

**UNIVERSITE CHOUAIB DOUKKALI  
FACULTE DES SCIENCES  
EL JADIDA**

**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
LABORATOIRE DE MECANIQUE ET ENERGETIQUE  
EQUIPE D'ACOUSTIQUE ET VIBRATION**

Thèse de **DOCTORAT**  
Présentée à la Faculté des Sciences d'El Jadida

par

**Boujemâa BOUGAZE**

**PROPAGATION DES ONDES ULTRASONORES DANS LES STRUCTURES TRI-  
COUCHE PLANES. APPLICATION À L'ÉVALUATION ET AU CONTRÔLE NON  
DESTRUCTIFS DES ASSEMBLAGES COLLES**

Soutenue le 16 Juin 2007 devant le Jury composé de :

<b>Mr A. NASSIM</b>	Professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences d'El Jadida.	<b>Président</b>
<b>Mr O. BOUKSOUR</b>	Professeur de l'enseignement supérieur. Directeur adjoint de l'Ecole Supérieure de Technologie. Casablanca.	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr S. BELAATAR</b>	Professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences d'El Jadida	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr A. CHERKAOUI</b>	Professeur de l'enseignement supérieur à l'Ecole Mohammedia des Ingénieurs. Rabat	<b>Examineur</b>
<b>Mr A. AZIM</b>	Professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences d'El Jadida.	<b>Examineur</b>
<b>Mr H. RHANIM</b>	Professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences d'El Jadida.	<b>Examineur</b>
<b>Mr S. SAHNOUN</b>	Professeur Assistant à la faculté des sciences d'El Jadida.	<b>Examineur</b>
<b>Mr M. SIDKI</b>	Professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences d'El Jadida.	<b>Directeur de thèse</b>

## Résumé

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre général de l'évaluation et du contrôle non destructifs des structures : recherche de défauts métallurgiques, caractérisation de l'adhérence, détermination des propriétés mécaniques...

Les structures considérées ici sont des assemblages plans tri-couches constitués de deux tôles collées

Des outils numériques, basés sur des méthodes théoriques, ont été mis au point pour étudier le potentiel des techniques ultrasonores à contrôler et évaluer l'état de santé des assemblages collés.

La première technique présentée dans cette étude est basée sur l'analyse de l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion. Un code de calcul numérique de grande précision est développé sur Matlab pour déterminer, en incidence normale, l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion pour différentes qualités du contact. La modélisation du contact est faite selon les conditions aux limites définies par Pilarski. Des simulations numériques sont effectuées sur trois structures tri-couche : aluminium/colle/aluminium ; acier/colle/acier et zircaloy/colle/zircaloy. Les résultats numériques obtenus sont en parfait accord avec ceux déterminés expérimentalement par d'autres chercheurs. Une nouvelle interprétation de l'évolution fréquentielle des minimums du coefficient de réflexion en passant d'un collage parfait à un mauvais collage est proposée. La deuxième technique proposée ici est basée sur la propagation des ondes guidées ayant l'aptitude à se propager sur de longues distances ce qui permet un contrôle de l'intégrité de la structure. L'utilisation de cette technique pour contrôler la qualité du collage de deux plaques d'aluminium nécessite l'étude et la compréhension de la propagation des ondes guidées dans les structures tri-couche. Deux méthodes analytiques sont exposées permettant la détermination de l'équation de dispersion de ces structures. Par une résolution numérique de cette équation caractéristique, nous avons déterminé le réseau de dispersion de la structure collée. Une nouvelle interprétation des courbes de dispersion est proposée mettant en évidence l'existence, pour chaque mode de propagation, de portions (quasi horizontales) qui suivent les modes d'une couche de colle seule et de portions qui suivent les modes d'une couche d'aluminium seule. Par ailleurs, l'étude du champ de déplacement a montré que le déplacement s'effectue dans la couche de colle lorsque le mode de propagation est pris de la partie qui suit le mode de la couche de colle seule et il est prépondérant dans la plaque d'aluminium si le mode est situé dans la partie qui suit le mode d'une plaque d'aluminium seule. En introduisant le modèle des interfaces de Pilarski, le calcul numérique des courbes de dispersion pour différentes natures du contact colle/aluminium a permis de montrer la grande sensibilité de ces courbes de dispersion à la qualité du collage.

La troisième technique présentée dans cette étude consiste à l'évaluation non destructive des propriétés matérielles d'une structure tri-couche à partir de ses courbes de dispersion. La structure tri-couche est composée d'une tôle de cuivre liée à une tôle d'acier par une couche de colle en résine époxy. Les propriétés matérielles considérées sont les vitesses d'onde longitudinale et transversale, ainsi que la densité de chaque couche de la structure. Sur les courbes de dispersion déterminées par notre code numérique, nous avons mis en évidence l'existence, pour chaque mode de la structure tri-couche, des portions qui suivent les modes d'une plaque de cuivre seule et des portions qui suivent les modes d'une plaque d'acier seule et d'autres (quasi horizontales) qui suivent les modes d'une couche de colle seule. A partir de ces courbes de dispersion, le champ du déplacement est déterminé en montrant que l'énergie ultrasonique dans la structure tri-couche est restreinte à une couche donnée quand le mode sélectionné de la structure est localisée dans la portion qui suit le mode de cette couche. Finalement, à partir d'une courbe de dispersion sélectionnée, une méthode inverse est proposée pour reconstruire les neuf propriétés matérielles de la structure tri-couche étudiée. La procédure de la méthode inverse utilise la solution non-linéaire des moindres carrées à l'équation de dispersion en définissant une fonction d'erreur en terme des neuf propriétés matérielles inconnues de la structure. Un programme est développé, sur Matlab, pour minimiser cette fonction d'erreur et donc déterminer un ensemble optimum des neuf propriétés matérielles. La comparaison des valeurs optimisées avec les valeurs exactes montre l'efficacité de la méthode inverse proposée. Cette technique ultrasonore permet donc l'accès à la connaissance de l'état de santé des assemblages collés en déterminant leurs propriétés matérielles.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe d'Acoustique et Vibration du Laboratoire de Contrôle et de Mesure des Matériaux de l'Université Chouaib Doukkali.

Ces années de la préparation de la thèse ont été extrêmement enrichissantes. Elles furent pour moi l'apprentissage d'un métier passionnant : La recherche scientifique. Etre chercheur requiert de la curiosité, de l'obstination et de la méthodologie. J'ai eu la chance d'évoluer parmi des personnes qui possédaient ces qualités et qui m'ont toujours assuré de leur soutien. Je tiens à remercier Mr. Mouncif Sidki d'avoir accepté d'encadrer ma thèse. Je tiens de plus à le remercier pour sa constante disponibilité, pour m'avoir transmis de nombreuses connaissances, pour m'avoir appris à travailler avec rigueur et pour le partage de sa passion, de ses idées, de son savoir faire. Je remercie vivement tous les membres du laboratoire dont la bonne humeur a égailé ces années de recherche. Ils ont toujours été disponibles pour répondre à mes nombreuses questions, scientifiques ou non.

Je remercie sincèrement Mr. Robert Seifried (Professeur à l'Université de Stuttgart) pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée concernant la résolution de problèmes numériques épineux. Ses éclaircissements ont été d'un grand secours.

Toute ma reconnaissance va également au membre du jury, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant de juger ce travail.

Je tiens aussi à remercier tous les amis que j'ai découverts au cours de cette thèse. Surtout Rachid Luizi pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée concernant la documentation.

Mes plus profonds remerciements sont adressés à mes parents qui, tout en m'accompagnant, m'ont permis de tracer ma route. Je les remercie chaleureusement, mes sœurs et mes frères également, pour leur soutien financier et leur patience qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Soyez tous assurés de toute ma reconnaissance et de mon amitié.

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>5</b>

## ***CHAPITRE I***

### **Etude bibliographique Les colles et les techniques de collage**

<b>Introduction .....</b>	<b>13</b>
<b>I. Adhésion et adhérence.....</b>	<b>15</b>
<b>II. Les adhésifs .....</b>	<b>17</b>
<b>III. Théories de l'adhésion.....</b>	<b>18</b>
III.1 Modèle de la liaison chimique .....	18
III.2 Modèle mécanique .....	19
III.3 Modèle électrostatique .....	20
III.4 Modèle de la diffusion/inter-diffusion .....	21
III.5 Modèle thermodynamique - théorie du mouillage .....	22
III.6 Modèle des couches de faible cohésion .....	25
III.7 Modèle du Facteur Dissipatif .....	25
III.8 Conclusion.....	26
<b>IV. Préparation des surfaces .....</b>	<b>27</b>
<b>V. Réaction de prise .....</b>	<b>28</b>
<b>VI. Les avantages et les inconvénients du collage.....</b>	<b>30</b>
<b>VII. Le Contrôle et l'Evaluation Non Destructifs des matériaux de structure.....</b>	<b>31</b>
VII.1 Intérêt du contrôle et l'évaluation non destructifs (CND;END) .....	31
VII.2 Les techniques non destructives de contrôle ou d'évaluation.....	32
<b>Conclusion.....</b>	<b>35</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>36</b>

## **CHAPITRE II**

### **Rappels fondamentaux sur la propagation acoustique en milieu sain**

<b>Introduction .....</b>	<b>40</b>
<b>I. Propagation en milieu infini .....</b>	<b>40</b>
I.1 Tenseur des déformations .....	40
I.2 Tenseur des contraintes .....	40
I.3 Relations entre contraintes et déformations : La loi de Hooke .....	41
I.4 Equation de propagation d'une onde ultrasonore dans un corps isotrope.....	42
I.5 Solution de l'équation de propagation .....	43
I.6 Potentiels des élongations .....	44
<b>II. Réflexion et transmission a l'interface liquide/solide .....</b>	<b>45</b>
II.1 Position de problème .....	45
II.2 Equation de continuité .....	46
<b>III. La propagation dans les structures multicouche – Coefficient de réflexion et de transmission .....</b>	<b>47</b>
III.1 Contraintes et déplacements .....	47
III.2 Les conditions aux limites : Modèle de Pilarski.....	51
III.3 La relation entre les vecteurs de déplacement et de contrainte aux interfaces extrêmes .....	51
III.4 les expressions du coefficient de réflexion et de transmission .....	52
<b>IV. Ondes guidées : Courbes de dispersion.....</b>	<b>53</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>59</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>60</b>

### **CHAPITRE III**

#### **Contrôle ultrasonore non destructif de la qualité du collage à partir de l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion**

<b>Introduction .....</b>	<b>62</b>
<b>I. Caractérisation d'un collage de deux tôles d'aluminium.....</b>	<b>64</b>
I.1 Influence de la colle sur l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion.....	65
I.1.1 Influence des paramètres viscoélastiques de la colle .....	65
I.1.2 Influence de l'épaisseur de la colle .....	67
I.2 Influence du contact sur l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion.....	68
<b>II. Caractérisation d'un collage de deux tôles d'acier et de deux tôles de zircaloy .....</b>	<b>74</b>
II.1 Présentations des structures .....	74
II.2 Résultats numériques .....	75
<b>Conclusion.....</b>	<b>82</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>83</b>

### **CHAPITRE IV**

#### **Propagation des ondes guidées dans les structures tri-couche: *Application au contrôle non destructif de la qualité de collage des tôles***

<b>Introduction .....</b>	<b>85</b>
<b>I. Propagation des ondes de Lamb dans les structures tri-couche planes.....</b>	<b>87</b>
I.1 Méthodes analytiques: Equation de dispersion.....	87
I.1.1 Méthode des matrices globales .....	87
I.1.2 Méthode des matrices de transfert .....	91
A. Principe de la méthode .....	91
B. L'équation de dispersion de la structure tri-couche .....	91

I.2	Résolution numérique de l'équation de dispersion :	
	Courbes de dispersion .....	94
	I.2.1 Première impression des courbes de dispersion.....	94
	I.2.2 Courbes de dispersion raffinées .....	95
	I.2.3 Difficultés numériques et amélioration.....	98
I.3	Le calcul du champ de déplacement .....	99
<b>II.</b>	<b>Influence du contact sur les courbes de dispersion .....</b>	<b>100</b>
	II.1 Conditions aux limites : Modèle de Pilarski.....	100
	II.2 Résultats numériques .....	101
	<b>Conclusion.....</b>	<b>106</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>107</b>

## ***CHAPITRE V***

### **Propagation des ondes guidées dans les structures tri-couche: *Application à l'évaluation non destructive des propriétés matérielles des assemblages collés à partir de leurs courbes de dispersion***

	<b>Introduction .....</b>	<b>113</b>
<b>I.</b>	<b>Problème direct: Courbes de dispersion et champ de déplacement de la structure (Cuivre/Colle/Acier) .....</b>	<b>114</b>
	I.1 Courbes de dispersion .....	114
	I.2 Le champ de déplacement.....	118
<b>II.</b>	<b>Problème inverse .....</b>	<b>121</b>
	<b>Conclusion.....</b>	<b>126</b>
	<b>Références bibliographies.....</b>	<b>127</b>
	<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>128</b>
	<b>Annexe.1 .....</b>	<b>131</b>
	<b>Annexe.2 .....</b>	<b>136</b>
	<b>Liste des figures .....</b>	<b>138</b>
	<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>142</b>

## **INTRODUCTION GENERALE**

Le collage est une technique d'assemblage qui remonte à la plus haute antiquité. En effet, quinze siècles avant J.C., les Egyptiens employaient déjà des colles naturelles. Une révolution importante dans le domaine de l'adhésion se produit dans les années 40 du siècle dernier avec l'utilisation du collage métal/métal en construction aéronautique et la découverte des résines époxydes en 1937 par P. Castan. Ces résines jouent maintenant un rôle prépondérant dans le domaine du collage structural. Si le collage n'était initialement utilisé que pour les structures secondaires, son domaine d'utilisation s'est étendu. Ainsi, depuis plus de 60 ans, dans les secteurs de l'industrie des transports (aéronautique, aérospatial, automobile, ferroviaire, naval) le collage est utilisé sur des structures primaires, et ceci au dépens d'autres techniques d'assemblage plus classiques telles que le rivetage, le vissage et le soudage. Les avantages du collage sont nombreux; dont une diminution de poids, la possibilité d'unir différents matériaux, une bonne résistance à la fatigue, l'atténuation du choc et la facilité pour rassembler les formes les plus complexes ou encore l'absence de corrosion. De plus les concentrations de contraintes dues aux trous et les éléments de liaison, comme rivets et vis, n'y sont pas présentes. Les tensions sur les extrémités sont aussi réduites car la colle remplit tout l'espace entre les deux éléments rassemblés, ce qui favorise la répartition des efforts.

Les assemblages collés sont utilisés dans l'industrie de haute technologie exigeant de hautes performances. Malheureusement, au cours de sa durée de vie en service, l'assemblage collé est soumis à des conditions environnementales très variées, qui vont influencer sur ses propriétés physiques et mécaniques en provoquant la dégradation de la couche de colle. En effet, la structure aromatique de la colle la rend non seulement sensible aux effets de certains solvants, mais aussi susceptible d'une réorganisation des chaînes dans le temps. Ce dernier phénomène est connu sous le terme de "vieillessement" et conduit à une perte des propriétés physiques et mécaniques initiales de la colle. Il est provoqué par de nombreux facteurs dont : la température d'utilisation, les conditions vibratoires, les conditions de sollicitations mécaniques, les conditions environnementales (la chaleur et l'humidité atmosphériques), les rayons ultra violets, etc. Ce phénomène de dégradation se traduit par la diminution de la raideur de l'interface adhésif/adhérent jusqu'à la perte du contact entre l'adhésif et l'adhérent (décollements d'interface). Cet endommagement peut se produire durant le processus du collage. Il est donc nécessaire de surveiller l'état de l'assemblage collé à divers stades de son

utilisation, tant que possible sans le dégrader pour des raisons évidentes de coût de fabrication. On distingue deux approches d'examen non destructif de l'état de santé: **le contrôle non destructif (CND)** qui consiste à tester les zones à risque du milieu, et notamment à inspecter toute inhomogénéité en essayant d'estimer si sa nature, sa position et ses dimensions en font un défaut qui implique le rejet de la pièce ; **l'évaluation non destructive (END)** qui réside en la quantification de certaines propriétés physiques (densité, vitesse longitudinale, vitesse transversale, ...) du milieu permettant de définir son aspect général. Afin d'éviter autant que faire ce peut les pertes de matériau et le recours à des réparations souvent onéreuses, l'idée d'intégrer des méthodes de CND dès les phases de conception et de fabrication des structures est désormais bien répandue.

Les techniques non destructives de contrôle ou d'évaluation sont très variées et basées sur des phénomènes physiques divers tels que, par exemple, l'absorption de rayons X et  $\gamma$ , le ressuage, la magnétoscopie, le rayonnement d'infrarouges, la transmission optique, les courants de Foucault, l'émission acoustique, la shearographie, la thermographie, l'interférométrie holographique, la tomographie, la rétro-diffusion Compton, la propagation d'ondes ultrasonores, etc . Parmi toutes les techniques existantes, les techniques ultrasonores sont devenues l'outil privilégié pour le contrôle et l'évaluation non destructifs des propriétés mécaniques des matériaux. L'onde acoustique se propageant dans tout milieu matériel suffisamment dense (fluide ou solide), cette propagation ne peut se faire dans le vide (à la différence des ondes électromagnétiques). Les ondes ultrasonores atteignent des fréquences supérieures à la gamme audible qui s'étend de 20Hz à 20kHz. Les techniques ultrasonores présentent l'avantage d'être applicables à une très large gamme de matériaux et sont particulièrement faciles à mettre en œuvre car ils nécessitent des équipements relativement légers et sans danger pour les utilisateurs [1]. Les ondes ultrasonores existent en différentes natures. Nous citons:

- les ondes de volumes solution de l'équation du mouvement en milieu infini, sont étudiées par Christoffel [2], elles sont entièrement caractérisées par les propriétés du matériau insonifié et la direction de propagation. Elles sont largement utilisées dans le cadre de la caractérisation de matériau [3], et pour l'imagerie des défauts de structures [4,5].
- Les ondes de surface étudiées par Rayleigh [6], font intervenir une interface libre du milieu semi infini considéré. Elles sont essentiellement utilisées en géophysique dans le cadre de l'étude des séismes [7,8].

- Les ondes de Lamb découvertes au début du XX<sup>ème</sup> siècle [9], font intervenir toute l'épaisseur du guide et présentent la particularité d'être dispersives. Elles sont étudiées et utilisées dans de nombreux domaines de contrôle non-destructif. Elles servent par exemple à la détection de délaminages [10-13], de corrosion [14,15], à tester l'adhésion de structures collées [16-21] et à la caractérisation des matériaux [22-24].

Cette thèse présente des études théoriques et numériques dans l'optique de mettre en évidence la possibilité de contrôler et d'évaluer un collage métal/adhésif/métal, à l'aide des techniques ultrasonores. Le développement de ces techniques nécessite une parfaite connaissance des phénomènes de propagation de ces ondes dans les structures stratifiées et aussi de leur interaction avec les discontinuités que présentent ces structures. Le choix des conditions aux limites qui doivent décrire les effets du couplage est très important dans l'approche théorique de ce problème.

Le contenu de cette thèse est présenté en cinq chapitres:

Le premier chapitre est consacré à une analyse bibliographique. Il nous a paru utile de présenter un état de l'art sur la technologie du collage en donnant des informations plus détaillées sur le développement du collage en tant que méthode d'assemblage industriel. La nature des différentes familles d'adhésifs et les techniques de mise en œuvre qui sont couramment utilisées sont aussi abordées. Le chapitre se termine par une brève présentation des différentes techniques non destructives de contrôle ou d'évaluation mettant en évidence le potentiel et la fiabilité des techniques ultrasonores.

Après quelques rappels d'élasticité linéaire et la présentation des grandeurs fondamentales de l'acoustique linéaire, le second chapitre aborde le problème de la diffusion par un empilement d'une onde acoustique plane en incidence oblique. Le formalisme mathématique conduit à l'expression analytique du coefficient de réflexion d'une structure de  $n$  couches planes immergée dans un fluide quelconque en prenant en compte des conditions aux limites définies par Pilarski[25]. Cet auteur a supposé que l'on pouvait passer continûment d'un contact parfait (continuité des déplacements et des contraintes normales et tangentielles) à un contact glissant (continuité de la contrainte normale et tangentielle, continuité du déplacement normal et discontinuité du déplacement tangentiel) en postulant que les contraintes normales et tangentielles sont proportionnelles à la différence des déplacements de part et d'autre de l'interface. Dans ce chapitre nous décrivons également le procédé

d'obtention des équations de dispersion des ondes guidées dans une plaque libre d'un matériau homogène et isotrope : les ondes de Lamb.

Le troisième chapitre présente une technique ultrasonore pour le contrôle non destructif de la qualité du collage. Cette technique est basée sur l'analyse de l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion. L'expression analytique du coefficient de réflexion, déterminée dans le second chapitre pour un empilement de  $n$  couches planes, est utilisée pour la modélisation numérique de la structure tri-couche, composée de deux tôles d'aluminium, de même épaisseur, liées par une couche de colle, immergée dans l'eau et insonifiée par une onde monochromatique en incidence normale. Pour la description du contact entre les trois couches, les conditions aux limites définies par Pilarski [25] sont introduites. Un code de calcul numérique de grande précision est développé sur Matlab permettant le calcul du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, dans le cas d'incidence normale, pour différentes natures du contact colle-aluminium. Une nouvelle interprétation des résultats obtenus est proposée. Par ailleurs, les résultats analytiques obtenus correspondant respectivement au collage parfait et au mauvais collage montrent un bon accord avec les résultats obtenus expérimentalement par Faiz et al [26]. Dans le but d'éprouver le code de calcul développé, nous présentons aussi les résultats obtenus pour une structure de deux tôles de matériaux différents.

Le chapitre IV est consacré à l'étude de la sensibilité des ondes de Lamb à la qualité du collage de deux tôles d'aluminium. L'utilisation de ces ondes guidées comme moyen de contrôle passe inéluctablement par l'étude et la compréhension de la propagation guidée des ondes ultrasonores dans les structures tri-couches. Deux méthodes analytiques, développées pour étudier la propagation d'ondes guidées le long des milieux stratifiés plans constitués de matériaux élastiques et isotropes, sont adoptées pour déterminer l'équation de dispersion des ondes de Lamb de la structure étudiée. Par une résolution numérique de grande précision, sur Matlab, de cette équation caractéristique, nous déterminons le réseau de dispersion de la structure et proposons une nouvelle interprétation de ce réseau. Nous déterminons, par la suite le champ des déplacements et analysons la répartition de l'énergie ultrasonore dans les éléments de la structure. Enfin, nous étudions la possibilité de caractérisation de la qualité de collage des tôles à partir du réseau de dispersion de la structure. Le travail présenté dans ce chapitre a fait l'objet :

- d'une publication d'un article dans le journal EPJAP (The European Physical Journal-Applied Physics) [27]. Décembre 2005.
- d'une communication au 8<sup>ème</sup> Congrès de Mécanique, El jadida, Maroc, 17-20 avril 2007.

Le chapitre V expose un problème inverse qui rentre dans le cadre des applications d'END. L'objectif consiste à la reconstruction des propriétés matérielles d'une structure tri-couche, à partir de ces courbes de dispersion, par un calcul inverse numérique. La structure tri-couche est composée d'une tôle de cuivre liée à une tôle d'acier avec une couche de colle en résine époxy. Les propriétés matérielles considérées sont les vitesses d'onde longitudinale et transversale, aussi bien que la densité de chaque couche de la structure. Dans un premier temps nous déterminons et nous interprétons les courbes de dispersion et le champ de déplacement dans la structure à partir du modèle de la propagation et la procédure présentés dans le chapitre précédent. Ensuite nous proposons une procédure numérique du calcul inverse basée sur une méthode non-linéaire des moindres carrés pour reconstruire simultanément les neuf propriétés matérielles de la structure à partir de ses courbes de dispersion déterminées. Le travail présenté dans ce chapitre a fait l'objet :

- d'une publication d'un article dans le journal EPJAP (The European Physical Journal-Applied Physics) [28]. Octobre 2006.
- d'une communication au 8<sup>ème</sup> Congrès de Mécanique, El jadida, Maroc, 17-20 avril 2007.

Ce mémoire est achevé par une conclusion générale sur l'ensemble de nos travaux de recherche et les perspectives dessinées.

### Références bibliographiques

- [1] H. TRÉTOU. Review of advanced ultrasonic techniques for aerospace structures. ECDNT Proceedings (NDT.net), vol. 3 (9). 1998
- [2] E.B. CHRISTOFFEL. Ann. Mat. Pura Appl. vol. 8, pp. 193. 1877
- [3] Y.C. CHU, S.I. ROKHLIN. Analysis of composite elastic constant reconstruction from ultrasonic bulk wave velocity data", Review of Progress in Quantitative NDE, Plenum Press, New York, pp. 1165-1172. 1994
- [4] P. CAWLEY. The sensitivity of mechanical impedance method of non-destructive testing, NDT International, vol. 20(4), pp. 209-215. 1987
- [5] J.J. GRUBER, J.M. SMITH, R.H. BROCHELMAN. Ultrasonic velocity C-scans for ceramic and composite material characterisation, Materials Evaluation, vol. 46, pp. 90-96. 1988
- [6] L. RAYLEIGH. On waves propagating along the plane of an elastic solid, Proc. London Math. Soc., vol. 17, pp. 1885
- [7] M.A. BIOT. The Interaction of Raleigh and stoneley waves in the Ocean Bottom, Seismological Society of America, vol. 42, pp. 81-93. 1952
- [8] J. DORMAN, M. EWING, J. OLIVER. Study of shear-velocity distribution in the upper mantle by mantle Rayleigh waves, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 50(1), pp. 87-115. 1960
- [9] H. LAMB. On waves in an elastic plate, Conf. of the Royal Society, London, pp. 114-128. 1917.
- [10] S. ROKHLIN. Interaction of Lamb waves with elongated delaminations on thin sheets. International Advances in Non-destructive testing. 6, pp. 263-285. 1979
- [11] N. GUO AND P. CAWLEY. The interaction of Lamb waves with delaminations in composite laminates. J. Acoust. Soc. AM. 94, pp. 2240-2246. 1993
- [12] K.S. TAN, N.GUO AND B.S. WONG. Experimental evaluation of delaminations in composite plates by the use of Lamb waves. Composites Science and Technology. 53, pp. 77-84. 1995
- [13] E. LECLEZIO. Diffraction des ondes de Lamb par des fissures verticales. Thesis, University of Bordeaux 1, n° 2472.
- [14] K. J. SUN AND P. H. JOHNSTON. Effect of rivet rows on propagation of Lamb waves in mechanically fastened two-layer aluminum plates. Review of Progress in quantitative Nondestructive Evaluation. 14, pp. 1569-1577. 1995

- [15] P. CAWLEY AND D. ALLEYNE. The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures. *Ultrasonics*, 34, pp. 287-290. 1996
- [16] M.J.S. LOWE AND P. CAWLEY. The applicability of plate wave techniques for Inspection of adhesive and diffusion bonded joints. *J. Nondestruct. Eval.*, 13(4), pp. 185-200. 1994
- [17] P.B. NAGY. Leaky guided wave propagation along imperfectly bonded fibers in composite materials. *Journal of Non-destructive Evaluation*. 13, (3), pp. 137-145. 1994
- [18] R.E. CHALLIS, U. BORK AND P.C.D. TODD. Ultrasonic NDE of adhered T-joints using Lamb waves and intelligent signal processing. *Ultrasonics*, 34, pp. 455-459. 1996
- [19] T. KUNDU, A. MAJI, T. GHOSH AND K. MASLOV. Detection of Kissing Bonds By Lamb Waves. *Ultrasonics*. 35, pp. 573-580. 1998
- [20] K. HELLER, L.J. JACOBS AND J. QU. Characterization of adhesive bond properties using Lamb waves. *NDT E Int*, 33, pp. 555-63. 2000
- [21] B.W. DRINKWATER, M. CASTAINGS, B. HOSTEN. The measurement of A0 and S0 Lamb wave attenuation to determine the normal and shear stiffnesses of a compressively loaded interface. *J. Acoust. Soc. Am.* 113 (6), pp. 3161-3170. 2003
- [22] P.B. NAGY, L. ADLER. Nondestructive evaluation of adhesive joints by guided waves. *J Appl Phys*, 66(10), pp. 4658-63. 1989
- [23] Y. BAR-COHEN AND A.K. MAL. Characterisation of adhesive bonding using Leaky Lamb waves. *Review of progress in quantitative NDE*, Plenum Press, New York, pp. 1271-1277. 1990
- [24] D.E. CHIMENTI. Guided waves in plates and their use in materials characterisation. *Applied Mechanical Review*, 50 (5), pp. 247-284. 1997
- [25] A. PILARSKI, Ultrasonic wave propagation in a layered medium under different boundary conditions, *Archives of Acoustics*, 7 (1), 61. 1982
- [26] B. FAIZ, G. MAZE, A. MOUDDEN, D.DECULTOT. Contrôle ultrasonore de la qualité des structures collées. *Annales de chimie science des matériaux*, vol. 23, iss. 3, pp. 461-473, 1998.
- [27] B. BOUGAZE, M. SIDKI AND A. RAMDANI. Guided ultrasonic waves in the tri-layer structures. Application to the non destructive ultrasonic testing of the bonding quality of sheets. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 32, pp. 207-212, 2005.
- [28] B. BOUGAZE, M. SIDKI AND A. RAMDANI. Guided ultrasonic propagation in the tri-layer structures. Application to the reconstruction of their material properties from dispersion curves. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 37, 223-228, 2007.

# **CHAPITRE I**

## **Etude Bibliographique**

### **Les colles et les techniques de collage**

**Introduction :**

L'une des premières techniques d'assemblage d'une structure utilisée par l'homme est le collage, qu'il a emprunté au monde animal. En effet, le collage a toujours existé dans la nature, parfois dans des environnements très sévères (collage des coquillages sur les roches en milieu marin par exemple). L'homme a utilisé très tôt des colles d'origine végétale, animale et minérale tels que la gomme arabique, le latex, les farines de céréales, le goudron etc..., pour réaliser des assemblages par collage en créant des objets utilitaires ou décoratifs. Dès la plus haute antiquité, la cire d'abeille fut par exemple utilisée pour les sceaux. Cette technique permettait de fermer un pli et de graver, par moulage, une signature attestant l'identité de l'expéditeur [1].

D'autres techniques d'application de colles naturelles comme l'emballage et l'étiquetage, se développent au début du XXe siècle. Au cours de l'histoire, l'adhésif a subi diverses transformations jusqu'au développement de la chimie des macromolécules et la conception des résines synthétiques, à qui tous les secteurs de l'activité humaine font appel, directement ou non. Ces résines offrent, entre autres, la possibilité de rassembler des matériaux qui jusqu'alors ne pouvaient pas être collés.

La notion de colle structurale apparaît dans les années 1940. Les études entreprises sur les collages caoutchouc-métal et bois-métal et la mise au point des polyuréthanes et des colles phénoliques impulsent le développement des techniques de collage métal-métal. Ces colles, qui permettent une très grande résistance, commencent à être utilisées dans la construction des avions. Les résines époxy (permettant d'effectuer des collages sous faible pression) et les polymères silicones (utilisés soit pour coller, soit pour jouer un simple rôle de joints d'étanchéité et/ou de dilatation thermique) sont découverts à la même époque.

Après la deuxième guerre mondiale le collage empirique devient une véritable science. Les laboratoires de recherche et de développement commencent à étudier les lois du collage, le vieillissement et la durée de vie des assemblages collés. Diverses théories et modèles sont proposés pour comprendre les mécanismes du collage, pour déterminer les principaux paramètres actifs ainsi que leurs importances respectives selon les conditions de réalisation de l'assemblage souhaité.

Le collage est une technique d'assemblage dont les domaines d'application sont dès lors de plus en plus vastes, ils dépassent largement le cadre des secteurs de haute technologie comme l'aéronautique ou l'automobile. Il commence à être envisagé dans le domaine du Génie Civil (connexions de ponts mixte acier/béton, assemblages de structures en béton fibré, etc...). Les médecins et dentistes sont également intéressés par ces techniques de collages. Des colles

biocompatibles ont été mises au point pour résoudre des problèmes de fixation en chirurgie et en odontologie. Par exemple, en orthopédie dento-faciale, les verrous sont collés sur la face externe des dents pour modifier la denture en cas de malocclusion et d'esthétisme ingrat [2,3].

La première partie de ce chapitre présente un point sur la définition de l'adhésion et le concept d'adhérence.

Dans la deuxième partie nous allons faire quelques rappels sur les adhésifs et leurs propriétés.

Les mécanismes qui gouvernent l'adhésion entre deux matériaux collés restent complexes et jusqu'à aujourd'hui, ils sont partiellement méconnus. Pour essayer d'expliquer ces mécanismes, il existe plusieurs théories [1] et quelques unes seront abordés dans la troisième partie de ce chapitre.

La durabilité des assemblages collés nécessite la bonne préparation des surfaces avant d'appliquer la colle. Cette préparation peut consister en un simple nettoyage de la surface ou bien à utiliser des méthodes spécifiques de traitement [4,5]. La quatrième partie de ce chapitre présente une description des traitements de surface utilisés pour donner des caractéristiques souhaitables à cette surface.

Lorsque les substrats ont été correctement préparés, le collage peut être réalisé en deux étapes. La cinquième partie de ce chapitre présente ces deux étapes et les techniques à mettre en œuvre pour les effectuer qui dépendent du type de colle ou de substrat utilisé.

Dans l'industrie, le collage s'impose comme une technique de choix pour la réalisation d'assemblages structuraux à hautes performances mécaniques grâce à ses nombreux avantages devant des méthodes classiques d'assemblage. Pourtant, l'utilisation de cette méthode d'assemblage présente quelques inconvénients qui limitent encore son application. La sixième partie de ce chapitre sera consacrée à une description de quelques avantages et désavantages de la technique de collage.

Au cours de sa durée de vie en service, l'assemblage collé est soumis à des conditions environnementales très variées, qui vont influencer sur ses propriétés mécaniques en provoquant la dégradation de la couche de colle et ensuite l'endommagement de l'intégrité de la structure. Cet endommagement peut se produire durant le processus du collage. Il est donc nécessaire de surveiller l'état de l'assemblage collé à divers stades de son utilisation, tant que possible sans le dégrader pour des raisons évidentes de coût de fabrication. Ce chapitre se termine par une brève présentation des différentes techniques non destructives de contrôle ou d'évaluation mettant en évidence le potentiel et la fiabilité des techniques ultrasonores.

## I - Adhésion et Adhérence

Le terme d'usage courant «adhésion» revêt deux sens selon le point de vue d'où l'on se place. Pour le scientifique, il s'agit des interactions existant entre deux surfaces, l'ingénieur quant à lui s'intéresse à la résistance à la séparation de deux éléments. Il est donc approprié de distinguer ces deux aspects par deux termes différents : Adhésion et Adhérence [4]. L'adhésion est définie comme un phénomène chimique, physique ou physico-chimique qui produit l'adhérence.

La cohésion d'un corps est assurée par l'existence de forces qui agissent en son sein. Les molécules les plus proches interagissent, de sorte que la résultante de ces interactions est nulle. Par contre, à la surface, une molécule se trouve soumise à une résultante non nulle dirigée vers l'intérieur et qui tend à réduire cette surface. C'est la raison pour laquelle, lorsque l'on approche deux solides l'un de l'autre, des forces d'attraction moléculaire se manifestent avant même que le contact soit établi et augmentent jusqu'à la réalisation du contact. Ces forces viennent s'ajouter aux efforts extérieurs, de la même manière que le champ magnétique accroît la pression d'appui d'un aimant posé sur un substrat en fer doux. Les forces d'attraction moléculaire ont une intensité qui dépend de la nature des liaisons assurant la cohésion des matériaux. L'énergie superficielle  $\gamma$  représente le travail à effectuer pour séparer, de manière isotherme et réversible, deux parties du solide suivant un plan imaginaire de surface unitaire, en coupant les liaisons rencontrées.

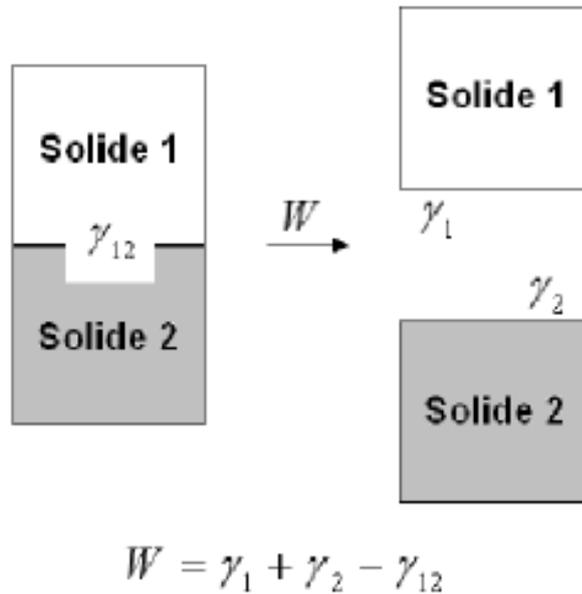
L'énergie superficielle des corps peut également être définie comme étant le travail pour créer deux surfaces unitaires. Ainsi, l'énergie d'adhésion de Dupré (1969), ou travail thermodynamique d'adhésion, permet de rendre compte de la séparation de deux solides différents 1 et 2 préalablement réunis. C'est l'énergie de Dupré qui est responsable du maintien en place de deux corps réunis dans un assemblage et qui assure leur contact intime, Figure I-1. L'équation du travail thermodynamique (W) proposée par Dupré est simple :

$$W = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$$

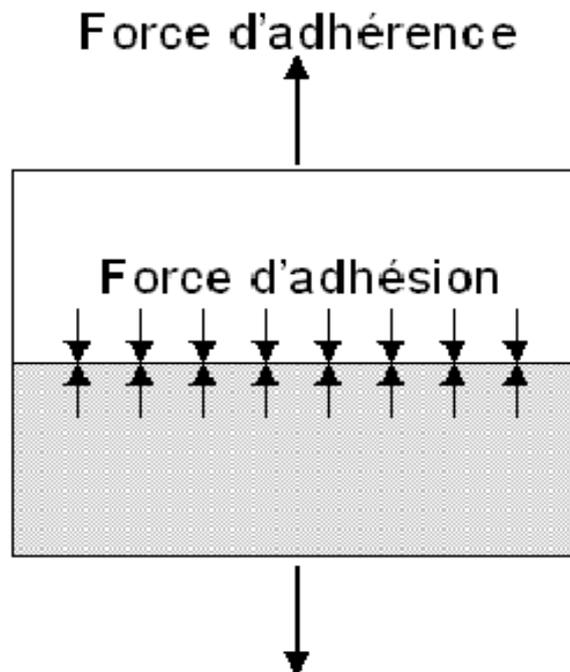
Où  $\gamma_1$  est l'énergie nécessaire pour créer un élément unitaire de surface du corps 1,  $\gamma_2$  est l'énergie pour créer un élément unitaire de surface du corps 2 et  $\gamma_{12}$  est l'énergie inter-faciale emmagasinée à l'interface lors de la mise en contact.

Le calcul ou la mesure de la force d'attraction (force d'adhésion), en fonction de la distance des solides que l'on rapproche, ne permet pas d'en déduire la force qu'il faut appliquer pour séparer les corps une fois le contact établi, Figure I-2. Cette force de séparation (force

d'adhérence) dépend d'un grand nombre de comportements mécaniques et de paramètres tels que les déformations élastiques, viscoélastiques ou plastiques des solides en contact, la vitesse de rupture, la température ambiante, etc.



**Figure I-1:** Travail thermodynamique de l'adhésion



**Figure I-2:** Adhésion et adhérence

A titre d'exemple, les forces qui lient entre elles les différentes couches d'un ruban adhésif sur son rouleau débiteur (les forces d'adhésion) sont de même intensité. En revanche, lorsque l'on souhaite décoller une certaine longueur du ruban, la force qu'il faut appliquer (la force d'adhérence) dépend de la vitesse de tirage que l'on impose [1].

## II – Les adhésifs:

Les adhésifs sont d'origine végétale, animale ou minérale, naturels ou synthétiques. Les caoutchoucs et les résines thermoplastiques ou thermodurcissables fournissent la plus grande variété des adhésifs industriels [4,6].

- **Les caoutchoucs naturels et synthétiques:** essentiellement utilisés en décoration peuvent être employés sur différents matériaux: métaux, bois, ciment, plâtre.
- **Les résines thermoplastiques:** permettent la réalisation d'assemblages secondaires. Toutefois, ces adhésifs ne donnent pas des joints de haute résistance et le domaine des températures d'utilisation est assez restreint.
- **Les résines thermodurcissables:** sont peu sensibles à l'action de la chaleur et du froid, leur cohésion est élevée et leur fluage réduit. Certaines d'entre elles permettent l'obtention d'assemblages primaires ou même structuraux.

Les assemblages primaires sont ceux qui doivent posséder une grande résistance mécanique, mais qui ne supportent que des efforts statiques; ce sont surtout des assemblages de bois comme les meubles.

Les assemblages structuraux doivent, de plus, supporter des efforts dynamiques, comme les carrosseries automobiles ou les ailes et les fuselages d'avions. Les colles utilisées dans ce type d'assemblage sont des colles dites 'structurales', c'est-à-dire qu'elles sont capables de conférer à un assemblage une résistance équivalente à celle des matériaux qui le constituent, tout en assurant le transfert des contraintes entre les deux substrats. Leur résistance en cisaillement doit être supérieure ou égale à 7 MPa. La notion de colle structurale est apparue dans les années 1940, en Grande-Bretagne et en Allemagne, lors de la mise au point des polyuréthanes et des colles phénoliques destinées aux assemblages métal/métal dans l'aéronautique. Leur science s'est depuis largement développée, permettant la mise au point d'adhésifs de plus en plus performants. Cependant, la nature et les propriétés fondamentales de ces polymères restent les mêmes.

Les résines époxy font partie de la catégorie des thermodurcissables; elles permettent d'assembler de nombreux matériaux, métalliques ou organiques. Ces résines sont, à température ambiante, liquides ou solides suivant la longueur de leur chaîne moléculaire. Elles sont capables de réagir avec les corps polyfonctionnels acides ou basiques, appelés "durcisseurs", pour donner

des produits durs et infusibles. On distingue deux types de résines: celles qui durcissent à froid, et celles qui durcissent à chaud.

- ✓ Les colles "à froid" sont liquides, pâteuses ou en solution. Avant collage, on leur incorpore la quantité nécessaire d'un durcisseur, lui-même liquide ou en solution. De telles colles permettent l'assemblage du verre, de la pierre, du béton, du papier, des tissus, des résines thermodurcissables moulées, des polyesters, des polyamides et les polyméthylméthacrylates.
- ✓ Les colles "à chaud" sont solides à température ambiante. Le durcisseur est déjà intégré. Ces colles doivent être fondues et leur application se fait après préchauffage des parties à encoller. La structure est ensuite portée à l'étuve pour que le durcissement s'effectue. Pour les collages structuraux qui nous intéressent dans cette étude, c'est ce type d'adhésif qui est utilisé dans l'industrie.

### **III - Théories de l'adhésion:**

La technique de collage permet l'assemblage de deux matériaux par l'intermédiaire d'un adhésif. Si le choix de l'adhésif est important, les conditions de réalisation des assemblages sont toutes déterminantes. Derrière le procédé d'assemblage se cache le processus physico-chimique de l'adhésion. Pour que l'assemblage soit performant et durable, il est nécessaire d'obtenir un niveau d'adhésion satisfaisant entre adhérent et adhérent. Cette condition implique une bonne compréhension des mécanismes qui sont à l'origine du phénomène d'adhésion.

La réalisation d'un collage consiste à mettre en contact des surfaces imparfaites et à établir des liaisons physiques ou chimiques entre ces surfaces par le biais de l'adhésif. Il existe de nombreuses théories relevant de la physico-chimie, de la tribologie et d'autres disciplines, qui rendent compte de ces interactions entre adhérent et adhérent. Le caractère pluridisciplinaire de l'adhésion rend difficile la formulation d'une théorie unique capable de décrire le phénomène d'adhésion, car celui-ci résulte de la superposition de nombreux mécanismes élémentaires que nous allons maintenant présenter.

#### **III – 1 - Modèle de la liaison chimique:**

Pour assurer une grande résistance à la rupture et une bonne durabilité de l'assemblage, il est parfois possible d'augmenter les forces inter-faciales par la modification des propriétés chimiques de la surface des substrats. Ce qui permet la création à l'interface colle/substrat des liaisons covalentes ou ioniques lors de réactions chimiques. C'est le cas de l'oxydation des métaux qui permet de remplacer des liaisons de type Van der Waals (énergie d'adhésion

approximativement de 21 KJ/mole) par des liaisons fortes ioniques (énergie d'adhésion de l'ordre de 418 à 1045 KJ/mole) ou covalentes (énergie d'adhésion de l'ordre de 63 à 711 KJ/mole).

Ces liaisons chimiques peuvent être créées de deux manières [1,7,8,9]:

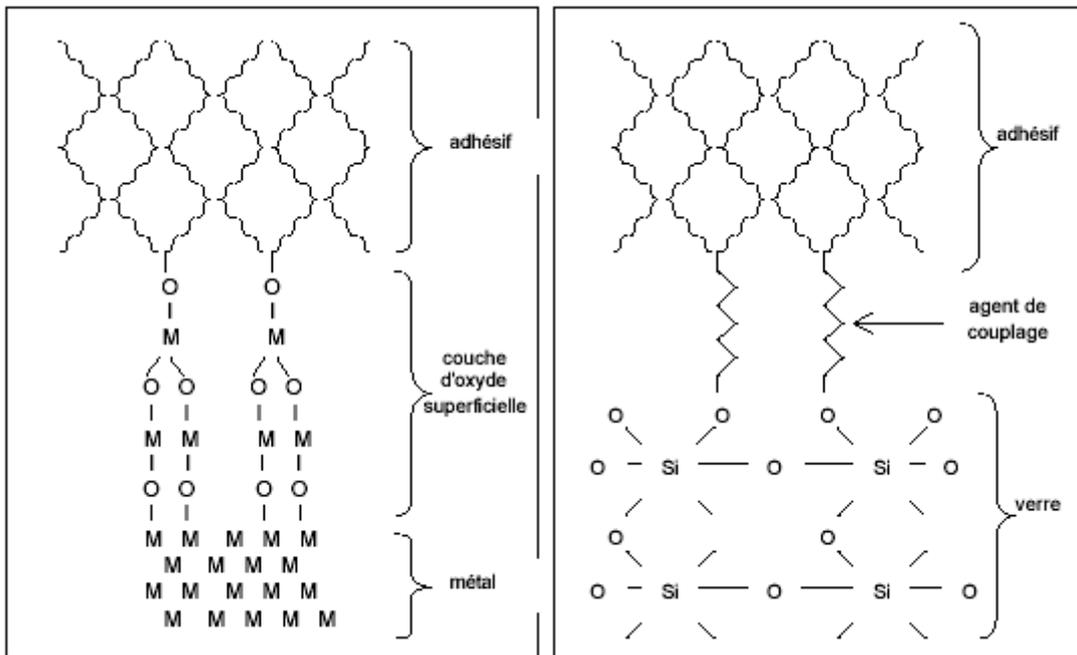
- par réaction directe entre l'adhésif et le substrat; c'est par exemple le cas entre une résine époxyde et la couche d'oxyde superficielle d'un métal (figure I-3).
- par l'intermédiaire d'un agent de couplage, c'est-à-dire d'une molécule compatible à la fois avec la colle et avec le substrat. C'est généralement la technique utilisée pour obtenir une bonne adhésion entre une matrice époxyde et des fibres de verre dans les matériaux composites (figure I-4)

### **III - 2 - Modèle mécanique:**

Ce modèle est proposé par Mac Bain et Hopkins (1925) [10], c'est l'une des premières théories utilisées pour rendre compte de l'adhésion durable entre deux solides. Selon cette théorie, une bonne adhésion dépend de la pénétration par capillarité de la colle liquide dans les pores et entre les aspérités des surfaces en contact, ce qui permet de constituer de nombreux points d'ancrage après solidification de l'adhésif.

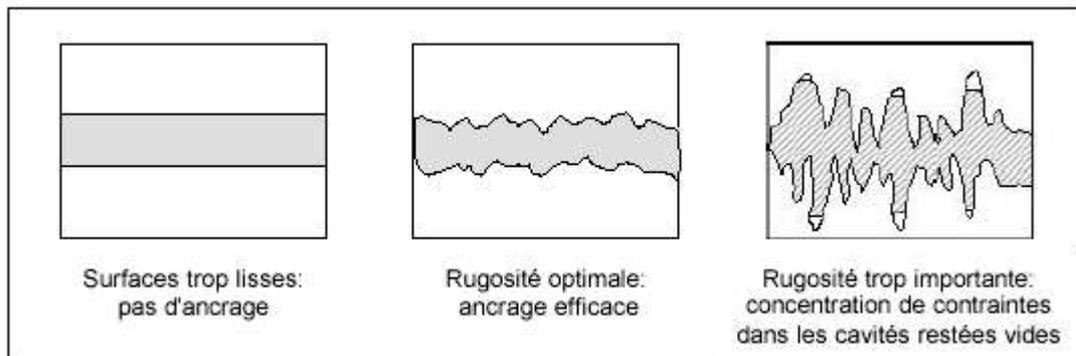
Si la liaison mécanique contribue à accroître l'adhésion par l'augmentation de l'aire de contact effective, et donc du nombre de liaisons inter-faciales, elle peut également être un handicap. En effet, il est nécessaire que la colle mouille parfaitement les surfaces afin de ne pas piéger de bulles d'air dans les porosités, ce qui induirait des concentrations de contraintes et fragiliserait le joint. Une rugosité trop importante peut, elle aussi, être source de bulles d'air: il existe donc une rugosité optimale des substrats à assembler (figure I-5).

Cette théorie trouve des applications essentiellement dans les collages de matériaux poreux (pièces en bois, en papier, en tissus) ou encore de métaux anodisés comme l'aluminium.



**Figure I-3:** Exemple de liaison chimique directe entre adhérent et adhérent

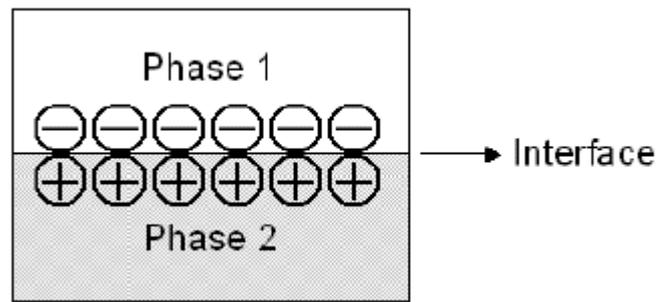
**Figure I-4:** Utilisation d'un agent de couplage pour former une liaison



**Figure I-5:** Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique, d'après [11]

### III - 3 - Modèle électrostatique :

Le modèle a été développé par Deryagin et Krotova en 1948 [12], pour des matériaux de natures différentes, suite à l'observation d'émissions d'électrons rapides lorsqu'un contact est rompu sous vide ou lors de la fracture d'un cristal (figure I-6), ce même modèle est repris par Skinner en 1953 [13]. Lors du contact entre deux matériaux de propriétés électriques différentes, il y a transfert de charges et réajustement des niveaux de Fermi, ce qui provoque l'apparition d'une double couche électrique à l'interface, assimilable aux deux plaques d'un condensateur plan.

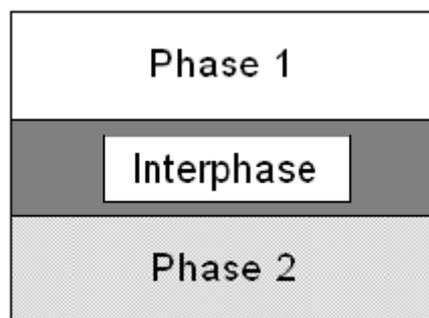


**Figure I-6:** Charges électriques

Cette théorie s'applique surtout aux assemblages verre/polymère ou métal/polymère entre autres. Elle n'est pas applicable pour un assemblage du type verre-métal, par exemple. Les transferts de charges électriques ne sont pas toujours observés dans les collages, ce qui fait penser qu'ils sont plutôt l'effet que la cause de l'adhésion entre le verre et le polymère.

### III - 4 - Modèle de la diffusion/inter-diffusion :

Dans les années 1960, apparaît l'hypothèse de la formation d'une zone au voisinage de l'interface, Figure I-7. Cette zone, appelée interphase, est caractérisée par une cohésion différente de celles des deux matériaux en présence.

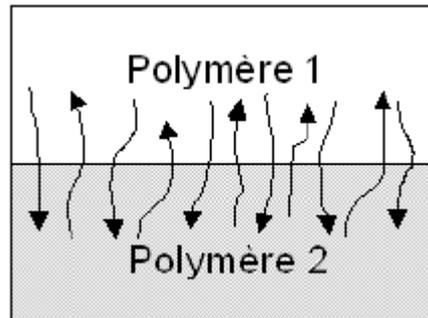


**Figure I-7:** Interphase

Selon cette théorie, la rupture se produit à l'intérieur de l'un des deux solides lorsqu'on a une forte cohésion. En revanche, la rupture dans la zone de transition inter-faciale traduit une faible cohésion.

Une théorie voisine de la précédente par l'aspect chimique qu'elle représente est la théorie de l'inter-diffusion proposée par Voyustkii (1949) [14]. Cette théorie vise essentiellement les assemblages de polymères compatibles de type élastomère/élastomère de même ou de différentes natures chimiques. L'idée ici est que les chaînes macromoléculaires des deux matériaux en contact (colle et substrat à chaque bord du joint) diffusent à travers l'interface selon

un mécanisme, appelé reptation, qui sera décrit plus tard par De Gennes (1971) [15], Figure I-8. Cette inter-diffusion assure la cohésion de l'assemblage grâce à la formation d'une interphase entre la colle et les substrats.



**Figure I-8:** *Inter-diffusion*

Cette théorie permet d'expliquer les phénomènes de cicatrisation observés avec les polymères fracturés ou fissurés. Par contre, on n'est pas encore certain aujourd'hui, si l'inter-diffusion est à l'origine de l'adhésion ou si elle se produit à la suite d'une adhésion préalable. L'inter-diffusion est également présente dans le cas des thermoplastiques, sous le nom d'auto-soudage.

### **III - 5 - Modèle thermodynamique - théorie du mouillage :**

Indépendamment de tout modèle, la théorie du mouillage doit être prise en compte car les colles sont toujours liquides, ou susceptibles de le devenir par chauffage. Pour qu'un collage soit résistant, la colle doit mouiller le plus parfaitement possible les surfaces à assembler afin de ne pas piéger de bulles d'air. Cette théorie du mouillage, appelée aussi modèle thermodynamique, a été développée par Sharpe et Schonhorn [16] en 1963. Elle nous indique que, pour que des liaisons puissent s'établir entre la surface solide et la colle liquide, il faut d'abord que les surfaces à assembler soient mouillées, autrement dit que l'adhésif s'étale bien. Une goutte d'un liquide quelconque s'étale naturellement plus ou moins sur la surface plane et lisse d'un solide. La configuration adoptée minimise l'énergie du système et rend parfaitement compte des interactions entre le liquide et le substrat solide. Un mouillage total est observé dans le cas de l'eau pure sur la surface propre d'une plaque de verre. A l'opposé, une goutte de mercure sur la même plaque de verre ne s'étale pas, parce que la tension de surface du métal est supérieure à l'énergie de surface du substrat en verre. La condition d'obtention d'une bonne adhésion dépend du contact entre les deux solides destinés à être assemblés donc du mouillage au contact "colle liquide-surface solide" lors de la formation de l'assemblage. La tension de surface de la colle doit être inférieure à celle du substrat qu'elle est destinée à recouvrir.

Le mouillage comporte deux aspects: un aspect thermodynamique correspondant au mouillage proprement dit et un aspect cinétique correspondant à la vitesse à laquelle s'effectue le mouillage. Dans le cas de surfaces poreuses ou rugueuses, il doit avoir lieu le plus rapidement possible.

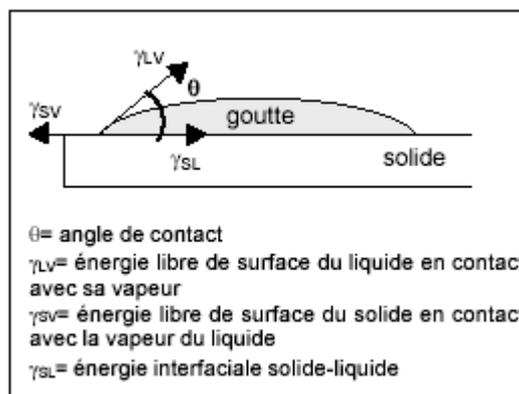
Le phénomène de mouillage traduit l'aptitude de l'adhésif à créer des liaisons de Van der Waals ou des liaisons de type acide-base (liaisons "hydrogène") avec le substrat. Bien que de faible énergie et de courte portée, ces forces compensent plus ou moins la disparition des forces de cohésion internes de la colle lors de l'augmentation de l'aire de contact avec le substrat. Selon le modèle, l'adhésion s'expliquerait donc par l'existence de ces forces de liaisons physiques.

Plusieurs grandeurs caractéristiques permettent de décrire cette adhésion thermodynamique. Il paraît intéressant de les présenter et de donner ici leurs définitions et leurs expressions.

On peut ainsi calculer une énergie libre de surface  $\gamma$ , également appelée tension superficielle, qui correspond au travail à fournir pour augmenter la surface d'un composé d'une unité:

$$\gamma = \frac{dW}{dS}$$

De plus, lorsque l'on dépose une goutte de liquide sur un solide, celle-ci va s'étaler jusqu'à atteindre un état d'équilibre, caractérisé par l'angle de contact liquide/solide (figure I-9) et décrit par l'équation d'Young.



**Figure I-9:** Étalement d'une goutte sur un substrat solide

L'équation d'Young s'écrit:  $\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta$

Or,  $\gamma_{SV} = \gamma_S - \pi_e$

Où:  $\pi_e$  est la pression d'étalement due à la présence de vapeur. Elle représente la réduction de l'énergie de surface du solide dans le milieu environnant, due à la pression, à la température, aux contaminants susceptibles de s'adsorber sur la surface libre.

et  $\gamma_S$  est l'énergie libre de surface du solide dans le vide, qui sert de référence.

On obtient alors:

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta + \pi_e$$

L'énergie d'adhésion  $W$ , appelée également énergie de Dupré qui tient compte du fait qu'il y a eu création d'une énergie libre inter-faciale et perte d'énergie de cohésion lors de l'étalement de la goutte.

$$W = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL}$$

En la combinant avec l'équation d'Young, on obtient l'équation de Young-Dupré:

$$W = \gamma_L \cdot (1 + \cos \theta) + \pi_e$$

Plus le mouillage est bon (angle de contact  $\theta$  nul ou très petit), plus l'énergie d'adhésion est grande.

Le tableau I-1 ci-dessous présente quelques valeurs d'énergies de surface pour des matériaux usuels:

Matériau	Energie de surface (mJ/m <sup>2</sup> )
Aluminium	840
Cuivre	1000
Verre	73
Plastiques	18-50
Epoxy	44
PVC	39
Caoutchouc	57
Polyéthylène	31

**Tableau I-1:** Exemples d'énergies de surface pour quelques matériaux courants (données par le CETIM - Centre Technique des Industries Mécaniques-france)

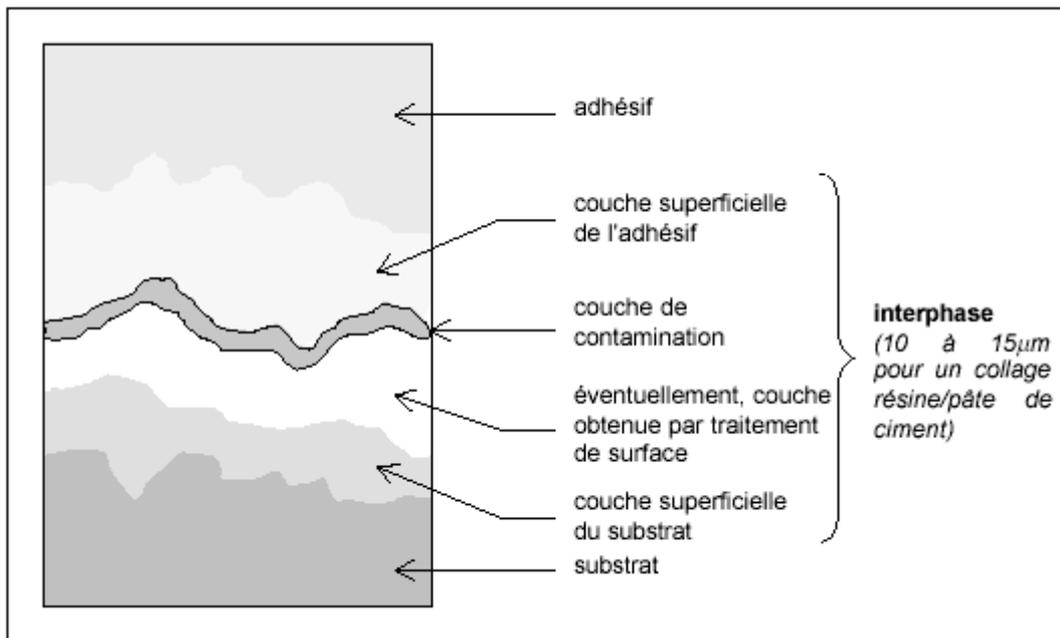
On peut conclure donc que le modèle thermodynamique définit des conditions indispensables mais insuffisantes pour obtenir une bonne adhésion. Il permet également d'appréhender le comportement des assemblages collés dans certains environnements spécifiques, comme le délaminage par réversibilité des liaisons inter-faciales en milieu solvant par exemple.

### III – 6 - Modèle des couches de faible cohésion :

Dans les années soixante Bikerman [17] a postulé la formation au voisinage de l'interface colle/solide d'une interphase d'épaisseur finie. Cette interphase de faible cohésion, due à la présence d'imperfections provenant de la mise en œuvre (bulles d'air,...) et à la discontinuité

entre les phases, constitue une zone de transition et présente des gradients de propriétés et de structure. Dans le cas d'une forte cohésion de l'assemblage, la rupture n'a généralement pas lieu à l'interface, mais à l'intérieur de l'un des solides; et au contraire, dans le cas d'une faible cohésion la rupture se produit au sein de l'interphase. Il s'agit plus ici d'une théorie de la rupture des interfaces que d'un modèle d'adhésion.

Cette théorie permet de se placer à une échelle très fine car elle décrit l'interface en termes d'interactions moléculaires.



**Figure I-10:** Couches de faible cohésion du modèle de Bikerman, d'après [18]  
(données numériques d'après [19])

### III - 7 - Modèle du Facteur Dissipatif :

La théorie du facteur dissipatif concerne plutôt l'adhérence que l'adhésion. Elle fait en effet intervenir la notion de rupture de l'assemblage collé plutôt que celle de sa cohésion et s'attache à calculer l'adhérence de l'assemblage collé [16]. Lorsqu'une fissure se propage à l'interface d'un joint adhésif, le bilan des énergies mises en jeu peut être écrit sous la forme simple suivante :

$$G = \gamma \times \Phi$$

C'est une expression dans laquelle l'énergie de rupture  $G$  est égale au produit de l'énergie de surface  $\gamma$  par le facteur de dissipation irréversible en volume  $\Phi$  (qui est lié aux pertes visqueuses dans le cas des polymères).

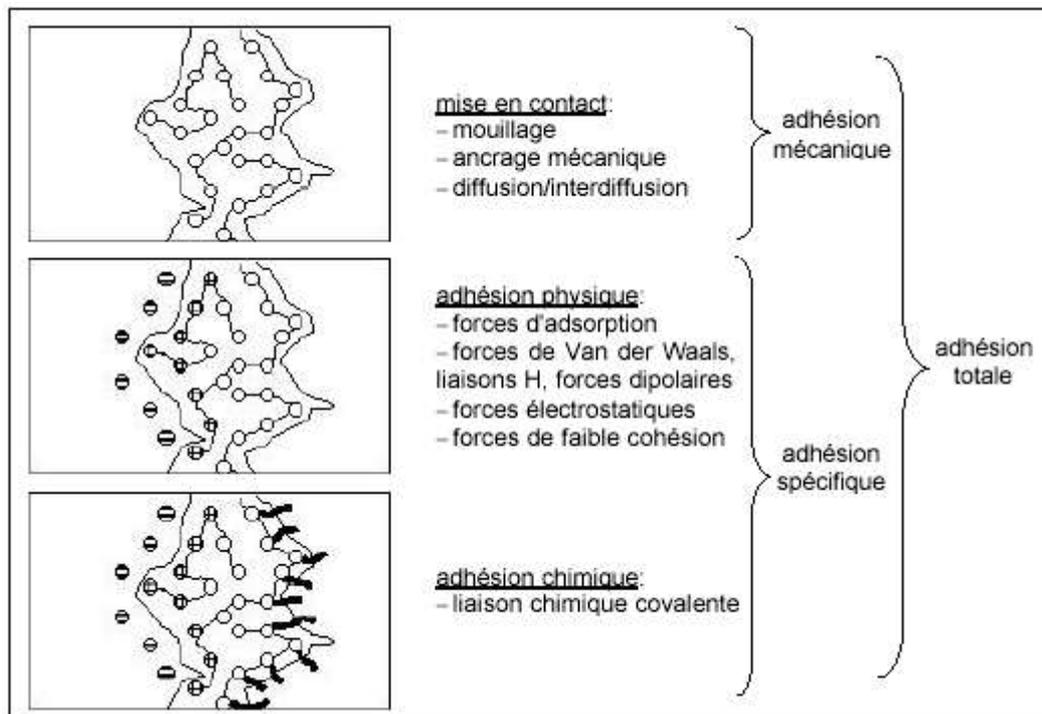
Le phénomène de dissipation est amplifié par "l'effet ventouse", produit par de minuscules bulles d'air piégées au sein de l'adhésif, qui a été mis en évidence récemment par Leibler [20]. Ce modèle permet également de comprendre pourquoi il faut dépenser, pour rompre un assemblage collé, une énergie au moins 10000 fois supérieure à l'énergie correspondant aux forces attractives entre les molécules [1].

### III - 8 – Conclusion :

Le caractère pluridisciplinaire de l'adhésion rend difficile la formulation d'une théorie unique capable de décrire les différents phénomènes de l'adhésion présentés. Il n'y a toujours pas une théorie qui permet à elle seule de décrire la globalité des mécanismes de l'adhésion, mais il existe plusieurs théories qui, dans la plupart des cas, sont complémentaires entre elles.

On peut cependant considérer que le processus de collage se déroule en plusieurs grandes étapes qui font intervenir ces différents mécanismes de l'adhésion (figure I-11):

- mise en contact des substrats avec la colle
- création de liaisons plus ou moins fortes et de portées variables, qui vont maintenir la cohésion de l'assemblage. Les énergies des différents types de liaisons sont rapportées dans le tableau I-2.



**Figure I-11:** Décomposition du processus de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion mis en jeu, d'après [21]

	Type de liaison	Energie (kcal/mol)
Liaisons chimiques	ionique	100-250
	covalente	15-170
	métallique	27-83
Liaisons intermoléculaires	liaison hydrogène ou acide/base	<12
	dispersion (London)	<10
	dipôle-dipôle (Keesom)	<5
	dipôle-dipôle induit (Debye)	<0.5

**Tableau I-2:** Energies des différents types de liaisons intermoléculaires, d'après [22]

#### IV- Préparation des surfaces:

L'étude bibliographique sur les théories de l'adhésion a montré que l'ancrage mécanique lié à la pénétration de la colle dans les aspérités du substrat permet d'augmenter le niveau d'adhérence. Pour optimiser cette adhésion mécanique, il peut être intéressant:

- d'augmenter la rugosité du substrat pour favoriser l'accrochage de l'adhésif,
- d'améliorer le mouillage du substrat par la colle,
- d'éliminer les couches de faible cohésion sur le substrat.

C'est pourquoi la préparation des surfaces est importante pour garantir de bonnes conditions d'adhésion. Différents traitements de surface peuvent être appliqués selon le type de matériau à rassembler.

L'opération de lavage précède généralement la mise en place de l'adhésif. Le lavage élimine les éléments faiblement attachés à la surface, comme des poussières. La présence de ces éléments pourrait se traduire dans l'existence de points où l'adhésion ne se produira pas. En fonction du produit utilisé, le lavage peut aussi contribuer au changement des caractéristiques de la surface. Les techniques de lavage les plus utilisées sont le dégraissage avec solvant, l'attaque acide et le lavage à la lessive (basique). En outre, l'utilisation des solvants peut générer des problèmes de sécurité, de santé et de pollution. C'est pourquoi les lavages à la lessive restent la méthode la plus utilisée.

Il existe des traitements qui consistent à travailler mécaniquement les surfaces afin d'obtenir l'augmentation de l'ancrage mécanique du collage. On peut citer comme exemple de ces opérations mécaniques le polissage et le brassage ou encore le sablage.

Les traitements thermiques jouent aussi un rôle important dans la préparation des surfaces à coller. Le chauffage pendant une heure d'un acier inoxydable, par exemple, peut améliorer considérablement le résultat du collage. Pour la préparation de l'aluminium ce type de traitement est aussi recommandé. Ce traitement peut, parfois, entraîner la modification de la couleur de la surface. Ce qui n'est toujours pas un inconvénient majeur vu que la plupart des traitements utilisés peuvent aussi changer l'apparence de la surface. D'autres types de traitements de nature

physique ou chimique sont aussi cités dans la littérature, comme par exemple les traitements Corona, Plasma et Laser [4].

Le rinçage est obligatoire après la plupart des traitements. Cette opération peut encore provoquer des changements dans la surface des matériaux. Cela explique pourquoi le type d'eau utilisée a son importance. Au contraire de ce que l'on peut croire, l'utilisation de l'eau distillée à la place d'eau du robinet n'est pas toujours favorable. Après l'attaque acide, le rinçage avec l'eau distillée peut réduire la résistance d'un joint d'aluminium collé à l'époxy. L'attaque acide provoque l'incorporation d'ions qui favorisent l'adhérence. Ceux-là se dissolvent dans l'eau distillée mais pas dans l'eau du robinet qui contient déjà des ions.

En général, les traitements de surface ont un effet de courte durée, le collage doit alors se faire dans un court espace de temps. Pour les pièces en aluminium, il est conseillé de procéder au collage dans l'heure qui suit le traitement. Dans l'industrie aérospatiale, par exemple, le collage s'effectue immédiatement après les traitements.

#### **V - Réaction de prise:**

Lorsque les substrats ont été correctement préparés, le collage peut être réalisé. Il a souvent lieu en deux étapes :

- une étape d'encollage, rendue plus ou moins délicate par la viscosité de la colle et par la nécessité de préparer le mélange résine/durcisseur dans le cas des bi-composants, ...
- une étape d'assemblage et de durcissement, pendant laquelle le maintien des éléments à assembler doit être assuré. Il peut également être nécessaire d'exercer un contrôle de la pression, de la température et de l'épaisseur du joint pendant cette phase.

Les techniques à mettre en œuvre pour effectuer ces deux étapes dépendent du type de colle ou de substrat utilisé.

##### **1. Pour les colles à solvants:**

il existe plusieurs procédés :

- **Le collage humide:**

Il consiste à enduire de colle l'une des deux surfaces à assembler, puis à mettre les surfaces en contact. Les performances du joint de colle augmentent avec le temps de prise et la quantité de solvant évaporé. Cette technique est donc privilégiée dans le cas des matériaux poreux.

- **Le collage avec évaporation des solvants:**

Il s'agit d'une variante dans laquelle, après enduction des deux surfaces à assembler, on attend l'évaporation de la plus grande partie des solvants avant de procéder à la mise en contact des substrats.

- **Le collage par contact:**

Il est identique au collage par évaporation de solvant, à ceci près qu'on exercera une pression sur toute la longueur du joint afin que ce dernier développe plus rapidement ses performances optimales.

## **2. Pour les colles réactives thermodurcissables :**

C'est le cas des adhésifs bi-composants tels que les systèmes époxydes utilisés en Génie Civil. Leur mise en œuvre comporte plusieurs étapes:

- mélange des constituants liquides (résine et durcisseur) dans les proportions stœchiométriques,
- encollage et mise en place des pièces à assembler,
- durcissement de l'adhésif par réaction de polymérisation, conduisant à la formation d'un réseau polymère tridimensionnel. Le temps de prise dépend en général de la température et de la présence de catalyseurs.

## **3. Pour les thermofusibles ou thermoplastiques :**

L'adhésif, initialement solide, est ramolli par chauffage pour pouvoir être déposé sur l'une des surfaces à assembler, préalablement chauffée elle aussi. Après avoir réalisé le collage, on laisse refroidir le joint qui se solidifie progressivement.

Dans tous les cas, quel que soit l'adhésif et la technique de mise en œuvre utilisés, il est nécessaire d'attendre un temps suffisant avant de soumettre le joint de colle à des efforts. Dans de nombreux cas, il faut également mettre en place des systèmes permettant le maintien en position des pièces à assembler.

## **VI – Les avantages et les inconvénients du collage:**

Pour la réalisation d'assemblages structuraux à hautes performances mécaniques, le collage s'impose comme une technique de choix devant le "triangle classique" rivetage - vissage – soudage. Le collage structural s'est ainsi banalisé dans des secteurs de haute technologie comme l'aéronautique ou l'automobile.

Le collage présente de nombreux avantages dans sa mise en œuvre et au niveau de la qualité des assemblages réalisés. Cependant, certaines précautions d'emploi doivent être

observées, et la conception des pièces doit nécessairement prendre en compte ce procédé particulier d'assemblage.

L'un des principaux avantages du collage est de permettre une plus grande productivité dans l'industrie en simplifiant les procédures de réalisation. En effet, les besoins en pièces à assembler sont moindres, seule la colle est nécessaire: on peut s'abstenir d'utiliser des vis par exemples. De même, l'application de la colle étant automatisée, l'assemblage des pièces est plus rapide.

Le collage est aussi parfaitement adapté à l'assemblage de matériaux différents, de matériaux fragiles ou minces. La colle forme un joint continu entre les solides au travers duquel se transmettent les efforts mécaniques.

En collant des matériaux métalliques, on ne modifie pas les dimensions des pièces ce qui constitue un gros avantage par rapport au soudage à haute température. L'industrie aéronautique est aussi attirée par l'amélioration de l'aspect esthétique apportée par le collage: les surfaces extérieures des assemblages, parfaitement lisses, conduisent à la réduction de la résistance de l'air.

Les couches de colle absorbent encore les vibrations et apportent une isolation à la fois électrique, thermique et acoustique.

Malgré ces nombreux avantages, le collage comporte toutefois certains inconvénients. Le premier concerne le choix des formes et des dimensions adéquates des surfaces des solides à réunir. Il est nécessaire d'éviter toute localisation de contraintes qui constituerait un point de faiblesse de l'assemblage. La préparation de la surface des solides à coller est aussi un problème. Il est habituellement nécessaire de traiter de façon mécanique ou physico-chimique les surfaces avant l'application de la colle, ce qui est une opération coûteuse mais indispensable pour éliminer les impuretés, augmenter l'énergie de la surface, accroître l'accrochage mécanique et favoriser le mouillage afin de faciliter l'étalement de la colle. Le choix de la colle est également problématique puisque le produit adhésif doit être sélectionné en fonction de nombreux critères liés, entre autres, à la nature même des solides à assembler, aux conditions auxquelles sera soumis l'assemblage, à la forme liquide ou solide à bas point de fusion de l'adhésif, à ses caractéristiques de mouillabilité, à sa facilité d'application sur les surfaces, aux conditions et à la durée de la solidification, au temps de séchage (durée de prise de la colle), etc.

Le démontage et le repositionnement des éléments d'un assemblage qui a été collé sont également deux opérations difficiles à envisager.

Enfin, parmi toutes les colles existantes, certaines ne résistent pas à la chaleur, au froid ou aux chocs thermiques, d'autres présentent un mauvais comportement en présence de la lumière

ou de l'eau, d'autres encore, techniquement parfaites pour l'utilisation envisagée, s'avèrent trop onéreuses compte tenu de la grande superficie à encoller, si bien qu'il n'existe malheureusement pas de colle universelle alliant toutes les qualités à la fois.

## **VII - Le Contrôle et l'Evaluation Non Destructifs des matériaux de structure:**

### **VII – 1 - Intérêt du contrôle et l'évaluation non destructifs (CND;END):**

La qualité de fabrication et la durabilité des matériaux constituent deux des préoccupations majeures des industries de pointe comme l'aéronautique, l'aérospatiale ou le domaine automobile. En effet, la mise au point de matériaux dont les caractéristiques mécaniques sont adaptées à une utilisation spécifique nécessite certains procédés de fabrication (laminage à chaud ou à froid des aciers, assemblages de plis dans les structures multicouches) qui risquent de générer des imperfections, dès la conception. De plus, le matériau subi, au cours de sa durée de vie, des contraintes mécaniques ou thermiques qui le fragilisent et peuvent faire apparaître des défauts.

Il est donc nécessaire de surveiller l'état d'une structure (composite, assemblage collé,...) à divers stades de leur utilisation, tant que possible, sans les dégrader pour des raisons évidentes de coût de fabrication. On distingue deux approches d'examen non destructif de l'état de santé: **le contrôle non destructif (CND)** qui consiste à tester les zones à risque du milieu, et notamment à inspecter toute inhomogénéité en essayant d'estimer si sa nature, sa position et ses dimensions en font un défaut qui implique le rejet de la pièce ; **l'évaluation non destructive (END)** qui réside en la quantification de certaines propriétés physiques (densité, vitesse longitudinale, vitesse transversale, ...) du milieu permettant de définir son aspect général.

Afin d'éviter autant que faire ce peut les pertes de matériau et le recours à des réparations souvent onéreuses, l'idée d'intégrer des méthodes de CND dès les phases de conception et de fabrication des structures est désormais bien répandue.

### **VII – 2 - Les techniques non destructives de contrôle ou d'évaluation:**

Les techniques non destructives de contrôle ou d'évaluation sont très variées et basées sur des phénomènes physiques divers tels que, par exemple, l'absorption de rayons X et  $\gamma$ , le ressuage, la magnétoscopie, le rayonnement d'infrarouges, la transmission optique, les courants de Foucault, l'émission acoustique, la shearographie, la thermographie, l'interférométrie holographique, la tomographie, la rétro-diffusion Compton, la propagation d'ondes ultrasonores, etc ... [23].

Toutes ces méthodes ont pour but le contrôle des matériaux par la mesure de leur épaisseur ou par la détection de défauts de surface ou de défauts internes - inclusions, porosités, fissures, décohésions, délaminations, décollements d'interface, etc.... ou l'évaluation des matériaux par la mesure de certaines de leurs propriétés physiques pour accéder à la connaissance de leur état de santé.

Parmi toutes les techniques non destructives de contrôle ou d'évaluation existantes, celles basées sur la propagation d'ondes ultrasonores sont particulièrement faciles à mettre en œuvre car elles nécessitent des équipements relativement légers et sans danger pour les utilisateurs [24]. On rencontre notamment des systèmes de balayage qui auscultent, zone après zone, des pièces de plus ou moins grandes dimensions (recherche de défauts), ou encore des systèmes fixes qui permettent d'effectuer des mesures localisées (épaisseur, densité, raideur du matériau, ...).

La plupart des techniques ultrasonores utilisent des transducteurs à immersion ou de contact. Un fluide ou un gel de couplage permet alors d'assurer une bonne transmission de l'énergie élastique entre les transducteurs et le milieu testé, contrairement au cas de l'air dont l'impédance acoustique est extrêmement faible par rapport à celles de milieux solides [25]. L'emploi de ces couplants est parfois très contraignant en environnement industriel car il devient alors nécessaire soit de démonter les pièces à contrôler pour les immerger dans des cuves à eau ou les placer devant des jets d'eau, soit de les enduire de gel. Dans tous les cas, une phase de remise en état de la structure est nécessaire, impliquant donc une perte de temps et un coût non négligeables. La génération et la détection d'ultrasons par faisceaux laser permettent de contourner ces contraintes [26, 27]. Cependant ces procédés sont onéreux à l'achat et à l'entretien et assez délicats à mettre en place en raison des réglages très fins généralement requis par les systèmes optiques.

Une solution consisterait à pouvoir utiliser des transducteurs ultrasonores à couplage par air, mais à fort rendement pour s'affranchir de la rupture d'impédance acoustique entre l'air et les solides. Trois principaux avantages résultent de l'absence de couplage (autre que l'air) entre le récepteur et l'échantillon étudié :

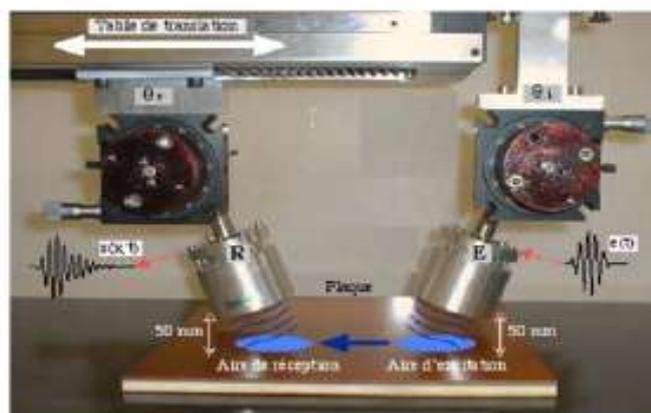
- (a) Mesure directe et reproductible du déplacement normal produit par les ondes en surface de la plaque, contrairement aux systèmes à couplage par gel qui faussent totalement cette information (le résultat de mesure varie avec le couplage du capteur) ou aux systèmes à immersion qui rajoutent à ce déplacement une atténuation significative due au fluide (dissipation d'énergie qui varie lorsque le capteur est déplacé le long de l'échantillon).

- (b) Mobilité facile du capteur par rapport à l'échantillon étudié, pour relever des informations concernant la propagation : mesure de l'amplitude ou de la phase des ondes en diverses positions, recherche de modes réfléchis ou transmis par des zones sujettes à défauts, etc ...
- (c) Capacité du transducteur à isoler un mode de propagation par choix de l'angle de coïncidence, contrairement aux mesures laser qui prennent en compte tous les modes.

Les premiers transducteurs à couplage par air sont apparus dans les années 70. Ces éléments électrostatiques ont permis de générer et de détecter des ondes à travers des feuilles de papier [28] et même le long de plaques métalliques [29]. Malgré ces résultats prometteurs, cette technologie a été mise de côté pendant une vingtaine d'années, vraisemblablement à cause du niveau de bruit perturbant les signaux mesurés. Les progrès accomplis en électronique au cours des dix dernières années ont permis de réduire considérablement ces niveaux de bruit, rendant ainsi possible l'exploitation, en temps réel, de signaux ultrasonores détectés par des récepteurs à couplage par air.

Pour l'instant, plusieurs solutions sont au point : transducteurs électrostatiques, transducteurs piézo-composites, ou encore transducteurs piézo-électriques avec couches d'adaptation d'impédances. Ces éléments permettent de générer et de détecter, sans contact, des ondes ultrasonores dans des milieux solides constitués de matériaux métalliques, polymères ou composites, simplifiant ainsi considérablement les applications de contrôle ou d'évaluation [30-31]. Sur sites industriels, les pièces à tester n'ont alors plus besoin d'être démontées, mais cela conduit souvent à une autre contrainte : l'accès unilatéral aux structures. L'émetteur et le récepteur doivent donc être placés du même côté de la structure mais assez loin l'un de l'autre car, à cause de la faible impédance acoustique de l'air, la réflexion spéculaire produite en surface des échantillons masque totalement toute onde provenant de l'intérieur du matériau. C'est une des raisons qui a motivé l'emploi d'ondes guidées pour mettre au point des applications d'END ou de CND avec transducteurs ultrasonores à couplage par air [32-34] (figure I-12).

Le principe de fonctionnement des transducteurs électrostatiques, ultrasonores et à couplage par air, est basé sur la vibration d'une fine membrane métallisée, constituant l'une des armatures d'un condensateur, l'autre armature se présentant sous la forme d'une plaque métallique de rugosité contrôlée par micro-sablage. L'efficacité à l'émission, la sensibilité à la réception et la bande passante en fréquence sont mesurées à l'aide d'une sonde laser, et modifiées par la taille des grains de sablage ainsi que par l'épaisseur de la membrane [35].



**Figure I-12:** *Systèmes de génération et détection d'ondes guidées par transducteurs ultrasonores plans à couplage air*

**Conclusion :**

L'étude bibliographique présentée dans ce chapitre a permis de ré-situer les principales familles d'adhésifs utilisées dans l'industrie et de rappeler les différentes théories de l'adhésion mettant en évidence le caractère pluridisciplinaire de l'adhésion entre l'adhésif et l'adhérent; ce qui rend difficile la formulation d'une théorie unique capable de décrire les différents phénomènes de l'adhésion existants. Il n'y a toujours pas une théorie qui permet à elle seule de décrire la globalité des mécanismes de l'adhésion, mais il existe plusieurs théories qui, dans la plupart des cas, sont complémentaires entre elles. Bien qu'une théorie unique de l'adhésion ne soit pas encore acceptée, il est reconnu que l'état initial de la surface à coller joue un rôle important sur le comportement d'un collage. Les traitements de surface sont donc souhaitables afin d'améliorer la résistance des collages. Les techniques à mettre en œuvre pour réaliser un collage sont également exposées. Ces techniques dépendent du type de colle ou de substrat utilisé. Les avantages et les inconvénients du choix de collage comme technique d'assemblages sont également présentée dans ce chapitre.

Après la réalisation des assemblages par collage, Il est donc nécessaire de contrôler leur état de santé et la surveiller à divers stades de leur utilisation, tant que possible sans les dégrader pour des raisons évidentes de coût de fabrication. Différentes techniques non destructives de contrôle ou d'évaluation ont été exposées dans ce chapitre. Il en ressort que les techniques basées sur la propagation des ondes ultrasonores sont particulièrement adaptées, en raison de leur facilité de mise en œuvre car elles nécessitent des équipements relativement légers et sans danger pour les utilisateurs.

**Références bibliographiques**

- [1] M. BARQUINS, K. FADEL. Adhésion et collage. Découverte, vol. 271, pp. 31-46, 1999.
- [2] G. LEWIS, S. MANICKAN, D. WHARTON. Effect of debonding forces on bonded orthodontic brackets : finite element study. *Biomed Mater Eng.* ; 6(2) : pp. 113–21, 1996.
- [3] I. NERGIZ, P. SCHMAGE, H. WOLFRAM ET, O. MUTLU. Effect of alloy type and surface conditioning on roughness and bond strength of metal brackets. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopaedics*; 125 (1); pp. 42-50, 2004.
- [4] J. COGNARD, Sciences et technologies du collage, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. ISBN 2-88074-410-5, 2000.
- [5] G.W. CRITCHLOW, D.M. BREWIS, Review of surface pretreatments for aluminium alloys, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, 16, pp. 255-275, 1996.
- [6] P. COUVRAT. Le collage structural moderne. Théorie et pratique. Tec & Doc, lavoisier, 1992.
- [7] L. LAVIELLE, J. SCHULTZ. L'adhésion polymère-métal *Matériaux et Techniques*, 1984, Juin-Juillet, pp 215-222, 1984.
- [8] M.F. VALLAT. Joints adhésifs et mesure de leur résistance *Matériaux et Techniques*, pp. 27-30, Juillet-Août, 1989.
- [9] J.A. PETIT. Bases scientifiques de l'assemblage par collage *Matériaux et Techniques*, 4-5, pp. 3-10, 1992
- [10] J.W. MAC BAIN, D.G. HOPKINS. On adhesives and adhesive action *Journal of Physical Chemistry*, 29, 2, pp. 188-204, 1925.
- [11] H. MONTERNOT, D. BENAZET, H. ANCENAY. Guide du collage du CETIM Paris: Lavoisier, pp. 232, 1978.
- [12] V. DERYAGIN B., N.A. KROTOVA. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 61, pp. 849, 1948.
- [13] S.M. SKINNER, R.L. SAVAGE, I.E. RUTZLER. Electrical phenomena in adhesion: electron atmospheres in dielectrics *Journal of Applied Physics*, 24, pp. 438, 1953.
- [14] S.S. VOYUTSKII. Autohesion and adhesion of high polymers New-York: Wiley Interscience, 1963.
- [15] P.G. DE GENNES. Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles *Journal of Chemical Physics*, 55, pp. 572-579, 1971.
- [16] L.H. SHARPE, H. SCHONHORN. Surface energetics, adhesion and adhesive joints In: Contact angle, wettability and adhesion / ed par F.M. FOWKES Washington: American Chemical Society, pp. 189, 1964 - (Advances in Chemistry Series, 43).

- [17] J.J. BIKERMAN. Causes of poor adhesion: weak boundary layers *Industrial and Engineering Chemistry*, 59, 9, pp. 40-44, 1967.
- [18] A. ROY. Comportement mécanique en sollicitation monotone et cyclique d'assemblages collés composite-composite et composite-acier – pp. 213 Th: *Science des Matériaux*, Université de Poitiers - ENSAM, 1994.
- [19] K. BENZARTI, T. CHAUSSADENT, Y. MOUTON. Adhesively bonded joints in civil engineering: some physico-chemical aspects interesting mechanical behaviour In: *Novel Approaches in Civil Engineering* / ed. par M. FREMOND et F. MACERI Berlin: Springer-Verlag- pp. 91-101, 2004. - (Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics)
- [20] C. GAY, L. LEIBLER. Theory of tackiness *Physical Review Letter*, 82, pp. 936-939, 1999.
- [21] H. SCHINDEL, E. BIDINELLI, *Pratique du collage industriel* Paris: Lavoisier, pp. 264, 1992 - (Technique et Documentation)
- [22] H. HAIDARA. Mécanismes fondamentaux du mouillage et de l'adhésion JADH'2001 (8-12 Octobre 2001 ; Lège-Cap Ferret) Société Française du Vide - 11èmes Journées d'Etude sur l'Adhésion- Session de Formation – pp. 1-19, 2001.
- [23] *Nondestructive Evaluation, Theory, Techniques and Applications*. Ed. by P. J. Shull, 2002.
- [24] H. TRÉTOU, Review of advanced ultrasonic techniques for aerospace structures. *ECDNT Proceedings (NDT.net)*, vol. 3 (9), 1998.
- [25] J. KRAUTKRAMER, H. KRAUTKRAMER, *Ultrasonic testing of materials*, 3rd revised version, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1983.
- [26] J.W. WAGNER, A.D. MCKIE, J. SPICER, J. JR. DEATON, Modulated laser array sources for generation of narrow band and directed ultrasound. *J. of N.D.E.*, vol. 9(4), pp.263-269, 1990.
- [27] J.P. MONCHALIN, Progress towards the application of laser ultrasonics in industry. *Review of Progress in Quantitat. NDE*, vol. 12, D.O. Thompson and D.E. Chimenti (eds), Plenum Press, NY, pp.495-506, 1993.
- [28] M. LUUKKALA, P. HEIKKILA, J. SURAKKA, Plate wave resonance. A contact-less test method. *Ultrasonics*, vol. 11 (10), pp.201-208, 1971.
- [29] M. LUUKKALA, P. MERILÄINEN, Metal plate testing using airborne ultrasound. *Ultrasonics*, vol. 11, pp. 218-221, 1973.
- [30] D. SCHINDEL, D. HUTCHINS, Applications of micromachined capacitance transducers in air-coupled ultrasonics and NDE. *IEEE Trans. UFFC*, vol. 42(1), 1995.
- [31] M.C.BHARDWAJ, Non-contact ultrasound: the final frontier in Non-destructive testing and evaluation. Ed. A. Biderman, *Encyclopedia of Smart Materials*, John Wiley & Sons, NY, 2001.

- [32] R. FARLOW, G. HAYWARD, Real-time ultrasonic techniques suitable for implementing non-contact NDT systems employing piezoceramic composite transducers. *Insight* (formerly *Brit. Journ. NDT*), vol. 36, pp. 926-935, 1994.
- [33] W. WRIGHT, D. HUTCHINS, Air-coupled Lamb wave tomography. *IEEE Trans. Ultras. Ferro. & Freq. Contr.*, vol. 44 (1), pp. 53-59, 1997.
- [34] 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), pp. 37-45, 1998.
- [35] B. HOSTEN, C. BIATEAU, M. CASTAINGS, D. ROZIÈRE, Etude et caractérisation de transducteurs à couplage par air pour l'évaluation et le contrôle non destructifs des matériaux. *Instrumentation Mesure Métrologie*, vol. 1 (1-2), pp. 169-189, 2001.

## **CHAPITRE II**

### **Rappels Fondamentaux sur la Propagation Acoustique en Milieu Sain**

**Introduction :**

L'onde acoustique est un mouvement vibratoire des particules d'un milieu matériel. Nous nous intéressons ici à la propagation en régime harmonique dans un milieu continu, élastique, homogène et isotrope. Les équations fondamentales de l'élasticité linéaire [1], rappelées dans ce chapitre, permettent d'obtenir l'équation du mouvement dans un solide ou dans un liquide en utilisant la loi de ( Hooke ) exprimant la proportionnalité entre les contraintes et les déformations et en considérant le principe fondamental de la dynamique [1-2]. On peut observer plusieurs modes de propagation suivant la nature du milieu. Dans ce chapitre, nous étudions dans un premier temps la diffusion acoustique par une structure multicouche plane et nous déterminons les expressions analytiques des coefficients de réflexion et de transmission. Puis, nous étudions la propagation guidée des ondes acoustiques dans une couche plane libre et nous définissons les modes propres de la plaque (courbes de dispersion).

**I – Propagation en milieu infini:****I – 1 – Tenseur des déformations :**

Sous l'action de forces de pression externes, un milieu se déforme. Une particule du milieu considéré subit, au cours de la déformation, un déplacement noté  $u$ . L'état de déformation du milieu est décrit par un tenseur symétrique d'ordre deux, appelé tenseur des déformations, dont les composantes peuvent s'écrire en fonction de celles du vecteur déplacement de la façon suivante:

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

Dans l'hypothèse de petites déformations, comme c'est le cas en acoustique linéaire, les termes du second ordre peuvent être négligés, donc

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

**I – 2 - Tenseur des contraintes :**

Les actions extérieures déformant le milieu provoquent des tensions internes tendant à ramener le milieu dans son état d'équilibre. Ces dernières sont décrites par un tenseur ( $\sigma_{ij}$ ) symétrique d'ordre deux, appelé tenseur des contraintes.

Soit un élément de surface d'orientation quelconque  $\vec{n}$ . La contrainte mécanique  $\vec{\sigma}$  dépend de l'orientation de l'élément de surface  $ds$ . Moyennant la convention de sommation sur les indices répétés, on a :

$$\sigma_i(\vec{n}) = \sigma_{ik} . n_k \quad (\sigma_{ik} = \sigma_{ki}) \quad (3)$$

### I – 3 -Relations entre contraintes et déformations : La loi de Hooke

Dans le cadre de l'acoustique linéaire supposant de petites déformations, il existe des relations linéaires liant les composantes du tenseur des contraintes et celles du tenseur des déformations. Soit :

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l} A_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (4)$$

Cette relation tensorielle est appelée loi de Hooke.

Les termes  $A_{ijkl}$  sont les composantes d'un tenseur d'ordre quatre, appelé tenseur des rigidités ou coefficients élastiques. Suivant les symétries du comportement mécanique du matériau considéré, on peut réduire le nombre de composantes indépendantes [3,4]. Dans le cas d'un milieu homogène isotrope, ils peuvent s'écrire simplement en fonction des coefficients de Lamé  $\lambda$  et  $\mu$  :

$$A_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (5)$$

Avec  $\delta_{ij}$  tenseur de Kronecker.

La matrice des constants élastiques s'écrit en contractant les indices :

$$[A_{ijkl}] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (6)$$

La loi de HOOKE s'écrit sous forme algébrique :

– En fonction des composantes du tenseur des déformations

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \sum_k \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

– En fonction des composantes du vecteur déplacement

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \sum_k \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

**I – 4 - Equation de propagation d'une onde ultrasonore dans un corps isotrope :**

L'équation du mouvement dérive du principe fondamental de la dynamique. En ne tenant compte que des propriétés élastique du milieu et en raisonnant sur un élément de volume  $dv$ , les composantes de la densité volumique de forces s'expriment en fonction des composantes du tenseur des contraintes comme suit :

$$F_i = \sum_j \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (9)$$

On négligeant l'action de la pesanteur :

$$F_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (10)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique du milieu.

On peut donc écrire :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (11)$$

Comme le tenseur des contraintes peut s'écrire d'après ( 8 ):

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

(11) devient :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \lambda \delta_{ij} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} \right) \quad (13)$$

En tenant compte du fait que :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} &= \text{div } \vec{u} & \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} &= \Delta u_i \\ \frac{\partial u}{\partial x_i} &= (\text{grad}(u))_i & (\ddot{u})_i &= \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \end{aligned}$$

et que

$$\Delta \vec{u} = \text{grad}(\text{div}(\vec{u})) - \text{rot}(\text{rot}(\vec{u}))$$

On obtient l'équation de propagation :

$$\rho \ddot{\vec{u}} = (\lambda + 2\mu) \text{grad}(\text{div}(\vec{u})) - \mu \text{rot}(\text{rot}(\vec{u})) \quad (14)$$

**I – 5 - Solution de l'équation de propagation :**

Le vecteur déplacement  $\vec{u}$  solution de l'équation de propagation peut être décomposé en la somme d'un vecteur rotationnel  $\vec{u}_T$  et d'un vecteur irrotationnel  $\vec{u}_L$  :

$$\vec{u} = \vec{u}_L + \vec{u}_T \quad (15)$$

Avec :

$$\vec{rot}(\vec{u}_L) = \vec{0} \quad (16)$$

$$\text{div}(\vec{u}_T) = 0 \quad (17)$$

D'après l'équation (14), le vecteur  $\vec{u}_L$  est solution de l'équation :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}_L}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \Delta \vec{u}_L \quad (18)$$

Le vecteur déplacement  $\vec{u}_L$  est lié à une onde longitudinale se propageant à la vitesse de phase :

$$v_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

On obtient : 
$$\ddot{\vec{u}}_L = v_L^2 \Delta \vec{u}_L \quad (19)$$

L'onde plane est une solution particulière, elle s'écrit sous la forme suivante :

$$\vec{u}_L = \vec{A}_L \exp j(\omega t - \vec{k}_L \vec{r})$$

$\vec{k}_L$  : le vecteur d'onde de l'onde longitudinale, de module  $k_L = \frac{\omega}{v_L}$  (  $\omega$  étant la pulsation )

indique le sens de propagation.

A partir de l'hypothèse  $\vec{rot}(\vec{u}_L) = \vec{0}$ , on obtient  $\vec{k}_L \wedge \vec{A}_L = \vec{0}$  ;  $\vec{k}_L$  et  $\vec{A}_L$  sont donc colinéaires et le mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation. On en déduit que les ondes liées à  $\vec{u}_L$  sont des ondes progressive planes à polarisation longitudinale (onde de compression) se déplaçant avec une célérité  $v_L$ .

Le vecteur  $\vec{u}_T$  est solution de l'équation :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}_T}{\partial t^2} = \mu \Delta \vec{u}_T$$

Il est lié à une onde transversale se propageant à la vitesse de phase :  $v_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$

On obtient : 
$$\ddot{\vec{u}}_T = v_T^2 \Delta \vec{u}_T \quad (20)$$

L'onde plane est une solution particulière, elle s'écrit sous la forme suivante :

$$\vec{u}_T = \vec{A}_T \exp j(\omega t - \vec{k}_T \cdot \vec{r})$$

$\vec{k}_T$  : le vecteur d'onde de l'onde transversale, de module  $k_T = \frac{\omega}{v_T}$  ( $\omega$  étant la pulsation)

De  $\text{div}(\vec{u}_T) = 0$ , on déduit que  $\vec{k}_T \cdot \vec{A}_T = 0$ , et donc que  $\vec{k}_T$  et  $\vec{A}_T$  sont deux vecteurs perpendiculaires ; le mouvement est donc perpendiculaire à la direction de propagation . Les ondes décrites par  $\vec{u}_T$  sont des ondes progressives planes à polarisation transversales (ondes de cisaillement) se déplaçant avec une célérité  $v_T$ .

Les expressions des vitesses  $v_T$  et  $v_L$  montrent que la vitesse de l'onde transversale est toujours inférieure à la vitesse des ondes longitudinales, en effet :  $v_L > \sqrt{2} v_T$  [3]. En CND, cet écart de vitesse est souvent utilisé pour distinguer les deux modes.

### I – 6 - Potentiels des élongations :

Les vecteurs  $\vec{u}_L$  et  $\vec{u}_T$  dont le rotationnel et la divergence sont respectivement nuls dérivent pour le premier d'un potentiel scalaire  $\phi$  et pour le second d'un potentiel vecteur  $\vec{\psi}$ . On écrit donc :

$$\begin{aligned}\vec{u}_L &= \vec{\text{grad}}(\phi) \\ \vec{u}_T &= \vec{\text{rot}}(\vec{\psi})\end{aligned}$$

on peut écrire aussi :

$$\vec{u} = \vec{\text{grad}}(\phi) + \vec{\text{rot}}(\vec{\psi})$$

on obtient donc :

$$\Delta \phi = \frac{1}{v_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (21)$$

et

$$\Delta \vec{\psi} = \frac{1}{v_T^2} \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2} \quad (22)$$

Dans le cas d'un liquide,  $\mu = 0$ , donc il n'existe pas d'ondes transversale. Seules des ondes longitudinales se propagent dans un liquide à la vitesse de phase  $v_l = \sqrt{\frac{\lambda_l}{\rho_l}}$ . Le vecteur

déplacement, noté  $\vec{u}_l$  pour un liquide, se réduit à sa composante longitudinale. Il dérive d'un

potentiel scalaire  $\varphi_l$  tel que  $u_l = \overrightarrow{grad}(\varphi_l)$

il est solution de l'équation :

$$\Delta\varphi_l = \frac{1}{v_l^2} \frac{\partial^2 \varphi_l}{\partial t^2} \quad (23)$$

La pression mesurée par les transducteurs dans un liquide dépend simplement du potentiel  $\varphi_l$ . En effet, la pression  $p$  subie par un élément de surface du plan  $x_1 \text{ox}_2$  est par définition  $\sigma_{33}$ . L'intégration de l'équation de propagation (23) donne :

$$p = \sigma_{33} = \rho \frac{\partial^2 \varphi_l}{\partial t^2}$$

le vecteur vitesse de déplacement d'une particule du milieu étudié est donné par :

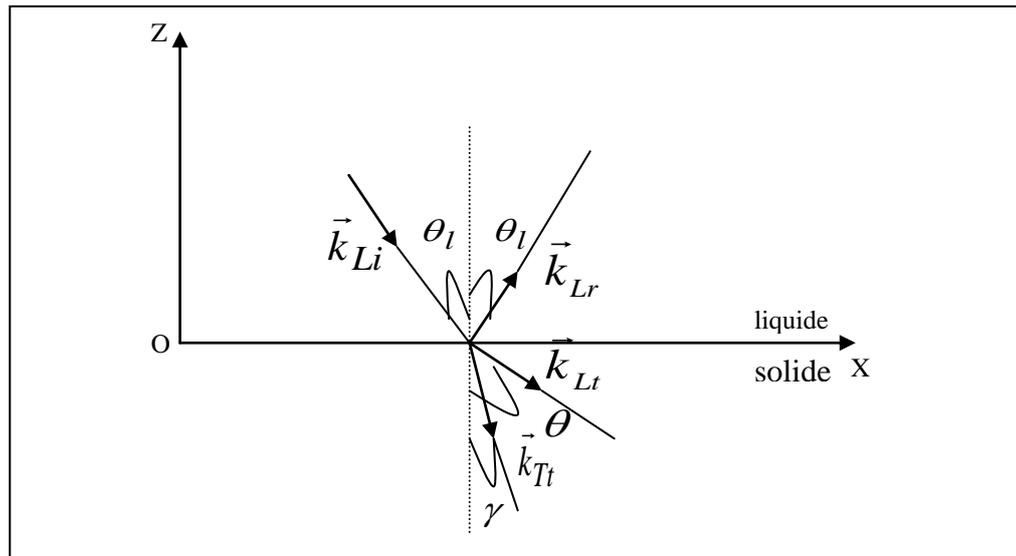
$$\vec{v} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad \text{soit } \vec{v} = -j\omega \vec{u}$$

les relations écrites pour les vecteurs  $\vec{u}$ ,  $\vec{u}_L$ ,  $\vec{u}_T$  sont applicables aux vecteurs vitesse correspondants  $\vec{v}$ ,  $\vec{v}_L$ ,  $\vec{v}_T$ .

## II - Réflexion et transmission à l'interface liquide/solide :

### II - 1 - Position du problème :

On considère une interface plane séparant un milieu fluide, caractérisé par masse volumique  $\rho_l$ , son coefficient de LAME  $\lambda_l$  ( $\mu_l = 0$ ) et par sa vitesse de phase  $v_l$ , d'un milieu solide de masse volumique  $\rho$ ,  $\lambda$  et  $\mu$  pour les coefficients de LAME,  $v_l$  pour la vitesse de phase longitudinale et  $v_t$  pour la vitesse de phase transversale. L'interface se trouve dans le plan  $z = 0$  et ses dimensions sont supposées infinies dans les directions Ox et Oy. La géométrie du problème est donnée à la figure (II-1) :



**Figure II-1 :** Réflexion et transmission à une interface liquide/solide.  
Géométrie du problème.

## II – 2 - Equation de continuité :

Dans le cas d'un problème plan, on suppose que toutes les grandeurs à définir ne dépendent que des coordonnées  $x$  et  $z$ . Ainsi, seules les composantes  $u_x$  et  $u_z$  du vecteur déplacement sont non nulles, de même seules les composantes normales  $\sigma_{zz}$  et tangentielles  $\sigma_{xz}$  de la contrainte sont non nulles.

Les ondes longitudinales et transversales se propageant dans le solide peuvent être décrites par les potentiels  $\phi$  et  $\vec{\psi}$ . Le potentiel vecteur  $\vec{\psi}$  est choisi tel que seule sa composante suivant Oy soit non nulle. Elle est notée  $\psi$ .

Les potentiels  $\phi$  et  $\vec{\psi}$  satisfont aux équations de propagation (24) et (25)

$$\Delta\phi = -k_L^2\phi \quad (24)$$

$$\Delta\vec{\psi} = -k_T^2\vec{\psi} \quad (25)$$

Dans le liquide, il suffit d'un potentiel scalaire  $\phi_l$  pour décrire les seules ondes longitudinales qui se propagent à la vitesse  $v_l$ . Le potentiel satisfait l'équation de propagation (26) :

$$\Delta\phi_l = -k_l^2\phi_l \quad (26)$$

Les composantes du déplacement et de la contrainte s'expriment en fonction des potentiels de la façon suivante :

$$u_x = \frac{\partial\phi}{\partial x} - \frac{\partial\psi}{\partial z}$$

$$u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$$\sigma_{xz} = \mu \left( 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right)$$

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu) \Delta \phi + 2\mu \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)$$

Les conditions de continuité à l'interface liquide/solide sont au nombre de trois .Elles doivent vérifier la continuité de la composante normale du déplacement  $u_z$ , la continuité de la composante normale de la contrainte  $\sigma_{zz}$  et de sa composante tangentielle  $\sigma_{xz}$  ; pour cette dernière, il suffit qu'elle soit nulle à l'interface.

$$\begin{cases} u_{z_l} = u_z \\ \sigma_{xz_l} = \sigma_{xz} = 0 \\ \sigma_{zz_l} = \sigma_{zz} \end{cases} \quad (27)$$

Dans ces expressions les composantes indicées par l concernent le liquide, celles non indicées concernent le solide.

### III – La propagation dans les structures multicouches – Coefficient de réflexion et de transmission :

Pour étudier la diffusion acoustique d'un milieu stratifié plan composé de n couches solides, les travaux de Brekhovskikh [5] et d'autres auteurs [6-10] utilisent une méthode qui repose sur des formules de récurrences liant les amplitudes des ondes dans deux couches voisines. Dans ce paragraphe, nous allons reprendre ces travaux dans la même optique de l'étude de la diffusion acoustique d'une strate plane.

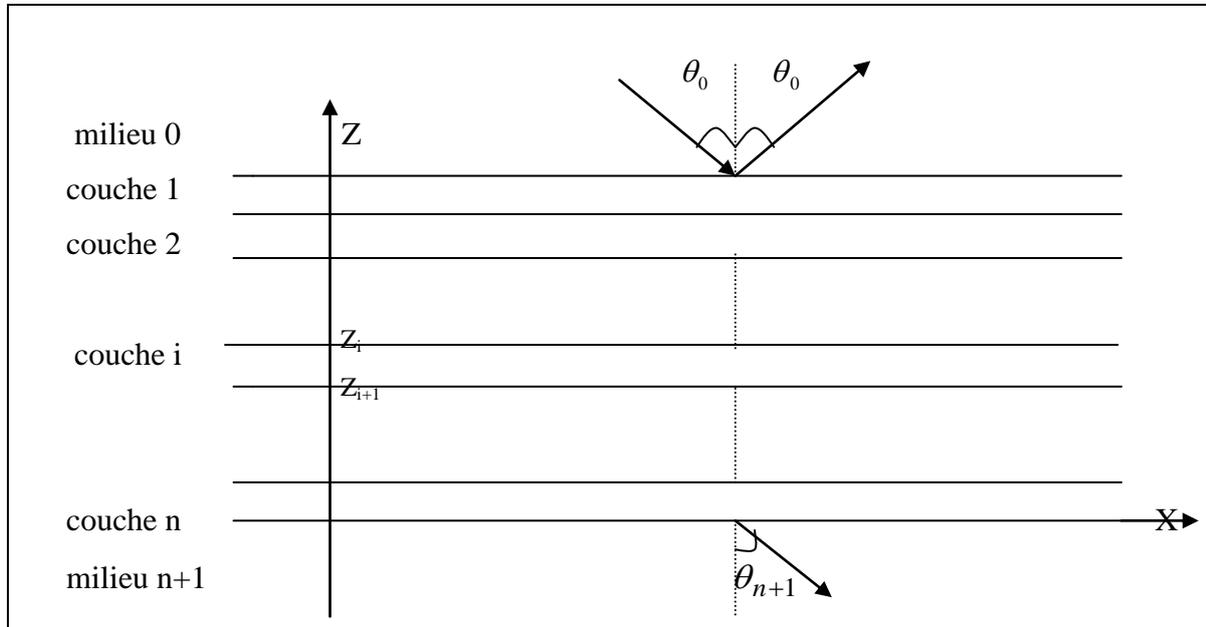
#### III-1- Contraintes et déplacements:

On considère un empilement de n couches planes, élastiques, homogènes et isotropes, d'épaisseur  $d_n$ , compris entre deux fluides non visqueux étant considérés en tant que deux milieux semi-infinis. Chaque couche i du milieu multicouche est définie par sa masse volumique  $\rho_i$ , ses coefficients de LAME  $\lambda_i$  et  $\mu_i$ , les vitesses longitudinale  $v_{Li}$  et transversale  $v_{Ti}$  et de son épaisseur  $d_i$ . On suppose que le système est exposé à une onde plane monochromatique de pulsation  $w$  sous l'incidence  $\theta_0$  (Figure II-2).

Les couches sont supposées d'extension infinie dans le plan (xOy), il ne peut donc y avoir création d'ondes stationnaires dans la longueur ou la largeur des plaques composant le

système. Les milieux extrêmes étant considérés comme semi-infinis, ils ne peuvent être le siège d'une résonance d'épaisseur.

Le signal réfléchi dans le milieu supérieur provient des multiples réflexions-réfractions dans les différentes couches de l'empilement. Il en est de même pour l'onde transmise dans le substrat.



**Figure(II-2):** Réflexion et transmission par un milieu stratifié plan composé de  $(n)$  couches solides. Géométrie du problème.

La détermination des coefficients de réflexion et de transmission d'un empilement nécessite la connaissance des expressions analytiques des ondes se propageant dans les milieux extrêmes en fonction des paramètres acoustique du système.

L'onde incidente, sur la partie supérieure du système, se propage de proche en proche dans chacun des éléments de la structure. Cette propagation donne lieu à de multiples réflexions et transmissions, de sorte que les ondes réfléchies et transmises aux extrémités de l'empilement ne peuvent être calculées qu'après détermination des modes présents dans chacune des couches.

Les ondes générées dans la couche  $i$  dépendent de celles existant dans les couches adjacentes. Elles sont liées par les conditions aux limites, ainsi que par la loi de Snell-Descartes.

Les conditions aux limites utilisées pour caractériser les interfaces sont celles définies par PILARSKI [11]. Ces conditions aux limites s'appliquent sur les déplacements et les contraintes, il est donc nécessaire de travailler avec l'expression de ces grandeurs en fonction des coefficients caractérisant les ondes présentes dans la strate étudiée.

Considérons la  $i^{\text{ème}}$  couche de la structure, deux types d'ondes s'y propagent :

- un mode longitudinal décrit par le potentiel scalaire  $\phi_i$ ,
- un mode transverse décrit par le potentiel vecteur  $\vec{\psi}_i$ .

Le potentiel vecteur peut être choisi de telle façon que seule sa composante en (y) soit non nulle, ainsi :  $\psi_{iy} = \psi_i$ .

De plus, l'onde étant à polarisation verticale, les potentiels vecteur et scalaire ne dépendent pas de la coordonnée y. les déplacements et les contraintes dans la couche i peuvent s'exprimer en fonction des potentiels suivants :

$$\begin{aligned}\phi_i &= [A_i \exp(j\alpha_i z) + B_i \exp(-j\alpha_i z)] \exp j(\tau x - \omega t) \\ \psi_i &= [C_i \exp(j\beta_i z) + D_i \exp(-j\beta_i z)] \exp j(\tau x - \omega t)\end{aligned}\quad (28)$$

$$\text{avec } \begin{cases} \tau = K_{Li} \sin \theta_{Li} = K_{Ti} \sin \theta_{Ti} = \dots \text{composante en } x \text{ des vecteurs d'onde} \\ \alpha_i = \sqrt{K_{Li}^2 - \tau^2} \text{ composante en } z \text{ du vecteur d'onde pour le mode longitudinal} \\ \beta_i = \sqrt{K_{Ti}^2 - \tau^2} \text{ composante en } z \text{ du vecteur d'onde pour le mode transverse} \end{cases}$$

$$\text{et } \begin{cases} K_{Li} = 2\pi \cdot f / v_{Li} & \text{nombre d'onde pour le mode longitudinal} \\ K_{Ti} = 2\pi \cdot f / v_{Ti} & \text{nombre d'onde pour le mode transverse} \\ v_{Ti} \text{ et } v_{Li} & \text{vitesse longitudinale et transverse dans la couche } i \end{cases}$$

Les quatre coefficients  $A_i, B_i, C_i$  et  $D_i$  définissent complètement le système d'ondes existant dans la couche i.

Les composantes tangentielles et normales du déplacement et de la contrainte dans la couche i s'écrivent :

$$u_x^{(i)} = \frac{\partial \phi_i}{\partial x} - \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \qquad u_z^{(i)} = \frac{\partial \phi_i}{\partial z} + \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \quad (29)$$

$$\sigma_{xz}^{(i)} = \mu \left( \frac{\partial u_x^{(i)}}{\partial z} + \frac{\partial u_z^{(i)}}{\partial x} \right) \qquad \sigma_{zz}^{(i)} = \lambda \left( \frac{\partial u_x^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial u_z^{(i)}}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_z^{(i)}}{\partial z} \quad (30)$$

On représente ces composantes sous forme de vecteur :

$$[Y^{(i)}(z)] = [u_x^{(i)}(z), u_z^{(i)}(z), \sigma_{zz}^{(i)}(z), \sigma_{xz}^{(i)}(z)]^t, \text{ où } t \text{ est le symbole de transposition.}$$

D'autre part, les amplitudes des potentiels dans la couche i peuvent être représentées sous la forme vectorielle:

$$[X^{(i)}] = [A_i + B_i, A_i - B_i, C_i - D_i, C_i + D_i]^t$$

Sur les interfaces supérieure et inférieure de la couche  $i$ , Les composantes du vecteur  $[Y^{(i)}]$  sont exprimées en fonction des amplitudes des potentiels en remplaçant respectivement  $z$  par  $z_i$  et par  $z_{i+1}$ .

Ainsi nous obtenons deux systèmes matriciels:

Pour l'interface supérieure :

$$[Y^{(i)}(z_i)] = [I^{(i)}(z_i)] [X^{(i)}] \quad (31)$$

où

$$[I^{(i)}(z_i)] = \begin{bmatrix} j\tau \cos P_i & -\tau \sin P_i & -j\beta_i \cos q_i & \beta_i \sin q_i \\ -\alpha_i \sin P_i & j\alpha_i \cos P_i & -\tau \sin q_i & j\tau \cos q_i \\ -e_i \cos P_i & -j e_i \sin P_i & -g_i \beta_i \cos q_i & -j g_i \beta_i \sin q_i \\ -j g_i \alpha_i \sin P_i & -g_i \alpha_i \cos P_i & j e_i \sin q_i & e_i \cos q_i \end{bmatrix}$$

$$P_i = \alpha_i z_i \quad q_i = \beta_i z_i$$

$$e_i = (\lambda_i K_{Li}^2 + 2\mu_i \alpha_i^2) = \mu_i (\beta_i^2 - \tau^2)$$

$$g_i = 2\mu_i \tau$$

Pour l'interface inférieure :

$$[Y^{(i)}(z_{i+1})] = [I^{(i)}(z_{i+1})] [X^{(i)}] \quad (32)$$

$$\text{où} \quad [I^{(i)}(z_{i+1})] = \begin{bmatrix} j\tau \cos P_{i+1} & -\tau \sin P_{i+1} & -j\beta_i \cos q_{i+1} & \beta_i \sin q_{i+1} \\ -\alpha_i \sin P_{i+1} & j\alpha_i \cos P_{i+1} & -\tau \sin q_{i+1} & j\tau \cos q_{i+1} \\ -e_i \cos P_{i+1} & -j e_i \sin P_{i+1} & -g_i \beta_i \cos q_{i+1} & -j g_i \beta_i \sin q_{i+1} \\ -j g_i \alpha_i \sin P_{i+1} & -g_i \alpha_i \cos P_{i+1} & j e_i \sin q_{i+1} & e_i \cos q_{i+1} \end{bmatrix}$$

$$\text{avec} \quad P_{i+1} = \alpha_i z_{i+1} \quad q_{i+1} = \beta_i z_{i+1}$$

Les déplacements et les contraintes à l'interface supérieure peuvent donc s'exprimer en fonction de ces mêmes grandeurs à l'interface inférieure par la relation :

$$[Y^{(i)}(z_i)] = [I^{(i)}(z_i)] [I^{(i)}(z_{i+1})]^{-1} [Y^{(i)}(z_{i+1})] \quad (33)$$

### III-2- Les conditions aux limites : Modèle de Pilarski

Les conditions aux limites considérées dans cette étude sont celles définies par Pilarski [5] qui suppose la continuité des contraintes et une relation de proportionnalité entre les contraintes et la différence des composantes du déplacement à chaque interface:

$$\begin{aligned}\sigma_{zz}^+ &= \sigma_{zz}^- & ; & \quad \sigma_{xz}^+ = \sigma_{xz}^- \\ \sigma_{zz}^+ &= P_N(u_x^+ - u_x^-) & ; & \quad \sigma_{xz}^+ = P_T(u_x^+ - u_x^-)\end{aligned}$$

$P_N, P_T$  sont les paramètres qui caractérisent l'interface ; ils s'expriment en  $N/m^3$  ;  $u_x^+$  et  $u_z^+$  désignent les composantes du déplacement dans le premier milieu incident ;  $u_x^-$  et  $u_z^-$  représentent les composantes du déplacement dans le second milieu. L'écriture des relations de proportionnalité ci-dessus sous la forme  $u_{z,x}^+ = u_{z,x}^- + \sigma / P_{N,T}$  montre que lorsqu'on donne au paramètre  $P_{N,T}$  une valeur très grande le terme  $\sigma / P_{N,T}$  tend vers zéro ce qui donne l'égalité des composantes du déplacement de part et d'autre des interfaces, c'est le cas d'un contact parfait.

Ainsi, à chaque interface, les vecteurs  $[u_x^+, u_z^+, \sigma_{zz}^+, \sigma_{xz}^+]$  et  $[u_x^-, u_z^-, \sigma_{zz}^-, \sigma_{xz}^-]$  sont reliés par l'équation :

$$\begin{bmatrix} u_x^+ \\ u_z^+ \\ \sigma_{zz}^+ \\ \sigma_{xz}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1/P_T \\ 0 & 1 & 1/P_N & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x^- \\ u_z^- \\ \sigma_{zz}^- \\ \sigma_{xz}^- \end{bmatrix} \quad (34)$$

que l'on peut écrire sous forme :  $[Y^+] = [P_{NT}] [Y^-]$  avec  $[P_{NT}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1/P_T \\ 0 & 1 & 1/P_N & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

est la matrice de passage entre les interfaces.

### III-3- La relation entre les vecteurs de déplacement et de contrainte aux interfaces extrêmes :

Les composantes du déplacement et de la contrainte à l'interface inférieure de la couche  $i$  sont reliées à celles de l'interface supérieure de la  $(i+1)^{\text{ème}}$  couche par l'équation:

$$[Y^{(i)}(z_{i+1})] = [P_{NT}^{(i)}] [Y^{(i+1)}(z_{i+1})] \quad (35)$$

En injectant (35) dans (33), nous obtenons la relation entre les composantes du déplacement et de la contrainte dans les couches  $i$  et  $i+1$ :

$$[Y^{(i)}(z_i)] = [I^{(i)}(z_i)] [I^{(i)}(z_{i+1})]^{-1} [P_{NT}^{(i)}] [Y^{(i+1)}(z_{i+1})] = a^{(i)} [Y^{(i+1)}(z_{i+1})] \quad (36)$$

Les éléments de la matrice  $a^{(i)}$  sont exprimées en fonction des impédances acoustiques des ondes longitudinales et transversales  $Z_{Li}$  et  $Z_{Ti}$  dans la couche  $i$ , des angles  $\theta_{Li}$  et  $\theta_{Ti}$  donnant la direction de propagation de ces ondes par rapport à la normale à la couche  $i$  et des paramètres caractérisant le couplage  $P_N$  et  $P_T$ .

En appliquant cette démarche depuis la première couche jusqu'à la dernière, nous obtenons la relation entre les vecteurs de déplacement et de contrainte aux interfaces extrêmes. Si l'on note  $H$  la hauteur totale de l'empilement, on obtient la relation suivante :

$$[Y^{(1)}(H)] = \prod_{j=1}^n a^{(j)} [Y^{(n)}(0)] = [A] [Y^{(n)}(0)] \quad (37)$$

Les milieux extrêmes étant deux fluides non visqueux, les contraintes tangentielles  $\sigma_{xz}^{(1)}(H)$  et  $\sigma_{xz}^{(n)}(0)$  sont nulles, l'équation (37) conduit donc à:

$$A_{41}u_x^{(n)}(0) + A_{42}u_z^{(n)}(0) + A_{43}\sigma_{zz}^{(n)}(0) = 0 \quad (38)$$

D'autre part, selon l'équation (37), les composantes normales de la contrainte et du déplacement aux interfaces extrêmes sont reliées par les relations :

$$\begin{aligned} u_z^{(1)}(H) &= M_{22}u_z^{(n)}(0) + M_{23}\sigma_{zz}^{(n)}(0) \\ \sigma_{zz}^{(1)}(H) &= M_{32}u_z^{(n)}(0) + M_{33}\sigma_{zz}^{(n)}(0) \end{aligned} \quad (39)$$

$$\text{Où} \quad M_{ij} = A_{ij} - \frac{A_{4j}A_{i1}}{A_{41}} \quad i, j = 2, 3 \quad (40)$$

#### III-4- les expressions du coefficient de réflexion et de transmission :

Les milieux extrêmes étant des fluides non visqueux, ils ne peuvent être le siège que d'une propagation à polarisation longitudinale.

Dans le milieu supérieur, le phénomène ondulatoire est décrit par le potentiel scalaire de l'expression suivante :

$$\phi^{(0)}(x, z, t) = [\phi_R \cdot \exp j\alpha_0(z-H) + \phi_0 \cdot \exp -j\alpha_0(z-H)] \cdot \exp j(\tau x - wt) \quad (41)$$

$$\text{avec} \begin{cases} \phi_0 : \text{amplitude de l'onde incidente} \\ \phi_R : \text{amplitude de l'onde réfléchi} \\ \alpha_0 : \text{composante en } z \text{ du vecteur d'onde} \\ \tau : \text{composante en } x \text{ du vecteur d'onde} \end{cases}$$

Pour le milieu inférieur, le potentiel scalaire a l'expression suivante :

$$\phi^{(n+1)}(x, z, t) = \phi_{TL} \cdot \exp(-j\alpha_{n+1}z) \cdot \exp(j(\tau x - \omega t)) \quad (42)$$

$$\text{avec} \begin{cases} \phi_{TL} : \text{amplitude de l'onde transmise dans le substrat} \\ \alpha_{n+1} : \text{composante en } z \text{ du vecteur d'onde} \\ \tau : \text{composante en } x \text{ du vecteur d'onde} \end{cases}$$

En appliquant les équations (29) et (30) à l'expression des potentiels (41) et (42), on trouve :

$$\begin{cases} u_z^{(1)}(H) = -j\alpha_0\phi_0(1-R) \end{cases} \quad (43)$$

$$\begin{cases} \sigma_{zz}^{(1)}(H) = -\rho_0\omega^2\phi_0(1+R) \end{cases} \quad (44)$$

avec  $R = \phi_R / \phi_0$  coefficient de réflexion de la structure

$$\begin{cases} u_z^{(n)}(0) = -j\alpha_{n+1}\phi_{TL} \end{cases} \quad (45)$$

$$\begin{cases} \sigma_{zz}^{(n)}(0) = -\rho_{n+1}\omega^2\phi_{TL} \end{cases} \quad (46)$$

La substitution des expressions (43), (44), (45) et (46) dans la relation (39) conduit aux expressions analytiques du coefficient de réflexion et de transmission suivantes :

$$R = \frac{M_{32} - j\omega M_{33}Z_{n+1} + \omega(M_{23}\omega Z_{n+1} + jM_{22})Z_0}{M_{32} - j\omega M_{33}Z_{n+1} - \omega(M_{23}\omega Z_{n+1} + jM_{22})Z_0} \quad (47)$$

$$T = \frac{\phi_{TL}}{\phi_0} = \frac{-2j\omega Z_{n+1}}{M_{32} - j\omega M_{33}Z_{n+1} - \omega(M_{23}\omega Z_{n+1} + jM_{22})Z_0} \quad (48)$$

$$\text{avec} \quad Z_0 = Z_{n+1} = \frac{\rho_0 v_{L0}}{\cos\theta_{L0}} = \frac{\rho_0 \omega}{\alpha_0}.$$

#### IV - Ondes guidées : Courbes de dispersion

Dès lors que le milieu de propagation des ondes élastiques n'est pas illimité, les solutions de l'équation du mouvement doivent aussi satisfaire des conditions aux limites mécaniques. La première approche théorique des ondes se propageant sur la surface libre d'un solide élastique semi-infini fut exposée par Rayleigh en 1885. Dans le cas d'un solide homogène isotrope, l'onde

de surface aussi appelée onde de Rayleigh [12] est polarisée elliptiquement dans le plan sagittal et son amplitude s'atténue sur quelques longueurs d'ondes dans la profondeur du milieu.

En 1911, Love [13] montra l'existence d'une onde transversale polarisée horizontalement, se propageant dans une couche déposée sur un substrat semi-infini.

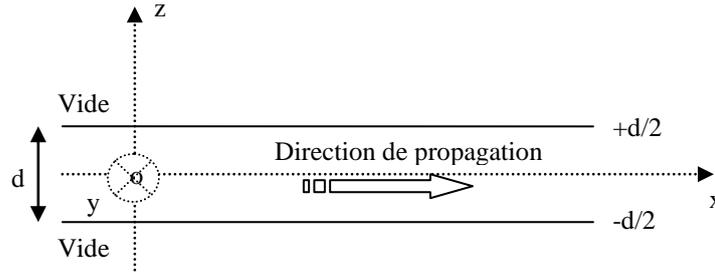
Dans le cas de deux solides semi-infinis, la combinaison des ondes de Rayleigh dans chacun des milieux donne naissance à une onde d'interface mise en évidence par Stoneley [14] en 1924.

Si l'on considère un milieu d'épaisseur finie (cas d'une plaque dans le vide) deux ondes de surface peuvent se propager sans interagir sur chacune des interfaces libres tant que l'épaisseur de la plaque est grande devant la longueur d'onde  $\lambda$ . Lorsque l'épaisseur de la plaque est du même ordre de grandeur que  $\lambda$ , Lamb [15] mit en évidence en 1917 les ondes résultant du couplage des différentes ondes partielles aux interfaces solide/vide dans un matériau homogène isotrope. Ces ondes de plaque, dites ondes de Lamb, sont dispersives et ont la particularité de mettre en mouvement la totalité de l'épaisseur de la plaque. Il existe deux types de modes guidés distincts : les modes symétriques et antisymétriques.

Les ondes de plaque s'établissent donc comme la superposition d'une série discrète de modes guidés. Le guide d'onde confère leur caractère dispersif aux modes de Lamb. L'étude de la propagation des ondes de Lamb requiert le calcul des courbes de dispersion, qui représentent les profils du nombre d'onde en fonction de la fréquence.

Pour le calcul des courbes de dispersion des ondes de Lamb dans une plaque mince de matériau homogène isotrope, Viktorov [16] décompose le champ acoustique de déplacement à l'intérieur du milieu de propagation comme la somme du gradient d'un potentiel scalaire  $\phi$  et du rotationnel d'un potentiel vecteur  $\vec{\psi}$  :  $\vec{u} = \vec{\nabla}\phi + \vec{\nabla} \wedge \vec{\psi}$ . Nous reprenons cette méthode dite des potentiels pour l'étude des modes guidés dans une plaque d'un matériau homogène et isotrope.

La plaque étudiée est d'extension infinie dans les directions  $x$  et  $y$ , et d'épaisseur finie  $d$  suivant  $z$  (Figure II-3). Les caractéristiques du matériau sont données par sa masse volumique  $\rho$ , les vitesses des ondes longitudinales et transversales  $\vec{v}_L$  et  $\vec{v}_T$ . On considérera la propagation d'une onde plane non-uniforme suivant l'axe ( $ox$ ) qui représente la ligne médiane de la plaque étudiée.



**Figure II-3** : Géométrie de la plaque homogène isotrope : axes de référence

Les potentiels sont invariants par translation dans la direction ( $oy$ ), donc toutes les grandeurs physiques ont des dérivées partielles nulles par rapport à la variable  $y$ . Les potentiels scalaires et vecteurs ont donc les formes suivantes:

$$\Phi = F(z) \exp j(kx - \omega t) \quad (49)$$

$$\vec{\Psi} = \vec{G}(z) \exp j(kx - \omega t) \quad (50)$$

Par la suite on omettra le terme de phase  $\exp j(kx - \omega t)$  pour ne s'intéresser qu'aux variations des amplitudes  $F$ ,  $G_x$ ,  $G_y$  et  $G_z$  des potentiels représentatifs du déplacement particulière. Pour l'onde se propageant avec un nombre d'onde  $k$  à la pulsation  $\omega$ , les composantes du déplacement sont donc :

$$\begin{aligned} u_x &= jkF(z) - \frac{\partial G_y(z)}{\partial z} \\ u_z &= jkG_y(z) + \frac{\partial F(z)}{\partial z} \\ u_y &= -jkG_z(z) + \frac{\partial G_x(z)}{\partial z} \end{aligned} \quad (51)$$

On remarque que les deux premières équations de (51) sont couplées et ne dépendent que des potentiels scalaires  $F$  et  $G_y$ . Elles décrivent l'onde de Lamb qui ne possède que des composantes  $u_x$  et  $u_z$  non nulles (elle est polarisée dans le plan sagittal). La troisième équation est indépendante et décrit l'onde transversale polarisée suivant ( $oy$ ) i.e. horizontalement. On l'appelle onde TH et dans ce cas il y a découplage de sa vibration et de celle de l'onde de Lamb.

On s'intéresse désormais uniquement à l'onde de Lamb. En injectant (49) et (50) dans les équations de propagation (21) et (22), on obtient les équations suivantes :

$$\frac{\partial^2 F(z)}{\partial z^2} + p^2 F(z) = 0 \quad (52)$$

$$\frac{\partial^2 G_y(z)}{\partial z^2} + q^2 G_z(z) = 0 \quad (53)$$

$$\text{avec } p = \sqrt{K_L^2 - k^2} ; q = \sqrt{K_T^2 - k^2}$$

On appelle  $K_L = w/v_L$  et  $K_T = w/v_T$  les nombres d'onde des ondes planes longitudinales et transversales qui se propagent dans le milieu respectivement avec les vitesses de phase  $\vec{v}_L$  et  $\vec{v}_T$ .

Les potentiels solutions de ces équations de propagation doivent satisfaire les conditions aux limites d'annulation des contraintes normales et tangentielles sur les surfaces libres :

$$\sigma_{zz}(z = \pm \frac{d}{2}) = \sigma_{xz}(z = \pm \frac{d}{2}) = 0 \quad (54)$$

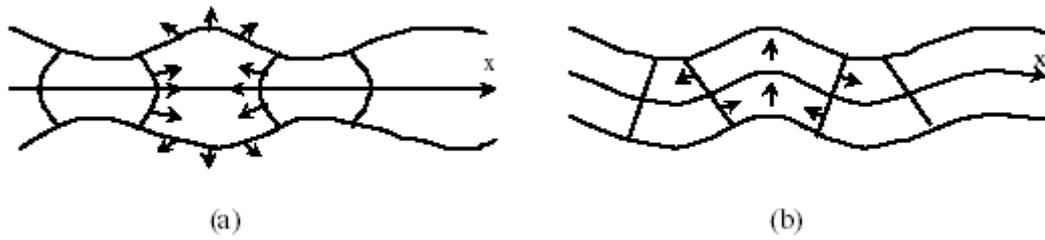
Sous ces conditions, on obtient les solutions suivantes :

$$\begin{aligned} F(z) &= A \cos(p.z + \xi) \\ G_y(z) &= B \sin(q.z + \xi) \end{aligned} \quad \text{avec } \xi = 0 \text{ ou } \frac{\pi}{2} \quad (55)$$

Les valeurs du paramètre  $\xi$  sont imposées par les conditions aux limites. Pour une valeur de  $x$  donnée, les parités des potentiels  $\phi$  et  $\psi_y$  en fonction de  $z$  sont opposées. De plus, pour chacune des valeurs de  $\xi$ , la substitution des expressions (55) dans les équations aux limites (54) donne un système linéaire de deux équations aux inconnues  $A$  et  $B$ . Ce système admet des solutions non identiquement nulles si et seulement si son déterminant s'annule, ce qui conduit à l'équation de dispersion de l'onde de Lamb :

$$(k^2 - q^2)^2 \tan(q \frac{d}{2} + \xi) + 4k^2 pq \tan(p \frac{d}{2} + \xi) = 0 \quad (56)$$

On peut aisément vérifier que dans le cas où  $\xi$  est nul, la composante  $u_x$  (resp.  $u_z$ ) du déplacement est une fonction paire (resp. impaire) de  $z$ . Il s'agit donc d'un mode symétrique ou encore mode de compression (Figure II-4 (a)). *A contrario*, dans le cas où  $\xi$  vaut  $\frac{\pi}{2}$ ,  $u_x(z)$  est impaire alors que  $u_z(z)$  est paire. Il s'agit d'un mode antisymétrique, encore appelé mode de flexion (Figure II-4 (b)).



**Figure II-4 :** Modes de Lamb symétrique (a) et antisymétrique (b) dans un matériau homogène isotrope

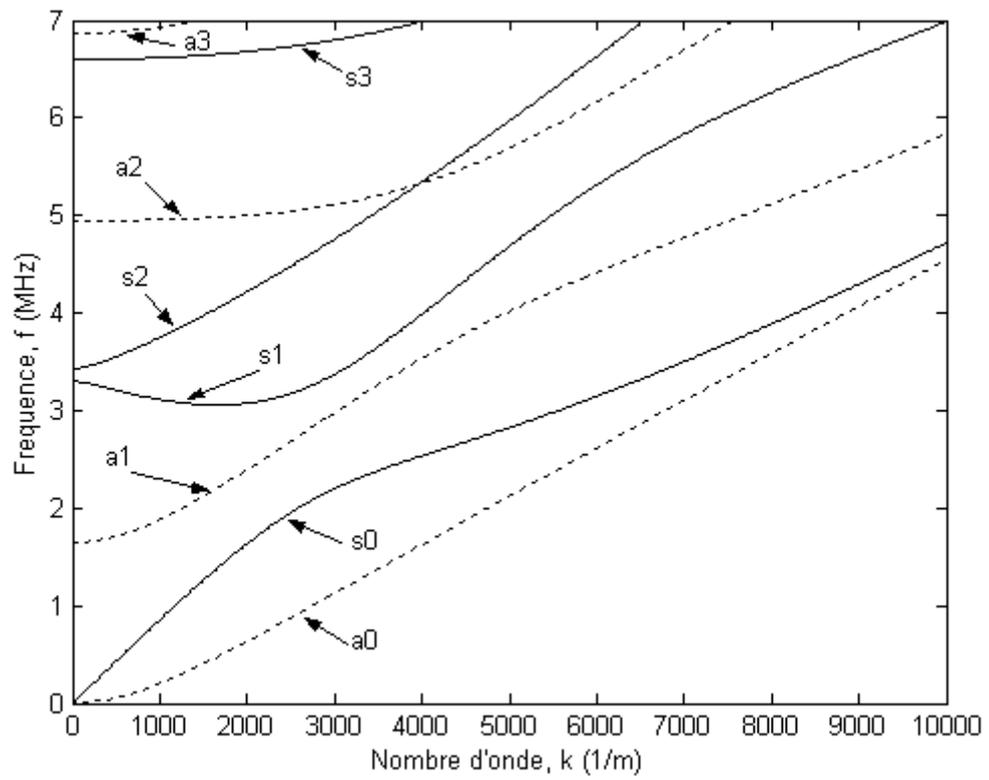
En réécrivant l'équation (56) pour chacune des valeurs de  $\xi$ , on obtient donc les équations de dispersion des modes symétriques ( $\xi = 0$ ) et antisymétriques ( $\xi = \frac{\pi}{2}$ ):

$$(k^2 - q^2)^2 \tan\left(q \frac{d}{2}\right) + 4k^2 pq \cdot \tan\left(p \frac{d}{2}\right) = 0 \quad (\text{symétriques})$$

$$(k^2 - q^2)^2 \cot\left(q \frac{d}{2}\right) + 4k^2 pq \cdot \cot\left(p \frac{d}{2}\right) = 0 \quad (\text{antisymétriques})$$
(57)

La résolution des équations (57) permet de déterminer les nombres d'ondes des modes symétriques et antisymétriques en fonction des paramètres élastiques  $\lambda$  et  $\mu$  (coefficients de LAME) contenus dans les quantités  $p$  et  $q$ , et de l'épaisseur  $d$  de la plaque. Ceci n'est analytiquement possible que dans les domaines asymptotiques où  $\omega$  tend vers zéro ou l'infini. Généralement, on résout ces équations numériquement afin de tracer l'évolution du nombre d'onde  $k$  en fonction de la fréquence. A titre d'exemple, par une méthode numérique sera présentée ultérieurement dans le chapitre IV, nous avons déterminé les courbes de dispersion d'une plaque d'aluminium dont les caractéristiques à prendre en compte sont :

$$v_L = 6450 \text{ m/s}, \quad v_T = 3100 \text{ m/s} \text{ et } \rho = 2700 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{Figure II-5})$$



**Figure II-5 :** Modes de Lamb symétriques (trait plein) et antisymétriques (trait pointillé) dans une plaque d'aluminium

**Conclusion :**

La procédure mathématique, pour la détermination de l'équation de propagation ultrasonore dans les milieux élastiques, homogènes, isotrope et infinis, a été exposée dans ce chapitre. Deux ondes élastiques de nature différentes peuvent se propager : Lorsque la polarisation est parallèle à la direction de propagation, on a à faire à une onde longitudinale et l'onde dont la polarisation est perpendiculaire à la direction de propagation est l'onde transverse ou transversale. Ces deux ondes évoluent indépendamment l'une de l'autre et leurs vitesses de propagation sont distinctes. Ces dernières sont directement liées aux propriétés élastiques du milieu.

Par ailleurs, nous avons présenté une étude de la diffusion acoustique par les structures stratifiées. Cette étude a permis la détermination des coefficients de réflexion et de transmission des structures. Nous avons également présenté la procédure mathématique pour la détermination des deux équations régissant la propagation des ondes guidées par une plaque libre. L'une de ces équations représente les modes symétriques et l'autre représente les modes antisymétriques. La résolution numérique de ces équations permet de déterminer les nombres d'ondes des modes symétriques et antisymétriques en fonction des paramètres élastiques et de l'épaisseur de la plaque.

**Références bibliographiques**

- [1] E. DIEULESAINT, D. ROYER. Ondes élastiques dans les solides. Masson, Paris, 1974.
- [2] I. A. VICTOROV. Rayleigh and Lamb Waves. Academic Press, New York, 1967.
- [3] D. ROYER ET E. DIEULESAINT. Onde Élastiques dans les Solides – Tome 1: Propagation Libre et Guidée. Masson, Paris, 1996.
- [4] G. S. KINO. AcousticWaves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing. Prentice Hall, New Jersey, 1987.
- [5] L. M. BREKHOVSKIKH, Waves in Layered Media, Academic Press, New York, 1960.
- [6] D.L. FOLDS, C.D. LOGGINS. J. Acoust. Soc. Am., 62, pp. 1102 – 1109, 1977.
- [7] T.KUNDU. J. Acoust. Soc. Am., 83, pp. 18 – 24, 1988.
- [8] A. H.NAYFEH, T. W. Taylor. J. Acoust. Soc. Am., 84, pp. 2187 – 2191, 1988.
- [9] A. H. NAYFEH. J. Appl. Phys, 63, pp. 1328 – 1333, 1988.
- [10] O. LENOIR. Thèse de doctorat de l'université du Havre, 1990.
- [11] A. PILARSKI, J. L. ROSE, K. BALASUBRAMANIAM J. Acoust. Soc. Am. 87(2), pp. 532 – 542, 1990.
- [12] L. RAYLEIGH. On waves propagating along the plane of an elastic solid. Proc. London Math. Soc., Vol. 17, pp.4-11, 1885.
- [13] A.E. LOVE. Some problems of geodynamics. Cambridge University Press. London. pp. 180, 1911.
- [14] R. STONELEY. Elastic waves at the surface of separation of two solids. Conf. of the royal society. pp. 416-428, 1924.
- [15] H. LAMB. On waves in an elastic plate. Conf of the royal society. pp. 114-128, 1917.
- [16] I.A. VIKTOROV. Rayleigh and Lamb waves. Plenum, New York. pp. 154, 1967.

## **CHAPITRE III**

**Contrôle ultrasonore non destructif de la qualité du collage à partir de l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion**

**Introduction :**

Comme nous l'avons indiqué dans l'introduction générale, notre objectif est de mettre en évidence la possibilité de contrôler et d'évaluer, à l'aide des techniques ultrasonores, un collage métal/adhésif/métal. Pour ce faire, nous proposons dans ce chapitre d'étudier l'efficacité de la technique basée sur l'analyse du comportement du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence à contrôler la qualité du collage de deux plaques métalliques.

Au cours de sa durée de vie en service, l'assemblage collé est soumis à des conditions environnementales très variées, qui vont influencer sur ses propriétés mécaniques en provoquant la dégradation de la couche de colle qui se traduit par la diminution de la raideur de l'interface adhésif/substrats jusqu'à la perte du contact entre l'adhésif et l'adhérent (décollements d'interface). Cet endommagement peut se produire durant le processus du collage. Il est donc nécessaire de surveiller l'état de l'assemblage collé à divers stades de son utilisation, tant que possible sans le dégrader pour des raisons évidentes de coût de fabrication.

De nombreuses recherches ont été effectuées pour développer des méthodes de contrôle ultrasonores non destructif de la qualité des assemblages collés.

Pilarski[1] a présenté, un modèle complet d'une couche solide isotrope et homogène, comprise entre deux solides semi-infinis dans des conditions d'interface imparfaites. Il a calculé, par ce modèle, les coefficients de réflexion et de transmission, dans le cas d'incidence oblique, de l'onde longitudinale et l'onde transversale en fonction de l'angle d'incidence, la fréquence d'excitation, l'état d'interface et les propriétés matérielles.

Jungman et al. [2] ont analysé des propriétés d'interface dans la structure tri-couche de type métal/époxy/métal par les ondes de Lamb. L'étude montre que les coefficients de réflexion et de transmission ne sont pas très sensibles à ces propriétés d'interface.

Lavrenteyev et al [3] ont isolé l'effet de la raideur d'interface en considérant l'interaction d'onde ultrasonore avec une couche solide entre deux substrats de même matériau. Un système d'aluminium est choisi pour l'expérience ; les surfaces de contact sont rendues rudes et la pression variable est appliquée pour modéliser les changements d'interface imparfaits. Il est montré théoriquement et expérimentalement que l'augmentation de pression de contact se traduit par l'augmentation de la raideur d'interface et les minimums spectraux se décalent vers les hautes fréquences.

Faiz et Al [4] ont présenté une méthode de contrôle ultrasonore de la qualité de collage de deux plaques d'aluminium à partir de l'analyse fréquentielle de l'onde réfléchie, dans le cas d'incidence normale, par la structure tri-couche aluminium/colle/aluminium. La colle se

compose d'une résine visqueuse et de son durcisseur. Différentes qualités de collage sont obtenues en changeant la proportion en masse du durcisseur autour de la proportion optimale de 10% recommandée par le fournisseur. L'analyse fréquentielle du coefficient de réflexion a montré l'apparition, dans le cas d'un collage parfait, de deux minimums aigus correspondant à un dédoublement du mode de plaque d'aluminium. Un minimum large correspondant au mode d'épaisseur de la couche de colle, est également observé. Dans le cas d'un mauvais collage, seulement un minimum correspondant au mode de la plaque d'aluminium est observé. Le mode de la couche de colle disparaît. La confrontation de ces résultats expérimentaux aux résultats analytiques a montré que le modèle de contact développé par Pilarski [5] décrit bien le cas de contact parfait mais ne peut décrire le mauvais contact. En effet, dans le cas de mauvais contact, le mode de la couche de colle apparaît toujours sur le coefficient de réflexion analytique tandis qu'il disparaît sur le coefficient de réflexion expérimental. Les auteurs ont proposé alors une correction du modèle de contact de Pilarski pour assurer l'accord entre les résultats expérimentaux et analytiques.

Jian X.M et Al [6] ont considéré la réflexion ultrasonore d'impulsions par des interfaces pour évaluer l'état de contact à l'interface. Un modèle multicouche avec conditions aux limites de type ressort, est employé pour décrire le mauvais contact, et la réflexion ultrasonore est obtenue pour la structure en mode d'immersion. Après l'analyse des séquences d'échos ultrasonores de la structure acier-caoutchouc, la méthode de filtrage adapté est employée pour séparer les séquences d'écho et obtenir les signaux d'interface. Le décollement et le mauvais contact sont détectés et évalués par l'amplitude du signal correspondant des interfaces.

Lin et al [7] ont présenté un système de contrôle ultrasonore de la diffusion, en incidence normale, d'un assemblage de deux alliages identiques en Ti-6Al-4V pour différentes qualités d'adhésion. Trois échantillons correspondant aux cas: adhésion parfaite, mauvaise adhésion, interface rugueuse, ont été examinés. L'analyse de la diffusion ultrasonore des trois assemblages considérés a montré clairement que la nature de l'écho est directement liée à la qualité d'adhésion.

Le travail de recherche que nous allons présenter dans ce chapitre traite la caractérisation de la qualité de collage de deux plaques à partir de l'analyse fréquentielle du coefficient de réflexion ultrasonore. L'expression du coefficient de réflexion (équation (47), chapitre II) est déterminée à l'aide d'un modèle théorique basé sur le formalisme général de Brekhovskikh [8]. Ce modèle permet de prendre en compte l'influence de chacune des couches de la structure sur les signaux réémis et transmis. Ce modèle est pratique à mettre en œuvre sur ordinateur, il fournit un outil puissant permettant la simulation numérique rapide du phénomène étudié. Par

ailleurs, la qualité de contact entre les couches composant la structure est décrite par les conditions aux limites définies par Pilarski [5] (voir chapitre II).

Un code de calcul numérique de grande précision est développé sur Matlab pour le calcul du coefficient de réflexion, en incidence normale, des structures tri-couche. Une nouvelle interprétation de l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion pour différentes qualités de contact est proposée. Trois structures sont considérées: aluminium/colle/aluminium ; acier/colle/acier et zircaloy/colle/zircaloy.

## **I – Caractérisation d'un collage de deux tôles d'aluminium:**

### **Résultats numériques et discussions**

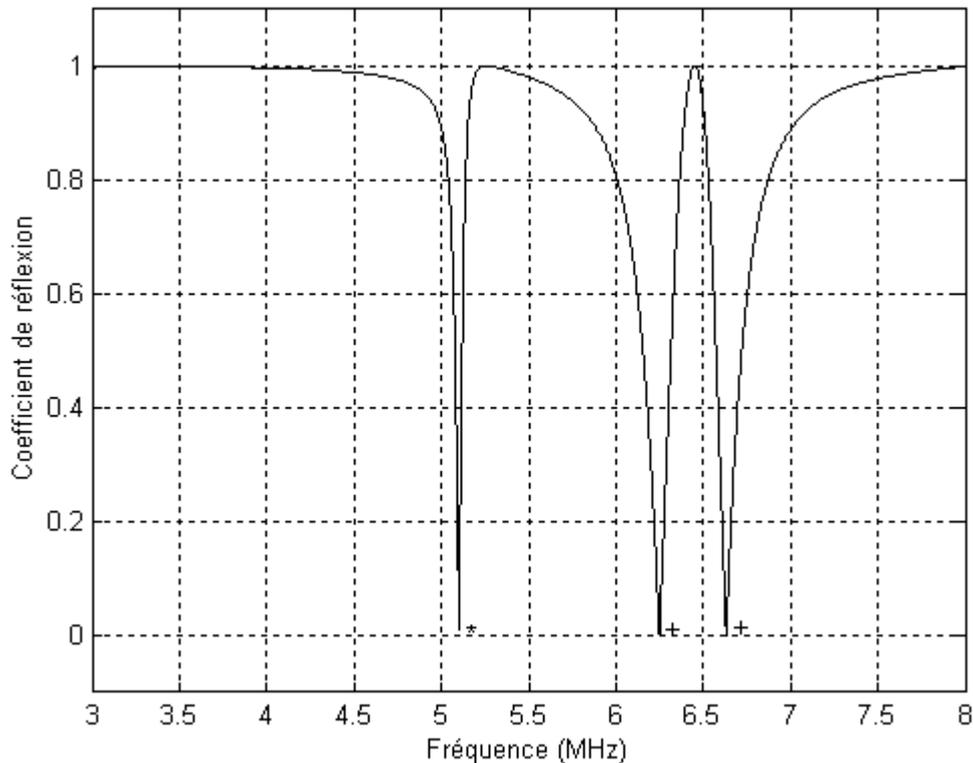
Nous considérons une structure composée de deux plaques d'aluminium, de même épaisseur, liées par une couche de colle (aluminium/colle/aluminium). La colle considérée dans cette étude se compose d'une résine visqueuse et de son durcisseur. Ses paramètres élastiques varient avec la concentration du durcisseur. Les propriétés géométriques et mécaniques de l'aluminium et de la colle (10% de durcisseur recommandée par le fournisseur) sont données dans le tableau.1 ci-dessous. Ils sont identiques à celles considérés dans [4]. La structure est immergée dans l'eau d'une densité  $\rho=1000 \text{ Kg/m}^3$  et de vitesse de propagation longitudinal  $V_L=1400\text{m.s}^{-1}$ . Un programme de grande précision est développé sur Matlab pour déterminer l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, dans le cas d'incidence normale, selon son expression (équation (47) du chapitre II) déterminée par le modèle analytique basé sur le formalisme général de Brekhovskikh [8] en introduisant les conditions aux limites définies par Pilarski [5]. Ce modèle analytique est exposé dans le paragraphe III du chapitre II.

Dans le cas d'un collage parfait, l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, présentée sur la figure III-1, a montré, l'apparition nette de deux minimums aigus correspondants au dédoublement de mode de la plaque d'aluminium au voisinage de la fréquence 6,4 MHz et à la fréquence 5,08 MHz apparaît un minimum correspondant au mode d'épaisseur de la couche de colle. Alors on peut dire qu'il y a une superposition des modes relatifs à la colle et ceux relatifs aux deux tôles d'aluminium qui ont la même épaisseur.

Le contact parfait entre les trois couches de la structure est obtenu numériquement lorsqu'on donne au paramètre de Pilarski[5]  $P_N$ , caractérisant le contact normal aux interfaces aluminium/colle, la valeur  $10^{17}\text{N m}^{-3}$ .

Matériau	Vitesse longitudinale $V_L$ (m/s)	Vitesse transversale $V_T$ (m/s)	Densité $\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	Epaisseur d (mm)
Aluminium	6380	3100	2700	0,5
Colle (10% de durcisseur)	1610	1080	1220	0,3

**Tableau III-1 :** Les propriétés géométriques et mécaniques de l'aluminium et de la colle (10% de durcisseur)



**Figure III-1:** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al.  
 $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'aluminium

### I – 1 - Influence de la colle sur l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion :

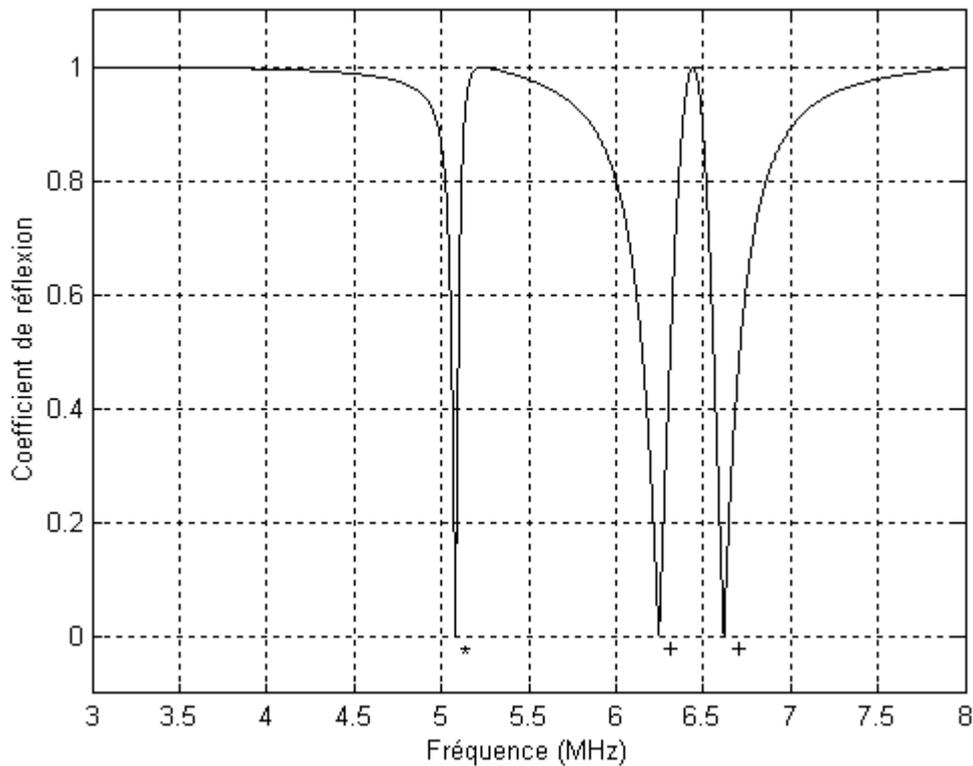
#### I – 1 – 1 - Influence des paramètres viscoélastiques de la colle :

En variant la concentration du durcisseur de 5% jusqu'à 20% la vitesse varie dans le domaine 1600 , 1700 m/s et la densité varie dans le domaine de 1200 , 1300 Kg/m<sup>3</sup> [4].

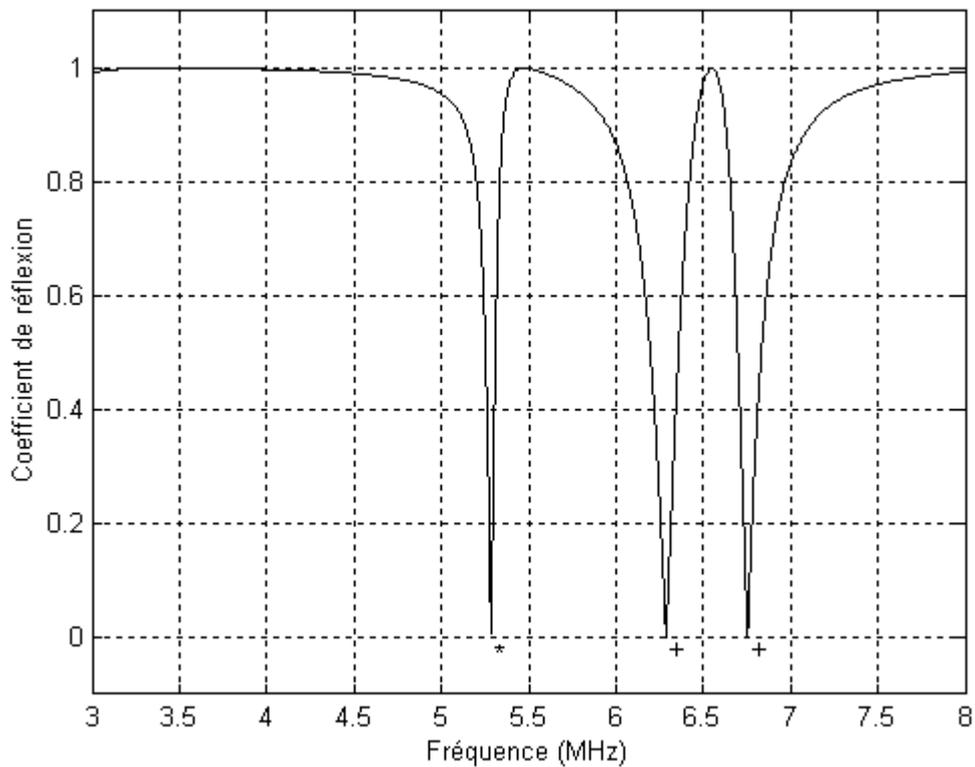
Vu que les paramètres de la colle varient, une étude préliminaire est alors nécessaire pour connaître le comportement du coefficient de réflexion en fonction de ces paramètres et par la suite comparer l'influence de ces paramètres à celle de la nature du contact entre les tôles d'aluminium et la colle. L'étude est basée sur le contrôle du dédoublement du mode de l'aluminium et le mode de la colle.

Pour connaître l'influence des paramètres viscoélastiques de la colle, son épaisseur est fixée à 0,3 mm et son contact avec les deux tôles d'aluminium est supposé parfait. Le coefficient de réflexion est tracé en fonction de la fréquence pour deux concentrations de durcisseur 5% et 20%, chacune de ces concentrations correspond à des paramètres viscoélastiques bien déterminés. La figure III-2 est obtenue pour la concentration 5% :  $V_L = 1600$  m/s et  $\rho = 1200 \text{ Kg/m}^3$  alors que la figure III-3 est obtenue pour la concentration 20% :  $V_L = 1700$  m/s et  $\rho = 1300 \text{ Kg/m}^3$ . Les paramètres de l'aluminium sont donnés dans le tableau 1.

Dans le domaine où la concentration de durcisseur varie i.e. les paramètres viscoélastiques varient, la position du mode relatif à l'épaisseur de la colle varie. Le dédoublement du mode relatif à l'aluminium est toujours marqué avec une petite variation de l'écart entre les deux pics de dédoublement.



**Figure III-2:** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(5%)/Al.  
 $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'aluminium

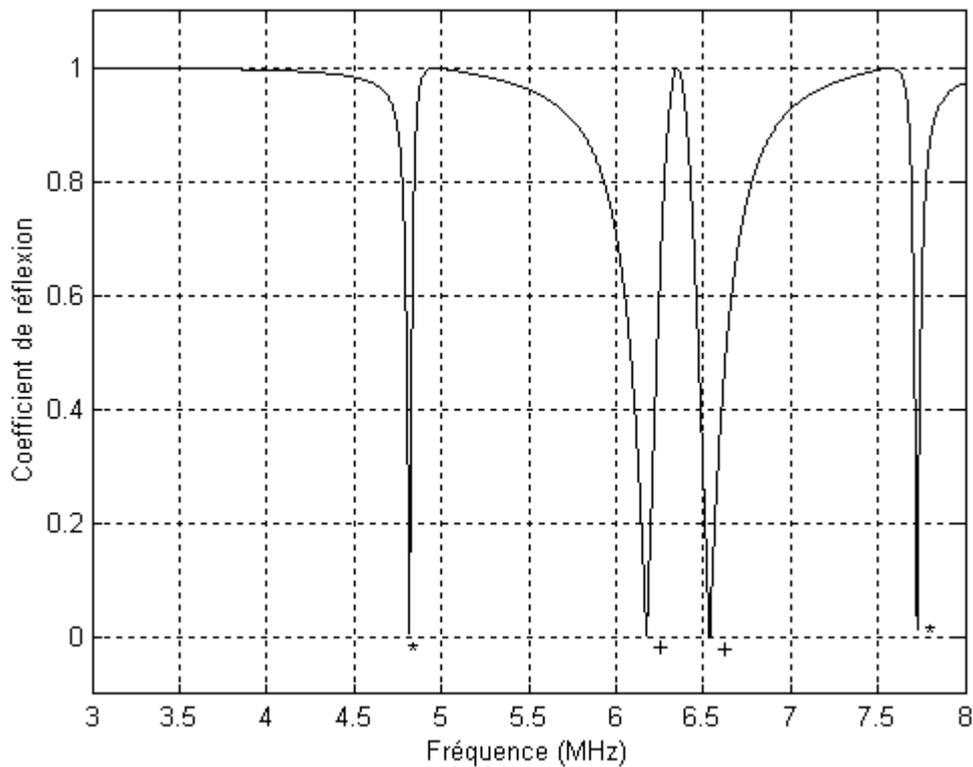


**Figure III-3:** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(20%)/Al.  
 $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'aluminium

### I – 1 – 2 - Influence de l'épaisseur de la colle :

La figure III-4 présente l'évolution du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de la structure (Al./Colle/Al.). Les paramètres de la couche de colle sont  $V_L = 1600 \text{ m/s}$ ,  $\rho = 1200 \text{ Kg/m}^3$  et  $d = 0,32 \text{ mm}$ . Donc par rapport à la figure III-2 seul l'épaisseur de la colle a changé.

En comparant la courbe de la figure III-4 avec celle de la figure III-2, on constate un déplacement remarquable vers les basses fréquences du mode relatif à la couche de colle avec une légère variation de l'amplitude et aussi un léger déplacement des pics du dédoublement.



**Figure III-4 :** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(5%)/Al.  
 $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$  ;  $d = 0,32 \text{ mm}$  \* mode de la colle + mode de l'aluminium

**Remarque:** Dans notre étude, nous n'avons pas tenu compte de l'atténuation dans la structure, car son seul effet sur l'évolution du coefficient de réflexion est la diminution de l'amplitude des modes de résonance ce qui entraîne un élargissement de leurs largeurs à mi-hauteur.

En conclusion, les résultats obtenus montrent que la grande variation des propriétés mécaniques de la colle ne présente pas une modification considérable dans l'évolution du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

### I – 2 - Influence du contact sur l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion :

Dans ce paragraphe, nous allons étudier l'influence de la nature du contact entre les tôles d'aluminium et la couche de colle, sur l'évolution du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. Les paramètres de la colle sont fixés aux valeurs correspondantes à la concentration 10% de durcisseur recommandée par le fournisseur [4] données dans le tableau III-1.

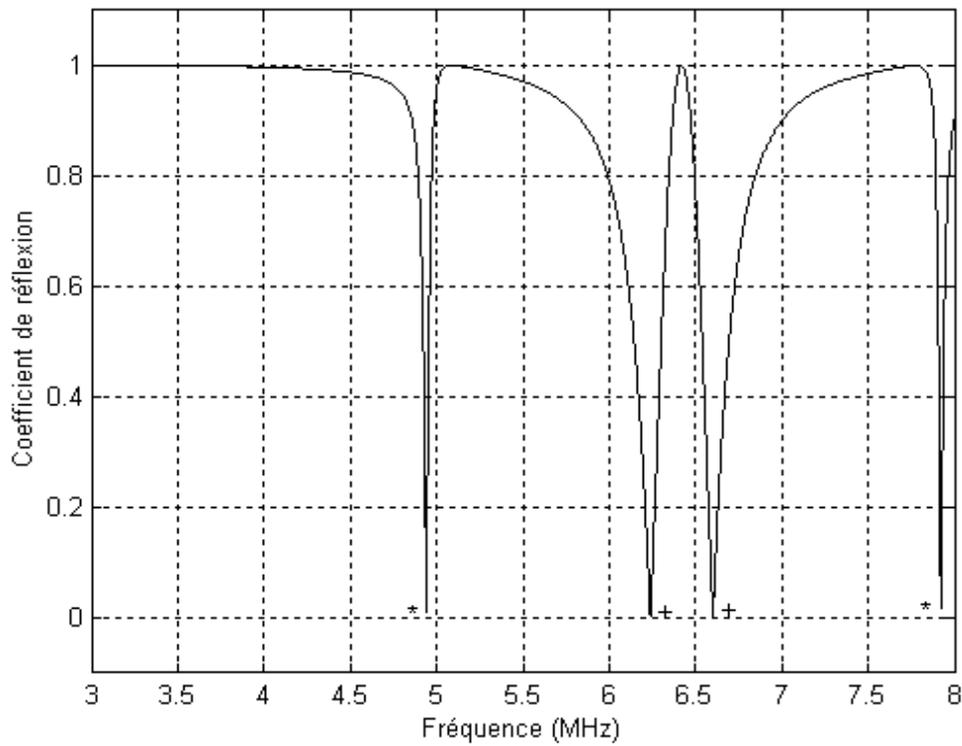
Le résultat portant sur le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour la structure étudiée dans le cas d'un contact parfait ( $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$ ) est représenté par la figure III-1.

On diminue la qualité du contact entre les tôles d'aluminium et la colle en donnant au paramètre  $P_N$  caractérisant les interfaces (Al/colle) et (colle/Al) des valeurs inférieures à

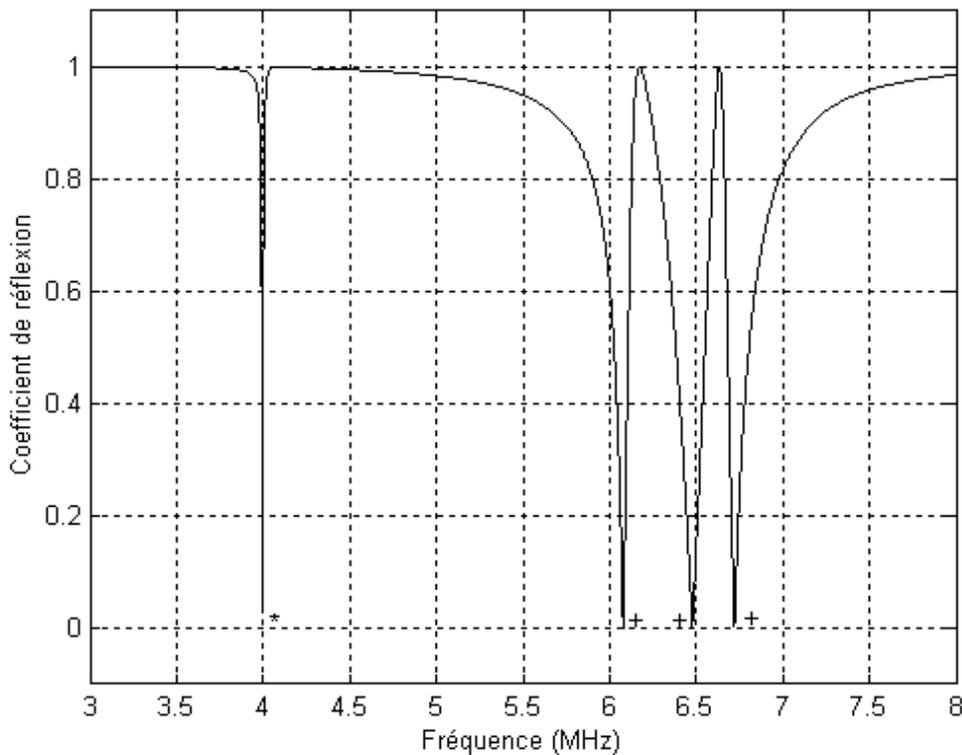
$10^{17} \text{N/m}^3$ . Les résultats portant sur l'évolution du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du paramètre  $P_N$  sont donnés sur les figures (III-5,  $P_N = 5 \cdot 10^{14} \text{N/m}^3$ ); (III-6,  $P_N = 5 \cdot 10^{13} \text{N/m}^3$ ); (III-7,  $P_N = 1.5 \cdot 10^{13} \text{N/m}^3$ ); (III-8,  $P_N = 5 \cdot 10^{12} \text{N/m}^3$ ); (III-9,  $P_N = 2 \cdot 10^{12} \text{N/m}^3$ ); (III-10,  $P_N = 6 \cdot 10^{11} \text{N/m}^3$ ) et (III-11,  $P_N = 10^{11}$ , mauvais contact).

Au fur et à mesure que la qualité d'adhésion diminue, i.e.  $P_N$  diminue, nous pouvons facilement voir que :

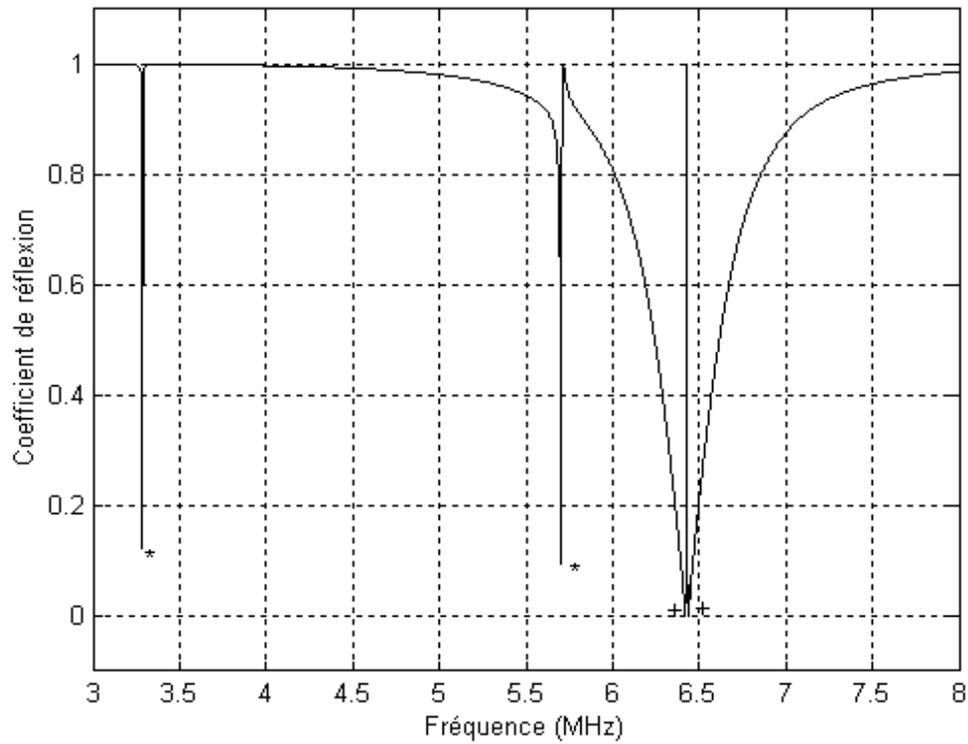
- le mode relatif à la colle se déplace vers les basses fréquences et son amplitude diminue jusqu'à sa disparition à la fréquence  $f_0 = 2.68 \text{ MHz}$  prévue, dans la théorie ( $f = v_L/2.d$ ), pour une couche de la colle seule d'épaisseur  $d = 0.3 \text{ mm}$ .
- le deuxième mode de la colle se trouvant à haute fréquence, se déplace vers les basses fréquences et se convertit en mode de l'aluminium qui fusionne avec le deuxième mode de dédoublement relatif à la tôle d'aluminium supérieure pour donner un seul mode à la fréquence  $6.38 \text{ MHz}$  prévue, dans la théorie ( $f = v_L/2.d$ ), pour une tôle d'aluminium seule d'épaisseur  $d = 0.5 \text{ mm}$  (figure. III-11,  $P_N = 10^{11} \text{ Nm}^{-3}$ , mauvaise adhésion).
- le premier mode de dédoublement relatif à la tôle d'aluminium inférieure, se déplace vers les basses fréquences et se convertit en mode de la colle et son amplitude diminue jusqu'à sa disparition à la fréquence  $2 \cdot f_0 = 5.36 \text{ MHz}$  prévue, dans la théorie ( $f = 2 \cdot v_L/2.d$ ), pour une couche de la colle seule d'épaisseur  $d = 0.3 \text{ mm}$ .



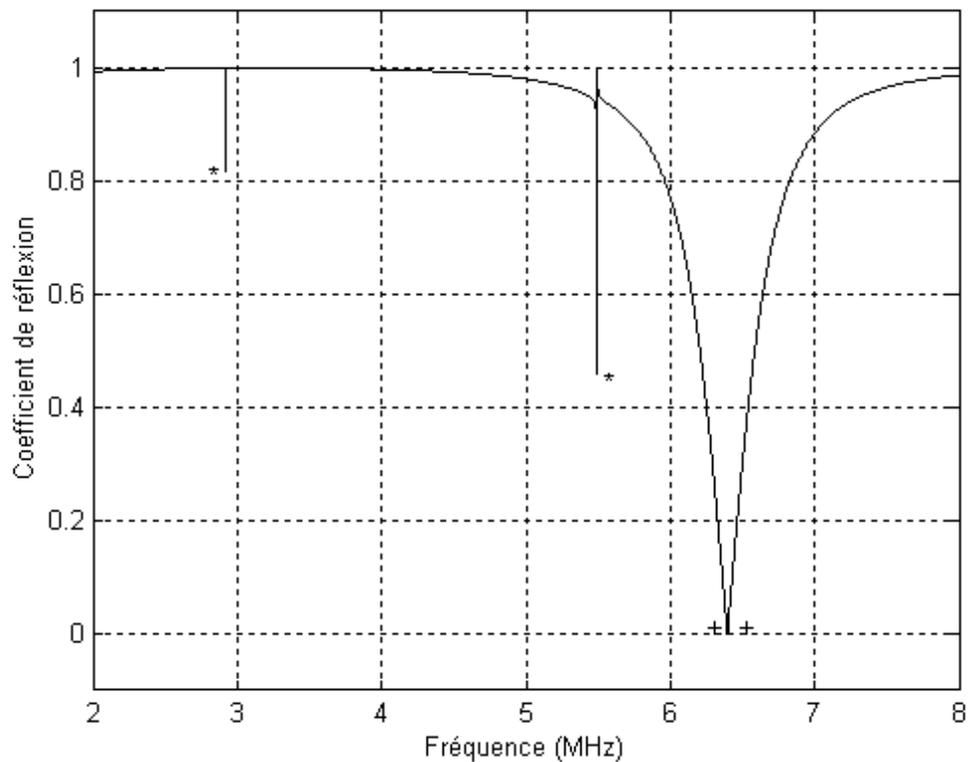
**Figure III-5 :** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al.  
 $P_N = 5.10^{14} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'aluminium



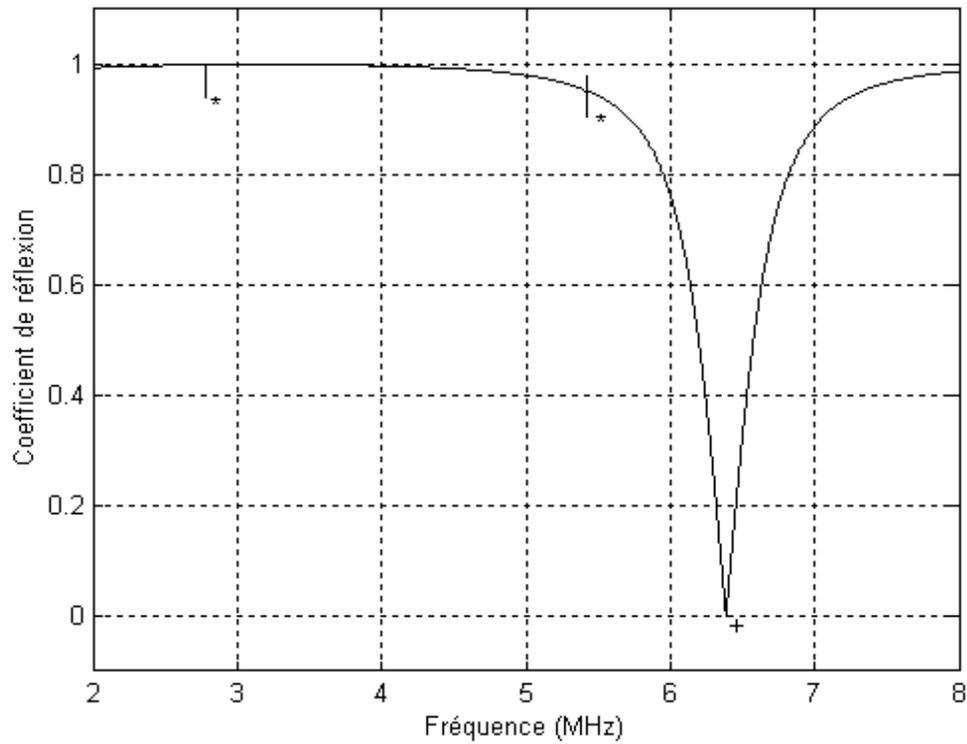
**Figure III-6 :** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al.  
 $P_N = 5.10^{13} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'aluminium



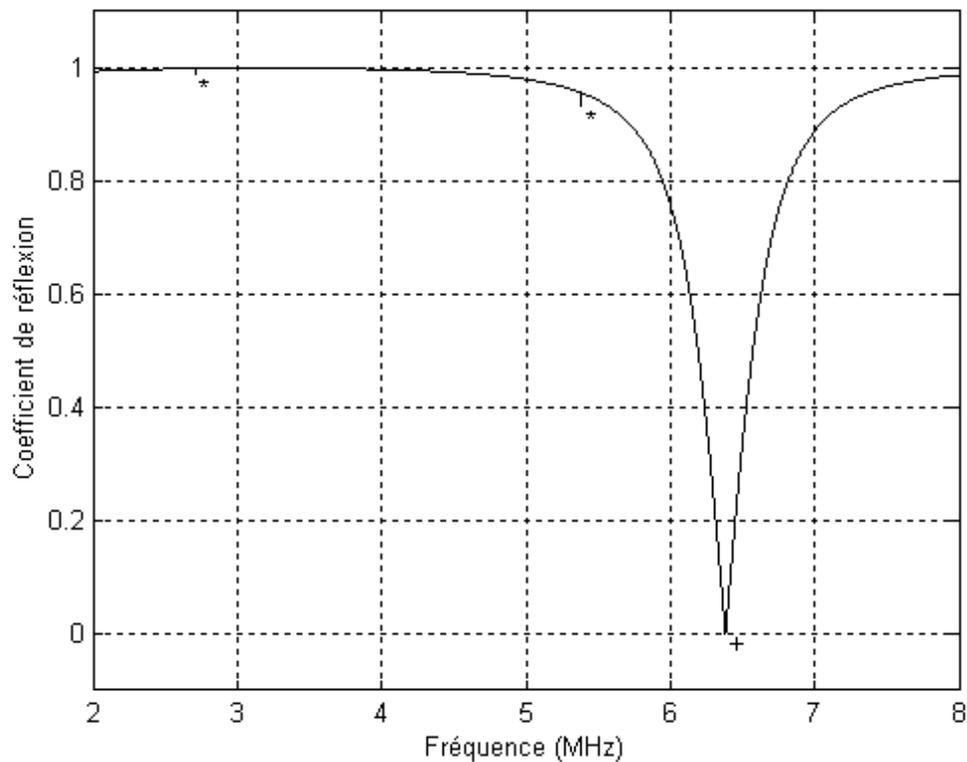
**Figure III-7 :** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al  
 $P_N = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'aluminium



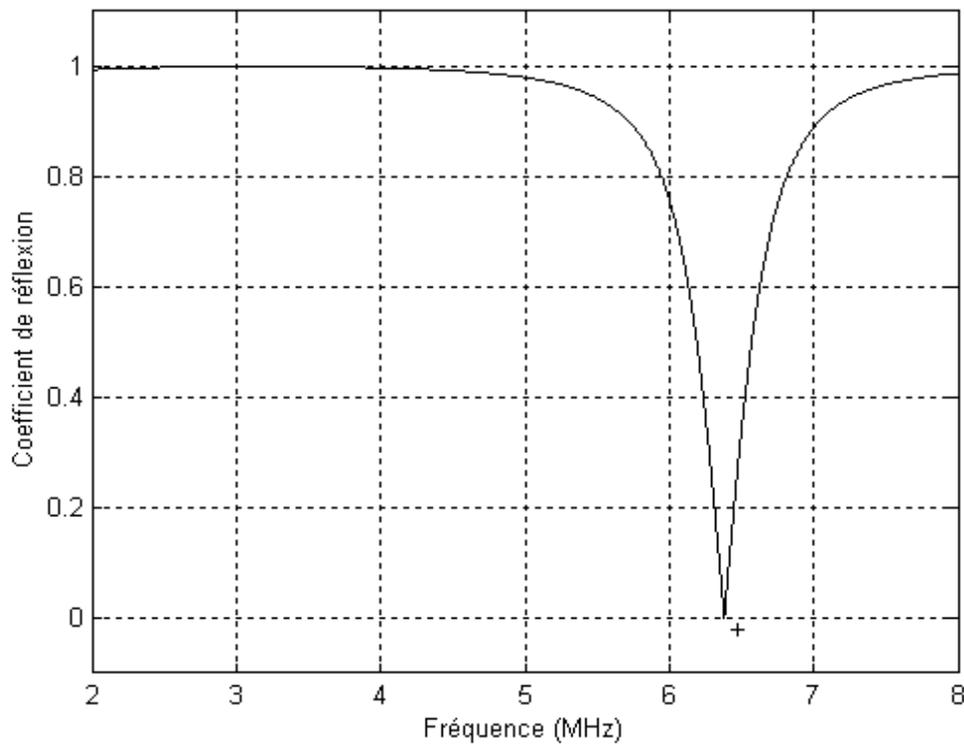
**Figure III-8 :** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al.  
 $P_N = 5 \cdot 10^{12} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'aluminium



**Figure III-9 :** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al.  
 $P_N = 2.10^{12} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'aluminium



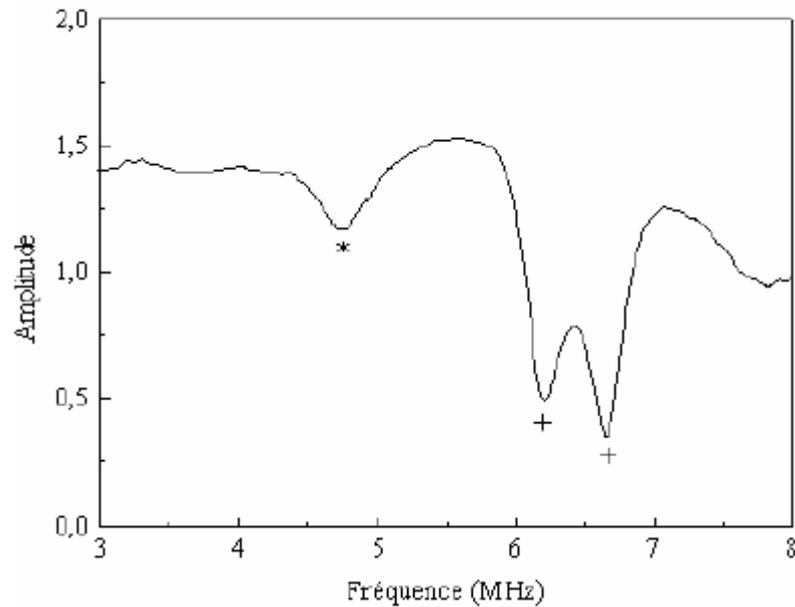
**Figure III-10 :** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al.  
 $P_N = 6.10^{11} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'aluminium



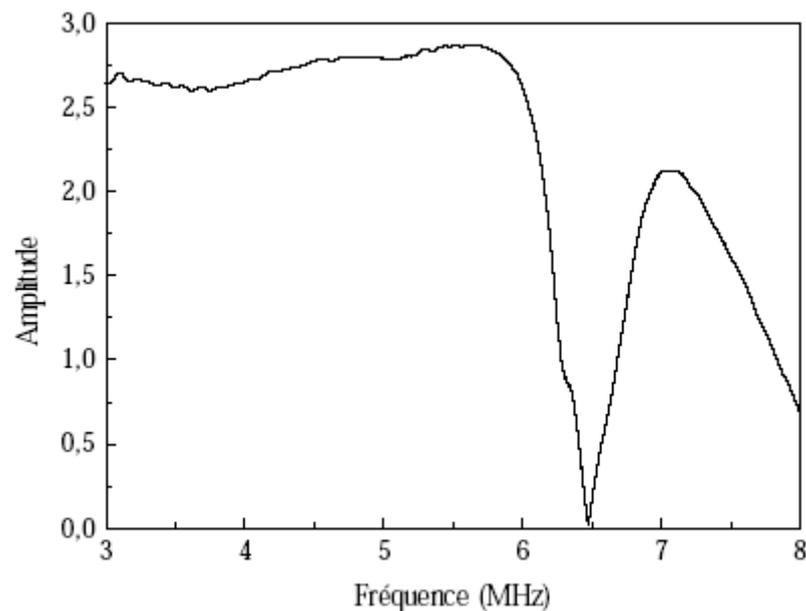
**Figure III-11** : L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al.  $P_N = 10^{11} \text{ N/m}^3$  + mode de l'aluminium prévu pour une tôle seule.

Ces résultats numériques montrent clairement que l'évolution du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence contient des informations précieuses sur la qualité de contact entre la colle et les deux tôles d'aluminium. Ainsi, il peut être utilisé comme moyen efficace pour caractériser la qualité du collage.

Nous notons ici que les résultats numériques présentés dans les figures III-1 et III-11, correspondants respectivement aux collage parfait et mauvais collage, sont en accord parfait avec ceux obtenus expérimentalement par Faiz et al [4] (figure III-12 (collage parfait) et Figure III-13 (mauvais collage)). Cependant, contrairement à l'observation faite dans [4], les conditions aux limites définies par Pilarski [5] permettent une bonne modélisation même dans le cas d'un mauvais contact.



**Figure III-12 :** *Spectre corrigé du signal rétrodiffusé par la structure Al/Colle (10%)/Al. Cas du collage parfait selon [4]  
\*mode de la colle +mode d'aluminium.*



**Figure III-13 :** *Spectre corrigé du signal rétrodiffusé par la structure Al/Colle (5%)/Al. Cas de mauvais collage selon [4]*

## II – Caractérisation d'un collage de deux tôles d'acier et de deux tôles de zircaloy[9]:

### II-1- Présentation des structures :

Nous considérons ici deux structures collées, l'une est composée de deux tôles d'acier collées et l'autre est composée de deux tôles de zircaloy [9] collées. Les propriétés géométriques et mécaniques de l'acier et de zircaloy sont données dans le tableau III-2 ci-dessous.

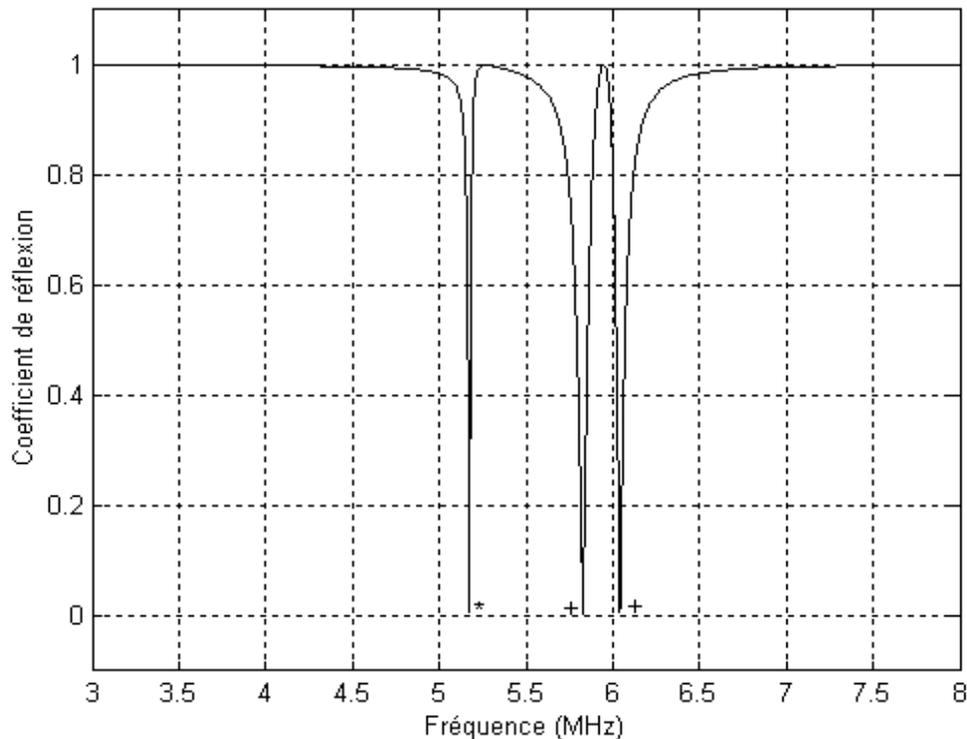
Matériau	Epaisseur (mm)	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Vitesse longitudinale (m/s)
Tôle Acier	0,5	7800	5850
Tôle Zircaloy	0,5	6550	4720

**Tableau III-2 :** Les propriétés géométriques et mécaniques de l'acier et de zircaloy.

Les paramètres de la colle sont fixés aux valeurs données dans le tableau 1.

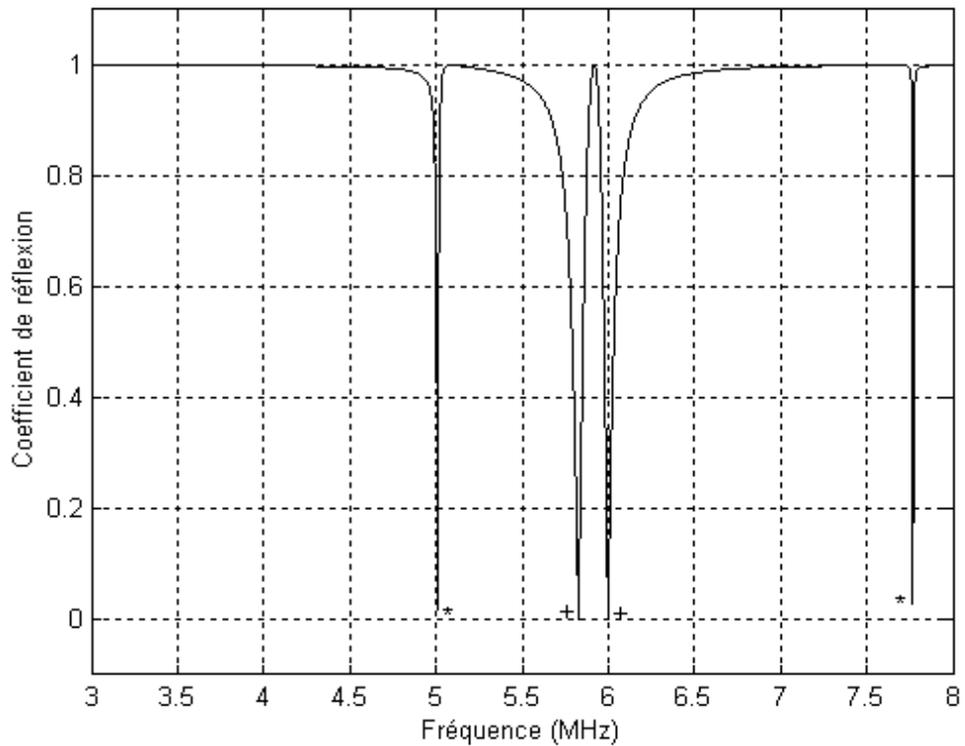
### II-2- Résultats numériques :

Notre programme est testé également dans le cas des deux structures présentées précédemment. Le contact parfait entre la colle et les tôles, est traduit numériquement par la valeur  $10^{17}$  N/m<sup>3</sup> donnée au paramètre d'interface  $P_N$ . L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion obtenue pour différentes valeurs du paramètre  $P_N$  est représentée sur les figures (III-14, III-15, III-16, III-17, III-18, III-19) dans le cas d'un collage de deux tôles d'acier et sur les figures (III-20, III-21, III-22, III-23, III-24, III-25) dans le cas d'un collage de deux tôles de zircaloy. La même interprétation faite dans le cas des tôles d'aluminium peut être faite ici montrant clairement que l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion peut être utilisée comme moyen efficace pour caractériser la qualité du collage.

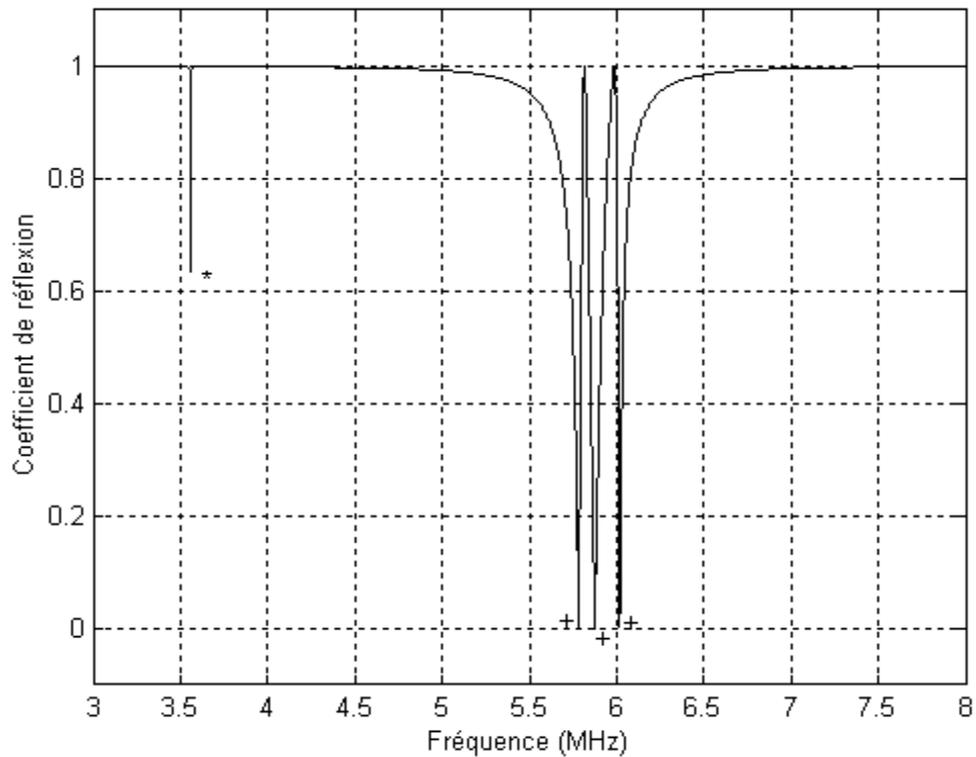


**Figure III-14 :** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac.

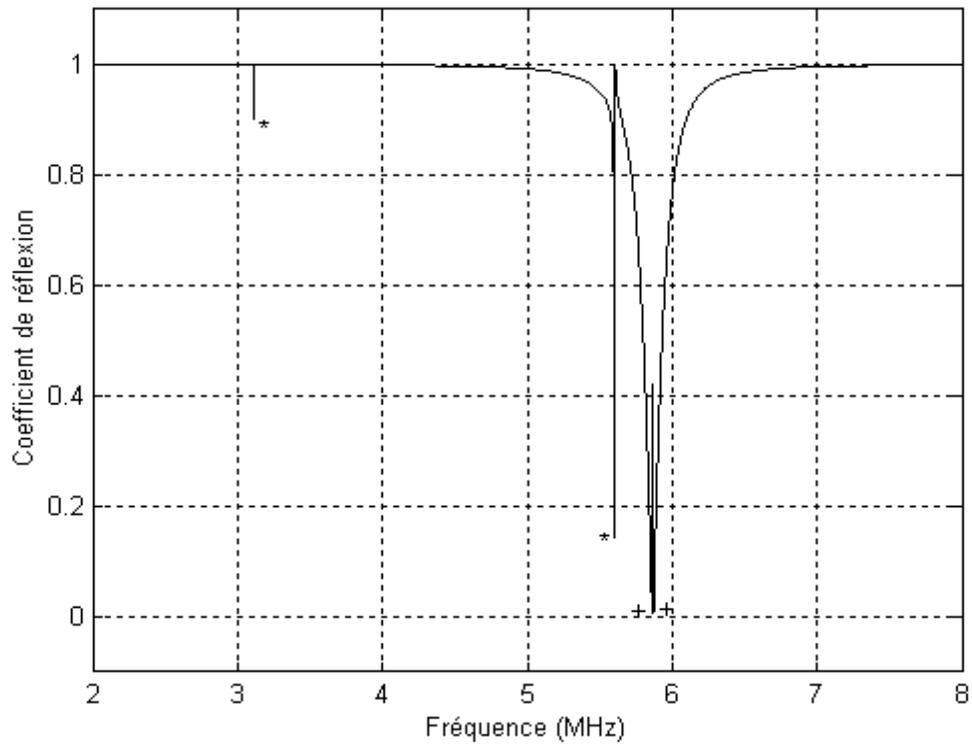
$$P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3 \quad * \text{ mode de la colle } + \text{ mode de l'acier.}$$



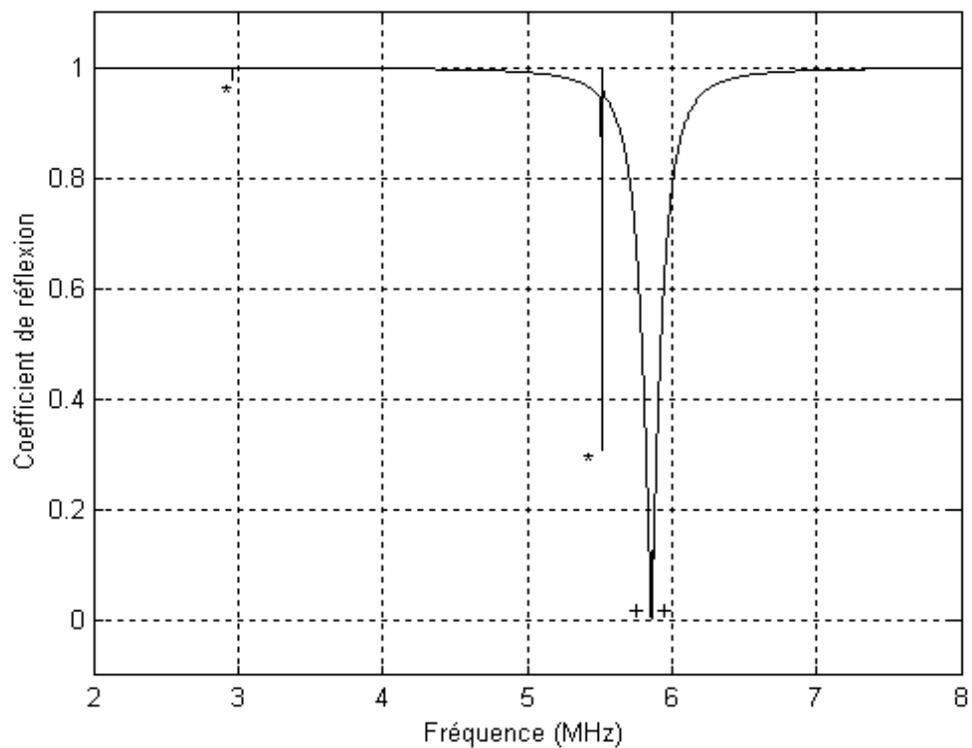
**Figure III-15 :** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac.  
 $P_N = 5.10^{14} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'acier.



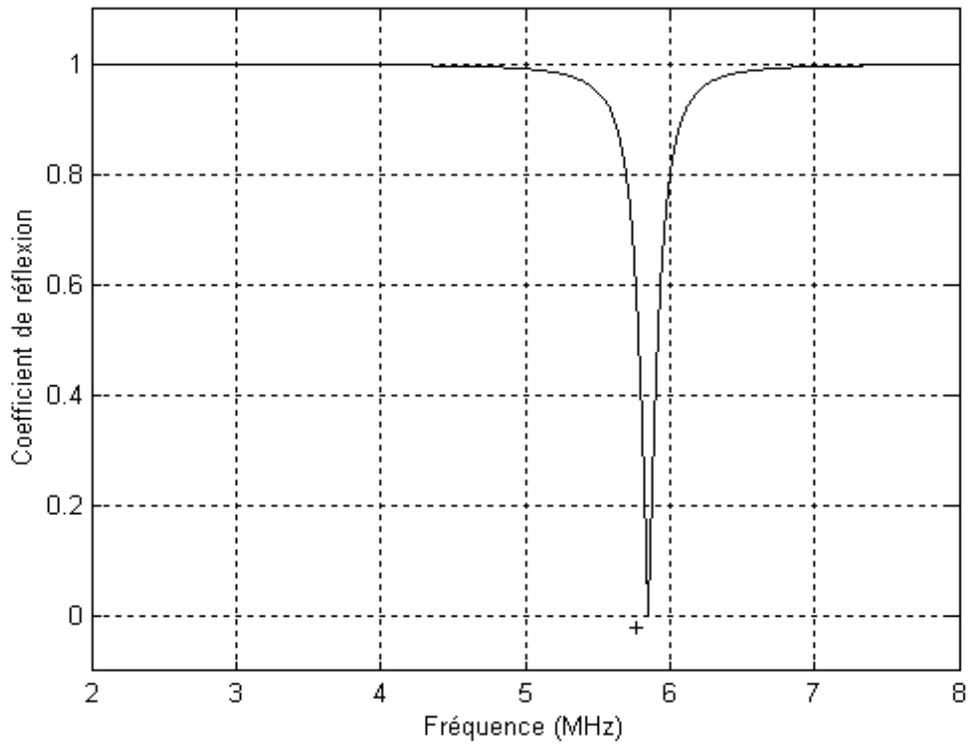
**Figure III-16 :** L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac.  
 $P_N = 2.5.10^{13} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'acier.



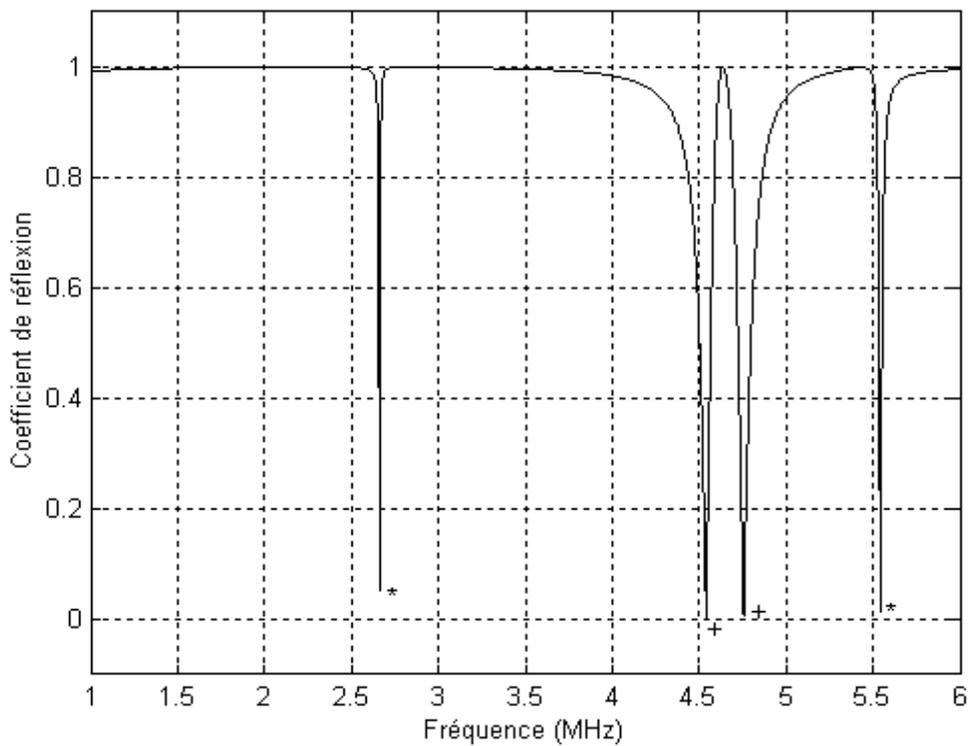
**Figure III-17** : L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac.  
 $P_N = 10^{13} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'acier.



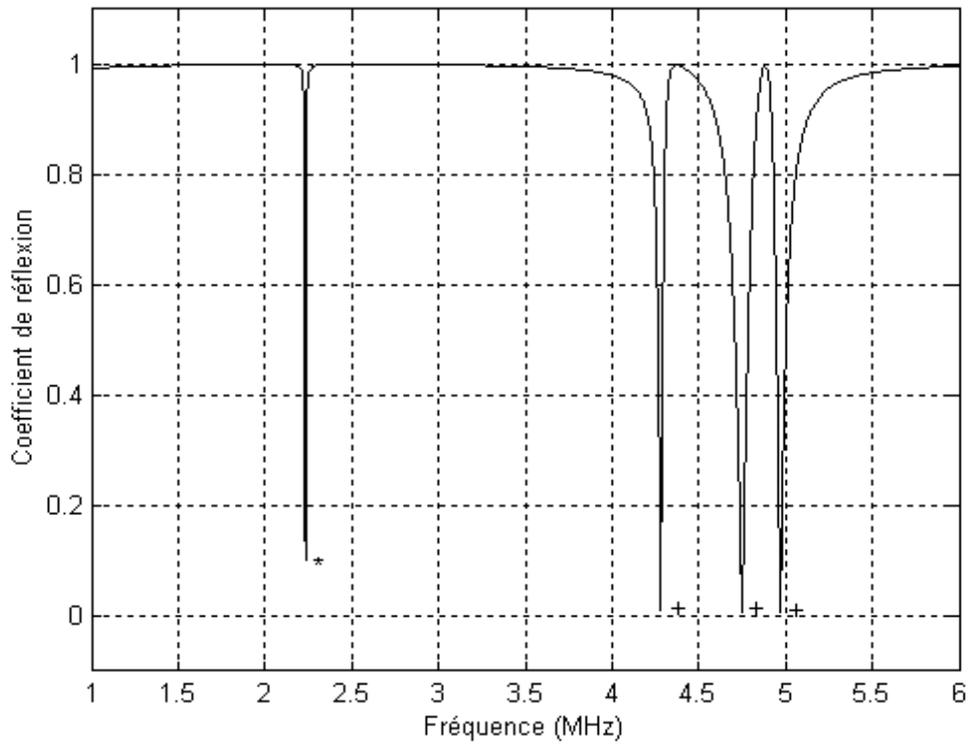
**Figure III-18** : L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac.  
 $P_N = 610^{12} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de l'acier.



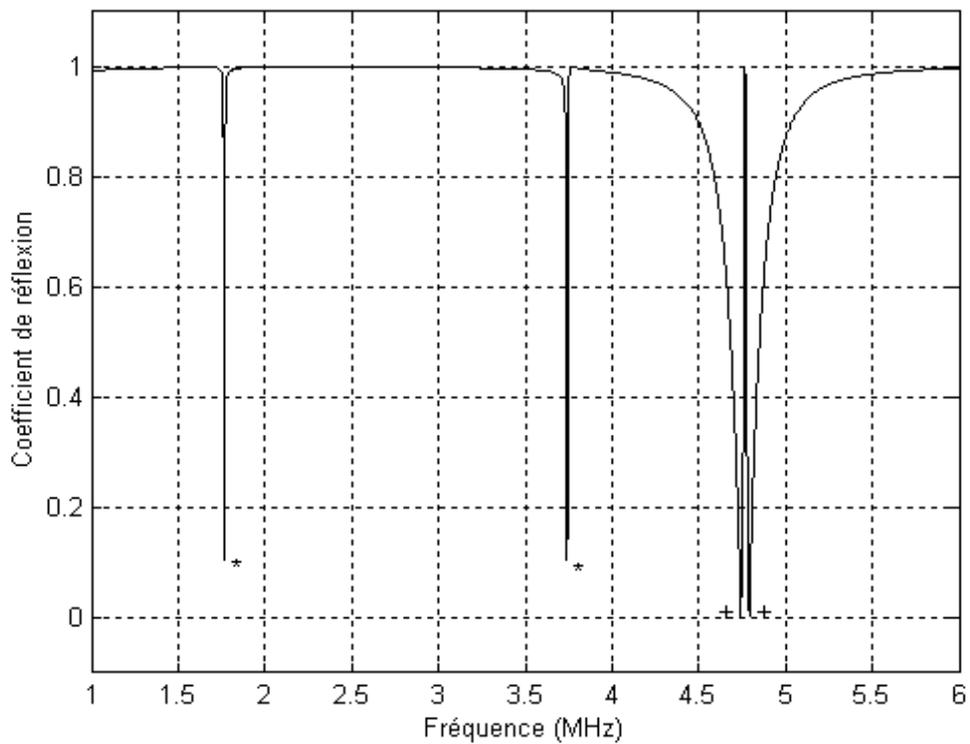
**Figure III-19** : L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac.  
 $P_N = 10^{11} \text{ N/m}^3$  + mode de l'acier prévu pour une tôle seule.



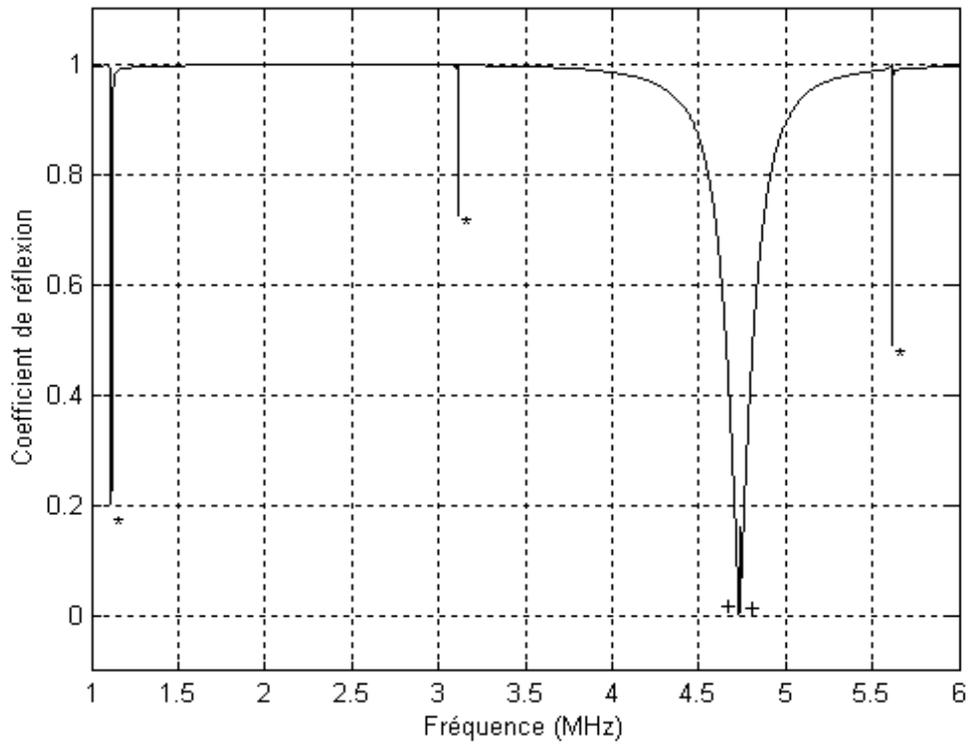
**Figure III-20** : L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir.  
 $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de zircaloy.



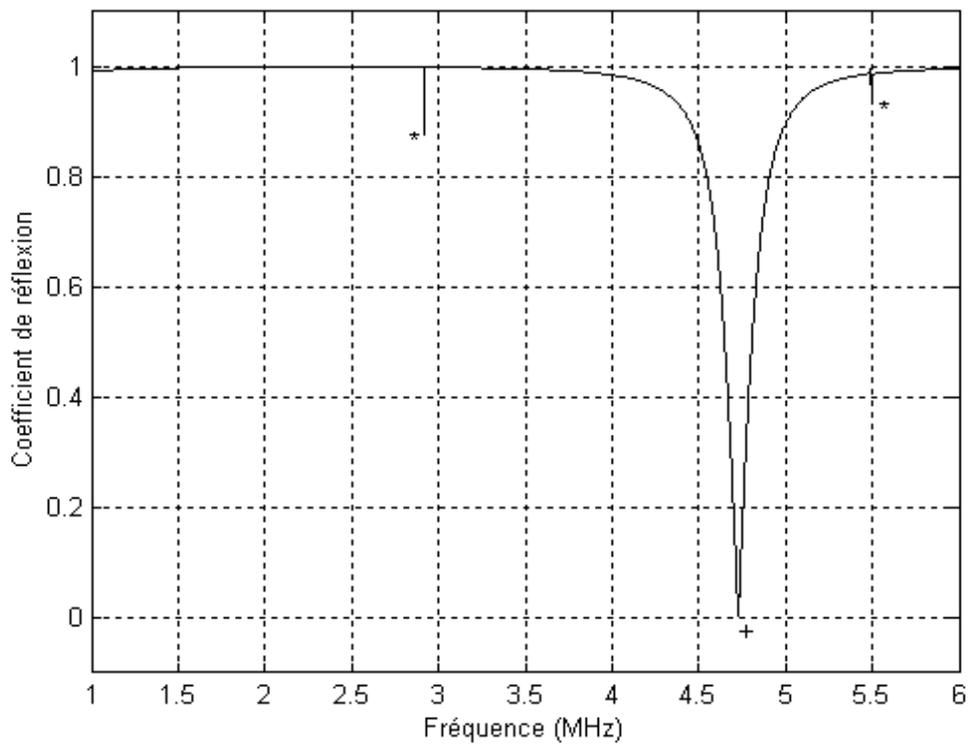
**Figure III-21** : L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir.  
 $P_N = 10^{14} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de zircaloy.



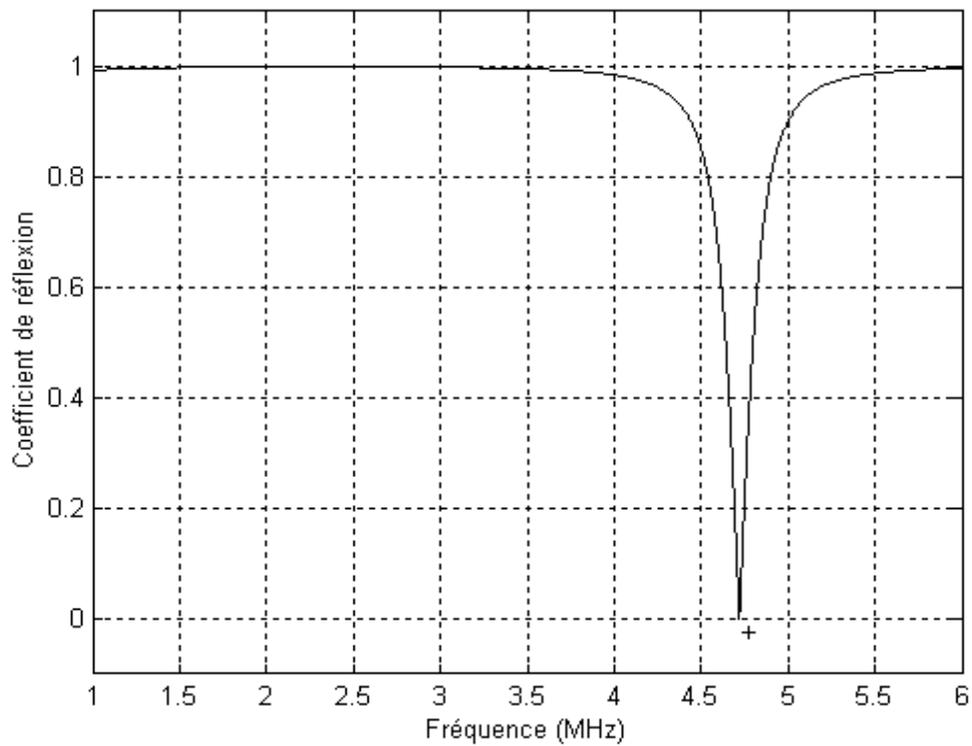
**Figure III-22** : L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir.  
 $P_N = 3.5 \cdot 10^{13} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de zircaloy.



**Figure III-23** : L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir.  
 $P_N = 10^{13} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de zircaloy.



**Figure III-24** : L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir.  
 $P_N = 5.10^{12} \text{ N/m}^3$  \* mode de la colle + mode de zircaloy.



**Figure III-25** : L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir.  
 $P_N = 10^{11} \text{ N/m}^3$  + mode de zircaloy prévu pour une tôle seule.

**Conclusion :**

La technique ultrasonore non destructive de contrôle de la qualité du contact dans les structures tri-couche a été étudiée. Elle est basée sur l'analyse de l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion de ces structures. Un programme de grande précision est développé sur Matlab pour déterminer, dans l'incidence normale, l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion pour différentes qualités du contact. La modélisation du contact est faite selon les conditions aux limites définies par Pilarski [5]. Des simulations numériques sont effectuées sur trois structures tri-couche : aluminium/colle/aluminium ; acier/colle/acier et zircaloy/colle/zircaloy. Les résultats numériques obtenus sont en accord parfait avec ceux déterminés expérimentalement par Faiz et al [4]. Ils montrent également la fiabilité du modèle de Pilarski [5]. Sur le coefficient de réflexion nous avons montré l'existence des minimums correspondants aux modes des adhérents (aluminium, acier et zircaloy) et des minimums correspondants aux modes de la couche de colle. Nous avons clairement montré que l'évolution (déplacement, conversion, disparition totale) de ces minimums liée à la qualité du contact entre les trois couches. Par conséquent l'analyse spectrale du coefficient de réflexion offre un moyen fiable et efficace pour la caractérisation de la qualité du collage.

**Références bibliographiques**

- [1] A. PILARSKI, J.L. ROSE AND K. Balasubramaniam, The angular and frequency characteristics of reflectivity from a solid layer embedded between two solids with Imperfect boundary conditions, *J. Acoust. Soc. Am.*, 87(2), pp. 532-542, 1990.
- [2] A. JUNGMAN, P. GUY, G. QUENTIN. Characterization of glued bonds using ultrasonic reflected beam. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 10B, pp. 1319–27, 1991.
- [3] A.I. LAVRENTYEV, S. I. ROKHLIN, Ultrasonic spectroscopy of imperfect contact interfaces between a layer and two solids, *The Journal of the Acoustical Society of America* ,Volume 103, Issue 2, pp. 657-664, February 1998.
- [4] B. FAIZ, G. MAZE, A. MOUDDEN, D.DECULTOT. Contrôle ultrasonore de la qualité des structures collées. *Annales de chimie science des matériaux*, volume 23, issue 3, pp. 461-473, 1998.
- [5] A. PILARSKI, ultrasonic wave propagation in a layered medium under different boundary conditions, *Archives of Acoustics*, 7 (1), pp. 61. 1982.
- [6] X. M. JIAN ; N. GUO ; M. X. LI ; H. L. ZHANG , Characterization of bonding quality in a multilayer structure using segment adaptive filtering, *Journal of Nondestructive evaluation* (J. Nondestr. Eval), vol. 21, n°2, pp. 55-65(11), 2002.
- [7] LIN, Y. W. SHI, J. CHEN, X. M. LI, G. P. GUO, Ultrasonic testing of the diffusion bonding of titanium alloy, *The British Institute of the Non-destructive Testing* vol.48(7), pp. 415-417, 2006.
- [8] L. M.BREKHOVSKIKH, *Waves in Layered Media*, Academic Press, New York, 1960.
- [9] A. BRIGGS, *Acoustic microscopy* Oxford university Press, pp. 102, 1992.

## **CHAPITRE IV**

**Propagation des ondes guidées dans les structures tri-couche:**  
*Application au contrôle non destructif*  
*de la qualité de collage des tôles*

**Introduction:**

Les techniques ultrasonores de contrôle par transmission ou réflexion ont largement été étudiées et ont prouvé leur efficacité. Ces techniques conventionnelles utilisant les ondes de volumes, restituent précisément la forme et la localisation des défauts [1-3] mais ne permettent l'inspection de larges domaines que par le recours à de multiples séquences d'interrogation zones après zones. En conséquence, l'évaluation de l'endommagement est un processus long et coûteux. Les ondes de Lamb [4] guidées par la géométrie de la structure insonifiée, ayant l'aptitude à se propager sur de longues distances (quelques centimètres à quelques dizaines de mètres selon la nature du milieu) permettent un contrôle de l'intégrité de la structure plus facilement et plus rapidement.

D'autre part, pour la génération, sans contact, d'ondes ultrasonore, mais surtout pour leur détection, sans contact et en absence de couplage (autre que l'air) entre le récepteur et l'échantillon, qui représente un point clef dans la qualité des mesures ultrasonores, il existe des procédés d'utilisation aisée et de récents développements dans le domaine des transducteurs ultrasonores à couplage par air, mais à fort rendement pour s'affranchir de la rupture d'impédance acoustique entre l'air et les solides. Sur sites industriels, les pièces à tester n'ont alors plus besoin d'être démontées pour les immerger dans des cuves à eau ou les placer devant des jets d'eau, mais cela conduit souvent aux problèmes d'accessibilité des pièces à tester. Si une seule face de la structure est accessible, les ultrasons ne pourront pas être utilisés en transmission. L'émetteur et le récepteur doivent donc être placés du même côté de la structure mais assez loin l'un de l'autre car, à cause de la faible impédance acoustique de l'air, la réflexion spéculaire produite en surface des échantillons masque totalement toute onde provenant de l'intérieur du matériau. C'est une des raisons qui a motivé l'emploi d'ondes guidées pour mettre au point des applications de contrôle ou d'évaluation non destructives avec transducteurs ultrasonores à couplage par air [5-7]. Les modes de Lamb [4,8,9] ont été particulièrement adoptés pour leurs aptitudes à se propager sur de longues distances tout en produisant des déformations dans toute l'épaisseur du support de propagation sans pour autant subir une atténuation aussi importante que les ondes de volume, ce qui permet à chaque pulse ultrasonore d'inspecter tout le champ compris entre l'émetteur et le récepteur. Ces ondes sont guidées par des plaques, des coques ou des tuyaux cylindriques, elles se propagent dans des structures de faible épaisseur devant les autres dimensions et présentent la particularité d'être dispersives. Elles ont été découvertes au début du XXème siècle [4], après les études fondamentales sur les ondes de volume décrites par Christoffel [13], et sur les ondes de surface étudiées par Rayleigh [14].

Les nombreux avantages des ondes de Lamb ont fait de ces ondes guidées les intermédiaires principaux de nombreux développements récents dans de nombreux domaines de contrôle non destructif. Elles servent par exemple à la détection de délaminages [15-18], de corrosion [19,20], à tester l'adhésion de structures collées [21-26] et à la caractérisation des matériaux [27-29].

Nous proposons dans ce chapitre d'étudier la sensibilité des ondes de Lamb à la qualité du collage de deux tôles d'aluminium. L'utilisation de ces ondes guidées comme moyen de contrôle passe inéluctablement par l'étude et la compréhension de la propagation guidée des ondes ultrasonores dans les structures tri-couches. La littérature scientifique est abondante en articles sur ce sujet.

Les travaux de recherche présentés dans les articles [30-38] ont porté sur le suivi des ondes de Lamb soit de la colle soit des matériaux collés. Jungman et al. [39] ont étudié expérimentalement les propriétés de l'interface de la structure métal/époxy/métal par les ondes de Lamb. Pour des couches d'adhésif suffisamment fines, l'étude montre que les coefficients de réflexion et de transmission ne sont pas très sensibles aux propriétés de l'adhésif. Ceci est confirmé par les travaux de Lowe et Cawley [21] qui ont montré que les ondes de Lamb sont fortement sensibles aux propriétés mécaniques et épaisseurs des adhérents mais restent insensibles aux propriétés de la couche de colle. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Nagy et Adler [27], qui ont étudié les ondes guidées dans la couche de colle entre deux demi-espaces et montré que les courbes de dispersion obtenues sont relativement insensibles aux propriétés de la couche de colle. Heller [25] combine la technique laser de génération des ondes ultrasonores à la transformée de Fourier bidimensionnelle (2D-FFT) pour déterminer expérimentalement les courbes de dispersion d'une structure tri-couche (deux tôles d'aluminium liées par une couche de colle) et une structure bi-couche (la même couche de colle adhérente à l'une des tôles d'aluminium). Les résultats obtenus montrent que les modes mesurés dans les deux structures sont identiques à ceux d'une tôle d'aluminium seule.

Seifried [40] combine le modèle analytique, la méthode des éléments finis et des mesures expérimentales pour une meilleure compréhension de la propagation des ondes guidées dans une structure tri-couche constituée de deux tôles d'aluminium liées par une couche de colle. Les éléments recherchés dans ce travail sont le réseau de dispersion, le champ des déplacements et les courbes d'atténuation.

Les travaux de recherche que nous présentons ici s'inscrivent dans la même optique de compréhension de la propagation ultrasonore dans une structure tri-couche modélisant deux tôles d'aluminium liées par une couche de colle en résine époxy. Deux méthodes analytiques

sont adoptées pour déterminer l'équation de dispersion des ondes de Lamb de la structure étudié. Par une résolution numérique de grande précision, sur Matlab, de cette équation caractéristique, nous déterminons le réseau de dispersion de la structure et proposons une nouvelle interprétation de ce réseau. Nous déterminons, par la suite le champ des déplacements et analysons la répartition de l'énergie ultrasonore dans les éléments de la structure. Enfin, nous étudions la possibilité de caractérisation de la qualité de collage des tôles à partir du réseau de dispersion de la structure.

## I – Propagation des ondes de Lamb dans les structures tri-couche planes:

### I - 1 - Méthodes analytiques: Equation de dispersion

Dans ce paragraphe nous proposons de déterminer l'équation de dispersion des ondes de Lamb d'une structure tri-couche plane, par deux méthodes théoriques: la méthode des matrices globales et la méthode des matrices de transfert. Ces méthodes sont développées pour étudier la propagation d'ondes guidées le long des milieux stratifiés plans constitués de matériaux élastiques et isotropes.

#### I – 1 - 1 – Méthode des matrices globales:

Cette méthode est développée et présentée dans les articles scientifiques [41,42] pour des milieux stratifiés plans constitués de matériaux élastiques. De manière similaire nous utilisons cette méthode pour déterminer l'équation de dispersion d'une structure tri-couche d'épaisseur  $h$ , composée de deux tôles métalliques (couches  $C_1$  et  $C_3$ ) collées entre elles par un adhésif (couche  $C_2$ ), chaque couche est en matériau élastique, homogène et isotrope (figure IV-1).

Les couches ( $C_1, C_2$  et  $C_3$ ) sont respectivement caractérisées par leur épaisseur ( $d_1, d_2$  et  $d_3$ ), leur densité ( $\rho^{(1)}, \rho^{(2)}$  et  $\rho^{(3)}$ ), les vitesses de propagation des ondes longitudinales ( $v_L^{(1)}, v_L^{(2)}$  et  $v_L^{(3)}$ ) et celles des ondes transversales ( $v_T^{(1)}, v_T^{(2)}$  et  $v_T^{(3)}$ ).

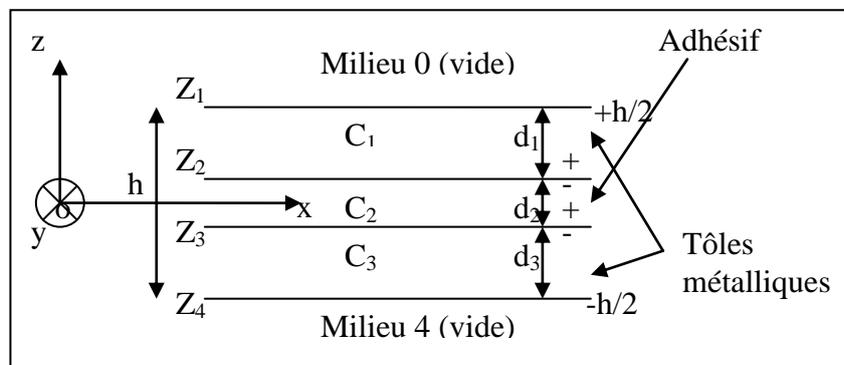


Figure IV-1: Géométrie la structure tri-couche métal/adhésif/métal.

Dans chaque couche de la structure tri-couche, la propagation des ondes ultrasonores guidées est considérée avec la direction de propagation suivant l'axe (ox) et la polarisation verticale (ondes de Lamb).

L'axe (ox) représente la ligne médiane de la couche C<sub>2</sub> et l'axe (oz), l'axe vertical dirigé vers le haut.

D'après la décomposition d'Helmholtz [43], le champ acoustique dans chaque couche (i) produit un vecteur déplacement  $\vec{U}^{(i)}$  qui peut être exprimé comme la somme du gradient d'un potentiel scalaire  $\Phi^{(i)}$  et du rotationnel d'un potentiel vecteur  $\vec{\Psi}^{(i)}$  :

$$\vec{U}^{(i)} = \overrightarrow{\text{grad}}\Phi^{(i)} + \overrightarrow{\text{rot}}\vec{\Psi}^{(i)} \quad (1)$$

Les potentiels  $\Phi^{(i)}$  et  $\vec{\Psi}^{(i)}$  doivent vérifier les équations de propagation suivantes:

$$\Delta\Phi^{(i)} = \frac{1}{v_L^{(i)2}} \frac{\partial^2\Phi^{(i)}}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$\Delta\vec{\Psi}^{(i)} = \frac{1}{v_T^{(i)2}} \frac{\partial^2\vec{\Psi}^{(i)}}{\partial t^2} \quad (3)$$

$v_L^{(i)}$  et  $v_T^{(i)}$  sont respectivement la vitesse longitudinale et la vitesse transversale dans la couche (i)

Les potentiels sont invariants par translation dans la direction (oy), donc toutes les grandeurs physiques ont des dérivées partielles nulles par rapport à la variable y. Les potentiels scalaires et vecteurs correspondants à la propagation d'onde monochromatique guidée, ont donc les formes suivantes:

$$\Phi^{(i)} = F^{(i)}(z) \exp j(kx - wt) \quad (4)$$

$$\vec{\Psi}^{(i)} = \vec{G}^{(i)}(z) \exp j(kx - wt) \quad (5)$$

k : le nombre d'onde .

w : la pulsation .

t : le temps .

L'onde étant à polarisation verticale (oz), le potentiel vecteur peut être choisi de telle façon que seule sa composante en (y) soit non nulle,  $\vec{\Psi}^{(i)}(0, \Psi^{(i)}, 0)$  .

L'injection de (4) et (5) dans les équations de propagation (2) et (3) conduit aux expressions de  $\Phi^{(i)}$  et  $\Psi^{(i)}$  suivantes:

$$\Phi^{(i)} = [A^{(i)} \exp(jq^{(i)}z) + B^{(i)} \exp(-jq^{(i)}z)] \exp j(kx - wt) \quad (6)$$

$$\Psi^{(i)} = [C^{(i)} \exp(jS^{(i)}z) + D^{(i)} \exp(-jS^{(i)}z)] \exp j(kx - wt) \quad (7)$$

avec  $q^{(i)} = \sqrt{K_L^{(i)2} - k^2}$  ;  $S^{(i)} = \sqrt{K_T^{(i)2} - k^2}$

et  $K_L^{(i)} = 2.\pi.f / v_L^{(i)}$  ;  $K_T^{(i)} = 2.\pi.f / v_T^{(i)}$

Les quatre coefficients  $A^{(i)}$ ,  $B^{(i)}$ ,  $C^{(i)}$  et  $D^{(i)}$  sont les constantes d'intégration.

Ces constantes d'intégration des potentiels scalaires et vecteurs sont déterminées par la résolution d'un système d'équation obtenu par l'écriture en expression d'ondes monochromatiques des conditions aux limites: au niveau des surfaces extrêmes de la structure tri-couche étudiée et aux interfaces collées.

Grâce aux nombreux avantages qui résultent de l'absence de couplage (autre que l'air) entre le récepteur et l'échantillon étudié (voir paragraphe VII-2 chapitre.I), les transducteurs ultrasonores à couplage par air, d'utilisation aisée et de récents développements, permettent de générer et de détecter, sans contact, des ondes ultrasonores dans les milieux solides, simplifiant ainsi considérablement les applications de contrôle ou d'évaluation non destructives.

Compte tenu de la très faible impédance acoustique de l'air comparativement à celles des matériaux solides [44], on peut considérer que, au cours de la propagation, les surfaces extrêmes de la structure sont libres de toute contrainte. Il est donc commode d'approximer l'air par le vide (milieu 0 et 4 ; Figure IV-1), ce qui simplifie les calculs.

En effet, les conditions aux limites sont:

- sur les deux surfaces libres de la structure, les contraintes normales et tangentiels sont nulles:

$$\sigma_{zz} = \sigma_{xz} = 0 \quad (8)$$

- à chaque interface tôle/adhésif (dans le cas d'un contact parfait), il y a continuité des contraintes et des déplacements.

$$\sigma_{zz}^+ = \sigma_{zz}^- \quad ; \quad \sigma_{xz}^+ = \sigma_{xz}^- \quad (9)$$

$$U_x^+ = U_x^- \quad ; \quad U_z^+ = U_z^- \quad (10)$$

Ces conditions aux limites peuvent être présentées sous forme du système d'équations suivant:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma_{ZZ}^{(1)} = 0 & \text{à } z = d_1 + d_2/2 \\ \sigma_{XZ}^{(1)} = 0 & \text{à } z = d_1 + d_2/2 \\ \sigma_{ZZ}^{(1)} = \sigma_{ZZ}^{(2)} & \text{à } z = d_2/2 \\ \sigma_{XZ}^{(1)} = \sigma_{XZ}^{(2)} & \text{à } z = d_2/2 \\ U_X^{(1)} = U_X^{(2)} & \text{à } z = d_2/2 \\ U_Z^{(1)} = U_Z^{(2)} & \text{à } z = d_2/2 \\ \sigma_{ZZ}^{(2)} = \sigma_{ZZ}^{(3)} & \text{à } z = -d_2/2 \\ \sigma_{XZ}^{(2)} = \sigma_{XZ}^{(3)} & \text{à } z = -d_2/2 \\ U_X^{(2)} = U_X^{(3)} & \text{à } z = -d_2/2 \\ U_Z^{(2)} = U_Z^{(3)} & \text{à } z = -d_2/2 \\ \sigma_{ZZ}^{(3)} = 0 & \text{à } z = -d_3 - d_2/2 \\ \sigma_{XZ}^{(3)} = 0 & \text{à } z = -d_3 - d_2/2 \end{array} \right. \quad (11)$$

Où les composantes tangentielles et normales du déplacement et de la contrainte dans la couche  $i$  s'écrivent :

$$U_X^{(i)} = \frac{\partial \Phi^{(i)}}{\partial x} - \frac{\partial \Psi^{(i)}}{\partial z} \quad ; \quad U_Z^{(i)} = \frac{\partial \Phi^{(i)}}{\partial z} + \frac{\partial \Psi^{(i)}}{\partial x} \quad (12)$$

$$\sigma_{XZ}^{(i)} = \mu^{(i)} \left( \frac{\partial U_X^{(i)}}{\partial z} + \frac{\partial U_Z^{(i)}}{\partial x} \right) \quad ; \quad \sigma_{ZZ}^{(i)} = \lambda^{(i)} \left( \frac{\partial U_X^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial U_Z^{(i)}}{\partial z} \right) + 2\mu^{(i)} \frac{\partial U_Z^{(i)}}{\partial z} \quad (13)$$

$\lambda^{(i)}$  et  $\mu^{(i)}$  sont les coefficients de Lamé de la couche (i).

En utilisant les relations (12) et (13) et les expressions des potentiels scalaires et vecteurs (6) et (7), le système de 12 équations homogènes (11) peut s'écrire sous forme matricielle:

$$[M] [C] = [0] \quad (14)$$

$[M]$  est une matrice 12x12 fonction des propriétés géométriques et mécaniques de la structure, de la fréquence d'excitation  $f$  et du nombre d'onde  $k$ . Les éléments de la matrice  $[M]$  sont donnés dans l'annexe.1.

$[C]$  est un vecteur dont les composantes sont les 12 constantes d'intégration.

Pour éviter les solutions triviales de l'équation (14), le déterminant de la matrice  $[M]$  doit être nul :

$$\det [M] = 0 \quad (15)$$

L'équation (15) est appelée l'équation de dispersion (ou l'équation caractéristique) qui est résolue numériquement pour déterminer ses racines  $k$  (nombre d'onde) et leur évolution en fonction de la fréquence  $f$ : courbes de dispersion. La méthode du calcul numérique est présentée au paragraphe I-2.

### **I – 1 – 2 – Méthode des matrices de transfert:**

Développée en 1949 par Thomson [45] qui fut le premier auteur à proposer une méthode de résolution du problème de la propagation d'ondes dans un milieu stratifié composé d'un nombre arbitraire de couches isotropes. Reprise et corrigée par Haskell [46] en 1953, cette méthode a longtemps été utilisée dans les domaines de la physique [47-49], de la géophysique [50-52] et de l'océanographie [53]. Au cours des années 80, elle a été généralisée pour simuler la réflexion ou la transmission d'ondes planes ultrasonores par des milieux stratifiés plans constitués de matériaux anisotropes et/ou viscoélastiques, représentatifs des composites ou des assemblages collés utilisés dans les industries du transport [54-58]. Plus tard, de part l'intérêt porté aux ondes guidées, la méthode des matrices de transfert a été utilisée pour simuler la propagation d'ondes de Lamb ou d'ondes SH le long de plaques constituées de matériaux plus ou moins complexes [59-63].

#### **A - Principe de la méthode:**

La méthode des matrices de transfert consiste à construire une matrice carrée, notée  $[R]$ , qui relie le vecteur d'état  $[Y]$  d'une surface de la couche à celui de l'autre surface. Le vecteur d'état  $[Y]$  représente le déplacement de la surface considérée et les contraintes qu'elle subit.

Pour une structure constituée de  $N$  couches différentes, une matrice de transfert  $[R^{(i)}]$  est établie pour chaque couche  $(i)$  ( $1 \leq i \leq N$ ). Elle relie le vecteur d'état  $[Y^{(i)}]$  d'une surface de cette couche à celui de l'autre surface. Les conditions de continuité des déplacements et des contraintes aux interfaces séparant deux couches solides adjacentes permettent alors de construire la matrice de transfert de toute la strate qui relie les vecteurs d'état des surfaces extrêmes de la strate.

#### **B – L'équation de dispersion de la structure tri-couche:**

Le système étudié est décrit dans le paragraphe (I-1-1). En déformations planes, le potentiel scalaire ainsi que la composante du potentiel vecteur sont définis respectivement par les expressions (6) et (7).

Les vecteurs d'état dans chaque couche (i) comportent quatre composantes (deux pour les déplacements et deux pour les contraintes):

$$\left[ Y^{(i)}(z) \right] = \left[ u_x^{(i)}(z), u_z^{(i)}(z), \sigma_{zz}^{(i)}(z), \sigma_{xz}^{(i)}(z) \right]^t, \text{ où } t \text{ est le symbole de transposition.}$$

A l'aide des relations (12) et (13) et les expressions des potentiels scalaires et vecteurs (6) et (7), Les composantes du vecteur d'état  $\left[ Y^{(i)} \right]$ , dans la couche (i), seront exprimer en fonction des amplitudes des potentiels au niveau de la surface supérieure et inférieure en remplaçant simplement  $z$  par  $z_i$  et par  $z_{i+1}$  qui représentent respectivement le coordonnée en  $z$  de la surface supérieure de la couche (i) et celui de la couche adjacente (i+1), (voir Figure IV-1).

Les amplitudes des potentiels dans la couche (i) sont les constantes d'intégration  $A^{(i)}, B^{(i)}, C^{(i)}$  et  $D^{(i)}$  qu'on représente sous la forme vectorielle suivante:

$$\left[ X^{(i)} \right] = \left[ A^{(i)}, B^{(i)}, C^{(i)}, D^{(i)} \right]^t, \text{ où } t \text{ est le symbole de transposition.}$$

On obtient ainsi deux systèmes matriciels, se mettant sous la forme suivante :

Pour la surface supérieure :

$$\left[ Y^{(i)}(z = z_i) \right] = \left[ L^{(i)}(z = z_i) \right] \left[ X^{(i)} \right] \quad (16)$$

Pour la surface inférieure :

$$\left[ Y^{(i)}(z = z_{i+1}) \right] = \left[ L^{(i)}(z = z_{i+1}) \right] \left[ X^{(i)} \right] \quad (17)$$

Les éléments des matrices  $\left[ L^{(i)}(z = z_i) \right]$  et  $\left[ L^{(i)}(z = z_{i+1}) \right]$  sont donnés dans l'annexe.2.

Le vecteur d'état  $\left[ Y^{(i)} \right]$  de la surface supérieure est donc relié à celui de la surface inférieure par la relation :

$$\begin{aligned} \left[ Y^{(i)}(z = z_i) \right] &= \left[ L^{(i)}(z = z_i) \right] \left[ L^{(i)}(z = z_{i+1}) \right]^{-1} \left[ Y^{(i)}(z = z_{i+1}) \right] \\ &= \left[ R^{(i)} \right] \left[ Y^{(i)}(z = z_{i+1}) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

Où  $\left[ R^{(i)} \right]$  est la matrice de transfert de la couche (i).

Dans le cas d'un contact parfait entre les couches de la structure étudiée, à chaque interface tôle/adhésif, il y a continuité des contraintes et des déplacements (les relations (9) et (10)). Ces dernières conditions de continuité se traduisent par la relation d'égalité entre les vecteurs d'état de chaque côté de l'interface :

$$\left[ Y^{(i)}(z = z_{i+1}) \right] = \left[ Y^{(i+1)}(z = z_{i+1}) \right] \quad (19)$$

La relation (19) à chaque interface tôle/adhésif permet alors d'obtenir la matrice de transfert de toute la structure tri-couche étudiée par la relation simple suivante:

$$[R] = \prod_{i=1}^3 [R^{(i)}] \quad (20)$$

La matrice de transfert  $[R]$  relie le vecteur d'état de la surface supérieure ( $z = h/2$ ) au vecteur d'état de la surface inférieure de la structure tri-couche étudiée ( $z = -h/2$ ):

$$[Y^{(1)}(z = h/2)] = [R] [Y^{(3)}(z = -h/2)] \quad (21)$$

$h$  : est l'épaisseur de la structure tri-couche étudiée, (Figure IV-1).

Comme nous l'avons considéré dans le paragraphe I-1-1, les surfaces extrêmes de la structure tri-couche étudiée sont libres de toute contrainte c'est-à-dire l'annulation des contraintes sur les surfaces inférieure et supérieure de la strate. En effet, les vecteurs d'état au niveau des deux surfaces extrêmes de la structure tri-couche étudiée s'écrivent alors:

$$[Y^{(1)}(z = h/2)] = [u_x^{(1)}(z = h/2), u_z^{(1)}(z = h/2), 0, 0]^T \quad (22)$$

$$[Y^{(3)}(z = -h/2)] = [u_x^{(3)}(z = -h/2), u_z^{(3)}(z = -h/2), 0, 0]^T \quad (23)$$

En utilisant les expressions (22) et (23) des vecteurs d'état des surfaces extrêmes de la structure tri-couche, l'équation (21) s'écrit sous la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} u_x^{(1)}(z = h/2) \\ u_z^{(1)}(z = h/2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x^{(3)}(z = -h/2) \\ u_z^{(3)}(z = -h/2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Ce système indéterminé possède des solutions non triviales si et seulement si :

$$\begin{vmatrix} R_{31} & R_{32} \\ R_{41} & R_{42} \end{vmatrix} = 0 \quad (25)$$

Notons  $[Rd]$  la matrice d'ordre 2  $\begin{bmatrix} R_{31} & R_{32} \\ R_{41} & R_{42} \end{bmatrix}$ . L'équation (25) s'écrit donc :

$$\det[Rd] = 0 \quad (26)$$

On obtient donc l'équation de dispersion (l'équ.(26)) qui est fonction des propriétés géométriques et mécaniques de la structure, de la fréquence d'excitation  $f$  et du nombre d'onde  $k$ .

Les courbes de dispersion de la structure tri-couche étudiée sont déterminées par la résolution numérique de l'équation de dispersion (l'équ. (26)) en déterminant ces racines  $k$  (nombre d'onde) et leur évolution en fonction de la fréquence  $f$ . La méthode du calcul numérique est présentée au paragraphe I-2.

**I – 2 – Résolution numérique de l'équation de dispersion : Courbes de dispersion**

Dans ce paragraphe nous présentons la méthode de la résolution numérique de l'équation caractéristique déterminée soit par la méthode des matrices globales (équation (15)) soit par la méthode des matrices de transfert (l'équation (26)). Nous discutons également les difficultés de cette résolution numérique. Le déterminant de la matrice  $[M]$  ou celui de la matrice  $[Rd]$ , est une fonction bidimensionnelle fréquence  $f$ - nombre d'onde  $k$ . Le déterminant peut être tracé sur un graphe tridimensionnel où la valeur du déterminant est représentée en fonction de la fréquence  $f$  et le nombre d'onde  $k$ . Les solutions de l'équation de dispersion sont les couples  $(f,k)$  pour lesquels le déterminant est nul. Deux programmes sont élaborés sur Matlab ; le premier (programme iso-contours) est utilisé pour obtenir une première impression des courbes de dispersion sans grande précision de calcul des racines de l'équation caractéristique. Le résultat de ce programme est ensuite exploité par un deuxième programme (programme des racines exactes) permettant d'obtenir, avec grande précision, le réseau de dispersion. La technique numérique utilisée est basée sur la méthode de la bisection combinée à une procédure d'interpolation.

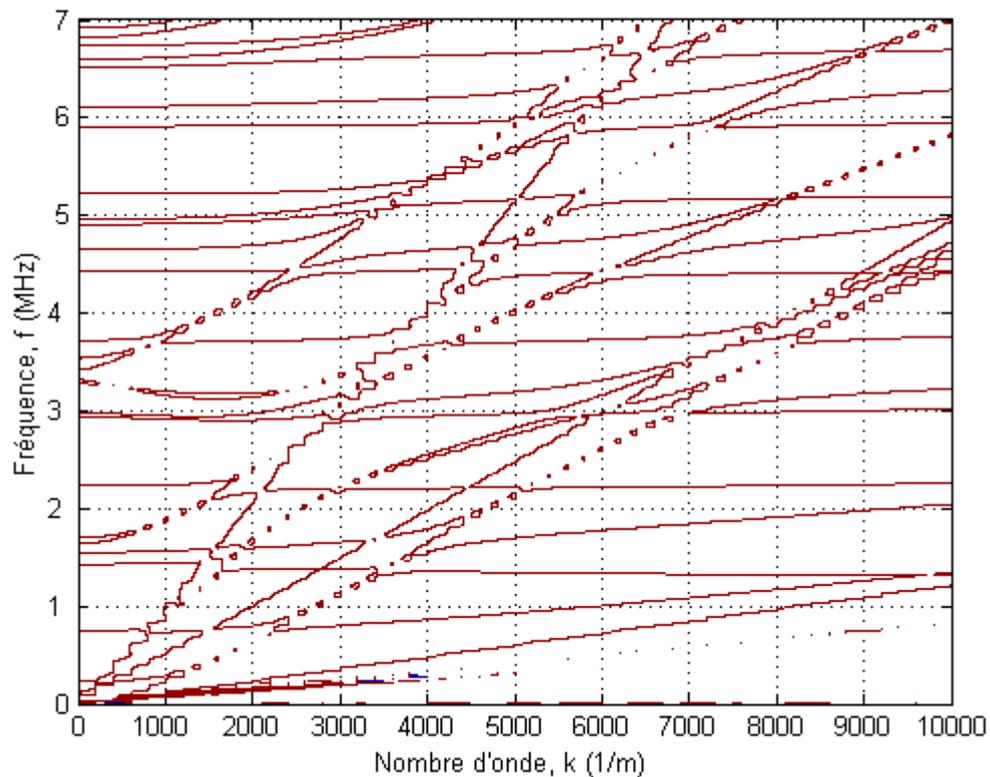
**I-2-1 - Première impression des courbes de dispersion :**

Un programme (programme iso-contours) est développé sur Matlab pour obtenir une première impression des courbes de dispersion sans gaspiller beaucoup de temps dans un calcul intensif, de grande précision des racines de l'équation caractéristique. Ce programme calcule la valeur de déterminant pour un nombre d'onde  $k$  fixe et pour des valeurs croissantes de la fréquence  $f$  depuis la fréquence nulle jusqu'à une fréquence maximale désirée avec un pas fréquentiel  $df$ . Pour chaque couple  $(f,k)$ , la valeur du déterminant est calculée et stockée dans une matrice. Cette dernière opération est répétée pour des valeurs croissantes du nombre d'onde  $k$ , avec un pas  $dk$ , jusqu'à ce que le nombre d'onde maximal désiré soit atteint. Finalement, pour toutes les paires  $(f,k)$ , la valeur du déterminant est stockée dans une matrice. En traçant les iso-contours à la valeur zéro du déterminant, les racines de l'équation caractéristique deviennent visibles sur un diagramme  $f-k$ . La figure IV-2 présente la première impression des courbes de dispersion d'une structure tri-couche constituée de deux tôles d'aluminium liées par une couche de colle en résine époxy. Les propriétés géométriques et mécaniques de la structure sont données sur le tableau IV-1 ci-dessous.

Matériau	Epaisseur (mm)	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Vitesse longitudinale (m/s)	Vitesse transversale (m/s)
Tôle d'Aluminium	0.9398	2700	6450	3100
Couche de résine époxy	0.25	1106	771	370

**Tableau IV-1 :** Les propriétés géométriques et mécaniques de l'aluminium et de la colle.

La figure IV-2 est obtenue en exécutant le programme iso-contours pour la gamme fréquentielle de 0-7 MHz et la gamme du nombre d'onde de 0-10.000 m<sup>-1</sup> avec le pas fréquentiel  $df=500$  Hz et le pas du nombre d'onde  $dk=200$  m<sup>-1</sup>.



**Figure IV-2 :** Les courbes de dispersion de la structure tri-couche (AL/C/AL) avec le programme iso-contours

Il est visible que les courbes de dispersion, déterminées par le programme iso-contours, ne sont pas de qualité car il existe des racines de l'équation caractéristique qui ne sont pas représentées. La résolution de ce tracé devient légèrement meilleure quand les valeurs de  $dk$  et  $df$  sont réduites.

### I-2-2- Courbes de dispersion raffinées :

Le résultat du programme iso-contours est exploité par un deuxième programme écrit sur Matlab (programme des racines exactes) permettant d'obtenir, avec grande précision, le réseau

de dispersion. La technique numérique utilisée est basée sur la méthode de la bisection combinée à une procédure d'interpolation. Les résultats obtenus sont les paires  $(f,k)$  de chaque mode du réseau de dispersion.

Dans une première étape, la valeur du déterminant est calculée pour les nombres d'onde  $k : 0, dk, 2dk$  pour des valeurs croissantes de la fréquence  $f$ . Le pas fréquentiel est  $df$ . Quand un changement de signe de déterminant apparaît, la méthode de bisection est utilisée pour chercher avec plus de précision la racine. Pour chaque courbe de dispersion, les fréquences déterminées correspondantes aux trois premières valeurs de  $k$ , sont stockées dans un vecteur.

Après cette opération, les fréquences de chaque courbe correspondantes aux nombres d'onde  $k$  de valeurs plus grandes, sont déterminées à l'aide d'un processus d'interpolation. Par exemple, pour déterminer la fréquence correspondante au nombre d'onde  $3dk$ , on considère un intervalle fréquentiel, centré à la fréquence  $f(2dk)$ . La longueur de l'intervalle est un multiple  $N$  du pas fréquentiel  $df$ . La valeur de  $N=50$  est souvent suffisante. Ensuite, toutes les racines dans cet intervalle sont déterminées. Evidemment, seulement une de ces racines est la racine correcte correspondante à la courbe cherchée. Les autres racines sont les racines pour des courbes voisines. C'est au voisinage des intersections des courbes que plus qu'une racine peut exister dans l'intervalle.

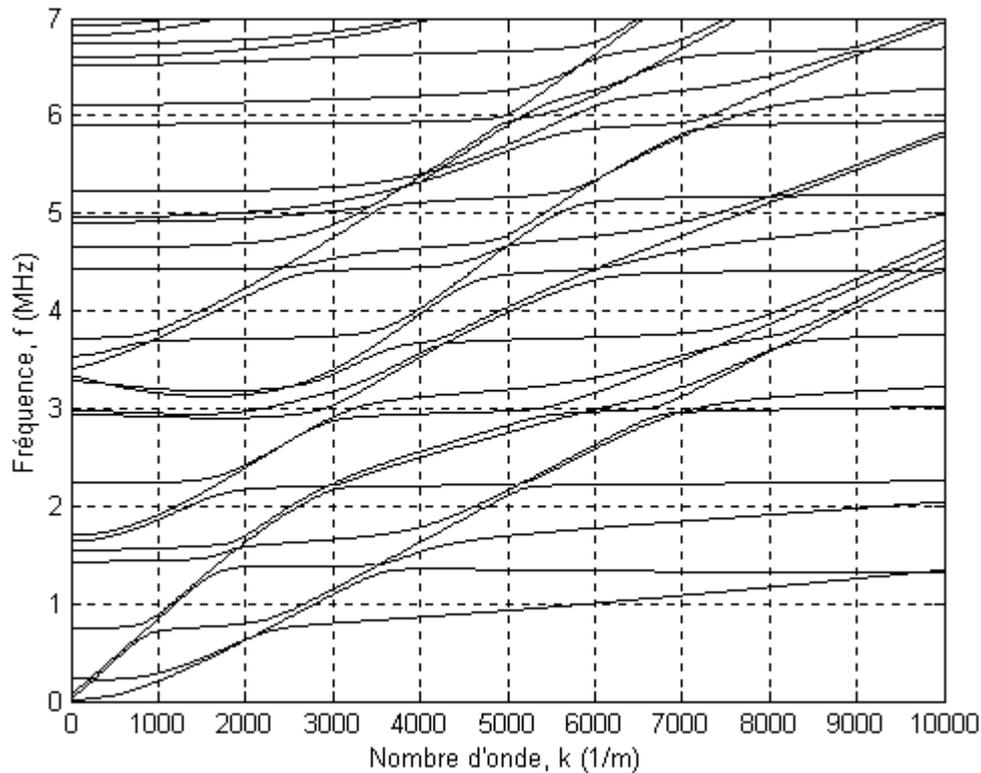
Pour chacune des racines  $f_i$  déterminées dans l'intervalle, nous déterminons un polynôme d'interpolation  $P_i$  correspondant aux quatre points  $(0, f_0), (dk, f_1), (2dk, f_2), (3dk, f_i)$  et nous calculons la dérivée seconde du polynôme  $P_i$  aux points  $2dk$  et  $3dk$ . La racine correcte  $f_3$  cherchée correspond à la plus petite valeur de  $|P_i''(3dk) - P_i''(2dk)|$ .

Dans le cas où aucune racine n'est trouvée dans l'intervalle, ce dernier doit être allongé.

Ce processus est répété pour déterminer la fréquence correspondante au nombre d'onde suivant.

Finalement, pour chaque courbe de dispersion il existe un vecteur dans lequel les fréquences déterminées sont stockées. La valeur du nombre d'onde  $k$  correspondant à chaque fréquence stockée est connue puisque la valeur du nombre d'onde  $k$  est toujours accrue de  $dk$ .

La figure IV-3 représente le réseau de dispersion raffiné de la structure étudiée, déterminé avec le programme des racines exactes, pour les mêmes gammes de fréquence et du nombre d'onde que celles de la première impression (figure IV-2) avec le pas fréquentiel  $df = 500$  Hz et le pas du nombre d'onde  $dk = 20$  m<sup>-1</sup>.



**Figure IV-3 :** Les courbes de dispersion raffinées de la structure (AL/C/AL)

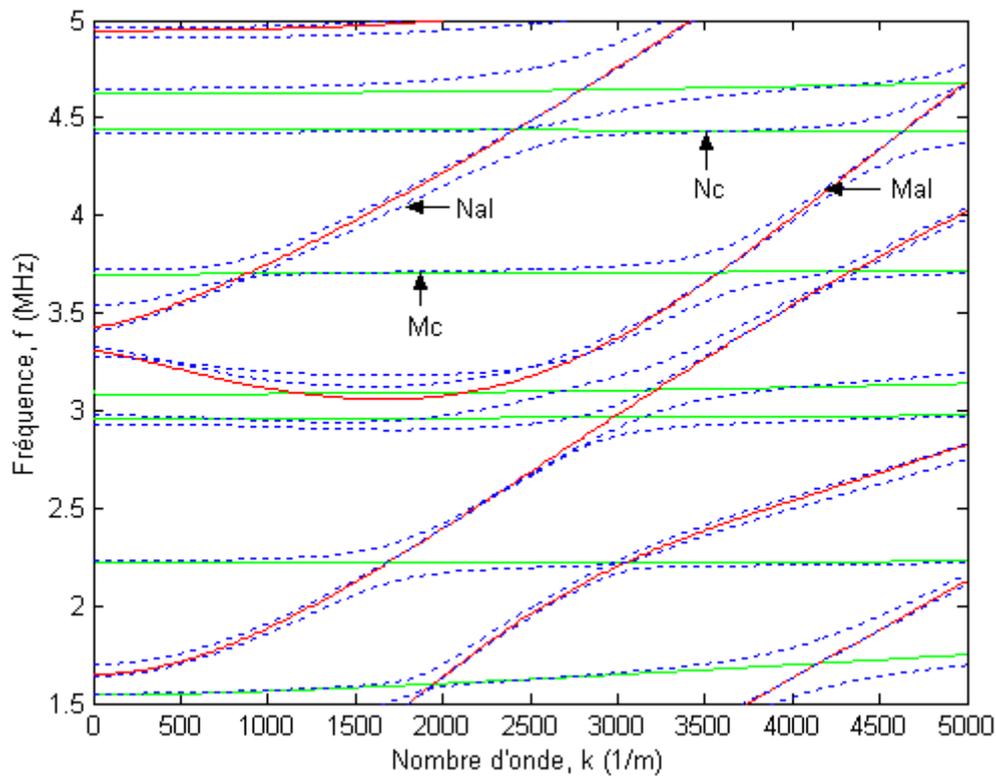
Contrairement à la première impression du réseau de dispersion (figure IV-2), tous les modes sont clairement visibles et chaque racine est représentée par un paire  $(f,k)$ . Ces valeurs sont nécessaires pour des calculs ultérieurs.

Seifried [40] utilise une superposition des courbes de dispersion d'une plaque d'aluminium seule sur les courbes de dispersion de la même structure tri-couche étudiée ici (aluminium/collé/aluminium) pour montrer que quelques modes du modèle tri-couche paraissent suivre les modes d'une plaque d'aluminium seule.

La figure IV-4 présente un zoom de la superposition artificielle, sur la gamme de fréquence de 1.5-5 MHz et la gamme de nombre d'onde de 0-5 000  $m^{-1}$ , de trois réseaux de dispersion :

- une plaque d'aluminium seule (trait plein rouge)
- la couche de colle seule (trait plein vert)
- la structure tri-couche (les courbes en trait pointillé bleu).

Ainsi, nous montrons que chaque mode de la structure tri-couche se compose de portions qui suivent des modes d'une tôle d'aluminium seule et autres (quasi horizontales) qui suivent des modes de la couche de colle seule.



**Figure IV-4 :** Les courbes de dispersion du modèle tri-couche AL/C/AL (trait pointillé bleu)  
 + Les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge)  
 + Les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert)

### I-2-3 – Difficultés numériques et amélioration :

Dans ce paragraphe, nous présentons quelques difficultés numériques de la résolution de l'équation de dispersion. Nous présentons également quelques solutions de ces problèmes numériques pour améliorer les résultats obtenus.

Les valeurs du déterminant de la matrice  $[M]$  de l'équation (15) sont extrêmement grandes. Elles atteignent la valeur  $10^{150}$ . Ces grandes valeurs produisent un bruit numérique et retarde la vitesse de l'algorithme. Cette vitesse peut être améliorée en remplaçant les constantes de Lamé dans les éléments de la matrice par leur expression en fonction des vitesses longitudinales et transversales ( $v_L^{(i)}$ ,  $v_T^{(i)}$ ) et les densités  $\rho^{(i)}$ . Cette opération conduit à la réduction de la valeur de déterminant par un facteur de  $10^{50}$  et une diminution du temps de calcul par un facteur de trois.

Les valeurs du déterminant de la matrice  $[Rd]$  (d'ordre 2) sont beaucoup plus petites que celles de la matrice  $[M]$  (d'ordre 12), Dans les cas extrêmes, elles atteignent la valeur  $10^{38}$ . L'ordre de la matrice  $[Rd]$  permet la réduction du bruit numérique et le temps de calcul. Ce qui

laisse déduire que la méthode des matrices de transfert est numériquement la plus performante pour le calcul des courbes de dispersion, notamment en ce qui concerne le choix du nombre des couches constituant la strate. En effet, la quantité de strates peut être extrêmement élevée, contrairement au cas de la méthode des matrices globales pour laquelle la dimension des matrices croît linéairement avec le nombre de couches.

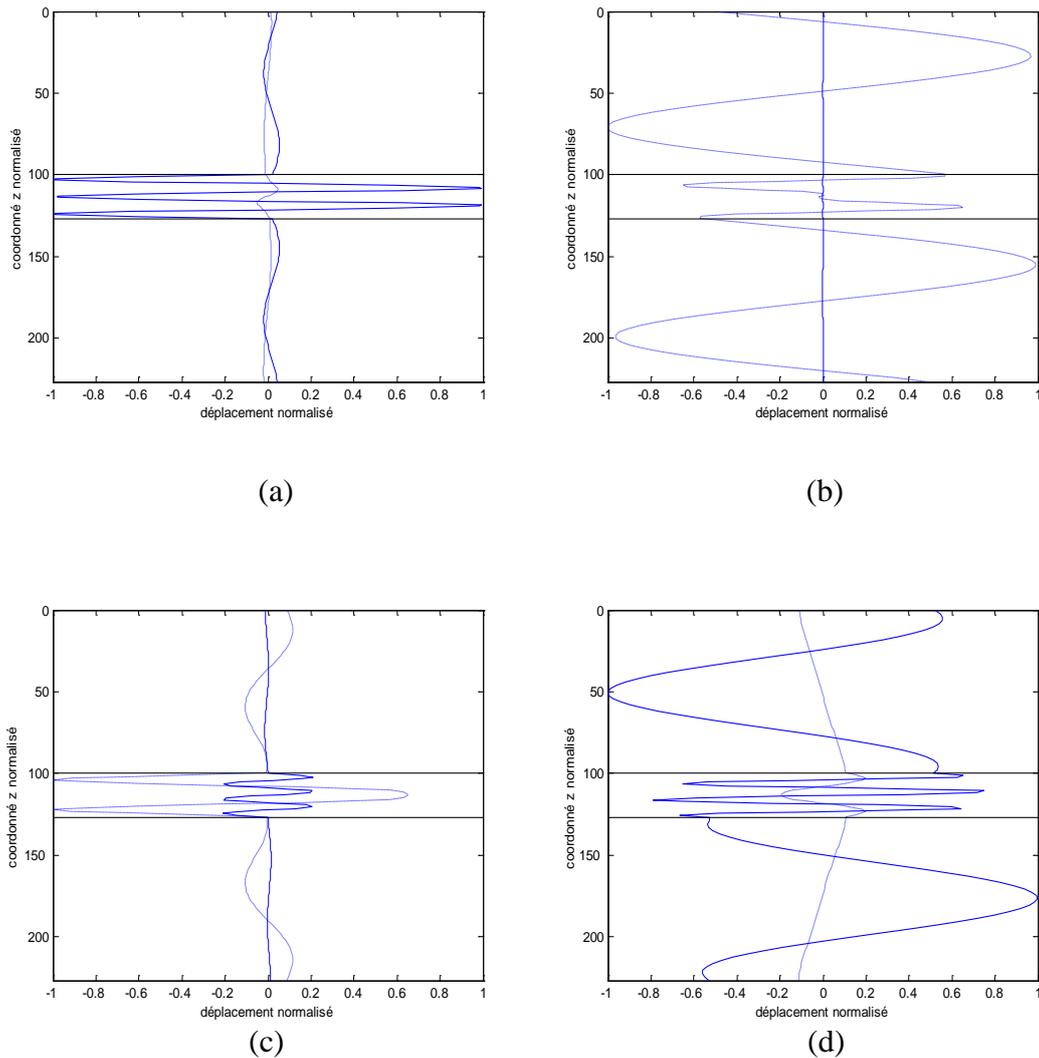
C'est numériquement difficile de calculer correctement les racines de l'équation de dispersion. Même avec des nombres à double précision, le déterminant n'atteindra pas une valeur au voisinage de zéro. En conséquence, seulement un changement du signe montre la présence d'une racine. Un autre problème dans la recherche des racines est que le changement du signe près d'une racine se produit très brusquement. Pour cette raison, seulement un algorithme basé sur la méthode de bisection peut être utilisé pour localiser approximativement une racine.

### **I – 3 – Le calcul du champ de déplacement :**

Le réseau de dispersion (figure IV-3) présente tous les modes pouvant se propager dans la structure tri-couche dans la gamme fréquentielle 0-7 MHz mais ne fournit aucune information sur la répartition énergétique de ces modes dans la structure. Seule la détermination du champ des déplacements, via le calcul des vecteurs propres de la matrice  $[M]$ , le permet. Les vecteurs propres ne pouvant être calculés qu'à une constante arbitraire près, les déplacements sont alors normalisés à leurs maximums.

La figure IV-5 présente les composantes longitudinale ( $u_x$ ) et transversale ( $u_z$ ) du déplacement correspondantes à quatre paires  $(f,k)$  (points  $M_c$ ,  $M_{al}$ ,  $N_c$  et  $N_{al}$ ) identifiées sur la figure IV-4.  $M_c$ (ou  $N_c$ ) et  $M_{al}$ (ou  $N_{al}$ ) sont deux points d'un même mode. L'un est pris de la partie qui suit le mode de la couche de colle seule, l'autre est pris de la partie longeant le mode de la tôle d'aluminium seule. Pour chacune des courbes, l'axe des ordonnées représente l'épaisseur de la structure tri-couche normalisée à l'épaisseur de la tôle d'aluminium. L'axe des abscisses représente les déplacements normalisés.

La figure IV-5(a) montre que le mode  $M_c$  se propage principalement dans la couche de colle et il n'y a pratiquement aucun déplacement appréciable dans les tôles d'aluminium. Par contre la figure IV-5(b) montre que le mode  $M_{al}$  se propage de manière prépondérante dans les tôles d'aluminium. Le même constat est à faire lorsque l'on considère les deux points  $N_c$  et  $N_{al}$  (figures IV-5(c) et IV-5(d)).



**Figure IV-5:** Le champ de déplacement pour quatre paires (f-k) différents identifiés sur la figure IV-4.

Trait en pointillé ----- le déplacement transversal  $U_z$

Trait plein ----- le déplacement longitudinal  $U_x$

(a) Point  $M_c$  (b) Point  $M_{al}$  (c) Point  $N_c$  (d) Point  $N_{al}$

## II – Influence du contact sur les courbes de dispersion :

### II-1- Conditions aux limites : Modèle de Pilarski

Pour étudier l'influence du contact (aluminium/colle et colle/aluminium) sur les courbes de dispersion, les conditions de continuité aux interfaces, les équations (9) et (10), considérées dans le paragraphe (I-1-1) sont remplacées par celles définies par Pilarski [64] :

- Continuité des contraintes de part et d'autre des interfaces :

$$\sigma_{ZZ}^+ = \sigma_{ZZ}^- \quad ; \quad \sigma_{XZ}^+ = \sigma_{XZ}^- \quad (27)$$

- Relation de proportionnalité entre les contraintes et la différence des composantes du déplacement de part et d'autre de l'interface :

$$\begin{aligned}\sigma_{ZZ}^+ &= P_N (U_Z^+ - U_Z^-) \\ \sigma_{XZ}^+ &= P_T (U_X^+ - U_X^-)\end{aligned}\quad (28)$$

$P_N$  et  $P_T$  sont les paramètres qui caractérisent l'interface, ils s'expriment en  $\text{Nm}^{-3}$ .

L'écriture des relations de proportionnalité ci-dessus sous la forme  $U_{z,x}^+ = U_{z,x}^- + \sigma / P_{N,T}$  montre que lorsqu'on donne au paramètre  $P_{N,T}$  une valeur très grande le terme  $\sigma / P_{N,T}$  tend vers zéro ce qui donne l'égalité des composantes du déplacement de part et d'autre des interfaces, c'est le cas d'un contact parfait.

Dans le formalisme matriciel de la méthode des matrices de transfert, paragraphe I-1-2 (B), ces conditions aux interfaces sont introduites de la manière suivante :

A l'aide des équations de Pilarski (27) et (28), on peut écrire une relation entre les vecteurs d'état  $[Y^{(i)}(z = z_{i+1})]$  et  $[Y^{(i+1)}(z = z_{i+1})]$  qui décrivent les deux composantes de déplacement et de contrainte de chaque coté de l'interface:

$$\begin{bmatrix} u_x^{(i)}(z = z_{i+1}) \\ u_z^{(i)}(z = z_{i+1}) \\ \sigma_{zz}^{(i)}(z = z_{i+1}) \\ \sigma_{xz}^{(i)}(z = z_{i+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1/P_T \\ 0 & 1 & 1/P_N & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x^{(i+1)}(z = z_{i+1}) \\ u_z^{(i+1)}(z = z_{i+1}) \\ \sigma_{zz}^{(i+1)}(z = z_{i+1}) \\ \sigma_{xz}^{(i+1)}(z = z_{i+1}) \end{bmatrix}$$

que l'on peut écrire sous forme:

$$[Y^{(i)}(z = z_{i+1})] = [P_{NT}] [Y^{(i+1)}(z = z_{i+1})] \quad (29)$$

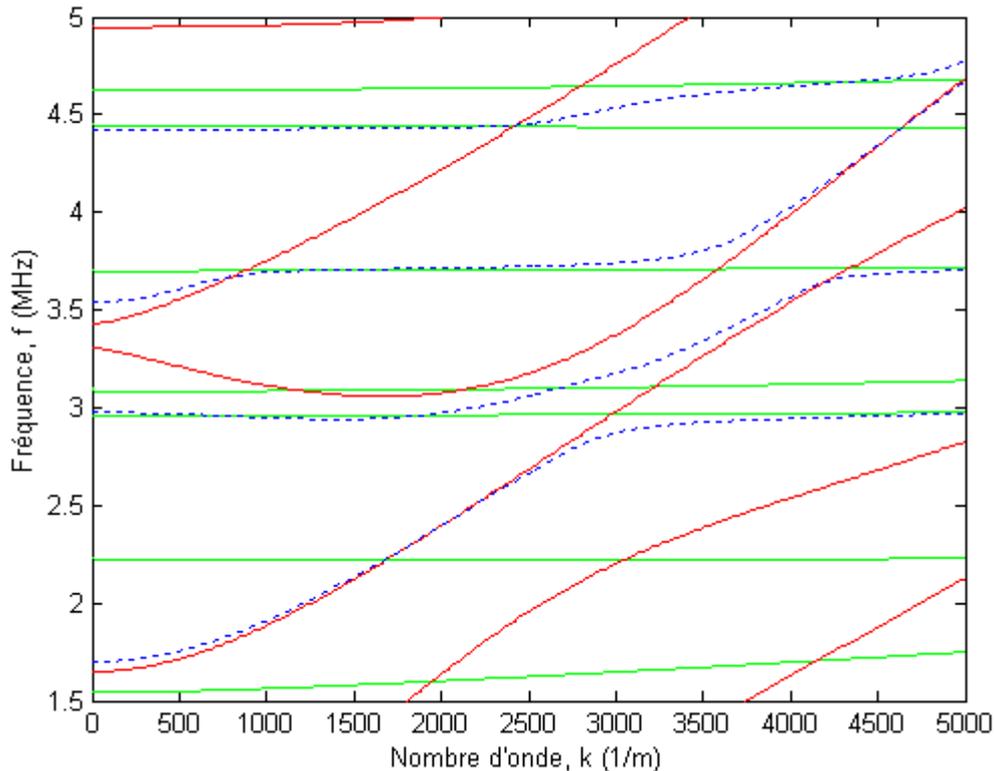
avec  $[P_{NT}]$  est la matrice de passage entre les interfaces.

A chaque interface de la structure, la relation (19) est donc remplacée par la relation (29) qui représente les conditions aux interfaces de Pilarski.

## II-2- Résultats numériques :

La figure IV-6 présente quatre modes des courbes de dispersion du modèle tri-couche (les courbes en trait pointillé) dans le cas d'un contact parfait. Le contact parfait du système examiné est obtenu numériquement lorsqu'on donne aux paramètres  $P_N$  et  $P_T$  la valeur  $10^{17} \text{N m}^{-3}$ .

Le choix du nombre des modes étudiés permet de suivre d'une manière claire l'évolution des courbes de dispersion en fonction de la qualité du contact. Les autres modes évoluent de la même manière que les modes choisis.



**Figure IV-6:** - les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge)  
 - les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert)  
 - les quatre modes choisis pour le modèle AL/C/AL (trait pointillé bleu)  $P_N=P_T=10^{17}$ .

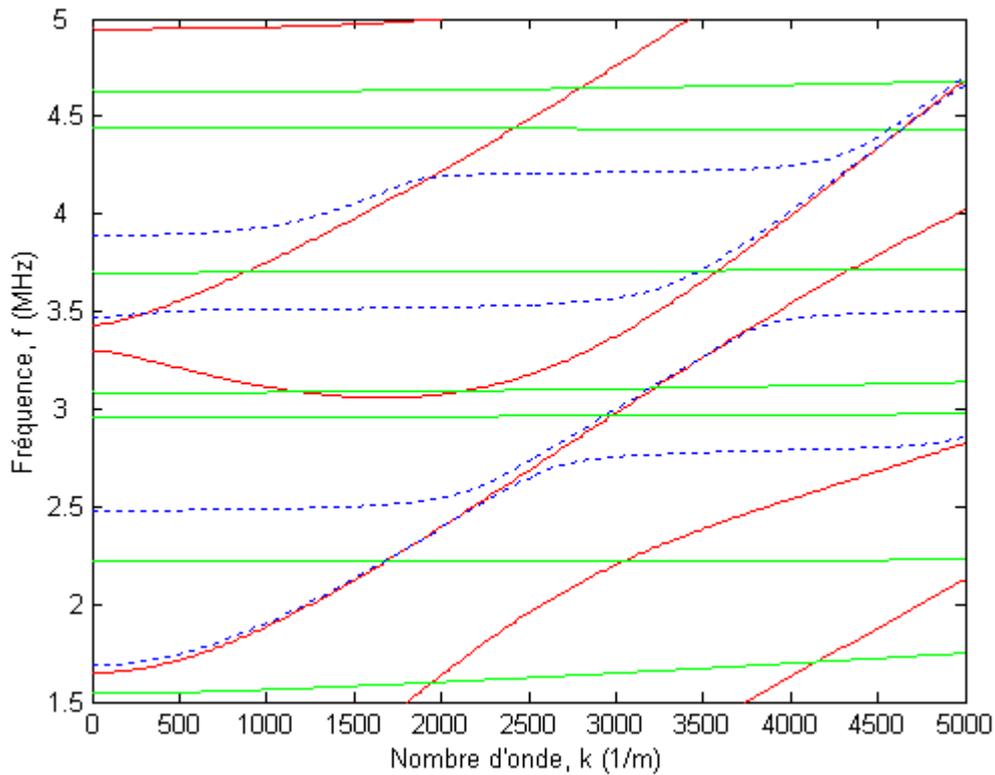
La dégradation de la qualité du contact entre les tôles d'aluminium et la colle est traduite numériquement en donnant aux paramètres  $P_N$  Et  $P_T$  des valeurs inférieures à  $10^{17} \text{N m}^{-3}$ . Les figures IV-7, IV-8, IV-9 et IV-10 représentent l'évolution des courbes de dispersion en fonction de la qualité du contact.

On constate qu'au fur et à mesure que la qualité de contact diminue i.e. la valeur de  $P_N$  et  $P_T$  diminue, les modes des portions presque horizontales glissent vers les basses fréquences en montrant soit un élargissement ou un rétrécissement.

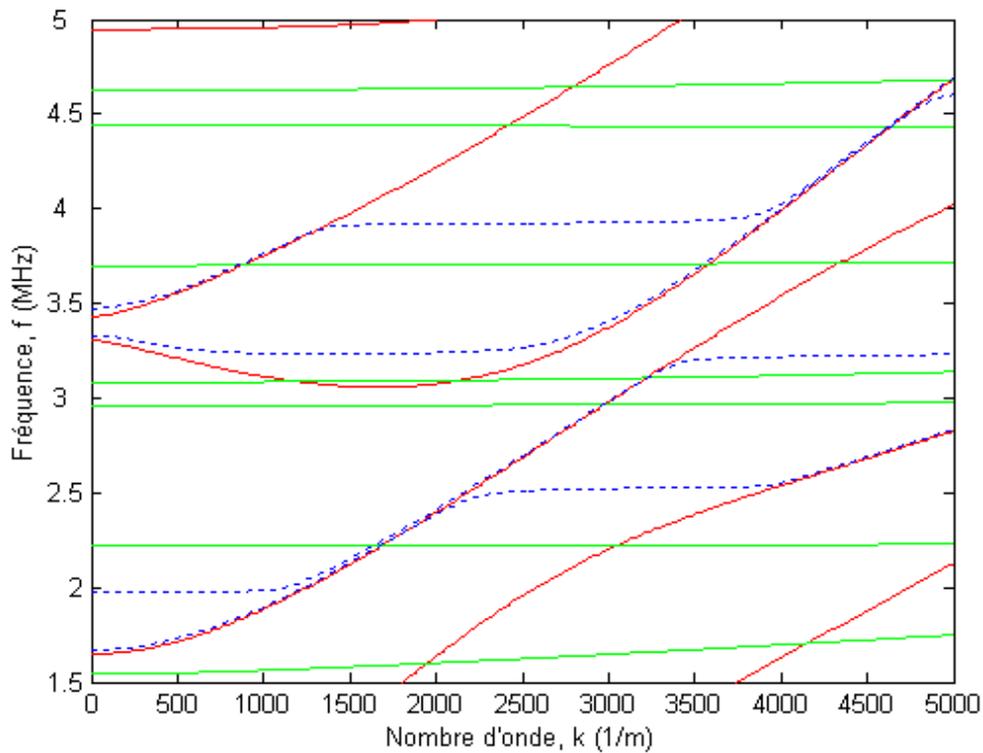
Quand les paramètres de Pilarski prennent des valeurs inférieures à la valeur  $1.5 \cdot 10^{12}$ , les modes qui suivent les modes de la plaque d'aluminium seule commencent à disparaître.

A la valeur  $10^{11}$  toute les parties des courbes qui suivent les modes d'une plaque d'aluminium seule disparaissent totalement, seules les parties quasi horizontales restent et s'alignent avec les mêmes parties des autres courbes (le reste des courbes de dispersion du

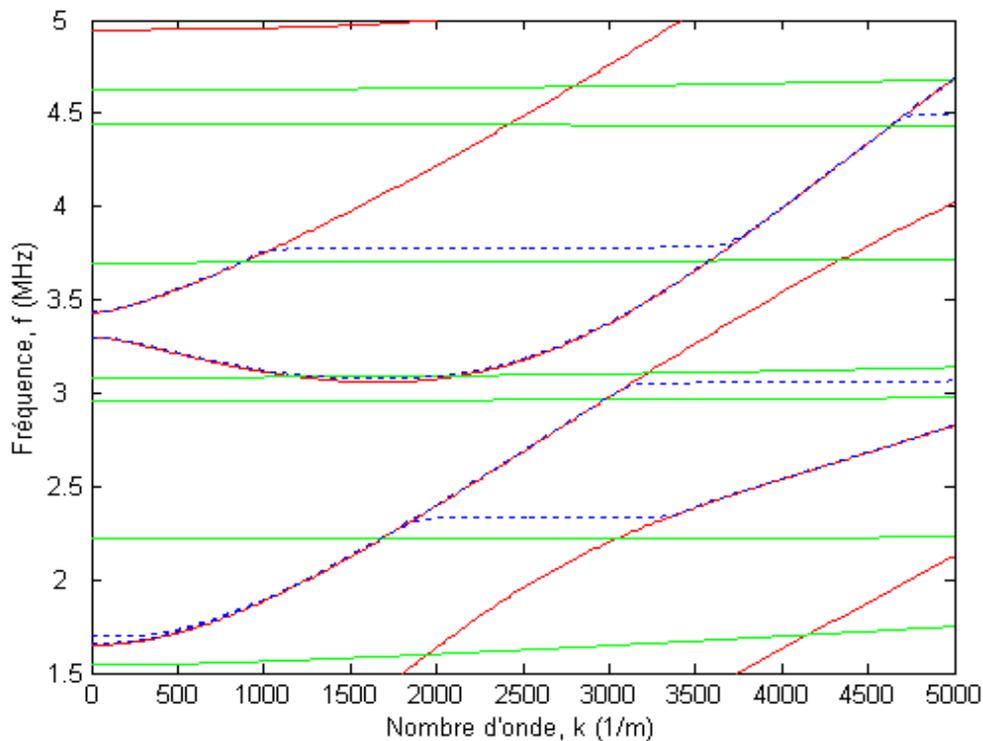
modèle tri-couche non choisis) pour donner exactement les modes prévus pour la couche de la colle seule (figure IV-10). Des valeurs de  $P_N$  et  $P_T$  inférieures à  $10^{11}$  ne produisent aucun changement sur les courbes de dispersion obtenues pour  $P_N = P_T = 10^{11}$ .



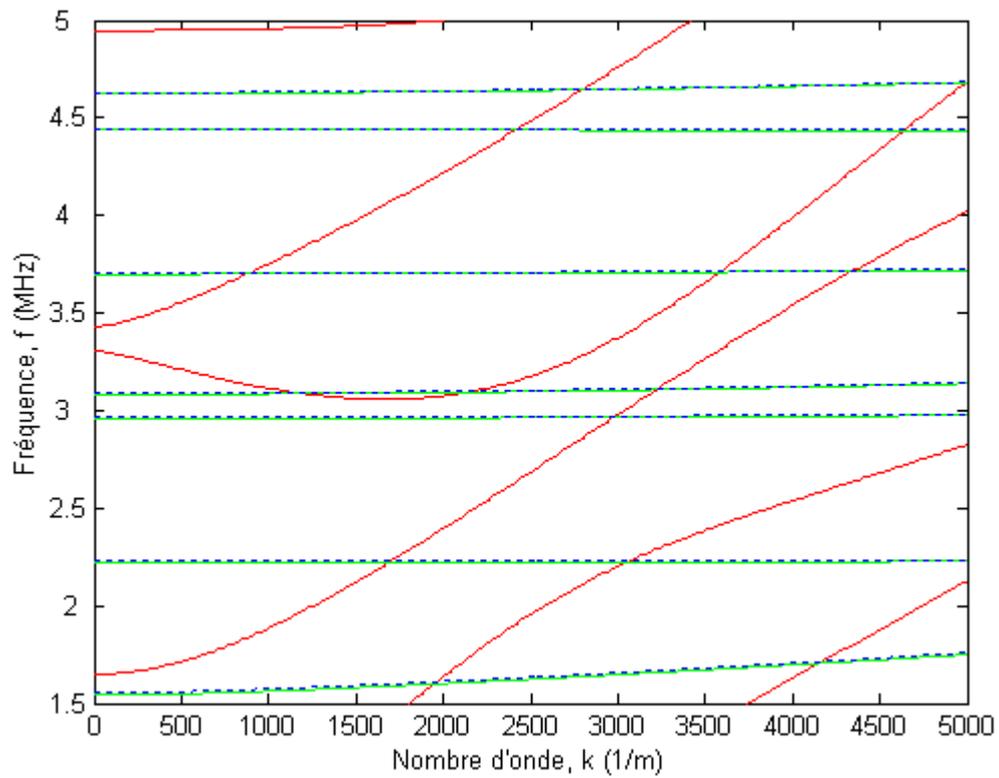
**Figure IV-7:** - les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge)  
 - les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert)  
 - les quatre modes choisis pour le modèle AL/C/AL (trait pointillé bleu)  $P_N=P_T=2.10^{13}$ .



**Figure IV-8:** - les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge)  
 - les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert)  
 - les quatre modes choisis pour le modèle AL/C/AL (trait pointillé bleu)  $P_N=P_T=5.10^{12}$ .



**Figure IV-9 :** - les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge)  
 - les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert)  
 - les quatre modes choisis pour le modèle AL/C/AL (trait pointillé bleu)  $P_N=P_T=1.510^{12}$ .



**Figure IV-10:** - les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge)  
- les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert)  
- les quatre modes choisis pour le modèle AL/C/AL (trait pointillé bleu)  $P_N=P_T=10^{11}$ .

**Conclusion :**

Deux méthodes analytiques ont été exposées permettant la détermination de l'équation caractéristique (équation de dispersion) d'une structure tri-couche plane.

Par une résolution numérique précise de cette équation caractéristique, les courbes de dispersion d'une structure tri-couche composée de deux tôles d'aluminium collées ont été déterminées. Ces courbes mettent en évidence l'existence, pour chaque mode de la structure tri-couche, de portions qui suivent des modes d'une tôle d'aluminium seule et d'autres (quasi horizontales) qui suivent des modes de la couche de colle seule.

Par ailleurs, la détermination du champ des déplacements dans la structure a montré que la répartition énergétique de l'onde ultrasonore est confinée à la couche de colle lorsque le mode de propagation est situé dans la portion qui suit le mode de la couche de colle seule et elle est prépondérante dans la couche d'aluminium si le mode est situé dans la portion qui suit le mode de la tôle d'aluminium seule.

Enfin, l'impact de la qualité de contact entre les tôles d'aluminium sur les courbes de dispersion de la structure tri-couche a été étudié. L'analyse et l'interprétation de l'évolution progressive, du contact parfait au décollement total, de ces courbes a permis de dégager des critères de caractérisation de la qualité de collage.

**Références bibliographiques**

- [1] B. HOSTEN, Bulk heterogeneous plane wave propagation through viscoelastic plates and stratified media with large values of frequency domain. *Ultrasonics*, 29, pp 445-450. 1991
- [2] T. KUNDU, M. EHSANI, ET AL., C-scan and L-scan generated images of the concrete/GFRF composite interface. *NDT&E International*, 32, pp. 61-69. 1999
- [3] T.H.GAN, D.A. HUTCHINS, ET AL., the use of broadband acoustic transducers and pulse-compression techniques for air-coupled ultrasonic imaging. *Ultrasonics*, 39, pp. 181-194. 2001
- [4] H. LAMB, On waves in an elastic plate. *Proc. Roy. Soc. of London A*, vol. 93, pp.114-128. 1917
- [5] R. FARLOW, G. HAYWARD, Real-time ultrasonic techniques suitable for implementing non-contact NDT systems employing piezoceramic composite transducers. *Insight (formerly Brit. Journ. NDT)*, vol. 36, pp.926-935. 1994
- [6] W. WRIGHT, D. HUTCHINS, Air-coupled Lamb wave tomography. *IEEE Trans. Ultras. Ferro. & Freq. Contr.*, vol. 44 (1), pp.53-59. 1997
- [7] 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), pp.37-45. 1998
- [8] D.C. WORLTON, Lamb waves at ultrasonic frequencies. *Hanford Works* 60662. 1959
- [9] I.A. VIKTOROV, Rayleigh and Lamb waves. *Plenum Press - New York*. 1967
- [10] D.E. CHIMENTI, Guided waves in plates and their use in materials characterization. *J. Am. Soc. Mech. Eng.*, vol 50 (5), pp.247-284. 1997
- [11] D. ALLEYNE, P. CAWLEY, The interaction of Lamb waves with defects. *IEEE Trans. Ultras. Ferro. & Freq. Contr.*, vol. 39 (3), pp.381-397. 1992
- [12] J.L. ROSE, *Ultrasonic waves in solid media*. Cambridge University Press. 1999
- [13] E.B. CHRISTOFFEL, *Ann. Mat. Pura Appl.* 8. pp.193. 1877
- [14] L. RAYLEIGH, on wave propagating along the plane of an elastic solid. *Proc. London Math. Soc*, 17, pp. 1885
- [15] S. ROKHLIN, Interaction of Lamb waves with elongated delaminations on thin sheets. *International Advances in Non-destructive testing*. 6, pp. 263-285. 1979
- [16] N. GUO AND P. CAWLEY, The interaction of Lamb waves with delaminations in composite laminates. *J. Acoust. Soc. AM*. 94, pp. 2240-2246. 1993

- [17] K.S. TAN, N.GUO AND B.S. WONG. Experimental evaluation of delaminations in composite plates by the use of Lamb waves. *Composites Science and Technology*. 53, pp. 77-84. 1995
- [18] E. LECLEZIO. Diffraction des ondes de Lamb par des fissures verticales. Thesis, University of Bordeaux 1, n° 2472.
- [19] K. J. SUN AND P. H. JOHNSTON. Effect of rivet rows on propagation of Lamb waves in mechanically fastened two-layer aluminum plates. *Review of Progress in quantitative Nondestructive Evaluation*. 14, pp. 1569-1577. 1995
- [20] P. CAWLEY AND D. ALLEYNE. The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures. *Ultrasonics*, 34, pp. 287-290. 1996
- [21] M.J.S. LOWE AND P. CAWLEY. The applicability of plate wave techniques for Inspection of adhesive and diffusion bonded joints. *J. Nondestruct. Eval.*, 13(4), pp. 185-200. 1994
- [22] P.B. NAGY. Leaky guided wave propagation along imperfectly bonded fibers in composite materials. *Journal of Non-destructive Evaluation*. 13, (3), pp. 137-145. 1994
- [23] R.E. CHALLIS, U. BORK AND P.C.D. TODD. Ultrasonic NDE of adhered T-joints using Lamb waves and intelligent signal processing. *Ultrasonics*, 34, pp. 455-459. 1996
- [24] T. KUNDU, A. MAJI, T. GHOSH AND K. MASLOV. Detection of Kissing Bonds By Lamb Waves. *Ultrasonics*. 35, pp. 573-580. 1998
- [25] K. HELLER, L.J. JACOBS AND J. QU. Characterization of adhesive bond properties using Lamb waves. *NDT E Int*, 33, pp. 555-63. 2000
- [26] B.W. DRINKWATER, M. CASTAINGS, B. HOSTEN. The measurement of A0 and S0 Lamb wave attenuation to determine the normal and shear stiffnesses of a compressively loaded interface. *J. Acoust. Soc. Am.* 113 (6), pp. 3161-3170. 2003
- [27] P.B. NAGY, L. ADLER. Nondestructive evaluation of adhesive joints by guided waves. *J Appl Phys*, 66(10), pp. 4658-63. 1989
- [28] Y. BAR-COHEN AND A.K. MAL. Characterisation of adhesive bonding using Leaky Lamb waves. *Review of progress in quantitative NDE*, Plenum Press, New York, pp. 1271-1277. 1990
- [29] D.E. CHIMENTI. Guided waves in plates and their use in materials characterisation. *Applied Mechanical Review*, 50 (5), pp. 247-284. 1997
- [30] F. LEOMY, M. DE BILLY, G. QUENTIN. Dispersive ultrasonic waves in adhesive bonds. *Review of Progress in quantitative. N. D. E.*, 8, 1409. 1988
- [31] G. BIGGIERO, G. CANELLA, A. MSCHINI, Ultrasonic scanning and spectrum analysis for inspection of bond efficiency of metal-to-metal structural adhesive joints, *NDT Int.*, 67. 1983

- [32] D.R. BILLSON AND D.A. HUTCHINS. Ultrasonic testing of adhesively bonded layers using shear waves, Ultrasonics International Conference Proceedings, pp. 447-450. 1991
- [33] D.E. CHIMENTI AND A.H. NAYFEH. Ultrasonic reflexion and guided wave propagation in fluid-coupled composite laminate, J. Nondestruct. Eval., 9, pp. 51. 1990
- [34] P. CAWLEY AND M. J. HODSON. The NDT of adhesive joints using ultrasonic spectroscopy, Rev. Prog. Quant. NDE, 8B, 1377. 1989
- [35] M.R. KARIM, A.K. MAL AND Y. BAR-COHEN. Inversion of leaky Lamb wave data by simplex algorithm, J. Acoust. Soc. Am., 88, 482. 1990
- [36] A.K. MAL AND P.C. XU AND Y. BAR-COHEN. Analysis of leaky Lamb waves in bonded plates. Int. J. Eng. Sci. (UK), 27(7), pp. 779-91. 1989
- [37] A. PILARSKI, J.L. ROSE, J. DITRI, D. JIAO AND K. RAJANA. Lamb wave mode selection for increased sensitivity to interfacial weaknesses of adhesive bonds, Prog. Quant. NDE, 12B, 1579. 1993
- [38] J.L. ROSE, J. DALE, T.D.K. NGOC AND K. BALASUBRAMANIAM. Evaluation of various interface layer models for ultrasonic inspection of weak bonds, Rev. Prog. Quant. NDE, 9, 1309. 1990
- [39] A. JUNGMAN, P. GUY AND G. QUENTIN. Characterization of glued bonds using ultrasonic reflected beam. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 10B, pp.1319-27. 1991
- [40] R. SEIFRIED, L.T. JACOBS AND J. QU. Propagation of guided waves in adhesive bonded components. NDT E Int, 35, pp. 317-28. 2002
- [41] B.N. PAVLAKOVIC, M.J.S. LOWE, D.N. ALLEYNE AND P. CAWLEY. Disperse: a general purpose program for creating dispersion curves. In: Thompson DO, Chimenti DE, editors. Review of progress in quantitative NDE, vol. 16. New York: Plenum Press, pp. 185-92. 1997
- [42] A.J. NIKLASSON, S.K. DATTA. On the modeling of guided waves in plates with thin superconducting layers. In: Thompson DO, Chimenti DE, editors. Review of progress in quantitative NDE, vol. 19A. New York: American institute of physics, pp. 185-92. 2000
- [43] I.A. VIKTOROV. Rayleigh and Lamb waves. Plenum, New York. pp. 154. 1967
- [44] J. KRAUTKRAMER, H. KRAUTKRAMER, Ultrasonic testing of materials, 3rd revised version, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York. 1983
- [45] W.T. THOMSON, Transmission of elastic waves through a stratified medium. J. Appl. Phys., vol. 21 pp.89-93. 1950
- [46] N.A. HASKELL, The dispersion of surface waves on multilayered media. Bull Seismol Soc. Am., vol. 43, pp.17-34. 1953

- [47] K.P. SCHARNHORST, Properties of acoustic and electromagnetic transmission coefficients and transfer matrices of multilayered plates. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 74 (6), pp.1883-1886. 1983
- [48] M.L. LEVIN, Propagation of a plane electromagnetic wave in a periodically layered medium. *Zh Tekh Fiz*, vol. 18, pp.1399. 1948
- [49] S.M. RYTOV, Electromagnetic properties of a finely layered medium. *Zh Eksp Teor Fiz*, vol. 29, pp.608, 1955
- [50] G.J. FRYER, L.N. FRAZER, Seismic waves in stratified anisotropic media. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, vol. 78, pp.691-710. 1984
- [51] B.L.N. KENNETT, N.J. KERRY, Seismic waves in stratified half space. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, vol. 57, pp.557-583, 1979
- [52] C.M. KEITH, S. CRAMPIN. Seismic body waves in anisotropic media: (a) Reflection and transmission at a plane interface, (b) Propagation through a layer, (c) Synthetic seismograms. *J.R. Astr. Soc.*, vol. 49, pp.181-243. 1977
- [53] R.A. STEPHEN, Seismic anisotropy observed in upper oceanic crust. *Geophysic Res Letter*, vol. 8, pp.865-868. 1981
- [54] A.H. NAYFEH, D.E. CHIMENTI, Ultrasonic wave reflection from liquid-coupled orthotropic plates with application to fibrous composites. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 55, pp.863-870. 1988
- [55] A.H. NAYFEH, The general problem of elastic wave propagation in multilayered anisotropic media. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 89(4), p.1521-1531. 1991
- [56] D.L. FOLDS, C.D. LOGGINS, Transmission and reflection of ultrasonic waves in layered media. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 62(5), pp.1102-1109. 1977
- [57] 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), pp.1488-1495, 1993
- [58] M. CASTAINGS, Propagation ultrasonore dans les milieux stratifiés plans constitués de matériaux absorbants et orthotropes. Thèse de l'université Bordeaux 1, n° 1043. 1993
- [59] A.H. NAYFEH, D.E. CHIMENTI, Propagation of guided waves in fluid-coupled plates of fiber-reinforced composite. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83(5), pp.1736-743. 1988
- [60] A.H. NAYFEH, The propagation of horizontally polarized shear waves in multilayered anisotropic media. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86(5), pp. 2007-2012. 1989
- [61] A.H. NAYFEH, D.E. CHIMENTI, Free wave propagation in plates of general anisotropic media. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 56, pp.881-886. 1989

- [62] M. CASTAINGS, B. HOSTEN, Guided waves propagating in sandwich structures made of anisotropic, viscoelastic composite materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113(5), pp. 2622-34. 2003
- [63] M. CASTAINGS, B. HOSTEN, Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates. *NDT & E International*, vol. 34 (6), pp.249-258, 2001
- [64] A. PILARSKI, J. L. ROSE. K. BALASUBRAMANIAM. *J. Acoust. Soc. Am.* 87(2), pp. 532-542. 1990

## CHAPITRE V

**Propagation des ondes guidées dans les structures tri-couche:**  
*Application à l'évaluation non destructive des propriétés matérielles  
des assemblages collés à partir de leurs courbes de dispersion*

## **Introduction :**

L'évaluation non destructive consiste à mesurer certaines propriétés d'un matériau pour accéder à la connaissance de son état de santé. Puisque les ultrasons offrent un moyen simple et efficace d'évaluation non destructive, nous nous sommes intéressés à la capacité d'ultrasons de caractériser les propriétés matérielles des structures tri-couche composées de deux tôles collées par une couche d'adhésif. De nombreux chercheurs ont exploré cette capacité auparavant dans le cas d'autres structures. M.R. Karim et al. [1] ont présenté une procédure numérique pour l'inversion de données des ondes de Lamb généralisées pour déterminer quelques propriétés matérielles d'un guide d'onde, en utilisant une version modifiée de l'algorithme du simplex. P.C. Xu et al. [2] ont présenté une méthode inverse pour déterminer les propriétés de la cohésion des adhésifs à partir des données de la vitesse de phase de l'onde guidée. L'approche est basée sur une procédure itérative des moindres carrés dans laquelle la perturbation non-linéaire des paramètres inconnus est linéarisée à chaque étape. Kinra et al. [3] ont développé une technique ultrasonore pour déterminer des propriétés acoustiques (épaisseur, vitesse d'onde, densité, atténuation) de la couche individuelle dans un milieu stratifié. Les ondes planes longitudinales en incidence normale ont été considérées. Les fonctions du transfert ont été calculées dans le domaine temporel aussi bien que dans le domaine fréquentiel. Un problème inverse est défini comme une détermination simultanée de plusieurs paramètres acoustiques à partir des fonctions du transfert mesurées. W.P. Rogers [4] a décrit une technique non-destructive pour la mesure du modèle d'Young et le coefficient de Poisson des plaques isotropes en utilisant des ondes ultrasonores du Rayleigh-Lamb. Cette technique consiste à appliquer des programmes numériques d'itération non-linéaire de moindres carrés pour minimiser la somme des carrés des erreurs entre des points des courbes de dispersion mesurées expérimentalement et ceux théoriques. N. Leymarie et al. [5] ont proposé une méthode inverse pour déterminer les propriétés viscoélastiques des plaques en matériau composite à partir d'onde plane du champ acoustique transmis. L.Wang et al. [6] ont développé un modèle général pour la détermination de l'ensemble complet des propriétés acoustiques et géométriques d'une couche isotrope située entre des solides stratifiés isotropes ou anisotropes. Ces propriétés ont été déterminées simultanément par deux mesures, une en incidence normale et l'autre en incidence oblique. Ma et al. [7] ont développé une procédure du calcul inverse en deux étapes qui utilise des ondes élastiques transitoires, pour la détermination des propriétés matérielles d'une couche mince. Y.H. Liu et al. [8] ont mesuré la dispersion de l'onde de surface dans un échantillon composé de deux adhérents différents (cuivre/aluminium) liés par une colle en époxy et l'ont comparé avec la solution

théorique. Un algorithme inverse basé sur la méthode du simplexe a été alors introduit pour déterminer l'épaisseur de la couche de colle aussi bien que ses propriétés élastiques. J.C. Stolzenburg et al [9] ont développé une méthodologie qui utilise des ondes ultrasonores pour déterminer les propriétés matérielles d'une couche (la vitesse de l'onde longitudinale et transversale et l'épaisseur de la couche). Une méthode inversion compare les données mesurées expérimentalement avec les données obtenues par le modèle théorique, et une fonction d'erreur évaluant la différence entre ces valeurs. Finalement, un algorithme de downhill-simplex est utilisé pour minimiser cette fonction d'erreur et donc déterminer un ensemble optimum des propriétés matérielles. C.L. Yapura et al. [10] ont présenté une technique ultrasonore pour une détermination simultanée des temps des parcours et les impédances acoustiques des structures tri-couches en utilisant une onde longitudinale en incidence normale. Les propriétés acoustiques sont déterminées en minimisant, par la méthode des moindres carrés, la différence entre les fréquences de résonance mesurées et calculées. Les fréquences de résonance de la structure tri-couche sont déduites, dans la transmission, à partir des maximums de la magnitude du spectre de la transmission, ou, dans la réflexion, à partir des valeurs de la phase du spectre de la réflexion.

Dans ce chapitre, nous présentons une méthode numérique inverse pour la reconstruction des propriétés matérielles d'une structure tri-couche à partir de ses courbes de dispersion. La structure tri-couche est composée d'une tôle de cuivre liée à une tôle d'acier par une couche de colle en résine époxy. Les propriétés matérielles considérées sont les vitesses d'onde longitudinale et transversale, ainsi que la densité de chaque couche de la structure. Dans un premier temps nous déterminons et nous interprétons les courbes de dispersion et le champ de déplacement dans la structure à partir du modèle de la propagation et la procédure présentés dans le chapitre précédent. Ensuite nous proposons une procédure numérique du calcul inverse basée sur une méthode non-linéaire des moindres carrés pour reconstruire simultanément les propriétés matérielles de la structure à partir des courbes de dispersion déterminées.

## **I – Problème direct: Courbes de dispersion et champ de déplacement de la structure (Cuivre/Colle/Acier)**

### **I – 1 – Courbes de dispersion:**

Les courbes de dispersion de la structure tri-couche, composée d'une tôle de cuivre et une tôle d'acier liée par une couche de colle en résine époxy, sont déterminées en utilisant la procédure présentée dans le chapitre IV : pour la résolution numérique de l'équation caractéristique de la structure étudiée les deux programmes élaborés sur Matlab pour le calcul du chapitre IV précédent, sont ajustés pour ce cas. Le premier programme (programme iso-

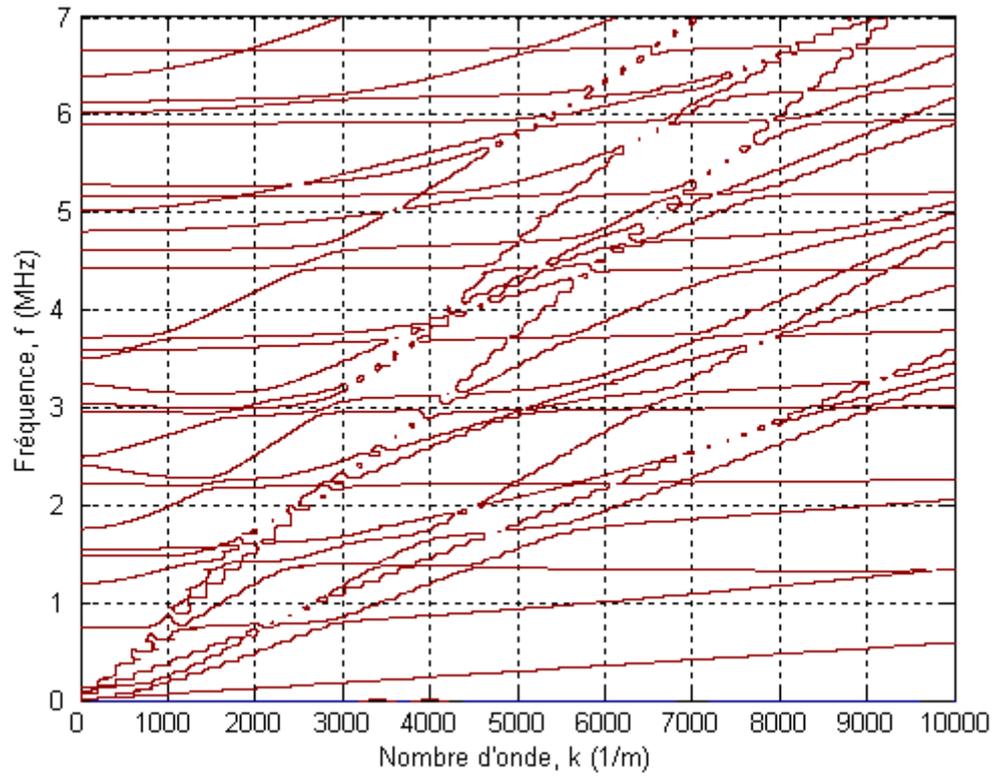
contours) permet l'obtention d'une première impression des courbes de dispersion sans grande précision de calcul des racines de l'équation caractéristique (Figure V-1). Le résultat de ce programme est ensuite exploité par un deuxième programme (programme des racines exactes) permettant l'obtention, avec grande précision, le réseau de dispersion de la structure tri-couche étudiée (Figure V-2). Les propriétés géométriques et mécaniques de la structure sont données sur le tableau V-1 ci-dessous :

Matériau	Epaisseur (mm)	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Vitesse longitudinale (m/s)	Vitesse transversale (m/s)
Tôle de cuivre	0.9398	8900	4700	2260
Couche de résine époxy	0.25	1106	771	370
Tôle d'acier	0.9398	7800	5980	3297

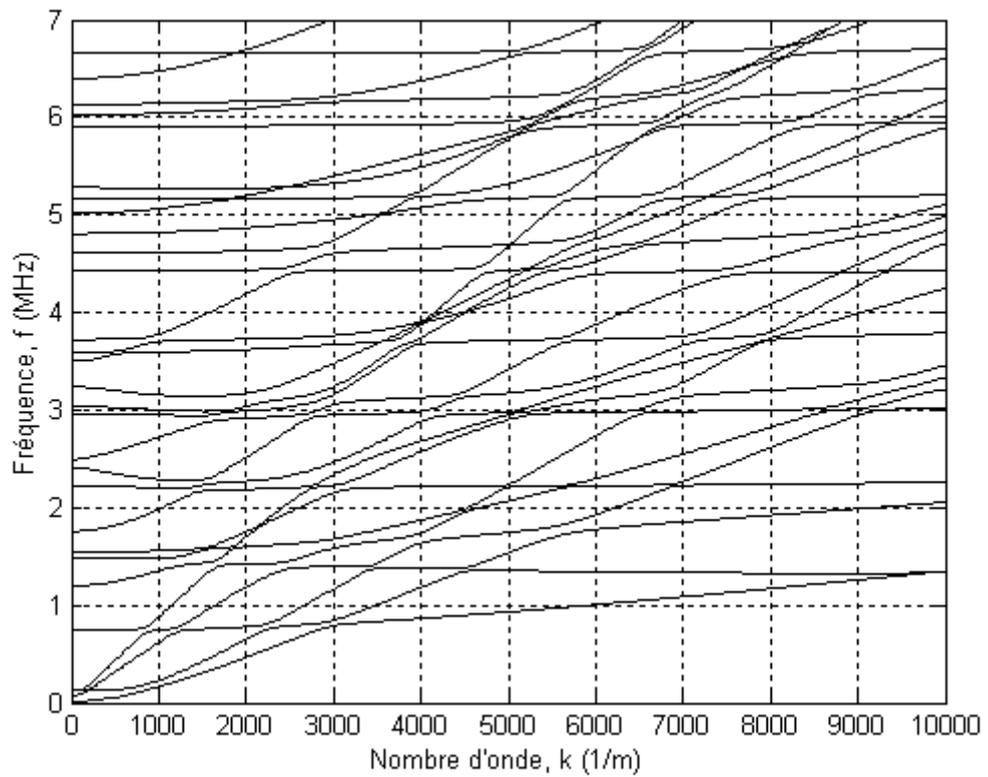
**Tableau V-1 :** Les propriétés géométriques et mécaniques du cuivre, d'acier et de la colle.

La figure V-1 est obtenue en exécutant le programme iso-contours pour la gamme fréquentielle de 0-7 MHz et la gamme du nombre d'onde de 0-10.000 m<sup>-1</sup> avec le pas fréquentiel  $df = 500$  Hz et le pas du nombre d'onde  $dk = 200$  m<sup>-1</sup>.

La figure V-2 représente le réseau de dispersion raffiné de la structure étudiée, déterminé avec le programme des racines exactes, pour les mêmes gammes de fréquence et du nombre d'onde que celles de la première impression (figure V-1) avec le pas fréquentiel  $df = 500$  Hz et le pas du nombre d'onde  $dk = 20$  m<sup>-1</sup>.



**Figure V-1 :** Les courbes de dispersion de la structure tri-couche (CU/C/AC) avec le programme iso-contours



**Figure V-2 :** Les courbes de dispersion raffinées de la structure (CU/C/AC)

Pour interpréter les courbes de dispersion de la structure (Aluminium/colle/aluminium) étudiée dans le chapitre IV, nous avons utilisé une superposition de trois réseaux de dispersion :

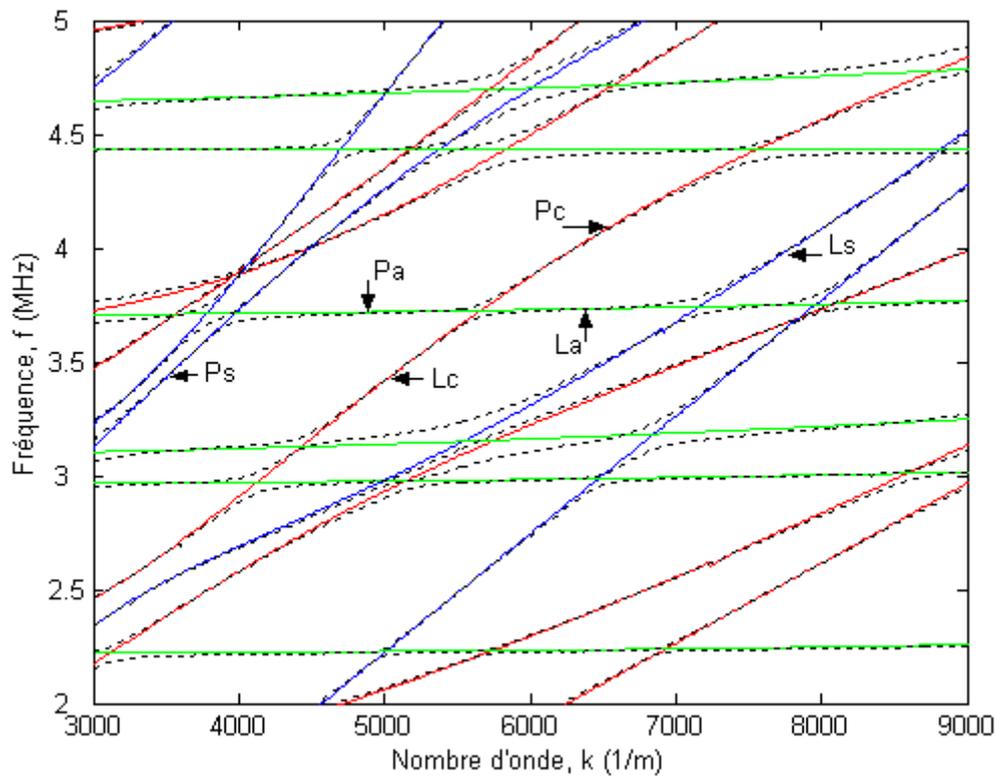
- une plaque d'aluminium seule.
- la couche de colle seule.
- la structure tri-couche (Aluminium/colle/aluminium),

pour montrer que chaque mode de la structure tri-couche se compose de portions qui suivent des modes d'une tôle d'aluminium seule et autres (quasi horizontal) qui suivent des modes de la couche de colle seule.

La figure V-3 présente un zoom de la superposition artificielle, sur la gamme de fréquence de 2- 5 MHz et la gamme de nombre d'onde de 3000-9000  $\text{m}^{-1}$ , de quatre réseaux de dispersion :

- une plaque de cuivre seule (trait plein rouge)
- une plaque d'acier seule (trait plein bleu)
- la couche de colle seule (trait plein vert)
- la structure tri-couche (Au/C/Ac) (trait pointillé noir).

Ainsi, nous montrons que chaque mode de la structure tri-couche se compose des portions qui suivent des modes de la tôle de cuivre seule et des portions qui suivent des modes de la tôle d'acier seule et autres (quasi horizontal) qui suivent des modes de la couche de colle seule.



**Figure V-3 :** Zoom d'une superposition artificielle:

- Des courbes de dispersion du modèle tri-couche Cu/C/Al (trait pointillé noir)*
- Des courbes de dispersion de la plaque de cuivre seule (trait plein rouge)*
- Des courbes de dispersion de la plaque d'acier seule (trait plein bleu)*
- Des courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert)*

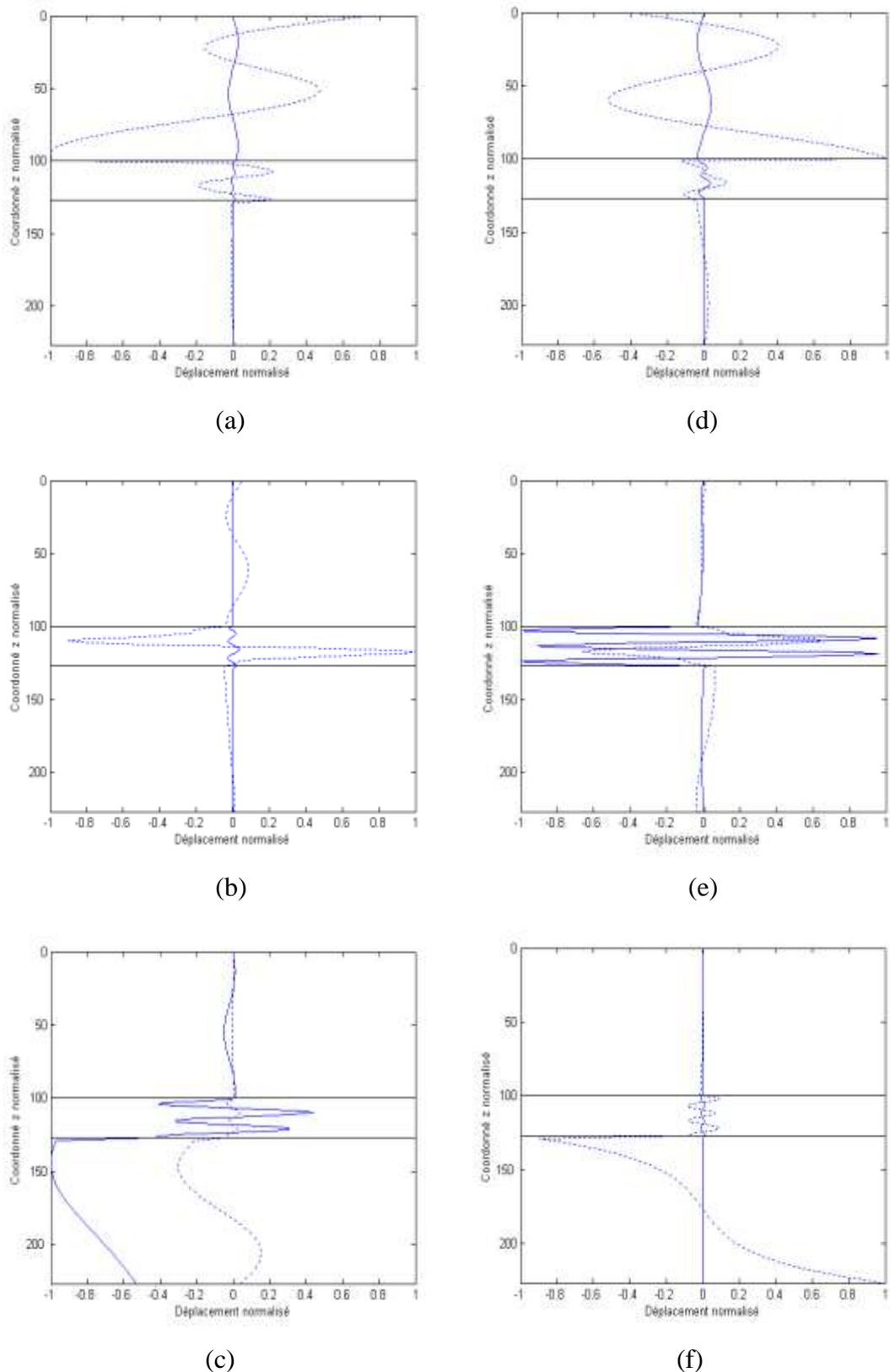
### I – 2 – Le champ de déplacement:

Pour étudier la distribution énergétique des modes de dispersion (Figure V-2) dans la structure et bien comprendre la propagation des modes dans le modèle tri-couche, le champ de déplacements est calculé pour différents modes de la structure tri-couche Cuivre/Colle/Acier en utilisant la même procédure décrite dans le paragraphe I-3 du chapitre IV.

La figure V-4 présente la composante longitudinale ( $U_x$ ) de déplacement tracée en trait pointillé et la composante transversale ( $U_z$ ) de déplacement tracée en trait plein à six pairs ( $f-k$ ) différents (point :  $P_c$ ,  $P_a$ ,  $P_s$ ,  $L_c$ ,  $L_a$ ,  $L_s$ ) identifiés sur la figure V-3. Les axes verticaux dans la figure V-4 représentent l'épaisseur de la structure tri-couche dans la direction  $z$ , normalisés à l'épaisseur de la plaque d'acier seule. Les axes horizontaux représentent les déplacements normalisés.

Considérant les déplacements aux points  $P_c$  (figure V-4(a)),  $P_a$  (figure V-4(b)) et  $P_s$  (figure V-4(c)), trois points sur le même mode,  $P_c$  est pris de la partie qui suit le mode de la plaque de cuivre seule,  $P_a$  est pris de la partie qui suit le mode de la couche de colle seule et  $P_s$  est

pris de la partie qui suit le mode de la plaque d'acier seule. La figure V-4(a) montre que la propagation du mode  $P_c$  est dominante dans la plaque de cuivre. La figure V-4(b) montre que le mode  $P_a$  se propage principalement dans la couche de la colle et il n'y a presque aucun déplacement considérable dans les deux plaques. En revanche, la figure V-4(c) montre que la propagation du mode  $P_s$  est dominante dans la plaque d'acier. Le même constat peut être fait quand les trois points  $L_c$ ,  $L_a$  et  $L_s$  sont considérés, ces trois points appartiennent au même mode,  $L_c$  est pris de la partie qui suit le mode de la plaque de cuivre seule (figure V-4(d)),  $L_a$  est pris de la partie qui suit le mode de la couche de colle seule (figure V-4(e)) et  $L_s$  est pris de la partie qui suit le mode de la plaque d'acier seule (figure V-4(f)).



**Figure V-4:** Le champ de déplacement pour six pairs (f-k) différents identifiés sur la figure V-3.

Trait en pointillé ----- le déplacement transversal  $U_z$

Trait plein ----- le déplacement longitudinal  $U_x$

(a) point  $P_c$  (b) point  $P_a$  (c) point  $P_s$  (d) point  $L_c$  (e) point  $L_a$  (f) point  $L_s$

## II – Problème inverse:

Dans ce paragraphe, nous présentons une méthode numérique inverse pour la reconstruction des propriétés matérielles de la structure tri-couche (cuivre/colle/acier) à partir de ses courbes de dispersion (figure V-2). La procédure proposée pour ce problème inverse est comme suit:

Premièrement, à partir des courbes de dispersion (figure V-2), nous avons sélectionné une courbe (un mode)  $f(k)$  présenté dans la figure V-5. Comme nous pouvons la voir sur la figure V-6 qui présente un zoom d'une superposition artificielle, cette courbe est composée des portions qui suivent les modes de la plaque de cuivre seule, des portions qui suivent les modes de la plaque de l'acier seule et autres (quasi horizontal) suivre les modes de la couche de colle seule. Ensuite, à partir de la courbe sélectionnée, nous avons enregistré quinze valeurs du nombre d'onde, variant de 1600 to 3560  $m^{-1}$  avec un pas de 140  $m^{-1}$ . Cela offre quinze paires du nombre d'onde et fréquence  $(k_i, f_i)$ .

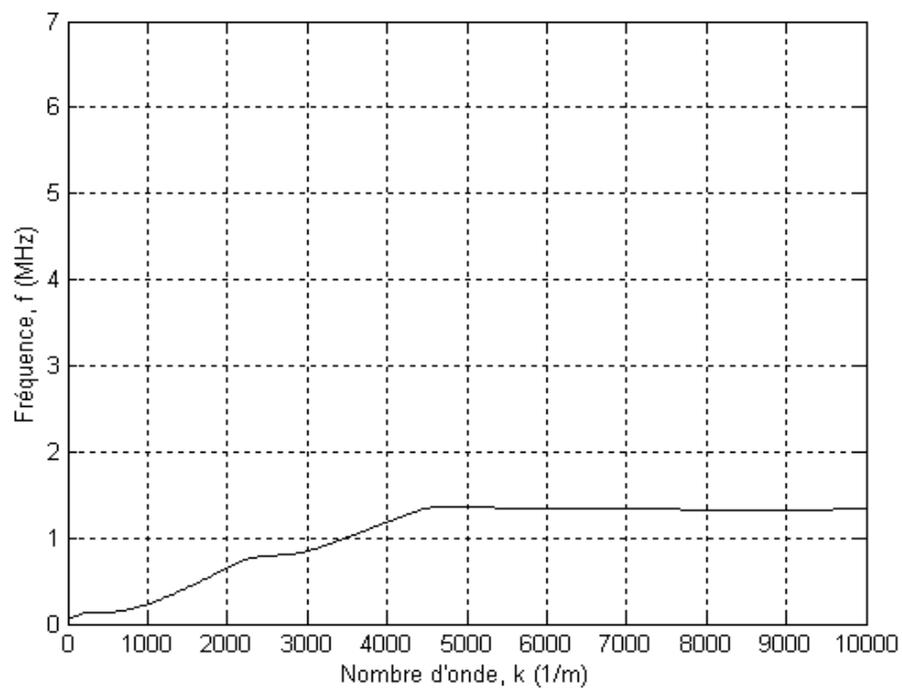
Notons  $[X]$  le vecteur dont les composants sont les propriétés matérielles inconnues de la structure étudiée. Les paires  $(k_i, f_i)$  sont les racines de l'équation caractéristique (soit l'équation (15) ou (26) du chapitre IV) pour les propriétés matérielles  $[X]$ . Cette équation peut être écrite sous la forme:

$$F(k, f, [X]) = 0$$

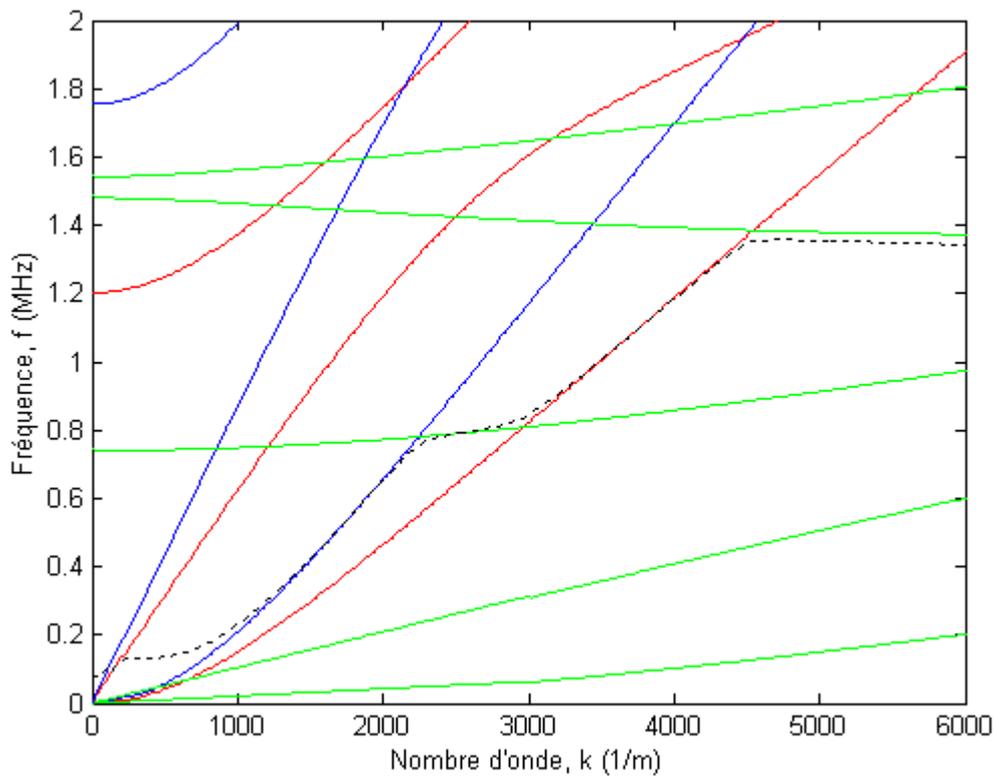
Pour déterminer les propriétés matérielles inconnues  $[X]$  nous utilisons un processus de la minimisation basé sur la méthode non-linéaire des moindres carrés c.-à-d. nous cherchons la valeur de  $[X]$  pour laquelle la fonction d'erreur  $\varepsilon = \sum_{i=1}^{15} (F(k_i, f_i, [X]))^2$  est minimale. Les neuf propriétés matérielles inconnues  $X_i$  ( $i=1,2,\dots,9$ ) considérées ici sont la vitesse de l'onde longitudinale et transversale et la densité de chaque couche de la structure ( $v_L^{(i)}, v_T^{(i)}$  et  $\rho^{(i)}$ ,  $i=1,2,3$ ).

Un programme est développé sur Matlab pour minimiser la fonction d'erreur  $\varepsilon$  et donc obtenir les valeurs optimums pour les propriétés matérielles  $[X]$ . La procédure de minimisation utilise l'algorithme large-scale basé sur la méthode de Newton décrite dans [11], [12]. Chaque itération nécessite la résolution approximative d'un grand système linéaire par la méthode de gradients conjugués préconditionnés (GCC). Un point de départ ( $[X]_0$ ) est nécessaire pour commencer l'algorithme de la minimisation. Dû au caractère complexe de la dépendance de la

fréquence en nombre d'onde ( $f(k, [X])$ ), la fonction d'erreur  $\varepsilon$  possède de nombreux minimums locaux. Donc si le point de départ  $[X]_0$  est trop loin de la valeur exacte de  $[X]$ , l'algorithme de l'optimisation s'arrête au premier minimum local rencontré, sans aller au minimum global désiré. Pour surmonter ce problème, une modification de l'algorithme d'optimisation est appliquée. Nous commençons le processus de la minimisation par plusieurs points de départ, et déterminons le plus petit des minimums résultants. Les points de départ  $[X]_0$  sont prises dans le domaine  $([X]_0^-, [X]_0^+)$  où  $[X]_0^-$  et  $[X]_0^+$  sont respectivement la plus petite et la plus grande valeur possible de  $[X]$ .



**Figure V-5 :** La courbe sélectionnée pour la méthode inverse



**Figure V-6 :** Zoom d'une superposition artificielle:

*De la courbe sélectionnée pour la méthode inverse (trait pointillé noir)*

*Des courbes de dispersion de la plaque de cuivre seule (trait plein rouge)*

*Des courbes de dispersion de la plaque d'acier seule (trait plein bleu)*

*Des courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert)*

Pour diminuer le nombre de points de départ et alors le temps du calcul, on peut suivre la même procédure utilisée dans [10] pour développer l'estimation initiale des vitesses d'onde longitudinale et transversale des deux couches extrêmes (les deux plaques collées). Cette procédure est basée sur la génération d'une onde ultrasonore guidée (onde de Rayleigh [13]) sur chacune des plaques collées et la mesure des vitesses de propagation. Cette mesure est facile et précise compte tenu du fait que les ondes de Rayleigh sont confinées aux surfaces (sur une profondeur d'environ une longueur d'onde) et que par ailleurs elles ne sont pas dispersives (pour le cas des surfaces planes). A partir de la formule approximative de Viktorov [14]:

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (\nu: \text{coefficient de Poisson}), \text{ on peut montrer aisément}$$

que  $0.87V_T < V_R < 0.96V_T$ . Alors nous utilisons ici la relation approximative  $\frac{V_R}{V_T} \approx 0.9$ , pour

déterminer une première estimation des vitesses d'onde de cisaillement  $V_T$ . Une estimation

additionnelle de la vitesse d'onde longitudinale  $V_L$  peut être faite en utilisant le rapport

approximatif:  $\frac{v_L}{v_T} \approx 2$  valable pour les matériaux métalliques élastiques et isotropes tels que

l'acier, l'aluminium, le cuivre, le nickel, le zinc.....).

Les valeurs optimisées des neuf propriétés matérielles obtenues à la fin du processus de la minimisation sont données dans le tableau V-2. La comparaison de ces valeurs reconstruites avec les valeurs exactes données sur la tableau V-1, montre qu'il y a un excellent accord entre les deux ensembles des valeurs (erreurs inférieures à 1%), ce qui montre l'efficacité du processus de la minimisation utilisé dans la procédure du calcul inverse proposée. Le temps nécessaire du calcul, sur un PC Pentium 4, pour une incertitude de reconstruction inférieure à 1% est environ 6 heures.

Cette reconstruction a été faite à partir du mode choisi présenté sur la figure V-5. Cependant, la reconstruction des propriétés matérielles de la structure peut être faite à partir du n'importe quel autre mode de dispersion. La convergence de l'algorithme inverse proposé et l'incertitude des résultats obtenus dépendent du nombre de points considérés sur la courbe de dispersion choisie aussi bien que le choix des points de départ (valeurs initiales). Par exemple, pour un nombre de points choisis, sur la courbe de dispersion, supérieur à quinze, l'incertitude de reconstruction reste toujours inférieure à 5%.

Matériau	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Erreur (%)	Vitesse longitudinale (m/s)	Erreur (%)	Vitesse transversale (m/s)	Erreur (%)
Tôle de cuivre	8875	0.28	4690	0.21	2261	0.04
Couche de résine époxy	1110	0.36	770	0.13	370	0
Tôle d'acier	7770	0.38	5978	0.03	3309	0.36

**Tableau V-2:** Les valeurs optimisées des neuf propriétés matérielles obtenues à la fin du processus de la minimisation.

Pour étudier l'influence de l'erreur du calcul sur les valeurs optimisées des propriétés matérielles de la structure, les nombre d'ondes des quinze points considérés sont multipliés par un facteur 1.05, qui correspond à une erreur de calcul de 5%. Le processus de la minimisation est exécuté pour les nouvelles valeurs ( $f, 1.05*k$ ). Les résultats obtenus sont donnés dans le tableauV-3.

Nous constatons que cette erreur de 5% introduite sur les nombres d'ondes provoque une incertitude de reconstruction toujours inférieure à 6%.

Matériau	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Erreur (%)	Vitesse longitudinale (m/s)	Erreur (%)	Vitesse transversale (m/s)	Erreur (%)
Tôle de cuivre	8700	2.25	4889	4.02	2377	5.18
Couche de résine époxy	1121	1.36	798	3.5	390	5.4
Tôle d'acier	7718	1.05	5901	1.32	3202	2.88

**Tableau V-3 :** Les valeurs optimisées des neuf propriétés matérielles obtenues à la fin du processus de la minimisation en introduisant une erreur de mesure simulée de 5%.

### **Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode numérique inverse basée sur la méthode non-linéaire des moindres carrées pour déterminer les propriétés matérielles des structures tri-couche à partir de leurs courbes de dispersion. Les propriétés matérielles considérées sont les vitesses d'onde longitudinale et transversale, ainsi que la densité de chaque couche de la structure. La structure considérée est composée d'une tôle de cuivre liée à une tôle d'acier par une couche de colle en résine époxy (cuivre/colle/acier). Les courbes de dispersion et le champ de déplacement dans la structure sont obtenus à partir du modèle de propagation et la procédure exposés au chapitre IV. Sur ces courbes, nous avons mis en évidence l'existence, pour chaque mode de la structure tri-couche, des portions qui suivent les modes d'une plaque de cuivre seule et des portions qui suivent les modes d'une plaque d'acier seule et d'autres (quasi horizontales) qui suivent les modes d'une couche de colle seule.

A partir de ces courbes de dispersion, le champ du déplacement est déterminé en montrant que l'énergie ultrasonore dans la structure tri-couche est restreinte à une couche donnée quand le mode sélectionné de la structure est localisée dans la portion qui suit le mode de cette couche.

Finalement, à partir d'une courbe de dispersion sélectionnée, une méthode inverse est proposée pour reconstruire les neuf propriétés matérielles de la structure tri-couche étudiée. La procédure de la méthode inverse utilise la solution non-linéaire des moindres carrées à l'équation de dispersion en définissant une fonction d'erreur en terme des neuf propriétés matérielles inconnues de la structure. Un programme est développé, sur Matlab, pour minimiser cette fonction d'erreur et donc déterminer un ensemble optimum des neuf propriétés matérielles. La comparaison des valeurs optimisées avec les valeurs exactes montre l'efficacité de la méthode inverse proposée.

L'intérêt pratique de la méthode inverse présentée ici est la possibilité de contrôler les propriétés matérielles des structures tri-couche planes telles que des plaques collées par une couche de colle, utilisées dans l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale et sous-marine. Elle offre un contrôle ultrasonore non destructif périodique de l'intégrité structurale de ces structures.

Pour les structures tri-couche de géométrie complexe, la solution de l'équation de propagation doit être recherchée par la méthode des éléments finis. Les courbes de dispersion peuvent être alors déterminées par une transformée de Fourier bidimensionnelle du champ de déplacement obtenu. L'application de l'algorithme inverse présenté ici peut alors nous fournir les propriétés matérielles de la structure étudiée. Ceci constitue une perspective à notre recherche.

### Références bibliographiques

- [1] M.R. KARIM, A.K. MAL, Y. BAR-COHEN. Inversion of Leaky Lamb wave data by Simplex Algorithm. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 88, iss. no.1, pp. 482-491. 1990.
- [2] P.C. XU, A.K. MAL, Y. BAR-COHEN. Inversion of Leaky Lamb wave data to determine cohesive properties of bonds. *Int. J. Eng. Sci.* Vol. 28, iss. no. 4, pp. 331-346, Apr. 1990.
- [3] V.K. KINRA, P.T. JAMINET, C. ZHU, V.R. IYER. Simultaneous measurement of the acoustical properties of a thin-layered medium: The inverse problem. *J Acoust Soc Am*. Vol. 95, iss. no. 6, pp. 3059-74, 1994.
- [4] W.P. ROGERS. Elastic property measurement using Rayleigh-Lamb waves. *Research in Nondestructive Evaluation*. Vol. 6, iss. no. 4, pp.185-208. December 1995.
- [5] N. LEYMARIE, C. ARISTIGUI, B. AUDOIN, S. BASTE. Identification of complex stiffness tensor from waveform reconstruction. *J Acoust Soc Am*. Vol. 111, iss. no. 3, pp. 1232-1244, March 2002.
- [6] L.WANG, B. XIE AND S.I. ROKHLIN. Determination of embedded layer properties using adaptive time-frequency domain analysis. *J Acoust Soc Am*, vol. 111, iss. no. 6, pp. 2644-2653, 2002.
- [7] C.C. MA, S.W. LIU, C.M. CHANG. Inverse calculation of material parameters for a thin-layer system using transient elastic waves. *J Acoust Soc Am*, vol. 112, iss. no. 3, pp. 811-821.2002.
- [8] Y.H. LIU, T.T. WU, C.K. LEE. Application of narrow band laser ultrasonics to the nondestructive evaluation of thin bonding layers. *J Acoust Soc Am*, Vol. 111, iss. no. 6, pp. 2638-43. 2002.
- [9] J.C. STOLZENBURG , J.W. DOANE, J. JARZYNSKI, L.J. JACOBS. Near field inversion method to measure the material properties of a layer. *NDT&E international*, Vol. 36, iss. no. 7, pp. 523-533. 2003.
- [10] C.L. YAPURA, V.K. KINRA, K. MASLOV. Measurement of six acoustical properties of a three-layered medium using resonant frequencies. *J Acoust Soc Am*, Vol. 115, iss. no. 1, pp. 57-65. 2004.
- [11] COLEMAN, T.F., Y. LI. On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds. *Mathematical Programming*, Vol. 67, iss. no. 2, pp. 189-224. 1994.
- [12] COLEMAN, T.F.,Y. LI. An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds. *SIAM Journal on Optimization*, Vol. 6, pp. 418-445. 1996.
- [13] L. RAYLEIGH. On waves propagating along the plane of an elastic solid. *Proc. London Math. Soc.*, Vol 17, pp. 4-11, 1885.
- [14] I.A. VIKTOROV. *Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications*. New York. Plenum Press 1967.

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

L'objectif de ce travail de thèse était la mise en place d'une technique de contrôle et d'évaluation non destructive au moyen d'ondes ultrasonores, de l'endommagement de structures constituées de deux plaques collées. Nous nous sommes particulièrement intéressés à ce type de structure du fait de la croissance rapide de leur utilisation dans des industries de pointe comme l'aéronautique civile ou militaire, l'aérospatiale ou le domaine automobile, où la sûreté opérationnelle des structures constitue une des préoccupations majeures des acteurs économiques impliqués.

Des outils numériques, basés sur des méthodes théoriques, ont été mis au point pour étudier le potentiel des techniques ultrasonores à contrôler et évaluer l'état de santé des assemblages collés.

Dans un premier temps, nous avons montré le potentiel de la technique ultrasonore basée sur l'analyse de l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion à contrôler la qualité du collage de deux tôles. Un code de calcul numérique de grande précision est développé sur Matlab pour déterminer, en incidence normale, l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion pour différentes qualités du contact. La modélisation du contact est faite selon les conditions aux limites définies par Pilarski. Des simulations numériques sont effectuées sur trois structures tri-couche : aluminium/colle/aluminium ; acier/colle/acier et zircaloy/colle/zircaloy. Les résultats numériques obtenus sont en parfait accord avec ceux déterminés expérimentalement par certains chercheurs. Ils montrent également l'efficacité du modèle de Pilarski à modéliser le contact entre l'adhésif et l'adhérent en passant d'une manière continue d'un contact parfait à un mauvais contact. Sur le coefficient de réflexion nous avons montré l'existence des minimums correspondants aux modes des adhérents (aluminium, acier et zircaloy) et des minimums correspondants aux modes de la couche de colle. Nous avons clairement montré que l'évolution (déplacement, conversion, disparition totale) de ces minimums est liée à la qualité du contact entre les trois couches. Par conséquent l'analyse spectrale du coefficient de réflexion offre un moyen fiable et efficace pour la caractérisation de la qualité du collage. Cette technique utilisant les ondes de volumes, ne permet l'inspection de larges domaines que par le recours à de multiples séquences d'interrogation zones après zones. En conséquence, le contrôle de l'endommagement est un processus long et coûteux. Une solution consisterait à pouvoir utiliser les ondes guidées par la géométrie de la structure insonifiée, ayant l'aptitude à se propager sur de longues distances permettent un contrôle de l'intégrité de la structure plus facilement et plus rapidement.

L'utilisation des ondes guidées comme moyen de contrôle de la qualité du collage a nécessité l'étude et la compréhension de la propagation des ondes guidées dans une structure tri-couche. Deux méthodes analytiques, développées pour étudier la propagation d'ondes guidées le long des milieux stratifiés plans constitués de matériaux élastiques et isotropes, sont exposées permettant la détermination de l'équation de dispersion des ondes de Lamb de la structure étudiée. Par une résolution numérique de grande précision, sur Matlab, de cette équation caractéristique, nous avons déterminé le réseau de dispersion d'une structure composée de deux tôles d'aluminium liées par une couche de colle en résine époxy. Une nouvelle interprétation des courbes de dispersion est proposée mettant en évidence l'existence, pour chaque mode de propagation, de portions (quasi horizontales) qui suivent les modes d'une couche de colle seule et de portions qui suivent les modes d'une couche d'aluminium seule. Par ailleurs, l'étude du champ de déplacement a montré que le déplacement s'effectue dans la couche de colle lorsque le mode de propagation est pris de la partie qui suit le mode de la couche de colle seule et il est prépondérant dans la plaque d'aluminium si le mode est situé dans la partie qui suit le mode d'une plaque d'aluminium seule.

En introduisant le modèle des interfaces de Pilarski, le calcul numérique des courbes de dispersion pour différentes natures du contact colle/aluminium a permis de montrer la grande sensibilité de ces courbes de dispersion à la qualité du collage.

Notre code de calcul numérique a été aussi testé dans le cas d'une structure composée d'une tôle de cuivre liée à une tôle d'acier par une couche de colle en résine époxy. Sur les courbes de dispersion obtenues, nous avons mis en évidence l'existence, pour chaque mode de la structure tri-couche, de portions qui suivent les modes d'une plaque de cuivre seule et de portions qui suivent les modes d'une plaque d'acier seule et d'autres (quasi horizontales) qui suivent les modes d'une couche de colle seule. A partir de ces courbes de dispersion, le champ du déplacement est déterminé en montrant que l'énergie ultrasonore dans la structure tri-couche est restreinte à une couche donnée quand le mode sélectionné de la structure est localisée dans la portion qui suit le mode de cette couche.

Finalement, à partir d'une courbe de dispersion sélectionnée, une méthode numérique inverse est proposée pour reconstruire les neuf propriétés matérielles de la structure tri-couche étudiée. Les propriétés matérielles considérées sont les vitesses d'onde longitudinale et transversale, ainsi que la densité de chaque couche de la structure. La procédure de la méthode inverse utilise la solution non-linéaire des moindres carrés à l'équation de dispersion en définissant une fonction d'erreur en terme des neuf propriétés matérielles inconnues de la structure. Un programme est développé, sur Matlab, pour minimiser cette fonction d'erreur et

donc déterminer un ensemble optimum des neuf propriétés matérielles. La comparaison de ces valeurs reconstruites avec les valeurs exactes montre qu'il y a un excellent accord entre les deux ensembles des valeurs (les erreurs sont inférieures à 1%), ce qui montre l'efficacité du processus de minimisation utilisé dans la méthode inverse proposée.

Cette étude permettra d'élaborer des logiciels incluant des tests de contrôle ou d'évaluation des assemblages collés réels, améliorant leurs performances mécaniques et assurant leurs durabilités, pour éviter et retarder au maximum les altérations globales et locales de ces structures lors de leur mise en service.

En perspective de ce travail nous envisageons les études suivantes :

- L'évaluation quantitative de la qualité d'adhésion métal/adhésif en déterminant les paramètres  $P_N$  et  $P_T$  caractérisant l'interface à partir des modes de dispersion par résolution d'un problème inverse.

- Pour renforcer l'adhésion d'un collage structural, il est courant dans le secteur industriel de sabler ou grenailer les plaques métalliques avant de les coller. Il est donc essentiel d'intégrer ce type de procédé dans la modélisation. Les conditions de saut en contraintes et déplacements font intervenir les efforts surfaciques et, par conséquent le paramètre "énergie libre interfaciale". Les modes propres guidés de la structure collée vont alors dépendre de ce paramètre. Une autre manière de modéliser certains types de traitement de surface est de supposer que chaque interface métal/adhésif est décrite par une surface non plane de la forme :

$$z = \eta \sin \frac{2\pi x}{\Gamma} \text{ avec } \eta \ll \Gamma.$$

- Pour les structures tri-couche de géométrie complexe, la solution de l'équation de propagation doit être recherchée par la méthode des éléments finis. Les courbes de dispersion peuvent être alors déterminées par une transformée de Fourier bidimensionnelle du champ de déplacement obtenu. L'application de l'algorithme inverse présenté dans cette thèse peut alors nous fournir les propriétés matérielles de la structure étudiée.

### Annexe.1

Le système de 12 équations homogènes (équation (11), chapitre IV) peut s'écrire sous la forme matricielle:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} & \dots & \dots & \dots & M_{1,12} \\ M_{2,1} & M_{2,2} & & & & M_{2,12} \\ \vdots & \vdots & \cdot & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \cdot & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \cdot & \vdots \\ M_{12,1} & M_{12,2} & \dots & \dots & \dots & M_{12,12} \end{bmatrix}}_{[M]} \underbrace{\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ D_3 \end{bmatrix}}_{[c]} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}}_{[0]}$$

L'annulation des contraintes normales à la surface supérieure de la structure est la première condition de continuité considérée ( $T_{zz} = 0$  à  $z = h/2$ ) cette équation donne:

$$\begin{aligned} M_{1,1} &= -(\lambda^{(1)} K_L^{(1)2} + 2\mu^{(1)} q^{(1)2}) \exp(jq^{(1)} h/2), \\ M_{1,2} &= -(\lambda^{(1)} K_L^{(1)2} + 2\mu^{(1)} q^{(1)2}) \exp(-jq^{(1)} h/2), \\ M_{1,3} &= -2\mu^{(1)} S^{(1)} k \exp(jS^{(1)} h/2), \\ M_{1,4} &= 2\mu^{(1)} S^{(1)} k \exp(-jS^{(1)} h/2), \\ M_{1,m} &= 0, \text{ pour } 5 \leq m \leq 12 \end{aligned}$$

La deuxième condition de continuité à la surface supérieure ( $T_{xz} = 0$  à  $z = h/2$ ) donne:

$$\begin{aligned} M_{2,1} &= -2\mu^{(1)} q^{(1)} k \exp(jq^{(1)} h/2), \\ M_{2,2} &= 2\mu^{(1)} q^{(1)} k \exp(-jq^{(1)} h/2), \\ M_{2,3} &= \mu^{(1)} (S^{(1)2} - k^2) \exp(jS^{(1)} h/2), \\ M_{2,4} &= \mu^{(1)} (S^{(1)2} - k^2) \exp(-jS^{(1)} h/2), \\ M_{2,m} &= 0, \text{ pour } 5 \leq m \leq 12 \end{aligned}$$

La première condition de continuité des contraintes à l'interface  $C_1/C_2$  ( $T_{zz}^{(1)} = T_{zz}^{(2)}$  à  $z = d_2/2$ ) donne:

$$\begin{aligned}
 M_{3,1} &= -(\lambda^{(1)} K_L^{(1)2} + 2\mu^{(1)} q^{(1)2}) \exp(jq^{(1)} d_2/2), \\
 M_{3,2} &= -(\lambda^{(1)} K_L^{(1)2} + 2\mu^{(1)} q^{(1)2}) \exp(-jq^{(1)} d_2/2), \\
 M_{3,3} &= -2\mu^{(1)} S^{(1)} k \exp(jS^{(1)} d_2/2), \\
 M_{3,4} &= 2\mu^{(1)} S^{(1)} k \exp(-jS^{(1)} d_2/2), \\
 M_{3,5} &= (\lambda^{(2)} K_L^{(2)2} + 2\mu^{(2)} q^{(2)2}) \exp(jq^{(2)} d_2/2), \\
 M_{3,6} &= (\lambda^{(2)} K_L^{(2)2} + 2\mu^{(2)} q^{(2)2}) \exp(-jq^{(2)} d_2/2), \\
 M_{3,7} &= 2\mu^{(2)} S^{(2)} k \exp(jS^{(2)} d_2/2), \\
 M_{3,8} &= -2\mu^{(2)} S^{(2)} k \exp(-jS^{(2)} d_2/2), \\
 M_{3,m} &= 0, \text{ pour } 9 \leq m \leq 12
 \end{aligned}$$

La deuxième condition de continuité des contraintes à l'interface  $C_1/C_2$

( $T_{xz}^{(1)} = T_{xz}^{(2)}$  à  $z = d_2/2$ ) donne:

$$\begin{aligned}
 M_{4,1} &= -2\mu^{(1)} q^{(1)} k \exp(jq^{(1)} d_2/2), \\
 M_{4,2} &= 2\mu^{(1)} q^{(1)} k \exp(-jq^{(1)} d_2/2), \\
 M_{4,3} &= \mu^{(1)} (S^{(1)2} - k^2) \exp(jS^{(1)} d_2/2), \\
 M_{4,4} &= \mu^{(1)} (S^{(1)2} - k^2) \exp(-jS^{(1)} d_2/2), \\
 M_{4,5} &= 2\mu^{(2)} q^{(2)} k \exp(jq^{(2)} d_2/2), \\
 M_{4,6} &= -2\mu^{(2)} q^{(2)} k \exp(-jq^{(2)} d_2/2), \\
 M_{4,7} &= -\mu^{(2)} (S^{(2)2} - k^2) \exp(jS^{(2)} d_2/2), \\
 M_{4,8} &= -\mu^{(2)} (S^{(2)2} - k^2) \exp(-jS^{(2)} d_2/2), \\
 M_{4,m} &= 0, \text{ pour } 9 \leq m \leq 12
 \end{aligned}$$

La première condition de continuité des déplacements à l'interface  $C_1/C_2$

( $U_X^{(1)} = U_X^{(2)}$  à  $z = d_2/2$ ) donne:

$$\begin{aligned}
 M_{5,1} &= jk \exp(jq^{(1)} d_2/2), \\
 M_{5,2} &= jk \exp(-jq^{(1)} d_2/2), \\
 M_{5,3} &= -jS^{(1)} \exp(jS^{(1)} d_2/2),
 \end{aligned}$$

$$M_{5,4} = jS^{(1)} \exp(-jS^{(1)} d_2/2),$$

$$M_{5,5} = -jk \exp(jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{5,6} = -jk \exp(-jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{5,7} = jS^{(2)} \exp(jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{5,8} = -jS^{(2)} \exp(-jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{5,m} = 0, \text{ pour } 9 \leq m \leq 12$$

La deuxième condition de continuité des déplacements à l'interface  $C_1/C_2$  ( $U_z^{(1)} = U_z^{(2)}$  à  $z = d_2/2$ ) donne:

$$M_{6,1} = jq^{(1)} \exp(jq^{(1)} d_2/2),$$

$$M_{6,2} = -jq^{(1)} \exp(-jq^{(1)} d_2/2),$$

$$M_{6,3} = jk \exp(jS^{(1)} d_2/2),$$

$$M_{6,4} = jk \exp(-jS^{(1)} d_2/2),$$

$$M_{6,5} = -jq^{(2)} \exp(jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{6,6} = jq^{(2)} \exp(-jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{6,7} = -jk \exp(jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{6,8} = -jk \exp(-jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{6,m} = 0, \text{ pour } 9 \leq m \leq 12$$

La première condition de continuité des contraintes à l'interface  $C_2/C_3$  ( $T_{zz}^{(2)} = T_{zz}^{(3)}$  à  $z = -d_2/2$ ) donne:

$$M_{7,m} = 0, \text{ pour } 1 \leq m \leq 4$$

$$M_{7,5} = -(\lambda^{(2)} K_L^{(2)2} + 2\mu^{(2)} q^{(2)2}) \exp(-jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{7,6} = -(\lambda^{(2)} K_L^{(2)2} + 2\mu^{(2)} q^{(2)2}) \exp(jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{7,7} = -2\mu^{(2)} S^{(2)} k \exp(-jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{7,8} = 2\mu^{(2)} S^{(2)} k \exp(jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{7,9} = (\lambda^{(3)} K_L^{(3)2} + 2\mu^{(3)} q^{(3)2}) \exp(-jq^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{7,10} = (\lambda^{(3)} K_L^{(3)2} + 2\mu^{(3)} q^{(3)2}) \exp(jq^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{7,11} = 2\mu^{(3)} S^{(3)} k \exp(-jS^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{7,12} = -2\mu^{(3)} S^{(3)} k \exp(+jS^{(3)} d_2/2),$$

La deuxième condition de continuité des contraintes à l'interface  $C_2/C_3$

$(T_{xz}^{(2)} = T_{xz}^{(3)} \quad \text{à} \quad z = -d_2/2)$  donne:

$$M_{8,m} = 0, \quad \text{pour} \quad 1 \leq m \leq 4$$

$$M_{8,5} = -2\mu^{(2)} q^{(2)} k \exp(-jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{8,6} = 2\mu^{(2)} q^{(2)} k \exp(jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{8,7} = \mu^{(2)} (S^{(2)2} - k^2) \exp(-jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{8,8} = \mu^{(2)} (S^{(2)2} - k^2) \exp(jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{8,9} = 2\mu^{(3)} q^{(3)} k \exp(-jq^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{8,10} = -2\mu^{(3)} q^{(3)} k \exp(jq^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{8,11} = -\mu^{(3)} (S^{(3)2} - k^2) \exp(-jS^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{8,12} = -\mu^{(3)} (S^{(3)2} - k^2) \exp(jS^{(3)} d_2/2),$$

La première condition de continuité des déplacements à l'interface  $C_2/C_3$

$(U_X^{(2)} = U_X^{(3)} \quad \text{à} \quad z = -d_2/2)$  donne:

$$M_{9,m} = 0, \quad \text{pour} \quad 1 \leq m \leq 4$$

$$M_{9,5} = jk \exp(-jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{9,6} = jk \exp(jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{9,7} = -jS^{(2)} \exp(-jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{9,8} = jS^{(2)} \exp(jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{9,9} = -jk \exp(-jq^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{9,10} = -jk \exp(jq^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{9,11} = jS^{(3)} \exp(-jS^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{9,12} = -jS^{(3)} \exp(jS^{(3)} d_2/2),$$

La deuxième condition de continuité des déplacements à l'interface  $C_2/C_3$

( $U_Z^{(2)} = U_Z^{(3)}$  à  $z = -d_2/2$ ) donne:

$$M_{10,m} = 0, \text{ pour } 1 \leq m \leq 4$$

$$M_{10,5} = jq^{(2)} \exp(-jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{10,6} = -jq^{(2)} \exp(jq^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{10,7} = jk \exp(-jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{10,8} = jk \exp(jS^{(2)} d_2/2),$$

$$M_{10,9} = -jq^{(3)} \exp(-jq^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{10,10} = jq^{(3)} \exp(jq^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{10,11} = -jk \exp(-jS^{(3)} d_2/2),$$

$$M_{10,12} = -jk \exp(jS^{(3)} d_2/2),$$

Les dernières conditions aux limites sont à la surface inférieure libre de toute contrainte :

La première condition de continuité ( $T_{zz} = 0$  à  $z = -h/2$ ) donne:

$$M_{11,m} = 0, \text{ pour } 1 \leq m \leq 8$$

$$M_{11,9} = -(\lambda^{(3)} K_L^{(3)2} + 2\mu^{(3)} q^{(3)2}) \exp(-jq^{(3)} h/2),$$

$$M_{11,10} = -(\lambda^{(3)} K_L^{(3)2} + 2\mu^{(3)} q^{(3)2}) \exp(jq^{(3)} h/2),$$

$$M_{11,11} = -2\mu^{(3)} S^{(3)} k \exp(-jS^{(3)} h/2),$$

$$M_{11,12} = 2\mu^{(3)} S^{(3)} k \exp(jS^{(3)} h/2),$$

La deuxième condition de continuité ( $T_{xz} = 0$  à  $z = -h/2$ ) donne:

$$M_{12,m} = 0, \text{ pour } 1 \leq m \leq 8$$

$$M_{12,9} = -2\mu^{(3)} q^{(3)} k \exp(-jq^{(3)} h/2),$$

$$M_{12,10} = 2\mu^{(3)} q^{(3)} k \exp(jq^{(3)} h/2),$$

$$M_{12,11} = \mu^{(3)} (S^{(3)2} - k^2) \exp(-jS^{(3)} h/2),$$

$$M_{12,12} = \mu^{(3)} (S^{(3)2} - k^2) \exp(jS^{(3)} h/2).$$

## Annexe.2

La matrice  $[R^{(i)}]$  appelée la matrice de transfert de la couche (i) relie le vecteur d'état  $[Y^{(i)}] = [u_x^{(i)}, u_z^{(i)}, T_{zz}^{(i)}, T_{xz}^{(i)}]$  de la surface supérieure de cette couche à celui de la surface inférieure par la relation:

$$[Y^{(i)}(z = z_i)] = [R^{(i)}] [Y^{(i)}(z = z_{i+1})] \quad (1)$$

$z_i$  et  $z_{i+1}$  représentent respectivement le coordonnée en  $z$  de la surface supérieure de la couche (i) et celui de la surface inférieure (aussi de la surface supérieure de la couche adjacente (i+1)).

La matrice de transfert  $[R^{(i)}]$  est obtenue en exprimant les composantes des vecteurs d'état  $[Y^{(i)}(z = z_i)]$  et  $[Y^{(i)}(z = z_{i+1})]$  en fonction des amplitudes des potentiels représentées sous la forme vectorielle  $[X^{(i)}] = [A^{(i)}, B^{(i)}, C^{(i)}, D^{(i)}]$  :

Pour la surface supérieure :

$$[Y^{(i)}(z = z_i)] = [L^{(i)}(z = z_i)] [X^{(i)}] \quad (2)$$

Pour la surface inférieure :

$$[Y^{(i)}(z = z_{i+1})] = [L^{(i)}(z = z_{i+1})] [X^{(i)}] \quad (3)$$

A partir de ces deux dernières relations (2) et (3) on déduit simplement que la matrice de transfert  $[R^{(i)}]$  s'écrit:

$$[R^{(i)}] = [L^{(i)}(z = z_i)] [L^{(i)}(z = z_{i+1})]^{-1} \quad (4)$$

Les éléments de la matrice  $[L^{(i)}(z = z_i)]$  :

$$L_{1,1}^{(i)} = jk \exp(jq^{(i)} z_i),$$

$$L_{1,2}^{(i)} = jk \exp(-jq^{(i)} z_i),$$

$$L_{1,3}^{(i)} = -jS^{(i)} \exp(jS^{(i)} z_i),$$

$$L_{1,4}^{(i)} = jS^{(i)} \exp(-jS^{(i)} z_i),$$

$$L_{2,1}^{(i)} = jq^{(i)} \exp(jq^{(i)} z_i),$$

$$L_{2,2}^{(i)} = -jq^{(i)} \exp(-jq^{(i)} z_i),$$

$$L_{2,3}^{(i)} = jk \exp(jS^{(i)} z_i),$$

$$L_{2,4}^{(i)} = jk \exp(-jS^{(i)} z_i),$$

$$L_{3,1}^{(i)} = -(\lambda^{(1)} K_L^{(1)2} + 2\mu^{(1)} q^{(1)2}) \exp(jq^{(1)} z_i),$$

$$L_{3,2}^{(i)} = -(\lambda^{(1)} K_L^{(1)2} + 2\mu^{(1)} q^{(1)2}) \exp(-jq^{(1)} z_i),$$

$$L_{3,3}^{(i)} = -2\mu^{(1)} S^{(1)} k \exp(jS^{(1)} z_i),$$

$$L_{3,4}^{(i)} = 2\mu^{(1)} S^{(1)} k \exp(-jS^{(1)} z_i),$$

$$L_{4,1}^{(i)} = -2\mu^{(1)} q^{(1)} k \exp(jq^{(1)} z_i),$$

$$L_{4,2}^{(i)} = 2\mu^{(1)} q^{(1)} k \exp(-jq^{(1)} z_i),$$

$$L_{4,3}^{(i)} = \mu^{(1)} (S^{(1)2} - k^2) \exp(jS^{(1)} z_i),$$

$$L_{4,4}^{(i)} = \mu^{(1)} (S^{(1)2} - k^2) \exp(-jS^{(1)} z_i).$$

Les éléments de la matrice  $[L^{(i)}(z = z_{i+1})]$  sont obtenus en remplaçant tout simplement  $z_i$  par  $z_{i+1}$ .

## LISTES DES FIGURES

Figure I-1: Travail thermodynamique de l'adhésion .....	16
Figure I-2: Adhésion et adhérence .....	16
Figure I-3: Exemple de liaison chimique directe entre adhérent et adhérent .....	20
Figure I-4: Utilisation d'un agent de couplage pour former une liaison.....	20
Figure I-5: Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique, d'après [11] .....	20
Figure I-6: Charges électriques .....	21
Figure I-7: Interphase.....	21
Figure I-8: Inter-diffusion .....	22
Figure I-9: Étalement d'une goutte sur un substrat solide.....	23
Figure I-10: Couches de faible cohésion du modèle de Bikerman, d'après [18] (données numériques d'après [19]) .....	25
Figure I-11: Décomposition du processus de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion mis en jeu, d'après [21].....	26
Figure I-12: Systèmes de génération et détection d'ondes guidées par transducteurs ultrasonores plans à couplage air.....	34
Figure II-1 : Réflexion et transmission à une interface liquide/solide. Géométrie du problème .....	46
Figure(II-2): Réflexion et transmission par un milieu stratifié plan composé de (n) couches solides. Géométrie du problème.....	48
Figure II-3: Géométrie de la plaque homogène isotrope: axes de référence.....	55
Figure II-4: Modes de Lamb symétrique (a) et antisymétrique (b) dans un matériau homogène isotrope .....	57
Figure II-5: Modes de Lamb symétriques (trait plein) et antisymétriques (trait pointillé) dans une plaque d'aluminium.....	58
Figure III-1: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al. $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'aluminium .....	65
Figure III-2: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(5%)/Al. $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'aluminium .....	66
Figure III-3: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(20%)/Al. $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'aluminium .....	67
Figure III-4: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(5%)/Al. $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$ ; $d = 0,32 \text{ mm}$ * mode de la colle + mode de l'aluminium....	68
Figure III-5: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al. $P_N = 5.10^{14} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'aluminium .....	70

Figure III-6: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al. $P_N = 5.10^{13} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'aluminium .....	70
Figure III-7: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al. $P_N = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'aluminium .....	71
Figure III-8: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al. $P_N = 5 \cdot 10^{12} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'aluminium .....	71
Figure III-9: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al. $P_N = 2.10^{12} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'aluminium .....	72
Figure III-10: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al. $P_N = 6. \cdot 10^{11} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'aluminium .....	72
Figure III-11: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion Al./Colle(10%)/Al. $P_N = 10^{11} \text{ N/m}^3$ + mode de l'aluminium prévu pour une tôle seule .....	73
Figure III-12: Spectre corrigé du signal rétrodiffusé par la structure Al./Colle (10%)/Al. Cas du collage parfait selon [4] *mode de la colle +mode d'aluminium.....	74
Figure III-13: Spectre corrigé du signal rétrodiffusé par la structure Al./Colle(5%)/Al. Cas de mauvais collage selon [4] .....	74
Figure III-14: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac. $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'acier .....	75
Figure III-15: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac. $P_N = 5. \cdot 10^{14} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'acier .....	76
Figure III-16: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac. $P_N = 2.5 \cdot 10^{13} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'acier .....	76
Figure III-17: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac. $P_N = 10^{13} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'acier.....	77
Figure III-18: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac. $P_N = 610^{12} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de l'acier.....	77
Figure III-19: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Ac./Colle(10%)/Ac. $P_N = 10^{11} \text{ N/m}^3$ + mode de l'acier prévu pour une tôle seule.....	78
Figure III-20: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir. $P_N = 10^{17} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de zircaloy. ....	78
Figure III-21: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir. $P_N = 10^{14} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de zircaloy. ....	79
Figure III-22: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir. $P_N = 3.5 \cdot 10^{13} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de zircaloy. ....	79
Figure III-23: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir. $P_N = 10^{13} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de zircaloy. ....	80

Figure III-24: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir. $P_N = 5.10^{12} \text{ N/m}^3$ * mode de la colle + mode de zircaloy. ....	80
Figure III-25: L'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion, Zir./Colle(10%)/Zir. $P_N = 10^{11} \text{ N/m}^3$ + mode de zircaloy prévu pour une tôle seule. ....	81
Figure IV-1: Géométrie la structure tri-couche métal/adhésif/métal .....	87
Figure IV-2: Les courbes de dispersion de la structure tri-couche (AL/C/AL) avec le programme iso-contours .....	95
Figure IV-3: Les courbes de dispersion raffinées de la structure (AL/C/AL) .....	97
Figure IV-4 : Les courbes de dispersion du modèle tri-couche AL/C/AL (trait pointillé bleu) + Les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge) + Les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert) .....	98
Figure IV-5: Le champ de déplacement pour quatre paires (f-k) différents identifiés sur la figureIV- 4. Trait en pointillé ----- le déplacement transversal $U_z$ Trait plein ----- le déplacement longitudinal $U_x$ (a) Point $M_c$ (b) Point $M_{al}$ (c) Point $N_c$ (d) Point $N_{al}$ .....	100
Figure IV-6: - les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge) - les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert) - les quatre modes choisis pour le modèle AL/C/AL (trait pointillé bleu) $P_N=P_T=10^{17}$ .....	102
Figure IV-7: - les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge) - les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert) - les quatre modes choisis pour le modèle AL/C/AL (trait pointillé bleu) $P_N=P_T=2.10^{13}$ .....	103
Figure IV-8: - les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge) - les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert) - les quatre modes choisis pour le modèle AL/C/AL (trait pointillé bleu) $P_N=P_T=5.10^{12}$ .....	104
Figure IV-9: - les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge) - les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert) - les quatre modes choisis pour le modèle AL/C/AL (trait pointillé bleu) $P_N=P_T=1.510^{12}$ .....	104
Figure IV-10: - les courbes de dispersion de la plaque d'aluminium seule (trait plein rouge) - les courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert) - les quatre modes choisis pour le modèle AL/C/AL (trait pointillé bleu) $P_N=P_T=10^{11}$ .....	105
Figure V-1: Les courbes de dispersion de la structure tri-couche (CU/C/AC) avec le programme iso-contours .....	116
Figure V-2: Les courbes de dispersion raffinées de la structure (CU/C/AC) .....	116

Figure V-3: Zoom d'une superposition artificielle:	
Des courbes de dispersion du modèle tri-couche Cu/C/Ac (trait pointillé noir)	
Des courbes de dispersion de la plaque de cuivre seule (trait plein rouge)	
Des courbes de dispersion de la plaque d'acier seule (trait plein bleu)	
Des courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert).....	118
Figure V-4: Le champ de déplacement pour six pairs (f-k) différents identifiés sur la figure V-3.	
Trait en pointillé ----- le déplacement transversal $U_z$	
Trait plein ----- le déplacement longitudinal $U_x$	
(a) point $P_c$ (b) point $P_a$ (c) point $P_s$ (d) point $L_c$ (e) point $L_a$ (f) point $L_s$ .....	120
Figure V-5: La courbe sélectionnée pour la méthode inverse.....	122
Figure V-6: Zoom d'une superposition artificielle:	
De la courbe sélectionnée pour la méthode inverse (trait pointillé noir)	
Des courbes de dispersion de la plaque de cuivre seule (trait plein rouge)	
Des courbes de dispersion de la plaque d'acier seule (trait plein bleu)	
Des courbes de dispersion de la couche de colle seule (trait plein vert).....	123

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Exemples d'énergies de surface pour quelques matériaux courants (données par le CETIM - Centre Technique des Industries Mécaniques-france) .....	24
Tableau I-2: Energies des différents types de liaisons intermoléculaires, d'après [22].....	27
Tableau III-1: Les propriétés géométriques et mécaniques de l'aluminium et de la colle (10% de durcisseur) .....	65
Tableau III-2: Les propriétés géométriques et mécaniques de l'acier et de zircaloy .....	75
Tableau IV-1: Les propriétés géométriques et mécaniques de l'aluminium et de la colle.....	95
TableauV-1: Les propriétés géométriques et mécaniques du cuivre, d'acier et de la colle .....	115
Tableau V-2: Les valeurs optimisées des neuf propriétés matérielles obtenues à la fin du processus de la minimisation .....	124
Tableau V-3: Les valeurs optimisées des neuf propriétés matérielles obtenues à la fin du processus de la minimisation en introduisant une erreur de mesure simulée de 5% .....	125

**Année** :2007  
**Auteur** :Boujemâa BOUGAZE  
**Universite Chouaib Doukkali, Eljadida**

### **Résumé**

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre général de l'évaluation et du contrôle non destructifs des structures : recherche de défauts métallurgiques, caractérisation de l'adhérence, détermination des propriétés mécaniques...

Les structures considérées ici sont des assemblages plans tri-couches constitués de deux tôles collées

Des outils numériques, basés sur des méthodes théoriques, ont été mis au point pour étudier le potentiel des techniques ultrasonores à contrôler et évaluer l'état de santé des assemblages collés.

La première technique présentée dans cette étude est basée sur l'analyse de l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion. Un code de calcul numérique de grande précision est développé sur Matlab pour déterminer, en incidence normale, l'évolution fréquentielle du coefficient de réflexion pour différentes qualités du contact. La modélisation du contact est faite selon les conditions aux limites définies par Pilarski. Des simulations numériques sont effectuées sur trois structures tri-couche : aluminium/colle/aluminium ; acier/colle/acier et zircaloy/colle/zircaloy. Les résultats numériques obtenus sont en parfait accord avec ceux déterminés expérimentalement par d'autres chercheurs. Une nouvelle interprétation de l'évolution fréquentielle des minimums du coefficient de réflexion en passant d'un collage parfait à un mauvais collage est proposée. La deuxième technique proposée ici est basée sur la propagation des ondes guidées ayant l'aptitude à se propager sur de longues distances ce qui permet un contrôle de l'intégrité de la structure. L'utilisation de cette technique pour contrôler la qualité du collage de deux plaques d'aluminium nécessite l'étude et la compréhension de la propagation des ondes guidées dans les structures tri-couche. Deux méthodes analytiques sont exposées permettant la détermination de l'équation de dispersion de ces structures. Par une résolution numérique de cette équation caractéristique, nous avons déterminé le réseau de dispersion de la structure collée. Une nouvelle interprétation des courbes de dispersion est proposée mettant en évidence l'existence, pour chaque mode de propagation, de portions (quasi horizontales) qui suivent les modes d'une couche de colle seule et de portions qui suivent les modes d'une couche d'aluminium seule. Par ailleurs, l'étude du champ de déplacement a montré que le déplacement s'effectue dans la couche de colle lorsque le mode de propagation est pris de la partie qui suit le mode de la couche de colle seule et il est prépondérant dans la plaque d'aluminium si le mode est situé dans la partie qui suit le mode d'une plaque d'aluminium seule. En introduisant le modèle des interfaces de Pilarski, le calcul numérique des courbes de dispersion pour différentes natures du contact colle/aluminium a permis de montrer la grande sensibilité de ces courbes de dispersion à la qualité du collage.

La troisième technique présentée dans cette étude consiste à l'évaluation non destructive des propriétés matérielles d'une structure tri-couche à partir de ses courbes de dispersion. La structure tri-couche est composée d'une tôle de cuivre liée à une tôle d'acier par une couche de colle en résine époxy. Les propriétés matérielles considérées sont les vitesses d'onde longitudinale et transversale, ainsi que la densité de chaque couche de la structure. Sur les courbes de dispersion déterminées par notre code numérique, nous avons mis en évidence l'existence, pour chaque mode de la structure tri-couche, des portions qui suivent les modes d'une plaque de cuivre seule et des portions qui suivent les modes d'une plaque d'acier seule et d'autres (quasi horizontales) qui suivent les modes d'une couche de colle seule. A partir de ces courbes de dispersion, le champ du déplacement est déterminé en montrant que l'énergie ultrasonique dans la structure tri-couche est restreinte à une couche donnée quand le mode sélectionné de la structure est localisée dans la portion qui suit le mode de cette couche. Finalement, à partir d'une courbe de dispersion sélectionnée, une méthode inverse est proposée pour reconstruire les neuf propriétés matérielles de la structure tri-couche étudiée. La procédure de la méthode inverse utilise la solution non-linéaire des moindres carrés à l'équation de dispersion en définissant une fonction d'erreur en terme des neuf propriétés matérielles inconnues de la structure. Un programme est développé, sur Matlab, pour minimiser cette fonction d'erreur et donc déterminer un ensemble optimum des neuf propriétés matérielles. La comparaison des valeurs optimisées avec les valeurs exactes montre l'efficacité de la méthode inverse proposée. Cette technique ultrasonore permet donc l'accès à la connaissance de l'état de santé des assemblages collés en déterminant leurs propriétés matérielles.

### **Mots-clés**

Ultrasons, coefficient de réflexion, ondes de Lamb, évaluation et contrôle, qualité de collage, caractérisation, méthode inverse.