximale du faisceau incident désiré.



(a)



(b)

Figure E.3 : Observation de la génération de faisceaux ultrasonores à  $0.5 \text{ MHz}$  par la sonde multiélément matricielle à laquelle est appliquée la méthode *Phased array* pour générer le mode de Lamb  $A_1$  dans une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, dans une direction spécifique ( $0^\circ$ ) : (a) Mesures expérimentales en cinq positions autour de la sonde matricielle ( $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $-135^\circ$  et  $-180^\circ$ ) à  $180 \text{ mm}$  de son centre, (b) Distribution à la fréquence centrale de la composante normale du champ de déplacement obtenue par simulation EF. Les amplitudes sont normalisées par l'amplitude maximale du faisceau incident désiré.

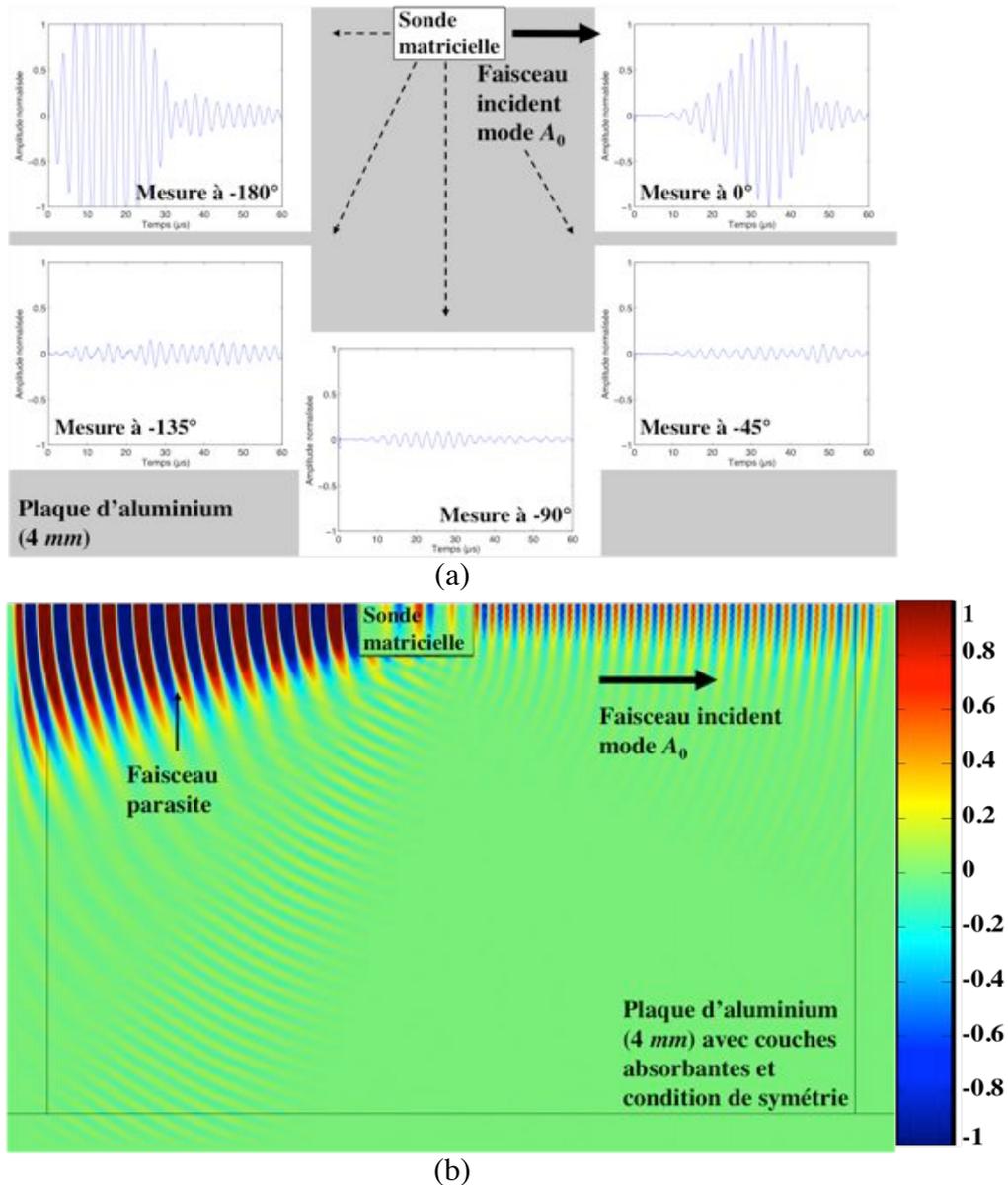
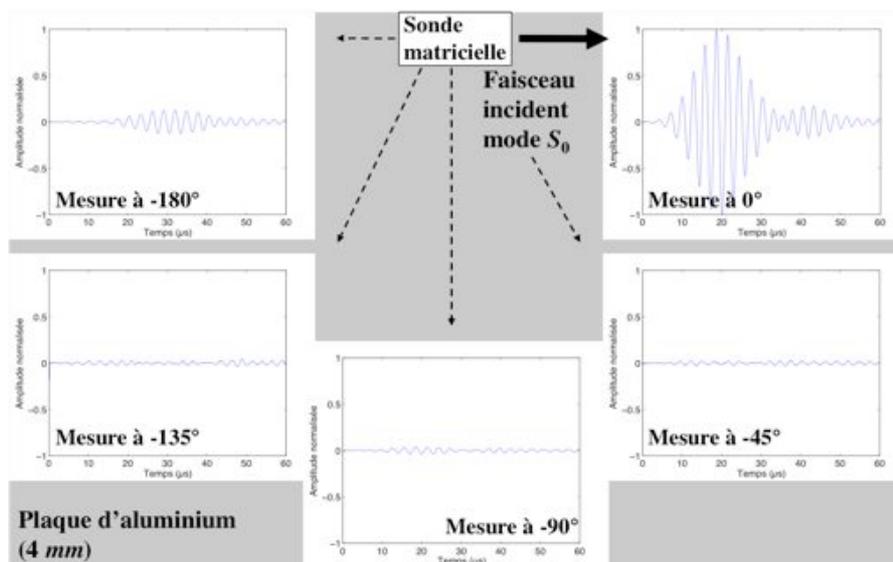
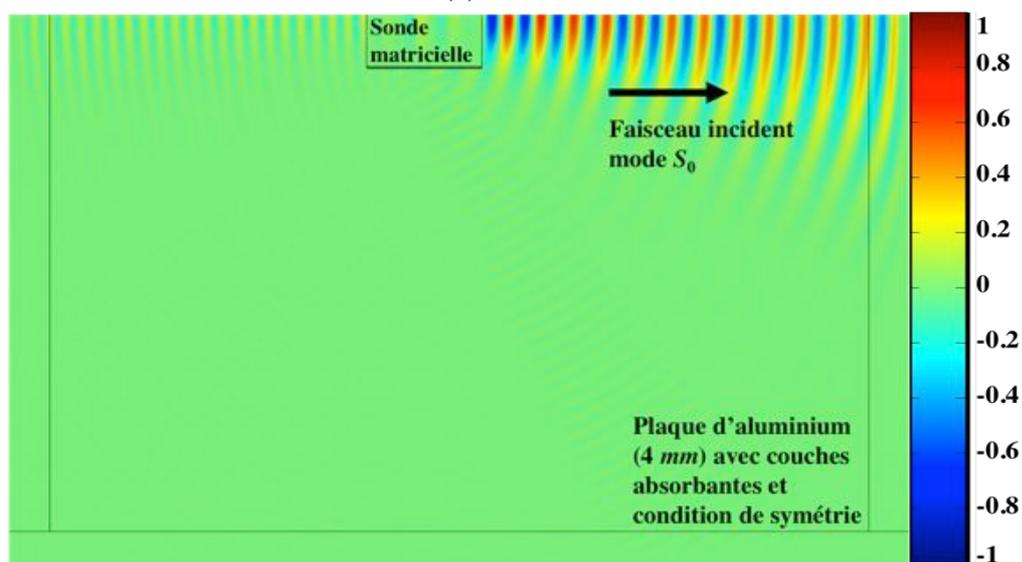


Figure E.4 : Observation de la génération de faisceaux ultrasonores à  $0.35 \text{ MHz}$  par la sonde multiélément matricielle à laquelle est appliquée la méthode *Phased array* pour générer le mode de Lamb  $A_0$  dans une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, dans une direction spécifique ( $0^\circ$ ) : (a) Mesures expérimentales en cinq positions autour de la sonde matricielle ( $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $-135^\circ$  et  $-180^\circ$ ) à  $180 \text{ mm}$  de son centre, (b) Distribution à la fréquence centrale de la composante normale du champ de déplacement obtenue par simulation EF. Les amplitudes sont normalisées par l'amplitude maximale du faisceau incident désiré.



(a)



(b)

Figure E.5 : Observation de la génération de faisceaux ultrasonores à  $0.35 \text{ MHz}$  par la sonde multiélément matricielle à laquelle est appliquée la méthode *Phased array* pour générer le mode de Lamb  $S_0$  dans une plaque d'aluminium de  $4 \text{ mm}$  d'épaisseur, dans une direction spécifique ( $0^\circ$ ) : (a) Mesures expérimentales en cinq positions autour de la sonde matricielle ( $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $-135^\circ$  et  $-180^\circ$ ) à  $180 \text{ mm}$  de son centre, (b) Distribution à la fréquence centrale de la composante normale du champ de déplacement obtenue par simulation EF. Les amplitudes sont normalisées par l'amplitude maximale du faisceau incident désiré.

# Annexe F

## Mesure des amplitudes et des conversions modales

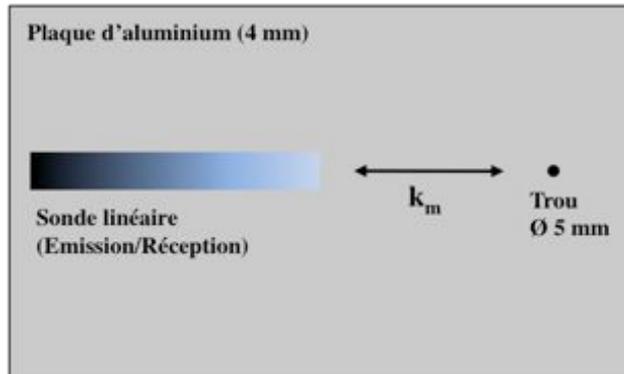


Figure F.1 : Détection d'un trou de 5 mm de diamètre dans une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur. La sonde linéaire permet de générer, via la méthode *Phased array*, différents modes de Lamb et d'identifier à la réception tous les modes réfléchis (via une transformée de Fourier 2D).

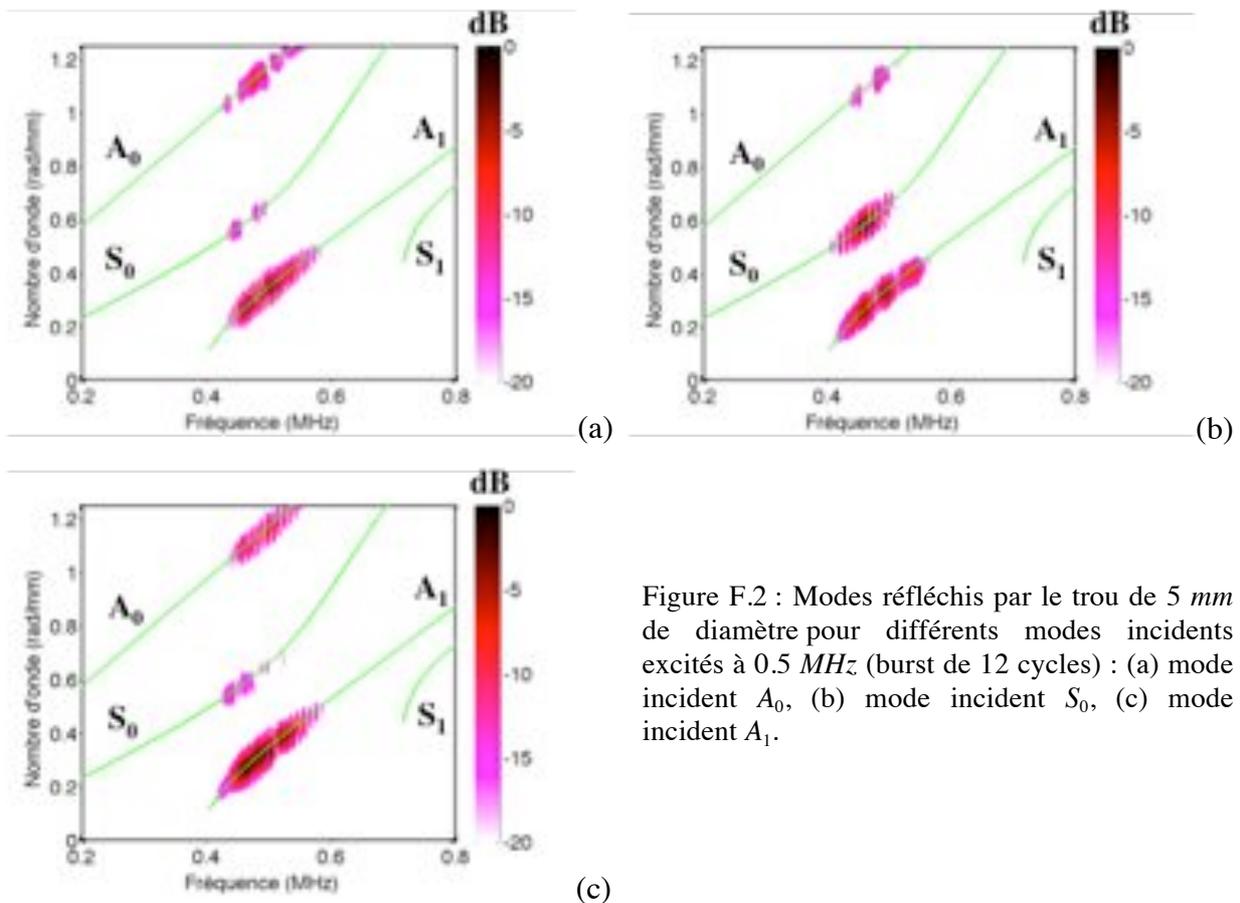


Figure F.2 : Modes réfléchis par le trou de 5 mm de diamètre pour différents modes incidents excités à 0.5 MHz (burst de 12 cycles) : (a) mode incident  $A_0$ , (b) mode incident  $S_0$ , (c) mode incident  $A_1$ .

# Bibliographie

- [1] J. M. Berthelot. *Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures*. 1st ed. Masson, Paris, 1992.
- [2] D. B. Miracle, S. L. Donaldson. *ASM Handbook Volume 21: Composites*. ASM International, 1201 pages, 2001.
- [3] H. L. Libby. *Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods*. Wiley-Interscience, New York, 1971.
- [4] C. E. Betz. *Principles of Magnetic Particle Testing*. American Society for Nondestructive Testing, 234 pages, 1985.
- [5] A. L. Kohan. *Boiler operator's guide*. 4th ed. McGraw-Hill Professional, 240 pages, 1997.
- [6] U. Ewert, G. R. Jaenisch, K. Osterloh, U. Zscherpel. *Industrial radiology. Springer handbook of materials measurement methods*. Springer, Berlin, 844-858, 2006.
- [7] P. Delouard, J.Y. Marin, I. Avenas-Payan, H. Tretout. *Infrared thermography development for composite material evaluation. Proceedings of the 12th World Conference on Non-Destructive Testing, Amsterdam*. Elsevier, Vol. 1, 567-572, 1989.
- [8] W. Steinchen, L. Yang. *Digital shearography, theory and application of digital speckle pattern interferometry*. SPIE press, USA, 310 pages, 2004.
- [9] D. E. Bray. *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Engineering and Biological Material Characterization*. CRC Press, 2003.
- [10] J. P. Charlesworth, J. A. G. Temple. *Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction Second Edition*. Research Studies Press LTD, 254 pages, 2001.
- [11] H. Sohn, C. Farrar. *A review of structural health monitoring literature: 1996-2001*. Rapport technique, Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [12] C. Farrar, K. Worden. *Nonlinear system identification for damage detection*. Rapport technique, Los Alamos National Laboratory, 2007.
- [13] D. Barton. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring, chapitre 106, Comparative Vacuum Monitoring (CVM)*. John Wiley & Sons, 1849-1865, 2009.
- [14] H. Nechad, A. Helmstetter, R. El Guerjouma, D. Sornette. *Creep ruptures in heterogeneous materials*. Physical Review Letters, Vol. 94, 2005.

- [15] G. Park, H. Sohn, C. Farrar et D. Inman. *Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward*. The Shock and Vibration Digest, Vol. 35, 451-463, 2003.
- [16] Q. Zhou, L. M. Sim. *Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors-review*. Smart Materials and Structures, Vol. 11, 925-939, 2002.
- [17] B. A. Auld. *Acoustic fields and waves in solids, volume I*. Robert E. Krieger Publishing Company, Florida, second edition, 1990.
- [18] D. Royer, E. Dieulesaint. *Ondes élastiques dans les solides, volume 1 : Propagation libre et guidée*. Masson, Paris, 1996.
- [19] Z. Su, L. Ye, Y. Lu. *Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 295, 753-780, 2006.
- [20] J. J. Ditri, J. L. Rose, G. Chen. *Mode selection criteria for defect detection optimization using Lamb waves*. QNDE review, Vol. 11, 2109-2115, 1992.
- [21] D. N. Alleyne, P. Cawley. *Optimisation of Lamb wave inspection techniques*. NDT&E International, Vol. 25, 11-22, 1992.
- [22] N. Guo, P. Cawley. *The interaction of Lamb waves with delaminations in composite laminates*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 94 (4), 2240-2246, 1993.
- [23] T. Hayashi, K. Kawashima. *Multiple reflections of Lamb waves at a delamination*. Ultrasonics, Vol. 40, 193-197, 2002.
- [24] B. Hosten, M. Castaings. *Ultrasonic guided waves for health monitoring of high-pressure composite tanks*. NDT&E International, Vol. 41, 648-655, 2008.
- [25] P. Fromme. *Monitoring of plate structures using guided ultrasonic waves*. QNDE review, Vol. 27, 78-85, 2008.
- [26] E. Kostson, P. Fromme. *Fatigue crack growth monitoring in multi-layered structures using guided ultrasonic waves*. Article de recherche, Department of Mechanical Engineering, University College London, WC1E 7JE, UK.
- [27] M. Bruneau, C. Potel. *Matériaux et acoustique 1&3 : Propagation des ondes acoustiques. Caractérisation des matériaux, contrôle non destructif et applications médicales*. Hermes science, Lavoisier, 2006.
- [28] D. E. Chimenti. *Guided waves in plates and their use in materials characterization*. J. Am. Soc. Mech. Eng., Vol 50 (5), 247-284, 1997.
- [29] D. Royer, E. Dieulesaint. *Ondes élastiques dans les solides, volume 2*. Masson, 1996.
- [30] H. Gao, S. Ali, B. Lopez. *Efficient detection of delamination in multilayered structures using ultrasonic guided wave EMATs*. NDT & E International, Vol. 43, 316-322, 2010.
- [31] S. C. Rosalie, M. Vaughan, A. Bremner, W. K. Chiu. *Variation in the group velocity of Lamb waves as a tool for the detection of delamination in GLARE aluminium plate-like structures*. Composite Structures, Vol. 66, 77-86, 2004.

- [32] M. Castaings, P. Cawley. *The generation, propagation and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 100 (5), 3070-3077, 1996.
- [33] V. Giurgiutiu. *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensor*. Elsevier Academic Press, 760 pages, 2008.
- [34] E. Moulin, J. Assaad, C. Delebarre, D. Osmont. *Modeling of Lamb waves generated by integrated transducers in composite plates using a coupled finite élément-normal modes expansion method*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 107 (1), 87-94, 2000.
- [35] S. Grondel, C. Paget, C. Delebarre, J. Assaad, K. Levin. *Design of optimal configuration for generating A0 Lamb mode in a composite plate using piezoceramic transducers*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 112 (1), 84-90, 2002.
- [36] E. Moulin, S. Grondel, J. Assaad, L. Duquenne. *Modeling a surface-mounted Lamb wave emission-reception system: Applications to structural health monitoring*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 124 (6), 3521-3527, 2008.
- [37] L. Duquenne, E. Moulin, J. Assaad, S. Grondel. *Transient modeling of Lamb waves generated in viscoelastic materials by surface bonded piezoelectric transducers*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 116 (1), 133-141, 2004.
- [38] R. S. C. Monkhouse, P. D. Wilcox, M. J. S. Lowe, R. P. Dalton, P. Cawley. *The rapid monitoring of structures using interdigital Lamb wave transducers*. Smart Mater. Struct., Vol. 9, 304-309, 2000.
- [39] T. Liu, S. Kitipornchai, M. Veidt. *Analysis of acousto-ultrasonic characteristics for contact-type transducers coupled to composite laminated plates*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43 1441-1456, 2001.
- [40] M. Veidt, T. Liu, S. Kitipornchai. *Modelling of Lamb waves in composite laminated plates excited by interdigital transducers*. NDT&E International, Vol. 35 437-447, 2002.
- [41] B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox. *Ultrasonic arrays: a comparison between medical and NDE requirements*. QNDE review, Vol. 27, 770-777, 2008.
- [42] B. A. J. Angelsen, H. Torp, S. Holm, K. Kristoffersen, T. A. Whittingham. *Which transducer array is best?*. European Journal of Ultrasound, Vol. 2 151-164, 1995.
- [43] L. Azar, Y. Shi, S. C. Wooh. *Beam focusing behavior of linear phased arrays*. NDT&E International, Vol. 33, 189-198, 2000.
- [44] S. Mahaut, O. Roy, C. Beroni, B. Rotter. *Development of phased array techniques to improve characterization of defect located in a component of complex geometry*. Ultrasonics, Vol. 40, 165-169, 2002.
- [45] N. Kono, A. Baba. *Development of phased array probes for austenitic weld inspections using multi-gaussian beam modeling*. QNDE review, Vol. 27, 747-753, 2008.
- [46] A. Neild, D. A. Hutchins, T. J. Robertson, L. A. J. Davis, D. R. Billson. *The radiated fields of focussing air-coupled ultrasonic phased arrays*. Ultrasonics, Vol. 43 183-195, 2005.

- [47] S. C. Wooh, Y. Shi. *Influence of phased array element size on beam steering behavior*. Ultrasonics, Vol. 36, 737-749, 1998.
- [48] F. J. Pompeia, S. C. Wooh. *Phased array element shapes for suppressing grating lobes*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111 (5), 2040-2048, 2002.
- [49] A. C. Clay, S. C. Wooh, L. Azar, J. Y. Wang. *Experimental Study of Phased Array Beam Steering Characteristics*. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 18 (2), 1999.
- [50] S. I. Nikolov, J. A. Jensen. *Application of different spatial sampling patterns for sparse array transducer design*. Ultrasonics, Vol. 37, 667-671, 2000.
- [51] M. D. C. Eames, J. A. Hossack. *Fabrication and evaluation of fully-sampled, two-dimensional transducer array for « Sonic Window » imaging system*. Ultrasonics, Vol. 48, 376-383, 2008.
- [52] R. Huang, L. W. Jr. Schmerr. *Characterization of the system functions of ultrasonic linear phased array inspection systems*. Ultrasonics, Vol. 49, 219-225, 2009.
- [53] M. Akhnak, O. Martinez, L. G. Ullate, F. Montero de Espinosa. *64 Elements two-dimensional piezoelectric array for 3D imaging*. Ultrasonics, Vol. 40, 139-143, 2002.
- [54] B. Cugnet, A. C. Hladky, J. Assaad. *Numerical technique to reduce cross-coupling in acoustical arrays*. Ultrasonics, Vol. 40, 503-506, 2002.
- [55] O. Martinez, M. Akhnak, L. G. Ullate, F. Montero de Espinosa. *A small 2D ultrasonic array for NDT applications*. NDT&E International, Vol. 36, 57-63, 2003.
- [56] J. E. Kirkebo, A. Austeng. *Improved beamforming using curved sparse 2D arrays in ultrasound*. Ultrasonics, Vol. 46, 119-128, 2007.
- [57] S. C. Mondal, P. D. Wilcox, B. W. Drinkwater. *Design and evaluation of two dimensional phased array ultrasonic transducers*. QNDE review, Vol. 24, 899-905, 2005.
- [58] J. Porre, S. Mahaut, S. Chatillon, P. Calmon. *Simulation of phased array techniques and model based data reconstruction*. QNDE review, Vol. 24, 906-913, 2005.
- [59] S. Chatillon, G. Cattiaux, M. Serre, O. Roy. *Ultrasonic non-destructive testing of pieces of complex geometry with a flexible phased array transducer*. Ultrasonics, Vol. 38, 131-134, 2000.
- [60] V. Amory, A. Lhemery. *Complex source and radiation behaviors of small elements of linear and matrix flexible ultrasonic phased-array transducers*. QNDE review, Vol. 27, 786-793, 2008.
- [61] G. Toullelan, O. Casula, E. Abittan, P. Dumas. *Application of a 3D smart flexible phased-array to piping inspection*. QNDE review, Vol. 27, 794-800, 2008.
- [62] R. Long, P. Cawley. *Further development of a conformable phased array device for inspection over irregular surfaces*. QNDE review, Vol. 27, 754-761, 2008.
- [63] C. Holmes, B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox. *Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation*. NDT&E International, Vol. 38, 701-711, 2005.

- [64] A. J. Hunter, B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox. *Autofocusing ultrasonic imagery for non-destructive testing and evaluation of specimens with complicated geometries*. NDT&E International, Vol. 43, 78-85, 2010.
- [65] C. Holmes, B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox. *Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: Application to defect detection and classification in non-destructive evaluation*. Ultrasonics, Vol. 48, 636-642, 2008.
- [66] J. Zhang, B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox, A. J. Hunter. *Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method*. NDT&E International, Vol. 43, 123-133, 2010.
- [67] A. I. Bowler, B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox. *Feasibility of using ultrasonic array images for mapping strain in engineering components*. QNDE review, Vol. 27, 648-655, 2008.
- [68] C. Matsuoka, K. Nakahata, A. Baba, N. Kono, S. Hirose. *Comparative study on ultrasonic imaging methods with array transducers*. QNDE review, Vol. 27, 707-714, 2008.
- [69] S. Robert, J. G. Minonzio, C. Prada, D. Clorennec. *Characterization of small flaws in solids with the DORT method*. QNDE review, Vol. 27, 778-785, 2008.
- [70] M. Fleming, M. J. S. Lowe, F. Simonetti, P. Cawley. *Super resolution imaging: performance studies*. QNDE review, Vol. 25, 736-743, 2006.
- [71] F. El Youbi, S. Grondel, J. Assaad. *Signal processing for damage detection using two different array transducers*. Ultrasonics, Vol. 42, 803-806, 2004.
- [72] T. Liu, M. Veidt, S. Kitipornchai. *Single mode Lamb waves in composite laminated plates generated by piezoelectric transducers*. Composite Structures, Vol. 58, 381-396, 2002.
- [73] E. Kerbrat, R. K. Ing, C. Prada, D. Cassereau, M. Fink. *The DORT method applied to detection and imaging in plates using Lamb waves*. QNDE review, Vol. 20, 934-940, 2001.
- [74] F. Deng, C. He, B. Wu. *Time reversal method for pipe inspection with guided wave*. QNDE review, Vol. 27, 131-138, 2008.
- [75] M. Lemistre, D. Balageas. *Structural health monitoring system based on diffracted Lamb wave analysis by multiresolution processing*. Smart Mater. Struct., Vol. 10, 504-511, 2001.
- [76] T. Cicero, P. Cawley, M. Lowe, F. Simonetti, S. I. Rokhlin. *Deconvolution approach for sparse sensor arrays in structural health monitoring*. QNDE review, Vol. 27, 571-578, 2008.
- [77] T. Clarke, P. Cawley, P. D. Wilcox, A. J. Croxford. *Evaluation of the damage detection capability of a sparse-array guided-wave SHM system applied to a complex structure under varying thermal conditions*. IEEE, Vol. 56 (12), 2666-2678, 2009.
- [78] A. J. Croxford, J. Moll, P. D. Wilcox, J. E. Michaels. *Efficient temperature compensation strategies for guided wave structural health monitoring*. Ultrasonics 50, 517-528, 2010.
- [79] R. Reusser, S. D. Holland, D. E. Chimenti, R. Roberts, S. Sulhoff. *Leak location in spacecraft skin with ultrasonic arrays*. QNDE review, Vol. 27, 1528-1535, 2008.

- [80] J. Davies, P. Cawley. *Synthetic focusing for high resolution guided wave pipe inspection: further results and robustness studies*. QNDE review, Vol. 27, 139-146, 2008.
- [81] P. J. Mudge, P. Catton. *Quantification of defect size from long range guided wave ultrasonic tests on pipes*. QNDE review, Vol. 27, 147-154, 2008.
- [82] W. Luo, J. L. Rose. *Phased array focusing with guided waves in a viscoelastic coated hollow cylinder*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 121 (4), 1945-1955, 2007.
- [83] A. Velichko, P. D. Wilcox. *Post-processing of guided wave array data for high resolution pipe inspection*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 126 (6), 2973-2982, 2009.
- [84] J. Vishnuvardhan, A. Muralidharan, C. V. Krishnamurthy, K. Balasubramaniam. *Structural health monitoring of anisotropic plates using ultrasonic guided wave STMR array patches*. NDT&E International, Vol. 42, 193-198, 2009.
- [85] P. Wilcox, M. Lowe, P. Cawley. *Lamb and SH wave transducer arrays for the inspection of large areas of thick plates*. QNDE review, Vol. 19, 1049-1056, 2000.
- [86] P. D. Wilcox. *Omni-Directional Guided wave Transducer Arrays for the Rapid Inspection of Large Areas of Plate Structures*. IEEE, Vol. 50 (6), 699-709, 2003.
- [87] L. Yu, V. Giurgiutiu. *In situ 2-D piezoelectric wafer active sensors arrays for guided wave damage detection*. Ultrasonics, Vol. 48, 117-134, 2008.
- [88] A. Velichko, P. D. Wilcox. *Guided wave arrays for high resolution inspection*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 123 (1), 186-196, 2008.
- [89] M. Engholm, T. Stepinski. *Adaptive beamforming for array imaging of plate structures using Lamb waves*. IEEE, Vol. 57 (12), 2712-2724, 2010.
- [90] D. K. Hsu, K. H. Im, I. Y. Yang. *Applications of electromagnetic acoustic transducers in the NDE of non-conducting composite materials*. KSME International Journal, Vol. 13 (5), 403-413, 1999.
- [91] W. Zhu, A. Chahbaz, M. Brassard. *Time-delay periodic linear array: a unidirectional guided wave transducer for ultrasonic NDT applications*. QNDE review, Vol. 19, 1057-1064, 2000.
- [92] J. Li, J. L. Rose. *Implementing Guided Wave Mode Control by Use of a Phased Transducer Array*. IEEE, Vol. 48 (3), 761-768, 2001.
- [93] C. Bacon, J. Pouyet. *Mécanique des solides déformables*. Hermes Science Publications, Paris, 310 pages, 2000.
- [94] B. A. Auld. *Acoustic fields and waves in solids, volume II*. Wiley-Interscience, USA, 1973.
- [95] G. Neau. *Lamb waves in anisotropes viscoelastic plates. Study of the wave fronts and attenuation*. Thèse de doctorat soutenue à l'université Bordeaux 1, 2003.
- [96] B. Hosten. *Reflection and transmission of acoustic plane waves on an immersed orthotropic and viscoelastic solid layer*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 89 (6), 2745-2752, 1991.

- [97] T. Kundu, J. Bereiter-Han, K. Hillmann. *Measuring elastic properties of cells by evaluation of scanning acoustic microscopy  $V(z)$  values using simplex algorithm*. Biophys. J. Vol. 59, 1194-1207, 1991.
- [98] B. Hosten, M. Castaings, T. Kundu. *Identification of viscoelastic moduli of composite materials from the plate transmission coefficient*. QNDE Review, Vol. 17, 1117- 1124, 1998.
- [99] M. Castaings, B. Hosten, T. Kundu. *Inversion of ultrasonic, plane-wave transmission data in composite plates to infer viscoelastic material properties*. NDT&E International, Vol. 33, 377-392, 2000.
- [100] B. Hosten, M. Castaings. *Surface impedance matrices to model the propagation in multilayered media*. Ultrasonics, Vol. 41, 501-507, 2004.
- [101] B. Hosten, M. Castaings. *Transfer matrix of multilayered absorbing and anisotropic media. Measurements and simulations of ultrasonic wave propagation through composite materials*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 94 (3), 1488-1495, 1993.
- [102] B. Hosten, M. Castaings. *Parabolic mirror and air-coupled transducer for multimodal plate wave detection*. QNDE Review, Vol. 22, 1243-1250, 2003.
- [103] M. Castaings, B. Hosten. *Delta operator technique to improve the Thomson Haskell method stability for propagation in multilayered anisotropic absorbing plates*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 95 (4), 1931-1941, 1994.
- [104] S. Baudouin, B. Hosten. *Comparison between prédictions and measurements of viscoelastic moduli in composite materials versus température using ultrasonic immersion technique with oil*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 102 (6), 3450-3457, 1997.
- [105] S. Dong, R. Nelson. *On natural vibrations and waves in laminated orthotropic plates*. J. Appl. Mech., Vol. 39, 739-745, 1972.
- [106] R. Nelson, S. Dong. *High frequency vibrations and waves in laminated orthotropic plates*. J. Sound Vib., Vol. 30, 33-44, 1973.
- [107] I. Bartoli, A. Marzani, H. Matt, F. Lanza di Scalea, E. Viola. *Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section*. J. Sound Vib., Vol. 295, 685-707, 2006.
- [108] M. Castaings, M. J. S. Lowe. *Finite Element Model for waves guided along solid systems of arbitrary section coupled to infinite solid media*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 123, 696-708, 2008.
- [109] <http://www.comsol.com/>, vu pour la dernière fois en septembre 2012.
- [110] <http://www.mathworks.fr/>, vu pour la dernière fois en septembre 2012.
- [111] M. V. Predoi, M. Castaings, B. Hostens, C. Bacon. *Wave propagation along transversely periodic structures*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 121 (4), 1935-1944, 2007.
- [112] A. Leleux, P. Micheau, M. Castaings. *NDT Process Using Lamb Waves Generated and Detected by Ultrasonic Phased Array Probes for the Detection of Defects in Metallic and Composite Plates*. QNDE review, sous presse pour volume 2013.

- [113] A. Leleux, P. Micheau, M. Castaings. *Long range detection of defects in composite plates using Lamb waves generated and detected by ultrasonic phased array probe*. *Journal of Nondestructive Evaluation*, Springer, soumis en septembre 2012.
- [114] A. Raghavan, C. E. S. Cesnik. *Finite-dimensional piezoelectric transducer modeling for guided wave based structural health monitoring*. *Smart Mater. Struct.*, Vol. 14, 1448-1461, 2005.
- [115] A. Velichko, P. D. Wilcox. *Modeling the excitation of guided waves in generally anisotropic multilayered media*. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 121 (1), 60-69, 2007.
- [116] <http://www.lecoeur-electronique.com/>, vu pour la dernière fois en septembre 2012.
- [117] <http://www.imasonic.fr/>, vu pour la dernière fois en septembre 2012.
- [118] D. Alleyne, P. Cawley. *A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals*. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 89 (3), 1159-1168, 1991.
- [119] B. Chapuis, N. Terrien, D. Royer. *Excitation and focusing of Lamb waves in a multilayered anisotropic plate*. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 127 (1), 198-203, 2009.
- [120] P. Wilcox. *A Rapid Signal Processing Technique to Remove the Effect of Dispersion from Guided Wave Signals*. *IEEE*, Vol. 50 (4), 419-427, 2003.
- [121] W. Ke, M. Castaings, C. Bacon. *3D finite element simulations of an air-coupled ultrasonic NDT system*. *NDT&E International*, Vol. 42, 524-533, 2009.
- [122] M. Castaings, P. Cawley, R. Farlow, G. Hayward. *Single sided inspection of composite materials using air coupled ultrasound*. *Journal of Non Destructive Evaluation*, Vol. 17 (2), 37-45, 1998.
- [123] D. Singh, M. Castaings, C. Bacon. *Sizing strip-like defects in plates using guided waves*. *NDT&E Intern.*, Vol. 44 (5), 394-404, 2011.
- [124] M. Castaings, D. Singh, P. Viot. *Sizing of impact damages in composite materials using ultrasonic guided waves*. *NDT&E Intern.*, Vol. 6, 22-31, 2012.
- [125] J. Mackerle. *Finite-element modeling of non-destructive material evaluation, an addendum: a bibliography (1997-2003)*. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 12, 799-834, 2004.
- [126] D. A. Guenther, W. F. Walker. *A method for accurate in silico modeling of ultrasound transducer arrays*. *Ultrasonics*, Vol. 49, 404-412, 2009.
- [127] S. Hongxiang, X. Baiqiang, Q. Rongzu. *Numerical simulation of laser-generated Lamb waves in viscoelastic materials by finite element method*. *Journal of applied physics*, Vol. 106, 2009.
- [128] L. Satyanarayan, C. Sridhar, C. V. Krishnamurthy, K. Balasubramaniam. *Simulation of ultrasonic phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves*. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 84, 716-729, 2007.

- [129] M. Drozd. *Efficient finite element modelling of ultrasound waves in elastic media*. Thèse de doctorat soutenue à l'université de Londres, 2008.
- [130] W. Liu, J. W. Hong. *Three-dimensional Lamb wave propagation excited by a phased piezoelectric array*. Smart Mater. Struct., Vol. 19, 12 pages, 2010.
- [131] L. Moreau, M. Castaings, B. Hosten. *An orthogonality relation-based technique for post-processing finite element predictions of waves scattering in solid waveguides*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 120 (2), 611-620, 2006.
- [132] L. Moreau, M. Castaings. *The use of an orthogonality relation for reducing the size of finite element models for 3D guided waves scattering problems*. Ultrasonics, Vol. 48, 357-366, 2008.
- [133] M. Drozd, M. Lowe, P. Cawley, L. Moreau, M. Castaings. *Efficient numerical modeling of absorbing regions for boundaries of guided waves problems*. QNDE Review, Vol. 25, 126-133, 2006.
- [134] P. Chaitanyaa, O. P. Thakurb, V. Kumarc, A. Shuklad, L. Pandeye. *Equivalent circuit model of a PbZr0.6Ti0.4O3 ceramic using impedance spectroscopy*. Journal of Ceramic Processing Research, Vol. 12 (3), 247-258, 2011.



## **Contrôle non destructif de composites par ondes ultrasonores guidées, générées et détectées par multiélément.**

Une technique de Contrôle Non Destructif (CND) a été développée, permettant la génération et la détection d'ondes de Lamb guidées le long de grandes plaques constituées de différents matériaux (métal, polymère ou composite renforcé par des fibres). Basée sur l'emploi de nombreux éléments étroitement couplés à la plaque, cette technique d'inspection diffère du *Structural Health Monitoring* (SHM) classique car tous les éléments émetteurs ou récepteurs sont regroupés dans une zone très localisée, définie par la surface active d'une sonde multiélément matricielle, et ne sont pas fixés de manière permanente et distribuée au sein, ou en surface, de la structure testée. De plus, le principe (connu) du déphasage entre éléments est appliqué à la sonde pour la génération et la réception d'un mode de Lamb pur dans (ou provenant) de multiples directions le long de la plaque. Les lois de retards appliquées à ces éléments, aussi bien lorsque la sonde fonctionne en mode *émission* qu'en mode *réception*, prennent en compte la nature dispersive de l'onde de Lamb. Enfin, un traitement de signal spécifique est appliqué pour compenser la dispersion subie par les ondes guidées au cours de leur propagation le long de la pièce testée. Un prototype expérimental et sa modélisation par éléments finis sont présentés, ainsi que les mesures et les résultats simulés de ses performances en termes de sélectivité modale et de directivité angulaire. Concernant les applications de CND, la construction d'images, représentatives de toutes les parties de la pièce testée qui diffractent le mode guidé (bord de pièce, défauts, trous, raidisseurs, etc.), a permis de démontrer le potentiel (et quelques limites) de cette technique vis-à-vis d'une inspection rapide de grandes structures, y compris de zones éloignées de la sonde ou encore de zones difficiles d'accès.

**Mots clés :** Ondes guidées ultrasonores ; Transducteurs multiéléments ; CND.

## **Non-destructive testing of composites using ultrasonic guided waves generated and detected by phased array probes.**

A technique of Non-Destructive Testing (NDT) was developed for the generation and detection of Lamb waves propagating along large plates made of different materials (metal, polymer or fibre-reinforced composite). Based on the use of many elements closely coupled to the plate, this inspection technique differs from the classic *Structural Health Monitoring* (SHM) because all the transmitters or receivers are grouped in a very localized area, defined by the active surface of a phased array matrix probe, and are not permanently attached and distributed within or on the surface of the test structure. In addition, the principle (known) of the phase shift between the elements is applied to the probe for generating and receiving a pure Lamb mode in (or from) multiple directions along the plate. The delay laws applied to these elements, in *transmit* mode or *receive* mode, take into account the dispersive nature of the Lamb wave. Finally, a specific signal processing is applied to compensate the dispersion suffered by the guided waves during their propagation along the test piece. An experimental prototype and its finite element modeling are presented, as well as measurements and simulation results of its performances in terms of modal selectivity and angular directivity. For NDT applications, the construction of images, representing all parts of the test piece, which diffract the guided mode (edges, defects, holes, stiffeners, etc.), has demonstrated the potential (and some limits) of this technique for a quick inspection of large structures, including areas remote from the probe or areas difficult to access.

**Keywords:** Ultrasonic guided waves; Phased array probes; NDT.