

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie
Houari Boumediene



Faculté de Physique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

EN : PHYSIQUE

Spécialité : Matériaux & Composants

Par :

M^{me} ABBAS Yamina

Sujet :

Utilisation des ondes ultrasonores guidées pour l'étude de défauts invisibles sur des plaques minces

Soutenu publiquement le : 27/10/2007,

devant le Jury composé de :

Mr. M. TALEB	Professeur	USTHB	Président
Mr. F. BOUBENIDER	Professeur	USTHB	Directeur de thèse
Mr. D. BRADAI	Professeur	USTHB	Examineur
Mr. T. BOUTKEDJIRT	Maître de conférence	USTHB	Examineur

REFERENCES :

- [1] Monnier T. , « Ondes de Lamb dans les milieux stratifiés application à la surveillance in situ et en temps réel de l'endommagement de structures composites », Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, 2001
- [2] Le Clézio E., « Diffraction des ondes de Lamb par les fissures verticales », Thèse de doctorat, de l'Université de Bordeaux I, 2001
- [3] Royer D., Dieulesaint E. « Ondes élastiques dans les solides » tome 1, Paris : Masson, 1996
- [4] Castaings M., « Contrôle et évaluation non destructifs de matériaux par des ondes ultrasonores guidées », Habilitation à diriger des recherches, l'Université de Bordeaux I, 2002
- [5] Cawley P., Alleyne D., « The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures », Ultrasonics , (1996), Vol 34, p. 287-290
- [6] Lambert A., Pralus Y., Rivenez J., « Propagation des ondes ultrasonores », Centre technique des industries mécaniques (CETIM)
- [7] Kazys R. , Mazeika L., Barauskas R., Raisutis R., Cicenias V., Demcenko A., « 3D Analysis of interaction of Lamb waves with defects in loaded steel plates », Ultrasound Institute, June 2006 ,Kaunas University of Technology,
- [8] Chancellier N.W., « Réflexion et conversion d'une onde de Lamb à l'extrémité biseautée d'une plaque », thèse de doctorat, Université du Havre, juillet 2003
- [9] Lowe M. J. S., Cawley P., Kao J-Y., and Diligent O., «The low frequency reflection characteristics of the fundamental antisymmetric Lamb wave A_0 from a rectangular notch in a plate»,; J. Acoust. Soc. Am. ,2002,Vol **111**

- [10] Rose J.L., Pelts S.P., Quarry M.J., «A comb transducer model for guided wave NDE », *Ultrasonics* , (1998), Vol 36, p.163-169
- [11] Jin J., Quek S.T., Wang Q., «Design of interdigital transducers for crack detection in plates», *Ultrasonics* , (2005), Vol 43, p. 481-493
- [12] El youbi F., Grondel S., Assaad J., « Signal processing for damage detection using two different array transducers », *Ultrasonics* , (2004), Vol 42, p. 803–806
- [13] Jeong H.D., Shin H.J., Rose J.L., « Detection of Defects in a Thin Steel Plate Using Ultrasonic Guided wave », 15 th World Conference on Non destructive Testing Roma (Italy), 15-21 October 2000
- [14] Santos M., Perdigaos J. , «Leaky Lamb waves for the detection and sizing of defects in bonded aluminium lap joints », *NDT&E International* , (2005), Vol 38, p. 561–568
- [15] Watkins R.D. et al, « The attenuation of Lamb waves in the presence of a fluid Ultrasonic », *Ultrasonics* ,(1982), Vol 20, p. 257-264
- [16] Titry C., Terrein N., Lepoutre F., « Détection de la corrosion cachée dans les structures aéronautiques en aluminium », colloque interdisciplinaire en instrumentation Cachan (France), janvier 2004
- [17] Gélébart Y., « Mesure et modélisation des endommagements dans les composites stratifiés », Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique LMA, Université de Marseille, 2005
- [18] Shin H.J., Song S.J., « Observation of a Lamb Wave Mode Conversion on an aluminium Plate », Rome 2000
- [19] Moulin E., Grondel S., Baouahi M., Assaad J., « Pseudo-3D modeling of a surface-bonded Lamb wave source (L) », *J. Acoust. Soc. Am.*, May 2006, Vol **119**

[20] Grondel S., Paget C., Delebarre C., Assaad J., « Design of optimal configuration for generating A_0 Lamb mode in a composite plate using piezoceramic transducers», J. Acoust. Soc. Am., July 2002, Vol **112**

[21] Hayashi T., Endoh S., «Calculation and visualization of Lamb Wave motion», Ultrasonics, (2000), Vol 38, p. 770-773

[22] Kazys R., Mazeika L., Barauskas R., Raisutis R., Cicenys V., Demcenko A., « 3D Analysis of interaction of Lamb waves with defects in loaded steel plates », Ultrasonics, (2006), Vol 44, p. 1127–1130

[23]. Lohr K.R., Rose J.L., «Ultrasonic guided wave and acoustic impact methods for pipe fouling detection », Journal of Food Engineering , (2003), Vol 56, p. 315-324

[24] Laugier P., Padilla F., Peyrin F., Raum K., Saied A., Talmast M., Vico L., « Apport des ultrasons dans l'exploitation du tissu osseux», ITBM-RBM , (2005), Vol 26, p. 299-311

[25] Li J., Rose J.L., « Natural beam focusing of non-axisymmetric guided waves in a large-diameter pipes », Ultrasonics, (2006), Vol 44, p. 35-45

[26] Leduc D., Morvan B., Pareige P., Izbicki J.L., « Measurement of the effects of rough surfaces on Lamb waves propagation », NDT&E International, (2004), Vol 37, p. 207-211

[27] Lowe M.J.S., Diligent O., « Low-frequency reflection characteristics of the S_0 Lamb wave from a rectangular notch in plate », J. Acoust. Soc. Am, Jan 2002, Vol **111** (1)

[28] Grondel S., Assaad J., Delebarre C., Moulin E., « Health monitoring of composite wingbox structure », Ultrasonics, (2004), Vol 42

[29] Chahbaz A., Mustafa V., Hay D., « Corrosion detection in aircraft structures using guided Lamb waves », NDT&E International, 1996, Vol 1 No 11

[30] Leymarie N., « Analyse du comportement viscoélastique de matériaux anisotropes par reconstruction de formes d'ondes », thèse de doctorat, Université Bordeaux I, (2002)

[31] Grondel S., « Optimisation du contrôle santé, intégré par ondes de Lamb. Application a la surveillance de structures aéronautiques », thèse de Doctorat, (2000)

[32] Morvan B., Wilkie-chencellier N., Dulfo H., Tinel A., Duclos J., « Lamb wave reflection at the free edge of a plate », J. Acoust. Soc. Am, March 2003 , Vol **113** (3), p.1417-1425

[33] Predoi M.V, Rousseau M., « Lamb propagation in elastic plane layers with a joint strip» Ultrasonics, (2005), Vol 43, p. 551-559

[34] Reindl L., Scholl G., Ostertag T., Ruppel C.C.W, Bulst W. E., Seifert F., « Saw devices as wireless passive sensor », IEEE ultrason.symp.proc, 1996, p. 363-367

[35] Schen H., Scholi G., Seifert F., Weigel R., « Quartz pressure sensor based on saw reflective delayline », IEEE ultrason.symp.proc, (1996), p. 347-350

[36] Rayleigh. L. « On waves propagating along the plane surface of an elastic solid » proc. London. Math. Soc, 1885, Vol 17, p. 4-11

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents qui m'ont soutenue tout au long de ma vie. Je tiens à leur exprimer ma profonde gratitude et mon éternelle reconnaissance.

A mes deux sœurs et à mon frère, à mes grands parents, mes tantes et oncles ; mes neveux et ma nièce pour leur présence à mes cotés.

A mon mari et toute ma belle famille pour leur patience, leurs encouragements et leur soutien

A tous mes amis (es), en les remerciant d'avoir toujours été présents dans les moments difficiles.

Remerciements

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements au Professeur **F. BOUBENIDER** pour m'avoir accueillie dans son équipe de recherche. Durant ma formation, j'ai pu profiter de sa riche expérience pour approfondir mes connaissances dans le domaine de l'Acoustique. Je tiens à lui exprimer ma gratitude pour m'avoir guidée tout au long de cette thèse. Ainsi que pour tous les conseils avisés, qu'il a bien voulu me donner.*

*Je suis très sensible à l'honneur que me fait le Professeur **A. TALEB**, en acceptant de présider le jury de cette thèse. Je lui en suis très reconnaissante et je l'en remercie vivement.*

*J'adresse mes sincères remerciements à monsieur **D. BRADAI**, professeur à l'USTHB, pour avoir accepté de participer au jury et pour l'intérêt qu'il porte à ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements à monsieur **T. BOUTKEDJIRT**, Maître de conférences à l'USTHB, pour l'intérêt qu'il porte à ce travail et pour l'honneur qu'il me fait en étant membre du jury.*

*Je remercie également tous mes collègues de l'équipe « **Ondes et Acoustique** » : (S. TOUMI ; A. ALILOUCHE ; H. ZITOUNE ; M. AIT OUARABI ; S. ABIDA ; S. DJILLI ; S. GACHI) ; pour leur soutien et leur encouragement.*

SOMMAIRE

Introduction.....	1
-------------------	---

Chapitre I

Etude théorique de la propagation des ondes de Lamb

I.1 Introduction.....	4
I.2 Propagation en milieu infini	4
I.2-1 Rappel d'élasticité linéaire : loi de Hooke	
I.2-2 Equations de propagation dans un solide illimité	
I.3 Ondes de Lamb dans une plaque isotrope	9
I.3-1 Equations de propagation dans le cas d'un solide isotrope	
I.3-2 Conditions aux limites sur les deux faces	
I.3-3 Equations de dispersion des ondes de Lamb	
I.4. Courbes de dispersion	14
1.4-1 Nombre d'ondes	
1.4-2 Vitesse de phase	
1.4.3 Vitesse de groupe	
I.5- Numérotation des modes.....	18
I.5.1 Modes d'ordre 0	
I.5.2 Modes d'ordre supérieur	

Chapitre II

Choix d'un mode de Lamb incident et méthodes de génération

II.1 Introduction.....	22
II.2 Origine des défauts.....	22
II.3 Choix du mode.....	23
II.3-1 Modes non dispersifs	

II.3-2 Déplacement de matière des modes fondamentaux de Lamb	
II.3-2-a Mode S_0	
II.3-2-b Mode A_0	
II.3-3 Propriétés du mode choisi	
II.3-4 Mode de bout	
II.4 Propagation du mode de Lamb S_0 dans une plaque.....	38
II.4-1 Réflexion du mode S_0 sur le bord libre d'une plaque	
II.4-2 Réflexion du mode S_0 sur un défaut	
II.5 Méthodes de génération des ondes de Lamb.....	41
II.5-1 Méthode utilisant un transducteur à doigts	
II.5-2 Méthodes de génération sous incidence oblique	
II.5-2-a Méthode par contact	
II.5-2-b Méthode par immersion	
II.5-2 -c Méthode sans contact	

Chapitre III

Résultats expérimentaux et discussions

III.1 Introduction.....	49
III.2 Génération d'un mode de Lamb unique.....	49
III.3 Propagation du mode S_0 sur une plaque saine.....	51
III.4 Propagation du mode S_0 en présence de défauts rectangulaires.....	53
III.4-1 Détection et localisation d'une fente	
III.4-2 Détection et localisation d'une fissure	
III.4-3 Détection et localisation d'une fente d'orientation quelconque	
III.4-4 Détection et localisation de fentes d'orientations diverses recouvertes d'une bande adhésive	
III.4-5 Mesure de la longueur d'une fente	
III.4-5-a Balayage horizontal le long d'un défaut	

III.4-5-b Mesure de la longueur d'une fente visible

III.4-5-c Mesure de la longueur d'une fente recouverte d'une bande adhésive

III.4-6 Mesure de la longueur d'une fissure

III.4-7 Détecter, localiser et dimensionner une fissure sur la surface interne (verso) de la plaque

III.5 Propagation du mode S_0 en présence de défauts circulaires.....85

III.5-1 Réflexion du mode S_0 sur un trou

III.5-2 Réflexion du mode S_0 sur un cratère

III.5-3 Détecter et localiser un défaut circulaire invisible

Conclusion.....92

Introduction

De nombreuses structures, dans le domaine industriel et domestique, peuvent être considérées comme planes. En effet, les réservoirs de stockage d'hydrocarbures et de liquides de première nécessité (eau, lait, etc.), vu leurs grandes dimensions, les ailes et le fuselage des avions, les coques de bateaux, les éléments utilisés dans les industries de transformation et de fabrication métallique, les réacteurs nucléaires, les chaudières etc.

Ces structures planes, subissent au cours de leur fabrication et de leur vie plusieurs contraintes pouvant les fragiliser : elles sont soumises aux variations de température (contraction-dilatation), à la corrosion, aux séismes, aux impacts d'objets divers (en ce qui concerne les avions).

L'intégrité de ces structures planes est donc primordiale, la présence d'endommagements pourrait conduire à des catastrophes humaines et écologiques. Les réparations post-fabrication et après mise en fonctionnement, conduisent à des pertes financières importantes. Il est donc nécessaire de pouvoir contrôler, de préférence, lors de leur fabrication mais aussi in situ, ces composants, afin de dépister et de localiser la présence de défauts, avant que ceux-ci n'engendrent des complications.

L'idéal serait de pouvoir contrôler ces structures sans les détruire, donc de manière non destructive. Le contrôle non destructif (C.N.D.), consiste à évaluer par une méthode physique (absorption de rayons X, propagation de courants (courants de Foucault), propagation d'ondes acoustiques etc.) l'état de la structure. De ce fait, la plupart des méthodes de C.N.D nécessitent une bonne connaissance de la physique du matériau et de son endommagement potentiel. Ceci, pour détecter et caractériser des défauts c'est-à-dire, évaluer leurs emplacements, leurs dimensions et leur nombre afin d'être en mesure d'estimer leur état et donc de déterminer s'il y a lieu ou non d'intervenir sur l'objet.

Après la seconde guerre mondiale, de nombreuses recherches ont permis de mettre à la disposition des utilisateurs plusieurs méthodes de contrôle non destructif comme, les courants de Foucault, la radiographie, la magnétoscopie, l'émission acoustique, les ultrasons, etc.

Les courants de Foucault sont utilisés pour inspecter des matériaux conducteurs. Ces courants sont très sensibles aux défauts de petites tailles et peuvent être utilisés pour mesurer l'épaisseur de la structure à tester ou d'un fin revêtement. Cependant, la profondeur du

contrôle dépend des caractéristiques magnétiques et électriques du matériau à contrôler (quelques dixièmes de millimètre pour l'acier et plusieurs millimètres pour le titane).

La radiographie est basée sur la propagation de rayons X ou gamma dans la structure inspectée. Cette méthode de contrôle permet d'inspecter des structures de plus grandes épaisseurs. Mais l'utilisation de ces rayons impose des conditions de sécurité importante pour l'opérateur et pour l'environnement d'où, le prix élevé de cette méthode.

L'émission acoustique résulte d'une libération d'énergie sous forme d'ondes ultrasonores transitoires au sein d'un matériau comportant une dégradation active: la source acoustique étant due à la dégradation évolutive du défaut. Ce contrôle permet une évaluation globale de la structure sans la mettre à l'arrêt ou sans la démonter. Cependant, l'émission acoustique ne permet pas de détecter des défauts non évolutifs ni de dimensionner une discontinuité ni de donner son orientation.

Le contrôle par ultrasons est basé sur la propriété des ondes ultrasonores à se réfléchir, dès que ceux-ci rencontrent une variation d'impédance acoustique. Cette technique peut être utilisée pour tous les matériaux (métalliques, céramiques, composite, bois etc.) qui ne présentent pas une trop forte atténuation aux ultrasons. Parmi tous les procédés existants, ceux basés sur la propagation des ondes ultrasonores, sont particulièrement faciles à mettre en œuvre, car ils nécessitent des équipements relativement légers et sans danger pour les utilisateurs. De plus le contrôle par ultrasons permet d'inspecter la totalité de la structure rapidement, de localiser, et d'estimer la taille d'un défaut. En utilisant les ondes ultrasonores guidées on peut inspecter de grandes structures.

En 1917, Lamb a montré que lorsque l'épaisseur de la plaque est de l'ordre de quelques longueurs d'onde, il peut alors se propager dans celle-ci des ondes guidées de plaques, appelées ondes de Lamb. Les ondes de Lamb présentent plusieurs avantages. En effet, contrairement aux ondes de surface (ondes de Rayleigh) dont l'amplitude s'atténue avec la profondeur sur quelques longueurs d'onde, les modes de Lamb ont la faculté de mettre en vibration la totalité de l'épaisseur de la plaque et offrent ainsi, la possibilité de détecter des défauts en surface ou internes quelle que soit leur profondeur. Il existe plusieurs modes de Lamb, cette nature multimodale permet d'exploiter la différence de sensibilité des divers modes présents dans une plaque à des types d'endommagements différents. De plus les ondes de Lamb peuvent se propager dans des régions inaccessibles de la structure (enfouies, peintes, recouvertes, etc.), et permettent ainsi aux utilisateurs de contrôler ces zones.

Dans ce cadre, il m'a été demandé d'étudier la possibilité de détecter des défauts invisibles sur des plaques minces en utilisant les ondes de Lamb.

La vitesse de propagation des ondes de Lamb et le nombre de modes présents dans la plaque dépendent de la fréquence choisie. L'utilisation de ce type d'ondes requiert donc, la connaissance précise de leurs lois de dispersion qui sont liées aux propriétés élastiques du milieu de propagation. Pour cela, dans le premier chapitre de ce mémoire, nous présentons quelques rappels d'élasticité linéaire nous permettant d'établir les équations de dispersion des ondes guidées de Lamb dans une plaque d'aluminium homogène et isotrope et de tracer les vitesses de phase et de groupe en fonction du produit fréquence x épaisseur, révélant les différentes familles de modes susceptibles de se propager sur une telle plaque.

Il est important de choisir un mode de Lamb incident unique, afin de faciliter l'interprétation des signaux réfléchis par la présence d'éventuels défauts dans la structure. D'où, la seconde partie de notre travail, consistant à choisir un mode de Lamb incident parmi tous les modes de Lamb pouvant se propager dans la plaque à la fréquence choisie. La méthode de génération du mode choisi est exposée.

Le troisième chapitre est consacré à la partie expérimentale. Le mode incident étant choisi, nous avons mis en place un dispositif expérimental afin de générer le mode désiré à un produit fréquence x épaisseur donné, dans des plaques d'aluminium saines de faibles épaisseurs. Puis, nous avons remplacé la plaque saine par des plaques endommagées par différents défauts (rectangulaires, circulaires), afin d'étudier l'interaction du mode choisi avec des défauts de nature, de taille, d'orientation et de symétrie différente situés sur la face sur laquelle se trouve notre émetteur-récepteur ou sur l'autre face de la structure à contrôler.

Souvent, les plaques utilisées dans les différentes industries sont protégées contre les agressions du milieu extérieur par divers revêtements. D'où, l'intérêt de tester la sensibilité des ondes de Lamb, à la présence de défauts cachés sous un revêtement quelconque. Pour cela, nous avons étudié l'interaction des ondes de Lamb avec des défauts visibles puis, nous avons renouvelé nos expériences pour des défauts invisibles (recouverts d'une bande adhésive ou de peinture).

I.1- Introduction

Pour inspecter directement la totalité d'une structure plane, plusieurs méthodes peuvent être utilisées dont, la méthode utilisant les ondes guidées de Lamb. De nombreuses industries utilisent ce mode de contrôle comme complément à d'autres méthodes ou comme principal outil de contrôle. Cette expertise nécessite une bonne connaissance des lois de dispersion de ces ondes dans les plaques. Pour cela, nous commencerons par rappeler quelques notions de base de la propagation des ondes dans un milieu élastique homogène, isotrope et illimité, puis dans un milieu limité : une plaque. Afin, d'obtenir un système d'équation de dispersion de Rayleigh Lamb dont les solutions représentent les différents modes propres de vibrations d'une plaque. Il est important de pouvoir tracer les courbes de dispersion de la vitesse de phase mais aussi de la vitesse de groupe, toutes deux utilisées pour l'identification et les conditions d'excitation d'un mode de Lamb précis.

I.2 Propagation en milieu infini

I.2-1 Rappel d'élasticité linéaire : loi de Hooke

La loi de Hooke est une loi de comportement des milieux solides soumis à une déformation élastique de faible amplitude, pour préserver l'élasticité du matériau. Le tenseur des contraintes T_{ij} (contraintes tendant à ramener le solide dans son état initial) et le tenseur des déformations S_{kl} (déformations du solide introduites par l'effet des forces extérieures) sont liés par le tenseur des constantes élastiques C_{ijkl} qui caractérise les propriétés élastiques du matériau, d'où la loi de Hooke [1] [3] :

$$\boxed{T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl}} \quad (I-1)$$

T_{ij} est un tenseur des contraintes d'ordre 2, symétrique ($T_{ij} = T_{ji}$) où T_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) est la composante suivant l'axe indicé i de la contrainte $\vec{T}^{(j)}$ s'exerçant sur une surface unitaire perpendiculaire à l'axe indicé j .

Les composantes T_{ii} qui exercent des pressions ou des tractions sont les composantes normales ou de compression de la contrainte. Les composantes T_{ij} , $i \neq j$ qui ont tendance à faire glisser l'une sur l'autre les surfaces en regard, sont les composantes tangentielles ou de cisaillement de la contrainte.

La déformation du solide est décrite au moyen du tenseur des déformations S_{kl} . Ce tenseur est d'ordre 2, symétrique ($S_{kl} = S_{lk}$), il contient 9 composantes dont 6 sont indépendantes. S_{kl} représente une déformation tangentielle ou de cisaillement. S_{ii} représente une déformation longitudinale correspondant à une dilatation S tel que :

$$S = S_{11} + S_{22} + S_{33} \quad (\text{I-2})$$

Le tenseur des constantes élastiques C_{ijkl} contient 81 coefficients élastiques, le nombre de coefficients indépendants est de 36 du fait de la symétrie du tenseur de contraintes T_{ij} et du tenseur des déformations S_{kl} . De plus, la symétrie des cristaux permet de réduire le tenseur d'élasticité pour un solide isotrope à 9 coefficients non nuls.

Puisque les tenseurs des contraintes et des déformations ne comprennent chacun que six éléments indépendants, il est possible de lier les contraintes et les déformations par une matrice de 36 éléments :

$$\begin{pmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{1122} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{1133} & C_{2233} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{1123} & C_{2223} & C_{3323} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1113} & C_{2213} & C_{3313} & C_{2313} & C_{1313} & C_{1213} \\ C_{1112} & C_{2212} & C_{3312} & C_{2312} & C_{1312} & C_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ S_{23} \\ S_{13} \\ S_{12} \end{pmatrix}$$

Pour simplifier les écritures, on utilise la notation matricielle. Les composantes des contraintes, des déformations et les coefficients élastiques intervenant dans la relation tensorielles (I-1) se déduisent l'une de l'autre avec la convention suivante sur les indices :

$$\begin{array}{lll} i, j = 1, 1 \longleftrightarrow \alpha = 1 & i, j = 2, 2 \longleftrightarrow \alpha = 2 & i, j = 3, 3 \longleftrightarrow \alpha = 3 \\ i, j = 2, 3 \longleftrightarrow \alpha = 4 & i, j = 1, 3 \longleftrightarrow \alpha = 5 & i, j = 1, 2 \longleftrightarrow \alpha = 6 \end{array}$$

Pour les déformations, il faut poser :

$$S_{11} = S_1 \quad S_{22} = S_2 \quad S_{33} = S_3 \quad 2S_{23} = S_4 \quad 2S_{13} = S_5 \quad 2S_{12} = S_6$$

En utilisant la notation matricielle, la loi de Hooke s'écrit ainsi :

$$T_\alpha = C_{\alpha\beta} S_\beta \quad \alpha, \beta = 1, 6$$

Par la suite, afin de simplifier les écritures nous utiliserons la convention de notation d'Einstein c'est-à-dire, que toute écriture ou indice, qui apparaît deux fois, suppose la sommation sur cet indice : Par exemple

$$A_{ij} B_{jk} = A_{i1} B_{1k} + A_{i2} B_{2k} + A_{i3} B_{3k} \quad (j = 1, 2, 3)$$

I.2-2 Equations de propagation dans un solide illimité

Dans la pratique, nous considérons qu'un solide est illimité si les ondes ultrasonores n'atteignent pas les frontières du milieu dans lequel elles se propagent. Lorsqu'un milieu est traversé par une onde, il est localement en mouvement ; le déplacement de chaque point matériel varie au cours du temps :

$$u_i = u(x_k, t) \quad (I-3)$$

L'équation du mouvement résulte de la loi fondamentale de la dynamique. Sachant que la densité de force par unité de volume du corps sous contraintes internes T_{ij} est :

$$f_i = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (I-4)$$

D'après la loi de Newton, en négligeant l'action de la pesanteur (forces extérieures nulles) ; on peut écrire :

$$\boxed{\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}} \quad \rho \text{ Étant la masse volumique} \quad (I-5)$$

En explicitant les contraintes en fonction des constantes élastiques et des déplacements relatifs, on obtient l'équation de propagation de l'onde (I-7):

$$\boxed{T_{ij} = C_{ijkl} \frac{\partial u_l}{\partial x_k}} \quad (I-6) \quad \boxed{\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k}} \quad (I-7)$$

Ce système de trois équations aux dérivées partielles ($i = 1, 2, 3$) joint aux conditions initiales et aux conditions aux limites (si le milieu est limité) permet, de calculer en tout point d'un milieu le déplacement $u_i = u(x_k, t)$.

On cherche des solutions sous forme d'ondes planes progressives se propageant dans la direction définie par le vecteur unitaire $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$ perpendiculaire aux plans d'onde d'équation $\vec{n} \cdot \vec{x} = \text{constante}$

$$u_i = U_i F\left(t - \frac{n_j x_j}{V}\right) \quad (I-8)$$

Pour déterminer la vitesse de phase V et la polarisation U_i (direction de déplacement des particules) de l'onde, on reporte l'expression (I-8) dans (I-7) et on obtient :

$$\rho U_i F'' = C_{ijkl} n_j n_k U_i \frac{F''}{V^2}$$

$$\rho V^2 U_i = C_{ijkl} n_j n_k U_i \quad (I-9)$$

En introduisant le tenseur du second ordre dit tenseur de Christoffel :

$$\Gamma_{il} = C_{ijkl} n_j n_k \quad (I-10)$$

On obtient l'équation de Christoffel

$$\Gamma_{ii} U_i = \rho V^2 U_i \quad (\text{I-11})$$

La polarisation U_i est un vecteur propre du tenseur Γ_{ii} , avec comme valeur propre $\gamma = \rho V^2$. Le tenseur Γ_{ii} étant symétrique, ses valeurs propres sont donc réelles et ses vecteurs propres orthogonaux. De plus, les valeurs propres $\gamma = \rho V^2$ sont positives (conditions nécessaire pour que la vitesse de propagation V soit réelle).

Les vitesses et les polarisations des ondes planes se propageant suivant une direction \vec{n} dans un cristal de constantes élastiques C_{ijkl} s'obtiennent en cherchant les valeurs propres et les vecteurs propres du tenseur de Christoffel. En milieu infini et isotrope pour une direction donnée, il peut y avoir trois vitesses de propagations.

- Une onde longitudinale de compression de vitesse de propagation

$$V_L = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

λ et μ sont les coefficients de Lamé qui sont directement liés aux constantes élastiques du milieu.

Cette onde est caractérisée par un déplacement des particules parallèle à la direction de propagation. Le passage d'une onde longitudinale plane entraîne une variation de la distance entre les plans parallèles contenant les particules, si bien que le volume occupé par un nombre donné de particules varie.

- Deux ondes transversales ou de cisaillement de vitesse de propagation $V_T = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$

Caractérisées par un déplacement des particules s'effectuant perpendiculairement au vecteur d'onde. Le glissement des plans parallèles ne donne lieu à aucune variation de volume.

A chaque vitesse correspond un vecteur propre définissant la direction du déplacement de matière.

Lorsqu'une onde se propage dans une plaque, le milieu n'est plus considéré comme infini, mais comme limité. Si la longueur d'onde est de l'ordre ou inférieure à l'épaisseur de la plaque, des modes particuliers peuvent se propager sur cette plaque : les modes de Lamb.

I.3 Ondes de Lamb dans une plaque isotrope

I.3-1 Equations de propagation dans le cas d'un solide isotrope

Pour un milieu isotrope, il ne reste que deux coefficients élastiques indépendants : les coefficients de Lamé λ et μ qui sont directement liés aux constantes élastiques du milieu comme suit :

$$\begin{aligned} \lambda &= C_{12} \\ \mu &= C_{44} \end{aligned} \quad \text{et} \quad \lambda + 2\mu = C_{11}$$

De façon générale,

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (\text{I-12})$$

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} = \mu \quad C_{11} = C_{22} = C_{33} = \lambda + 2\mu \quad C_{12} = C_{13} = C_{23} = \lambda$$

Pour déterminer les modes propres de Lamb, on utilise la méthode des potentiels ou décomposition d'Helmholtz : le déplacement de matière dérive d'un potentiel scalaire ϕ et d'un potentiel vecteur $\vec{\psi}$ [3].

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \phi + \vec{\nabla} \wedge \vec{\psi} \quad (\text{I-13})$$

ϕ traduit la déformation liée à la dilatation et $\vec{\psi}$ traduit la déformation liée au cisaillement

On obtient alors deux équations de propagation découplées:

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{V_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad \text{et} \quad \nabla^2 \vec{\psi} - \frac{1}{V_T^2} \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{I-14})$$

$$\text{Avec } V_L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad \text{et } V_T = \sqrt{\frac{C_{66}}{\rho}}$$

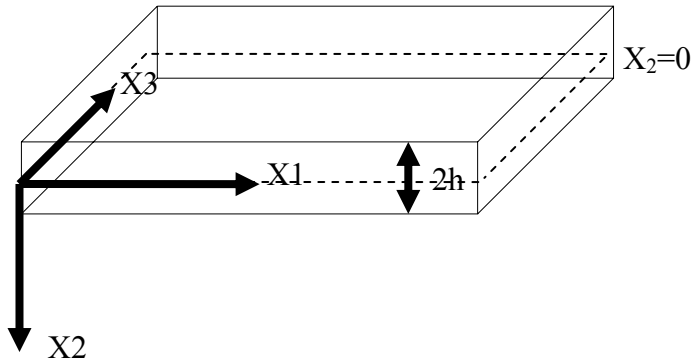


Figure I.3-1: Axes utilisés

La plaque étudiée est infiniment étendue dans la direction 1 et 3 et d'épaisseur finie $2h$ dans la direction 2.

On néglige la diffraction suivant X_3 $\left(\frac{\partial}{\partial x_3} = 0\right)$. Les composantes de l'onde de Lamb

se propageant suivant la direction X_1 en régime sinusoïdal, nous avons $\left(\frac{\partial}{\partial x_1} = -ik\right)$ et

$\left(\frac{\partial}{\partial t} = j\omega\right)$: En supposant que $\vec{\psi}(0,0,\psi_3 = \psi)$,

Les équations de propagation deviennent alors:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} + p^2 \phi = 0 \quad (\text{I-15})$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} + q^2 \psi = 0 \quad (\text{I-16})$$

$$\text{Avec } p^2 = \frac{\omega^2}{V_L^2} - k^2$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{V_T^2} - k^2$$

p est le nombre d'onde associé à la vitesse des ondes longitudinales (V_L) et q est le nombre d'onde associé à la vitesse des ondes transversales (V_T), k correspond au nombre d'onde.

La plaque étant placée dans un milieu (ici l'air), nous devons tenir compte des conditions aux frontières pour résoudre les équations de propagation.

1.3-2 Conditions aux limites sur les deux faces :

L'air exerce une très faible action sur les surfaces de la plaque ; celles-ci peuvent être considérées du point de vue acoustique comme libre de contraintes à leurs surfaces. Les conditions aux limites sur les deux faces sont donc :

$$T_{22} = T_2 = 0 \quad \text{Et} \quad T_{12} = T_6 = 0 \quad \text{pour } (X_2 = \pm h)$$

La composante T_{23} étant toujours nulle pour toutes les valeurs de X_2 .

Les contraintes et les déplacements de matière sont liés par la formule suivante :

$$T_{ij} = \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{I-17})$$

Les composantes T_{22} et T_{12} sont données par :

$$T_{22} = T_2 = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \lambda \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$$

$$T_{12} = T_6 = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)$$

La contrainte normale s'écrit alors :

$$T_2 = C_{66} \left[(k^2 - q^2)\phi + 2ik \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \right] \quad (\text{I-18})$$

La contrainte tangentielle s'exprime par :

$$T_6 = C_{66} \left[(k^2 - q^2)\psi - 2ik \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right] \quad (\text{I-19})$$

Les potentiels ϕ et ψ sont de parité différentes soit :

$$\phi = B \cos(px_2 + \alpha) \quad \text{et} \quad \psi = A \sin(qx_2 + \alpha) \quad (\text{I-20})$$

Les composantes du déplacement mécanique sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \\ u_2 = \frac{\partial \phi}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \\ u_3 = 0 \end{array} \right\} \text{ Soit :}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = -ikB \cos(px_2 + \alpha) + qA \cos(qx_2 + \alpha) \\ u_2 = -pB \sin(px_2 + \alpha) + ikA \sin(qx_2 + \alpha) \end{array} \right\} \quad (\text{I-21})$$

Dans ces expressions apparaît le coefficient α , qui permet de distinguer les deux familles des ondes de Lamb qui satisfont, indépendamment, les équations de propagation et les conditions aux limites [3]. Ces deux ondes peuvent donc exister indépendamment.

- Les modes symétriques correspondent à la valeur de $\alpha = 0$. Cette onde est caractérisée par un mouvement symétrique par rapport au plan médian $X_2=0$. La composante longitudinale est une fonction paire de X_2 et la composante transversale une fonction impaire de X_2 .
- Les modes antisymétriques correspondent à la valeur de $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Cette onde correspond à un mouvement asymétrique par rapport au plan médian. La composante longitudinale est une fonction impaire de X_2 et la composante transversale une fonction paire de X_2 .

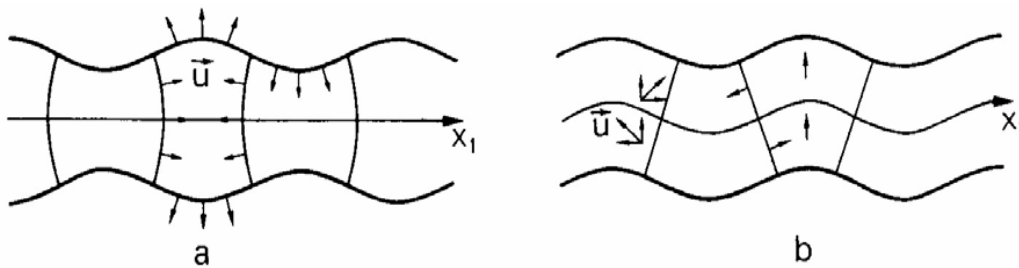


Figure I.3-2: Ondes de Lamb a) Mode symétrique b) Mode antisymétrique

I.3-3 Equations de dispersion des ondes de Lamb

Les contraintes étant nulles sur les surfaces, on obtient pour chaque valeur de α , un système de deux équations [3] :

$$\begin{aligned} (k^2 - q^2)B \cos(ph + \alpha) + 2ikqA \cos(qh + \alpha) &= 0 \\ 2ikpB \sin(ph + \alpha) + (k^2 - q^2)A \sin(qh + \alpha) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{I-22})$$

Pour que chacun de ces systèmes ait des solutions non triviales, il faut que chaque déterminant soit nul. Les systèmes se réduisent chacun à une seule équation. Ces équations permettent d'écrire l'équation de dispersion pour les modes symétriques et pour les modes antisymétriques suivant la valeur de α . Pour une plaque d'épaisseur $2h$ on obtient l'équation de dispersion de Rayleigh Lamb :

$$(k^2 - q^2)^2 \cos(ph + \alpha) \sin(qh + \alpha) + 4k^2 pq \sin(ph + \alpha) \cos(qh + \alpha) = 0$$

Ou :

$$\boxed{\frac{\tan(qh + \alpha)}{\tan(ph + \alpha)} + \frac{4k^2 qp}{(k^2 - q^2)^2} = 0} \quad (\text{I-23})$$

Avec $\alpha = 0$ (Modes symétriques) ou $\alpha = \pi/2$ (Modes antisymétriques)

La résolution de ces équations de dispersion permet d'obtenir les nombres d'onde k en fonction du produit fréquence x épaisseur, des modes de Lamb pouvant exister dans la plaque. En effet, les racines des équations (I-23) (le nombre d'onde k) sont directement reliées aux vitesses de phase et aux vitesses de groupe des modes de Lamb. L'équation (I-23) admet trois types de solutions [2] [3] :

- Solutions réelles qui correspondent à des modes propagateurs. Il existe un nombre fini d'ondes de Lamb qui correspondent aux différentes solutions réelles des équations de dispersion. A chaque solution correspond un mode de Lamb différent. Chaque mode est caractérisé par sa vitesse de phase à un produit fréquence x épaisseur donné et à un mouvement déterminé du matériau.
- Solutions complexes qui correspondent à des modes atténués. Ces ondes possèdent un nombre d'onde k complexe, solution des équations de dispersion. Elles ne propagent pas d'énergie et génèrent, un champ acoustique localisé dans une zone proche de leur lieu d'excitation. Cette région est d'autant plus grande que la partie imaginaire de leur nombre d'onde est faible. En effet celle-ci caractérise l'atténuation de l'onde le long de la plaque.
- Solutions imaginaires qui correspondent à des modes non propagateurs. Ces ondes possèdent un nombre d'onde k imaginaire pur, solution des équations de dispersion. De ce fait, elles restent confinées dans leur zone d'excitation et produisent des déplacements et des contraintes qui s'atténuent.

Les valeurs des modes propres des ondes de Lamb (k), ne peuvent être calculées que numériquement. Les logiciels tels que MATLAB, nous permettent de tracer les courbes de dispersion des différents modes, pour un matériau donné. Il est important de connaître les courbes de dispersion avant toute utilisation expérimentale des ondes de Lamb.

I.4 Courbes de dispersion

Il est possible de tracer les courbes de dispersion, correspondant à l'évolution d'une caractéristique de l'onde (nombre d'onde, vitesse de phase, vitesse de groupe, etc.) en fonction du produit fréquence x épaisseur.

I.4-1 Nombre d'onde

La résolution des équations (I-23) de dispersion permet d'obtenir les nombres d'onde k fonction du produit fréquence \times épaisseur, des modes de Lamb pouvant exister dans la plaque.

Les courbes suivantes donnent en fonction du produit fréquence \times épaisseur les nombres d'onde k des modes propagateurs dans une plaque d'aluminium [2]. Chaque courbe représente l'évolution, en fonction du produit fréquence \times épaisseur, du nombre d'onde d'un mode de Lamb particulier. Il est important de noter que certains modes n'apparaissent qu'à partir d'un certain produit fréquence \times épaisseur appelé produit fréquence \times épaisseur de coupure (f_c). En dessous de ce produit, ces ondes n'existent plus en tant que mode propagateur.

Nombre d'onde réel m^{-1}

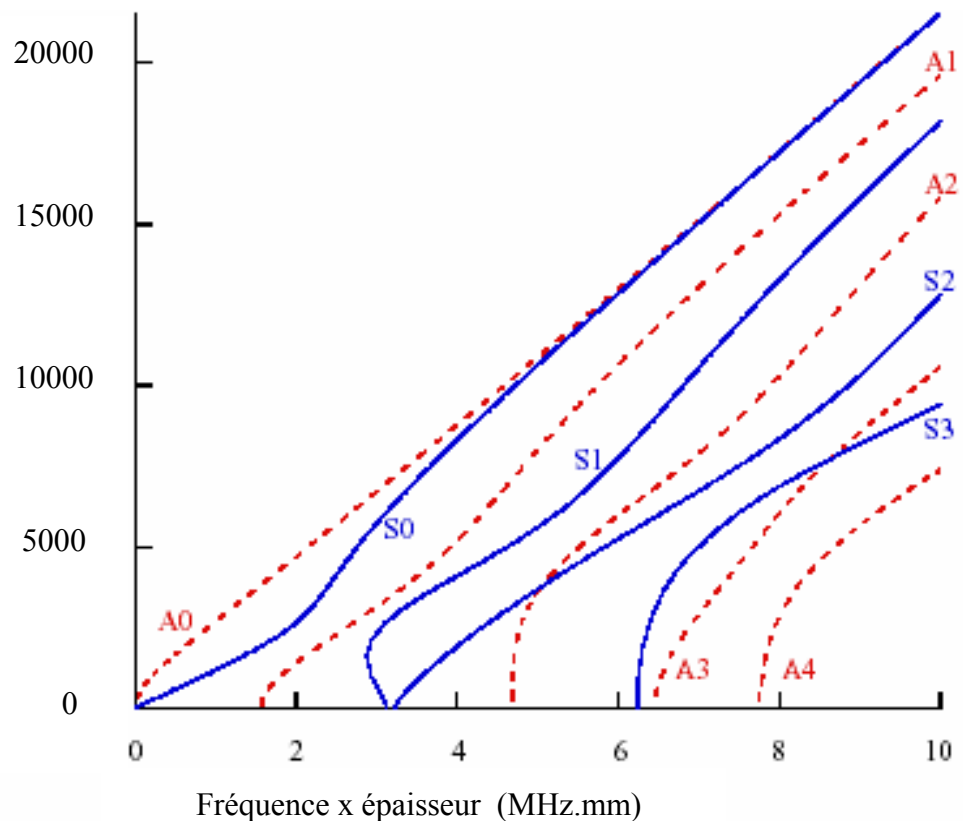


Figure I.4-1: Nombre d'onde réel des modes de Lamb propagateurs dans une plaque d'aluminium ; modes symétriques (—) et modes antisymétriques (· · ·) [2]

Le tableau ci-dessous présente les valeurs des premiers produits fréquence \times épaisseur ($f \times 2h$) de coupure pour une plaque d'aluminium : $V_L = 6464 \text{ m/s}$ et $V_T = 3105 \text{ m/s}$ [2]

Mode symétrique	Produit ($f \times 2h$) de coupure (MHz.mm)	Mode antisymétrique	Produit ($f \times 2h$) de coupure (MHz.mm)
S_1	3.10	A_1	1.55
S_2	3.23	A_2	4.66
S_3	6.21	A_3	6.46

Tableau I.4-1 : Produits fréquence \times épaisseur de coupure de divers modes de Lamb

I.4-2 Vitesse de phase

La vitesse de phase correspond à la vitesse de propagation des fronts d'onde de fréquence donnée, à l'intérieur d'un paquet d'onde. La vitesse de phase est donnée par :

$$V = \frac{\omega}{k} \quad (\text{I-24})$$

Lorsque la vitesse de phase est constante sur un intervalle de produit fréquence \times épaisseur, on dit que le mode est non dispersif dans cet intervalle. Si un mode est non dispersif, le paquet d'onde ne se déforme pas lors de sa propagation le long de la plaque. Un paquet d'onde dans sa partie dispersive, est constitué de plusieurs ondes avec des vitesses différentes. En effet, les ondes dont la vitesse est plus faible sont dépassées par celles dont la vitesse est plus élevée d'où une déformation du paquet d'onde lors de sa propagation le long de la structure. On peut remarquer que les modes sont très dispersifs au voisinage de leur produit fréquence \times épaisseur de coupure (f_c).

A la limite asymptotique des grands produits fréquence \times épaisseur les vitesses des modes de Lamb convergent vers la vitesse des ondes de Rayleigh C_R qui est légèrement inférieur à la vitesse transversale V_T [1]

Vitesse de phase (m.s⁻¹)

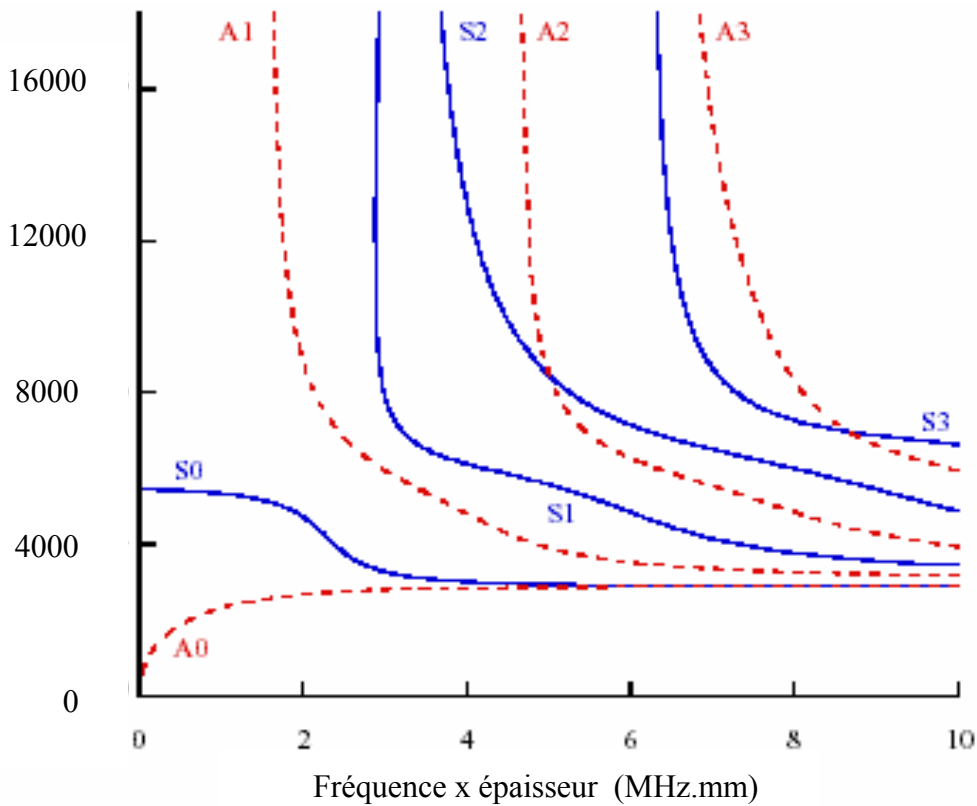


Figure I.4-2 : Vitesse de phase des modes de Lamb propagateurs dans une plaque d'aluminium ; Modes symétriques (—) et Modes antisymétriques (- - -)[2]

I.4-3 Vitesse de groupe

La vitesse de groupe est la vitesse à laquelle se propage, le long de la plaque, un paquet d'onde à une fréquence donnée. Elle correspond aussi à la vitesse de propagation de l'énergie transportée par l'onde le long de la plaque. Elle est donnée par la relation :

$$\boxed{V_G = \frac{\partial \omega}{\partial k}} \quad (\text{I-25})$$

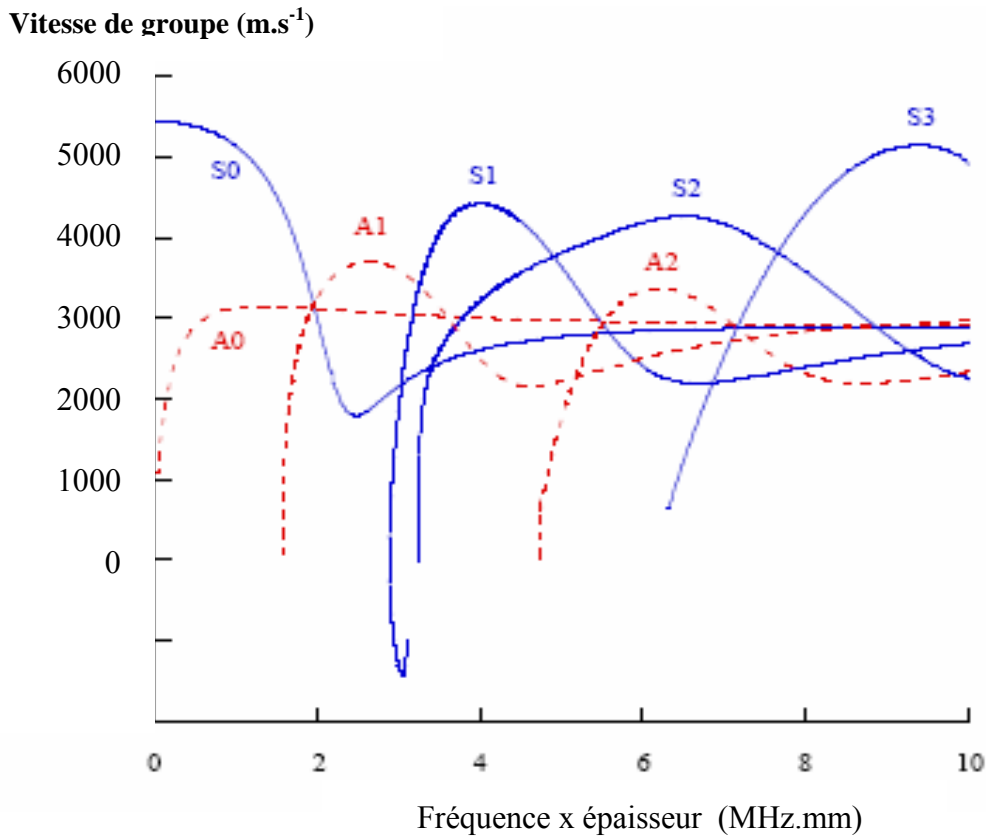


Figure I.4-3: Vitesse de groupe des ondes de Lamb dans une plaque d'aluminium
modes (—) symétriques et modes antisymétriques (- - -)

La vitesse de propagation d'un paquet d'onde est calculée à partir du temps de vol, lu sur un oscilloscope, c'est la vitesse de groupe de l'onde de Lamb. La valeur de cette vitesse à un produit fréquence x épaisseur donné, permet d'identifier ce mode.

I.5 Numérotation des modes :

Les modes de Lamb sont caractérisés par la lettre S pour les modes symétriques et par la lettre A pour les modes antisymétriques, suivi d'un indice [1]. L'indice pair ou impair correspond au nombre de nœuds de déplacement présents dans l'épaisseur de la plaque à la fréquence de coupure du mode. Le déplacement de matière à l'intérieur de la plaque au produit fréquence x épaisseur de coupure du mode est illustré sur la figure suivante.

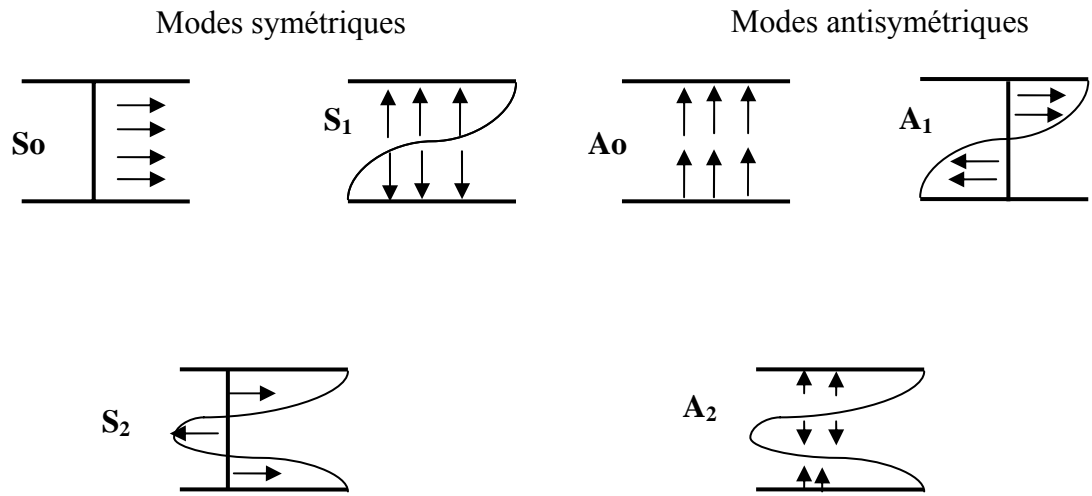


Figure I.5-1: Déplacement mécanique des modes symétriques et antisymétriques au voisinage de leur fréquence de coupure (sauf A_0 et S_0) (incidence quasi normale)

On constate que seuls les modes A_0 et S_0 ne possèdent pas de nœuds de vibration sur toute l'épaisseur de la plaque. Le déplacement mécanique de matière à l'intérieur de la plaque d'un mode donné dépend du produit fréquence x épaisseur utilisé, ceci sera explicité dans le chapitre II.

Modes d'ordre zéro

Les modes d'ordre zéro symétrique (S_0) et antisymétrique (A_0) sont les seuls modes propagateurs, solutions des équations de dispersion (I-23) pour les produits fréquence x épaisseur ($f \times 2h$) tendant vers zéro. Ces modes n'ont pas de fréquence de coupure, si bien qu'ils existent quelle que soit la fréquence choisie.

Si on effectue un développement limité au premier ordre de l'équation de dispersion (I-23) pour $\alpha = 0$ (mode S_0), on obtient [I-26] :

$$k_s^2 = \frac{1}{4} \frac{k_T^4}{k_T^2 - k_L^2} \quad (I-26) \quad \text{Avec } K_T = \frac{\omega}{V_T} \text{ et } K_L = \frac{\omega}{V_L}$$

La vitesse de phase du mode S_0 est constante pour les produits fréquence x épaisseur ($f \times 2h$) au voisinage de 0 et prend la valeur V_{PL} dite « vitesse de plaque » :

$$V_{PL} = 2V_T \sqrt{1 - \frac{V_T^2}{V_L^2}} \quad (\text{I-27})$$

Pour une plaque d'Aluminium (Duralumin), $V_L = 6464 \text{ m/s}$ et $V_T = 3105 \text{ m/s}$

On obtient :

$V_{PL} = 5440 \text{ m/s}$

Pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$ le développement de l'équation de dispersion donne :

$$k_a^4 = \frac{3}{(2h)^2} \frac{k_T^4}{(k_T^2 - k_L^2)} \quad (\text{I-28})$$

Le mode A_0 est dispersif dans le domaine des faibles produits fréquence x épaisseur. Sa vitesse de phase dans ce domaine est proportionnelle à la racine carrée du produit $(f \times 2h)$

$$V_a(f \times 2h) = \sqrt{\frac{\pi}{3}} V_{PL} (f \times 2h)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I-29})$$

1.5-2 Modes d'ordre supérieur

Les vitesses de phase des modes d'ordre supérieur ou égal à 1 décroissent très rapidement à partir des fréquences de coupure où les vitesses sont supposées infinies. Lorsque le produit fréquence x épaisseur augmente les vitesses des modes symétriques et antisymétriques tendent vers la vitesse des ondes de Rayleigh, ces ondes sont très sensibles aux variations du milieu extérieur.

Les modes d'ordre supérieurs ne sont propagateurs qu'à partir d'un certain produit de coupure f_c [1] [2] [3]. Lorsque le produit fréquence x épaisseur d'un mode de Lamb atteint la valeur critique f_c , il y a établissement d'une onde stationnaire ($k_c = 0$) purement longitudinale ou purement transversale. En dessous de f_c , le nombre d'onde devient imaginaire et l'on est alors en présence d'un mode évanescent qui ne se propage pas.

Pour les modes symétriques, on détermine les fréquences de coupure suivantes [1]

$$S_{2n} \quad 2f_c h = nV_T \quad \text{Pour } n = 1, 2, 3 \dots$$

$$S_{2n+1} \quad 2f_c h = \frac{2n+1}{2}V_L \quad \text{Pour } n = 0, 1, 2, \dots$$

Pour les modes antisymétriques, les fréquences de coupure sont données par [1]:

$$A_{2n} \quad 2f_c h = nV_L \quad \text{Pour } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$A_{2n+1} \quad 2f_c h = \frac{2n+1}{2}V_T \quad \text{Pour } n = 0, 1, 2, \dots$$

Pour déterminer le nombre de modes pouvant se propager dans la plaque à un produit fréquence x épaisseur donné il faut déterminer les différents produits fréquence x épaisseur de coupure des différents modes.

Conclusion

La résolution des équations de dispersion de Rayleigh Lamb, nous a permis d'obtenir les courbes de dispersion des différents modes de Lamb pour un matériau choisi, l'Aluminium. Ces courbes sont indispensables pour identifier un mode, mais aussi pour déterminer les conditions expérimentales de son excitation.

A un produit fréquence x épaisseur donné, il peut se propager dans la plaque plusieurs modes de Lamb avec des vitesses différentes et plus ou moins sensibles à la présence de discontinuités dans la plaque, mais aussi au milieu qui entoure celle-ci. Pour inspecter une structure, il est important de choisir un seul mode de Lamb incident afin de faciliter l'interprétation des signaux réfléchis par la présence, éventuelle, de défauts. Le choix du mode de Lamb incident et sa méthode de génération font l'objet du chapitre suivant.

II.1 Introduction

Il existe, au minimum, deux modes de Lamb (A_0 et S_0) pouvant se propager dans une plaque à une fréquence donnée. Or, chaque mode se propageant dans le guide, est réfléchi dès qu'il rencontre un défaut. D'où la complexité des signaux obtenus en particulier, lorsque la structure contient plusieurs discontinuités, ou lorsque un seul défaut réfléchit plusieurs échos par conversion, du mode incident en différents modes pouvant se propager dans la plaque. Il est donc important de limiter le nombre de modes propagateurs dans la plaque et de choisir un mode de Lamb incident unique.

Le mode choisi doit être sensible à la présence de défauts dans ou sur la plaque, sans être trop sensible aux perturbations du milieu extérieur. Pour appréhender cela, nous avons tracé le déplacement mécanique des modes de Lamb pour différents produits fréquence \times épaisseur.

Le mode incident étant choisi, il faut déterminer les conditions expérimentales pour le générer. Il existe pour cela plusieurs méthodes, pour exciter un seul mode de Lamb (par contact, par immersion, par codage, etc.) [2] [4]. Toutes ces techniques de génération, ne sont possibles que sous certaines conditions expérimentales que nous présenterons.

II.2 Origine des défauts

En 1930 la construction métallique a pris le pas dans le monde industriel et en particulier en aéronautique, sur la construction en bois grâce à l'arrivée de nouveaux matériaux plus légers comme l'aluminium et son alliage l'aluminium lithium. Cependant, le métal est sensible à la corrosion et à la fatigue, il réclame une protection soignée et un contrôle régulier afin de dépister toutes inhomogénéités.

La fatigue, en fait l'usure d'un métal est un phénomène naturel qui se produit lorsque celui-ci est soumis à des contraintes extérieures. La fatigue des ailes d'avion est principalement due aux contraintes qui s'exercent sur l'avion lors du décollage ou de l'atterrissage. De même, en mer, les vagues peuvent user les coques des bateaux ou des installations pétrolières.

Ce phénomène d'usure, peut être aggravé par la corrosion. Un des plus grands problèmes des réservoirs en acier ou en alliage d'aluminium est leur vulnérabilité à la corrosion. Dans un milieu environnant corrosif (par exemple un sol acide), des trous d'épingles peuvent se former en moins d'une année et laisser le produit s'écouler lentement. Les structures métalliques immergées ou enterrées sont plus susceptibles que les autres de se corroder. Cependant, tous les réservoirs de stockage métalliques doivent être protégés contre la corrosion par un revêtement. L'étude de l'utilisation des ondes de Lamb pour inspecter des structures recouvertes est donc primordiale. Cette méthode de contrôle doit être utilisée pour inspecter à la fois, les parois interne et externe du réservoir.

Un matériau résistant très bien à l'usure et très bien à la corrosion dans un milieu donné peut se rompre de manière catastrophique sous l'effet de la combinaison des deux phénomènes à la fois. Dès qu'une fissure s'amorce lorsque la contrainte se répète, la fissure s'agrandit et cela peut mener rapidement à la rupture. Globalement, le temps de germination de la fissure peut représenter jusqu'à 90 % de la durée de vie de la pièce, la propagation de la fissure ne représente alors que 10 %. Il est important de comprendre que durant 90 % de la durée du phénomène, on ne voit strictement rien, il se produit juste une modification de la structure interne du métal, il est donc important de contrôler les pièces métalliques régulièrement afin de dépister la présence d'une fissure avant la rupture. Pour contrôler des plaques de faibles épaisseurs en utilisant les ondes guidées de Lamb, il est indispensable de choisir un mode de Lamb incident unique approprié à la recherche de défauts dans la structure.

II.3 Choix du mode

II.3-1 Modes non dispersifs

Lorsqu'un mode de Lamb dispersif se propage le long d'une plaque, le paquet d'onde se déforme lors de sa propagation le long de la structure. Cette déformation peut gêner l'interprétation des signaux temporels reçus sur un oscilloscope lors d'une inspection. En effet, le paquet d'onde a tendance à s'étaler et peut donc cacher la présence d'échos réfléchis par un autre défaut. En particulier pour l'inspection de grandes distances, il est préférable d'utiliser un mode de Lamb non dispersif.

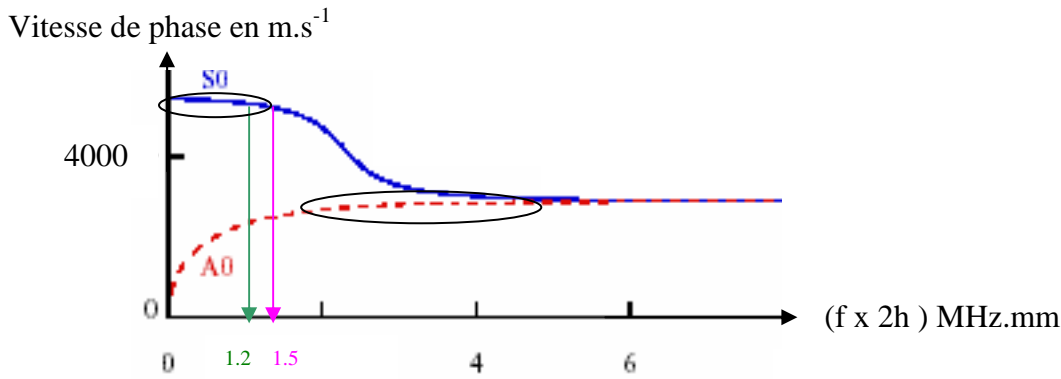
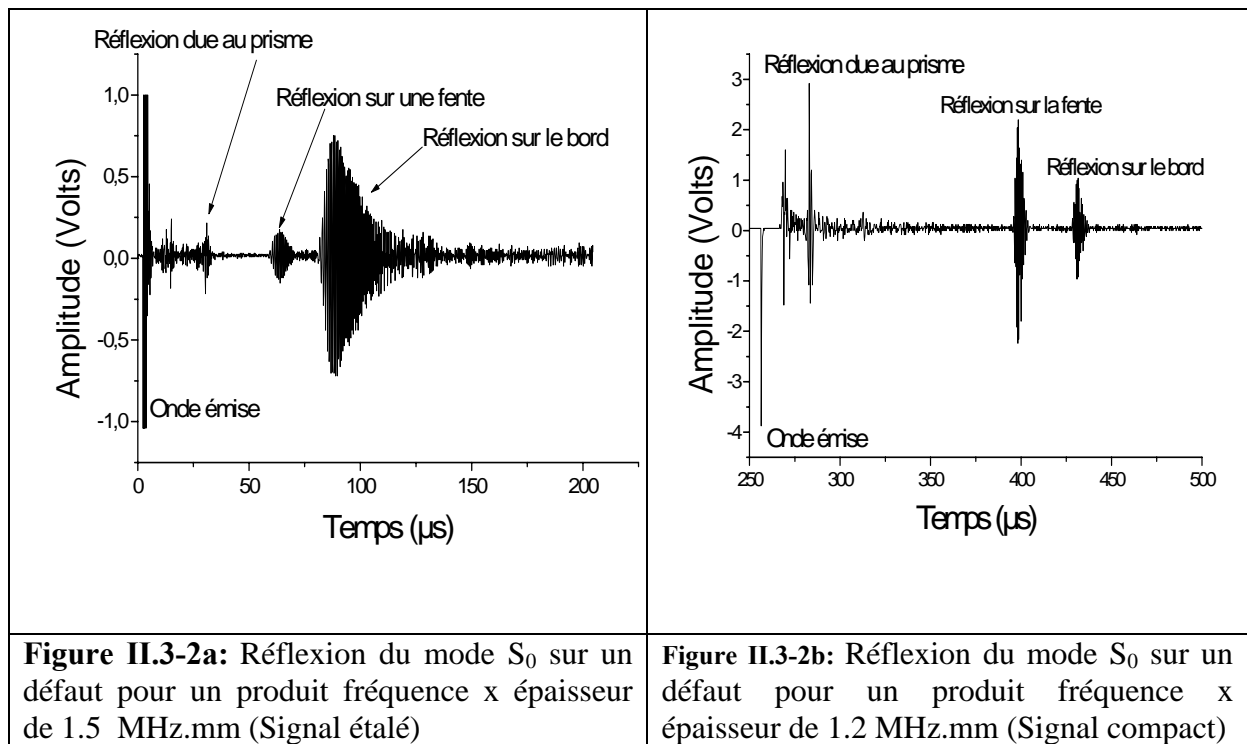


Figure II.3-1: Courbes de dispersion des vitesses de phase pour les modes de Lamb fondamentaux dans l'aluminium domaines non dispersifs du mode



On constate qu'un mode peut être dispersif pour un produit fréquence x épaisseur donné et non dispersif pour un autre. Il faut donc choisir l'intervalle de fréquence approprié, pour une plaque donnée, pour générer le mode choisi. Les modes de Lamb d'ordre supérieur (A_1, S_1, A_2, S_2 , etc.) ne deviennent propagateurs qu'à partir d'un produit fréquence x épaisseur de coupure. Les modes d'ordre supérieur ne peuvent être retenus car ils sont très dispersifs au voisinage de leur fréquence de coupure et aux fréquences élevées ils tendent vers les ondes de Rayleigh qui sont très sensibles à l'environnement et aux perturbations extérieures.

- Les modes de Lamb fondamentaux peuvent se propager dans une plaque quelle que soit la fréquence choisie. Ces deux modes présentent un palier non dispersif pour une bande de produit fréquence x épaisseur précise. Cette propriété est très intéressante pour le contrôle non destructif, car le paquet d'onde ne se déforme pas lors de sa propagation le long de la structure.

Pour le contrôle de plaques, avec ou sans protection, il est intéressant d'utiliser les modes fondamentaux de Lamb A_0 ou S_0 , car tous deux présentent un palier non dispersif.

Pour choisir parmi ces deux modes, nous nous sommes intéressés au déplacement mécanique de la plaque lorsque le mode A_0 ou le mode S_0 se propage dans celle-ci. En effet cette grandeur nous permet de déterminer la sensibilité du mode à la présence d'un défaut dans la plaque mais aussi à la sensibilité du mode aux variations qui entourent la plaque.

II.3-2 Déplacement de matière des modes fondamentaux de Lamb

La propagation d'un mode de Lamb, à un produit fréquence x épaisseur donné traduit un déplacement mécanique de matière et donc une sensibilité à un défaut.

Le déplacement mécanique est la somme vectorielle de la composante longitudinale (U_1) et de la composante transversale (U_2).

Les expressions des amplitudes des composantes du déplacement mécanique sont données par [3] [8] [28] :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = qA \left[\cos(qx_2 + \alpha) - \frac{2k^2}{k^2 - q^2} \times \frac{\cos(qh + \alpha)}{\cos(ph + \alpha)} \times \cos(px_2 + \alpha) \right] \\ U_2 = ikA \left[\sin(qx_2 + \alpha) + \frac{2pq}{k^2 - q^2} \times \frac{\cos(qh + \alpha)}{\cos(ph + \alpha)} \times \sin(px_2 + \alpha) \right] \\ U_3 = 0 \end{array} \right\} \quad (\text{II-1})$$

Avec $\alpha = 0$ pour les modes symétriques et $\alpha = \frac{\pi}{2}$ pour les modes antisymétriques. A est une constante déterminée par les conditions initiales (formules II-1).

II.3-2-a Mode S_0

Pour le mode S_0 , aux bas produits fréquence x épaisseur, la composante principale du déplacement mécanique est longitudinale (U_1). Lorsque le produit fréquence x épaisseur augmente, la composante transversale (U_2) du déplacement croit et le mode perd sa prédominance longitudinale. En utilisant le logiciel Matlab, nous avons tracé, pour différents produits ($f \times 2h$), l'allure des modules normalisés des composantes longitudinales et transversales du déplacement mécanique de la plaque et le module du déplacement pour une

plaque d'aluminium soit : $\frac{|U_1|_{S_0}}{A}$, $\frac{|U_2|_{S_0}}{A}$ et $\frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{A}|_{S_0}$

On remarque que les composantes du déplacement de matière varient lorsque le produit fréquence x épaisseur change. Cette propriété des ondes de Lamb, implique la possibilité de choisir « l'outil » adéquat (le produit fréquence x épaisseur) pour ausculter une plaque ayant des défauts particuliers (défauts de surface, défauts internes, variation du milieu extérieur etc.).

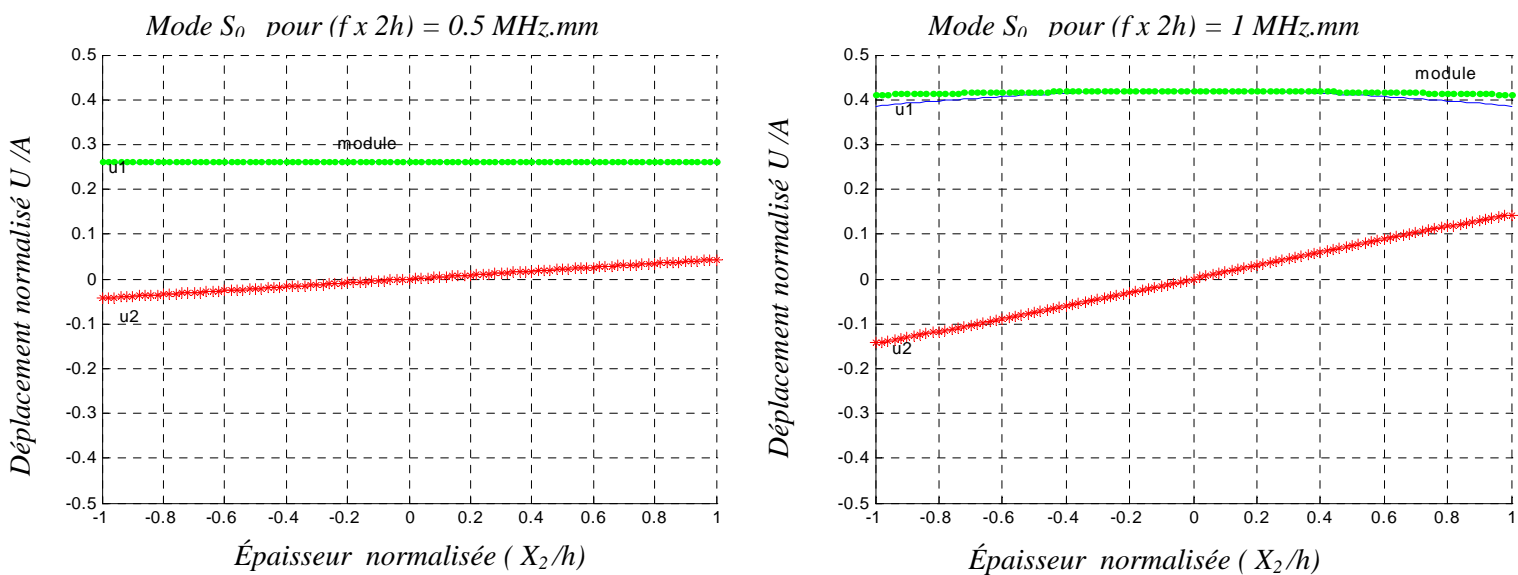
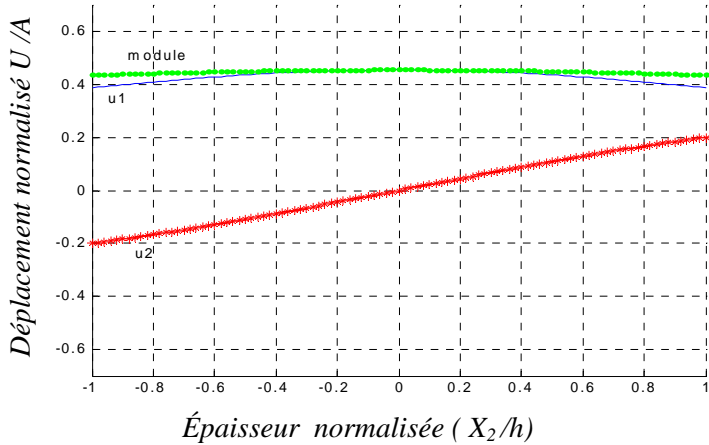
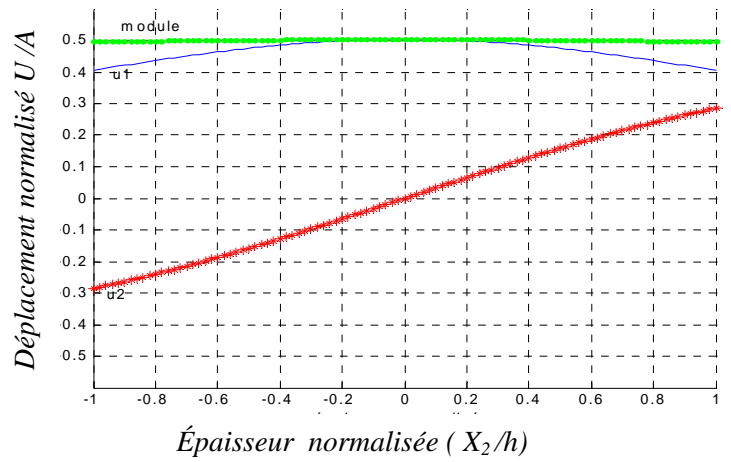


Figure II.3-3a: Déplacements mécaniques de la plaque, pour différents produits fréquence x épaisseur déplacement longitudinal U_1 (—) transversal U_2 (***) module (.....)(Mode S_0)

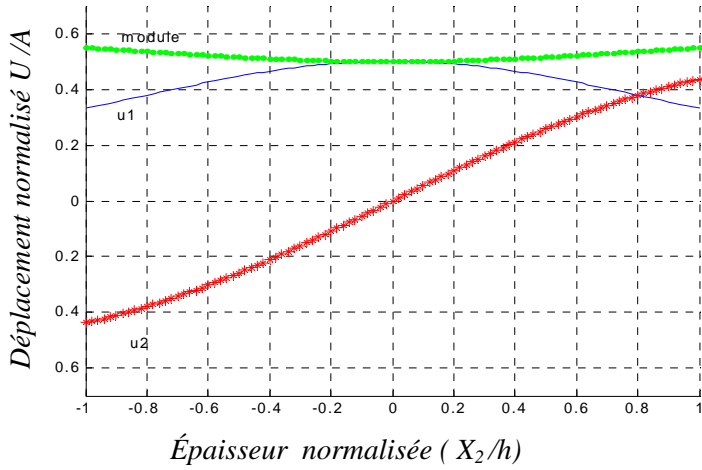
Mode S_0 pour $(f \times 2h) = 1.25 \text{ MHz.mm}$



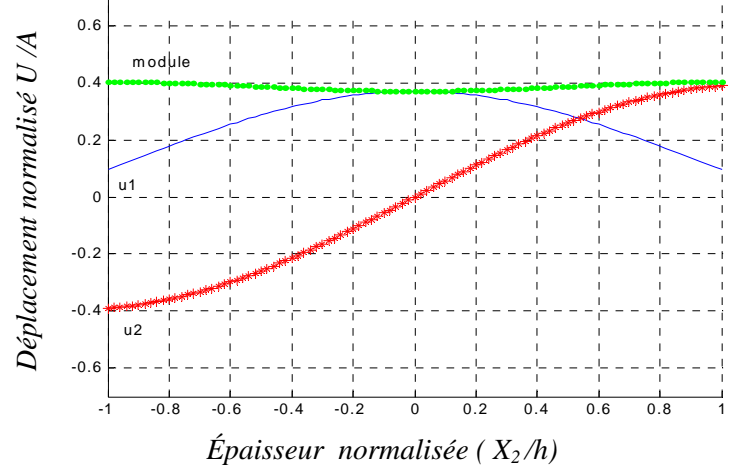
Mode S_0 pour $(f \times 2h) = 1.5 \text{ MHz.mm}$



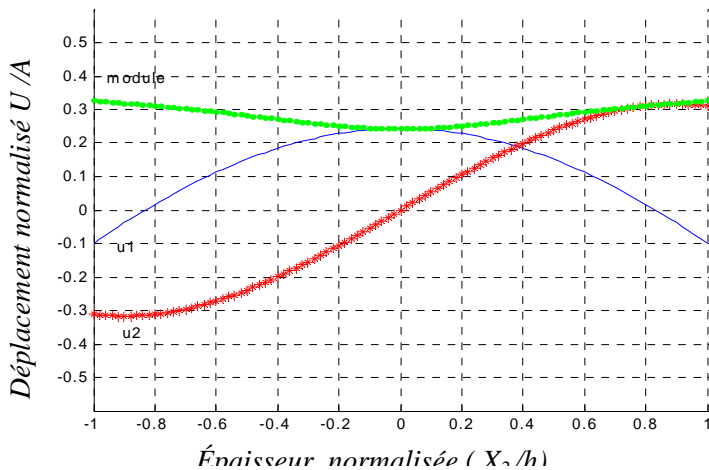
Mode S_0 pour $(f \times 2h) = 2 \text{ MHz.mm}$



Mode S_0 pour $(f \times 2h) = 2.25 \text{ MHz.mm}$



Mode S_0 pour $(f \times 2h) = 2.5 \text{ MHz.mm}$



Mode S_0 pour $(f \times 2h) = 3 \text{ MHz.mm}$

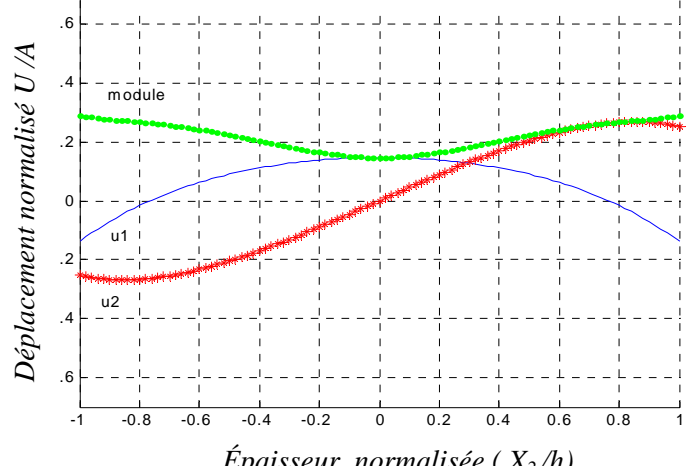


Figure II.3-3b: Déplacements mécaniques de la plaque, pour différents produits fréquence x épaisseur déplacement longitudinal U_1 (—) transversal U_2 (**) module (.....)(Mode S_0)

L'étude de ces composantes du déplacement, à la surface de la plaque, permet de connaître la sensibilité d'un mode de Lamb à toute modification de la surface ou du milieu qui entoure la plaque. Lorsque la composante transversale du déplacement de matière est importante par rapport à la composante longitudinale, le mode est sensible à toute modification du milieu extérieur.

Nous avons tracé les différentes composantes et le module du déplacement mécanique à la surface de la plaque, pour différents produits fréquence x épaisseur ($f \times 2h$)

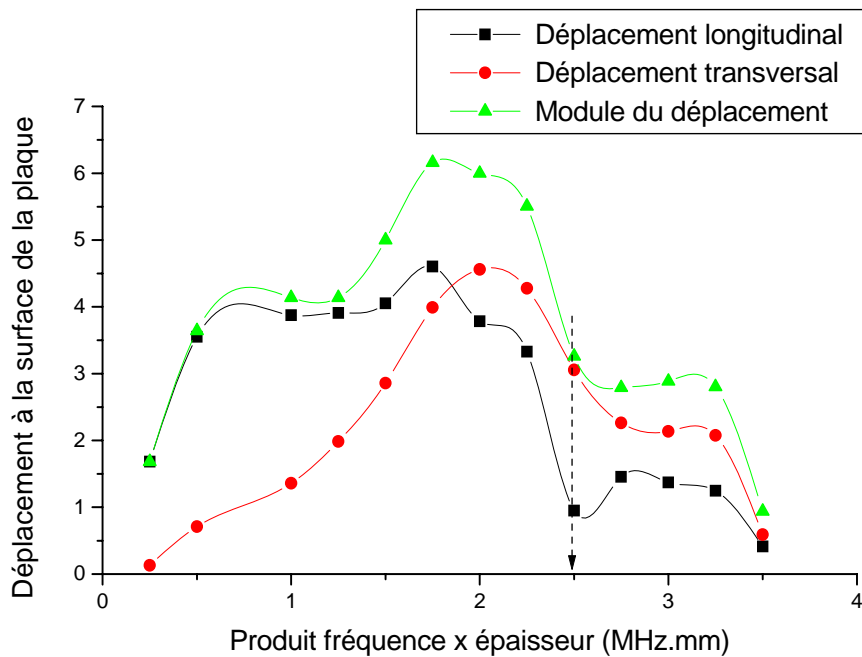


Figure II.3-4: Evolution des composantes et du module du déplacement du mode S_0 à la surface de la plaque.

A la surface de la plaque, pour les bas produits fréquence x épaisseur, le tracé confirme que le mode S_0 a une prédominance longitudinale. Au delà de 0.5 MHz .mm U_1 et le module ne sont plus confondus. En effet, la composante transversale du déplacement à la surface de la plaque augmente progressivement pour atteindre son maximum aux alentours de 2 MHz.mm. Pour connaître la sensibilité du mode S_0 au milieu qui l'entoure, nous avons tracé le rapport $\frac{U_2}{U_1}$ pour différents produits fréquence x épaisseur.

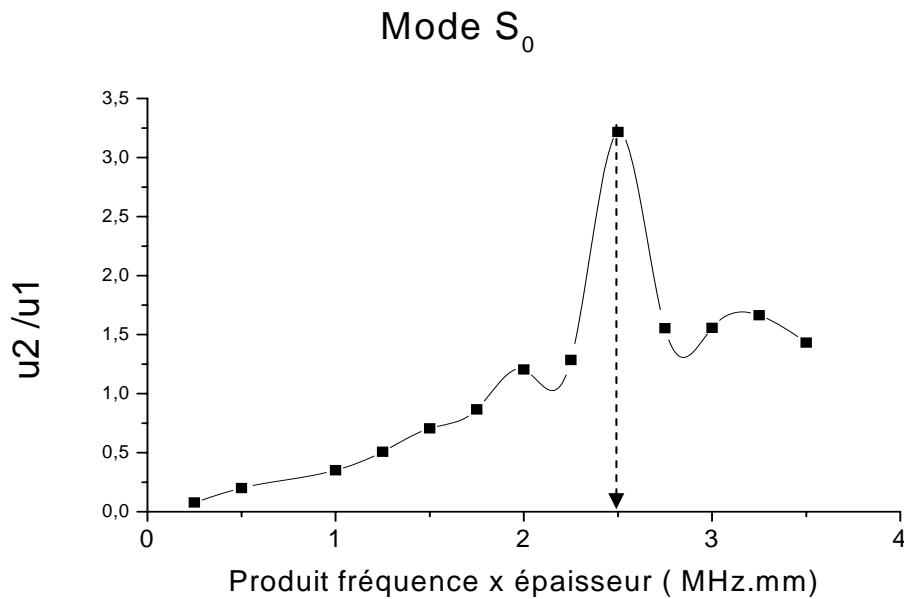


Figure II.3-5: Evolution du rapport des composantes du déplacement mécanique en fonction du produit fréquence x épaisseur pour le mode S_0

Le rapport $\frac{U_2}{U_1}$ présente un maximum [3] pour un produit fréquence x épaisseur égal à 2.5 MHz .mm. Pour ce produit fréquence x épaisseur la composante transversale du déplacement du mode S_0 est plus de trois fois supérieure à la composante longitudinale. Autour de cette valeur du produit fréquence x épaisseur, le mode S_0 est très sensible à toute variation du milieu extérieur (présence d'un liquide, d'une main, de peinture, etc. sur la plaque). Pour les bas produits fréquence x épaisseur (inférieur à 1.55 MHz .mm) le mode S_0 est peu sensible aux variations du milieu extérieur, il est donc adapté au contrôle d'intégrité d'une plaque.

Nous avons tracé ensuite, le module du déplacement de matière au centre de la plaque et en surface pour différents produits ($f \times 2h$).

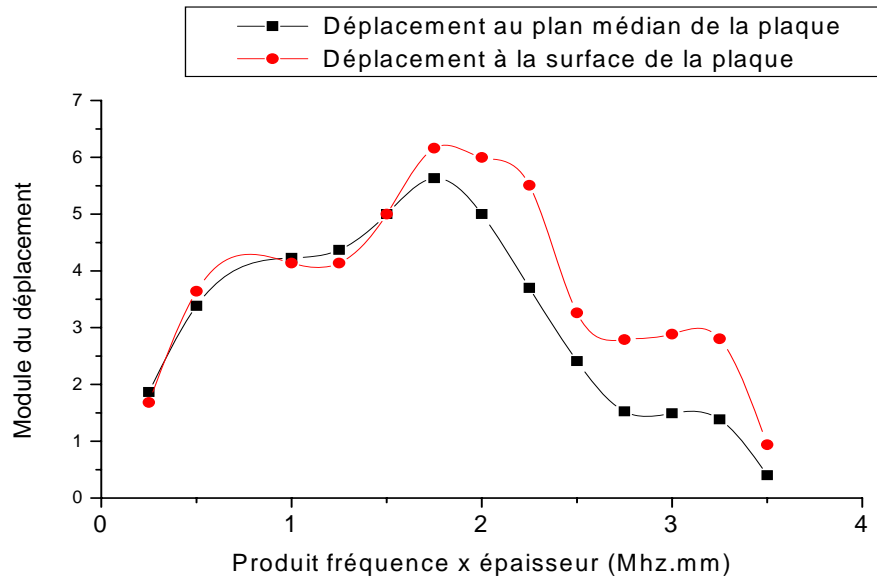


Figure II.3-6: Evolution du module du déplacement en surface et au centre de la plaque pour le mode S_0

On constate que pour les bas produits fréquence x épaisseur (inférieur à 1.6 MHz .mm) le module du déplacement de matière, au plan médian de la plaque et en surface sont pratiquement identiques. Le mode S_0 permet donc de détecter aussi bien des défauts internes que des défauts à la surface de la plaque.

Ce qui précède, montre que l'on peut utiliser le mode S_0 à différents produits fréquence x épaisseur :

- Aux bas produits fréquence x épaisseur (< 1.55 MHz.mm), le mode S_0 est sensible aux défauts de surface et aux défauts de volume. Le mode S_0 n'est pas très sensible aux perturbations du milieu extérieur (composante transversale faible). Pour ces produits fréquence x épaisseur, le mode S_0 est donc adapté à la détection de défauts dans des plaques.
- Aux produits fréquence x épaisseur aux alentours de 2.5 MHz.mm, le mode S_0 est très sensible aux modifications du milieu qui entoure la plaque (composante transversale forte). On peut alors l'utiliser pour contrôler tout changement sur la plaque (présence ou absence d'un liquide, d'une peinture ou autre).

II.3-2-b Mode A_0

De même que précédemment, on s'intéresse aux déplacements de matière lorsque le mode A_0 se propage dans la plaque, pour différents produits fréquence x épaisseur. Les graphes ci- dessous, donnent l'allure des modules normalisés (par rapport à la constante B) des déplacements transversaux et longitudinaux et le module du déplacement, pour le mode antisymétrique A_0 :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = qB \left[\cos\left(qx_2 + \frac{\pi}{2}\right) - \frac{2k^2}{k^2 - q^2} \times \frac{\cos\left(qh + \frac{\pi}{2}\right)}{\cos\left(ph + \frac{\pi}{2}\right)} \times \cos\left(px_2 + \frac{\pi}{2}\right) \right] \\ U_2 = ikB \left[\sin\left(qx_2 + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2pq}{k^2 - q^2} \times \frac{\cos\left(qh + \frac{\pi}{2}\right)}{\cos\left(ph + \frac{\pi}{2}\right)} \times \sin\left(px_2 + \frac{\pi}{2}\right) \right] \\ U_3 = 0 \end{array} \right. \quad (II-2)$$

$$\frac{|U_1|_{A_0}}{B} \quad \frac{|U_2|_{A_0}}{B} \quad \text{et} \quad \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{B} \Big|_{A_0}$$

où B est une constante qui dépend des

conditions initiales (formules II-2).

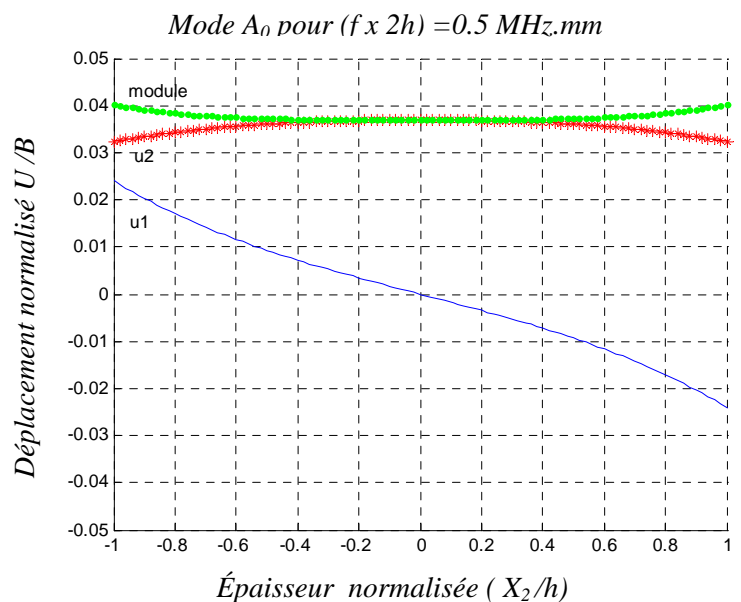
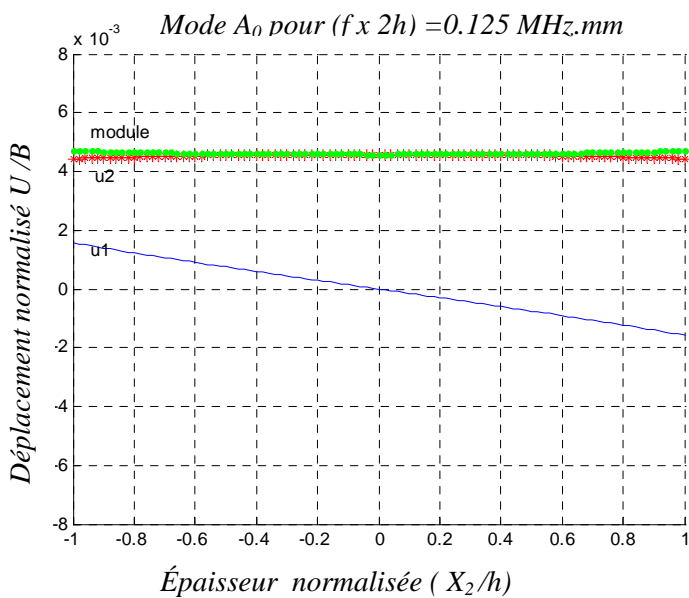


Figure II.3-7a: Evolution des composantes U_1 , U_2 et du module du mode antisymétrique A_0 , en fonction de l'épaisseur normalisée $\frac{X_2}{h}$, pour un produit fréquence x épaisseur donné.

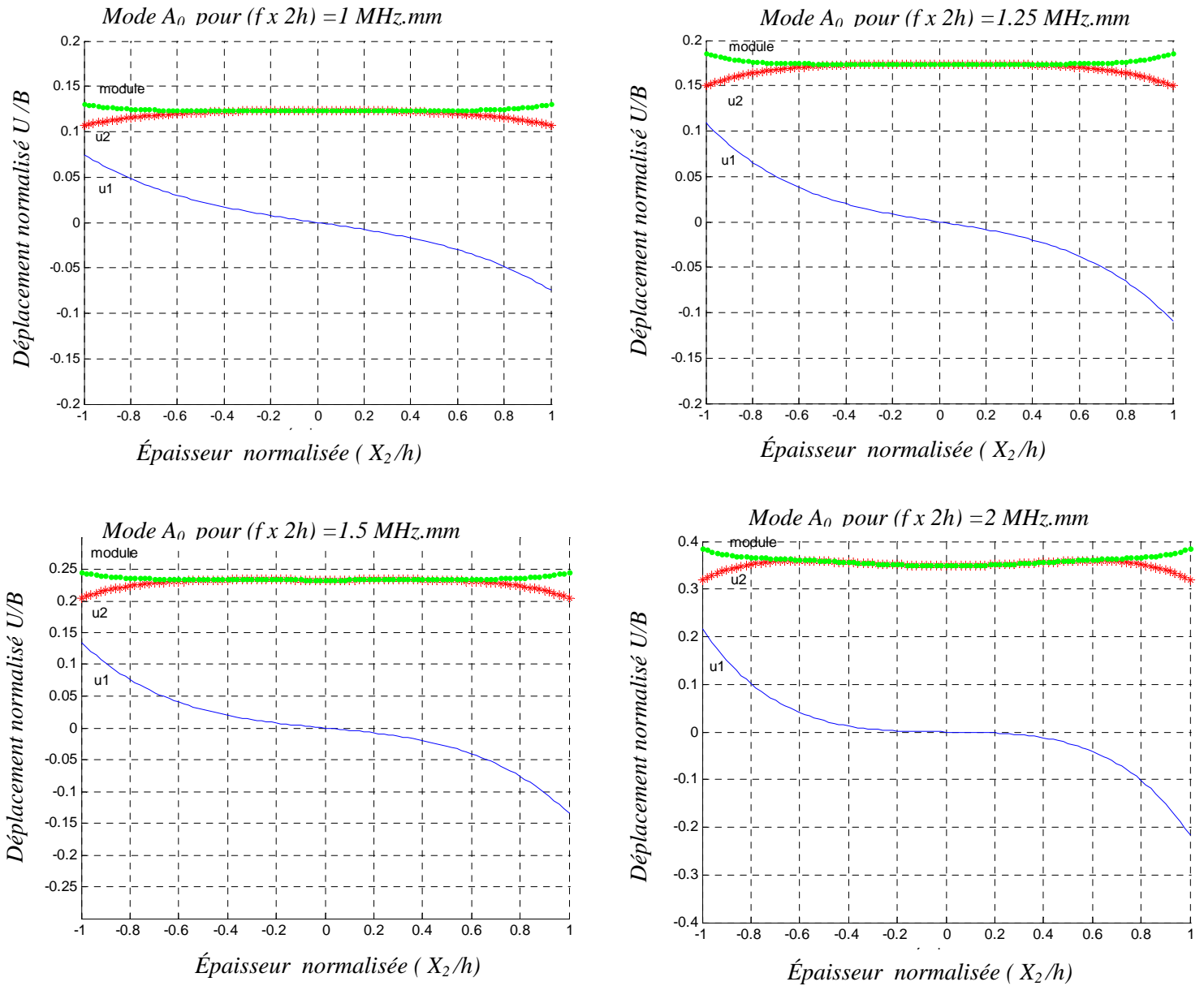


Figure II.3-7b: Evolution des composantes U_1 , U_2 et du module du mode antisymétrique A_0 , en fonction de l'épaisseur normalisée $\frac{X_2}{h}$, pour un produit fréquence x épaisseur donné.

Aux bas produits fréquence x épaisseur la composante principale est la composante transversale, la composante longitudinale est pratiquement nulle (mode de flexion pur). Lorsque le produit fréquence x épaisseur augmente, la composante U_1 augmente mais reste

inférieur à la composante transversale. Pour déterminer la sensibilité du mode A_0 à la profondeur d'un défaut, nous avons tracé le module du déplacement à la surface, et au centre de la plaque en fonction du produit fréquence x épaisseur.

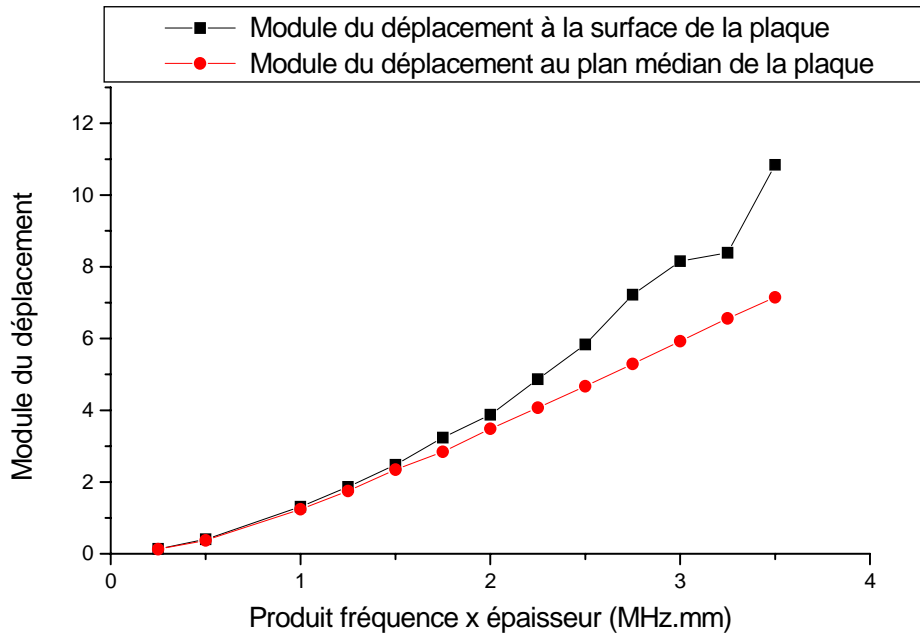


Figure II.3-8: Evolution, avec le produit fréquence x épaisseur, du module du déplacement du mode antisymétrique A_0 à la surface de la plaque $z = h$ et au centre de la plaque $z = 0$

Aux bas produits fréquence x épaisseur (inférieur à la fréquence de coupure de A_1), le mode A_0 permet donc de détecter et de localiser aussi bien des défauts en surface qu'en volume.

Pour déterminer la sensibilité du mode A_0 aux variations qui entourent la plaque, nous avons tracé le rapport $\left(\frac{U_2}{U_1}\right)$, en fonction du produit fréquence x épaisseur.

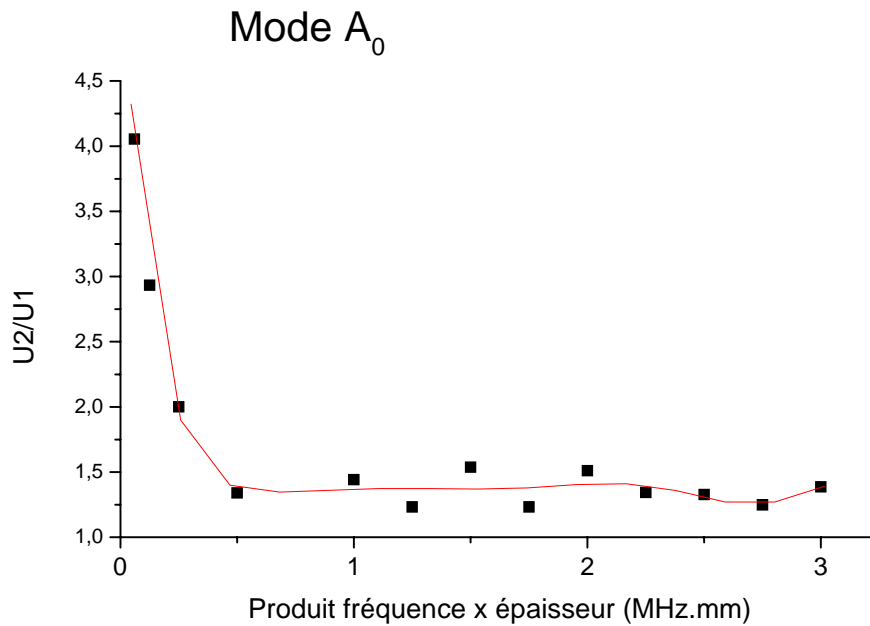


Figure II.3-9: Evolution, avec le produit fréquence x épaisseur, des rapports des

déplacements $\frac{U_2}{U_1}$ à la surface ($z = h$)

Le rapport $\frac{U_2}{U_1}$ est très élevé pour les bas produits fréquence x épaisseur. Ce qui révèle que le mode A_0 est très sensible aux variations extérieures, pour ces produits fréquence x épaisseur. A mesure que le produit ($f \times 2h$) augmente, le rapport diminue et se stabilise. Pour détecter la présence de défauts sur la surface de la plaque, le mode A_0 , aux bas produits ($f \times 2h$) semble être performant, puisque sa composante transversale est très importante par rapport à sa composante longitudinale. Mais cette qualité rend ce mode très sensible à l'environnement de la plaque. En outre, aux bas produits ($f \times 2h$) ce mode est très dispersif.

Pour comparer la sensibilité du mode A_0 et S_0 à un même produit fréquence x épaisseur, nous avons regroupé les différents rapports $\frac{U_2}{U_1}$ pour différents produits ($f \times 2h$).

Produit fréquence x épaisseur (MHz .mm)	$\frac{U_2}{U_1}$ pour le mode S_0	$\frac{U_2}{U_1}$ pour le mode A_0
0.5	0.2	1.4
1	0.35	1.38
1.2	0.5	1.38
1.5	0.7	1.38
2	1.2	1.38
2.5	3.2	1.38
3	1.66	1.38

Tableau II.3-1 : Rapports des composantes du déplacement $\frac{U_2}{U_1}$ pour différents produits fréquence x épaisseur

Nous remarquons alors, que pour les produits ($f \times 2h$) inférieurs à 1.55 MHz .mm, le mode S_0 est moins sensible que le mode A_0 aux variations du milieu extérieur à la plaque. Il est donc préférable de choisir le mode S_0 , peu dispersif aux bas produits ($f \times 2h$) et dont la composante longitudinale l'emporte sur la composante transversale, pour détecter et localiser des défauts dans une plaque, sans que les variations du milieu extérieur n'influent trop sur les résultats.

II.3-3 Propriétés du mode choisi

Le mode de Lamb retenu comme mode incident est donc **le mode S_0** , pour un produit fréquence x épaisseur situé dans la partie non dispersive de la courbe de dispersion (pour l'aluminium < 1.5 MHz.mm).

Ce mode présente les avantages suivants :

- Le mode S_0 peut être généré quelle que soit la fréquence utilisée. Il peut donc être généré à un bas produit fréquence x épaisseur. Ceci permet de limiter le nombre de modes propagateurs dans la plaque.
- Le mode S_0 est non dispersif pour les bas produits fréquence x épaisseur. Il permet ainsi l'inspection de grandes structures sans que le paquet d'onde ne se déforme.

- Le mode S_0 n'est pas très sensible aux perturbations qui entourent la plaque. En effet, le rapport entre la composante transversale et la composante longitudinale du déplacement de matière est plus faible que celle du mode A_0 pour les bas produits fréquence x épaisseur. Par exemple, pour un produit fréquence x épaisseur de 1.2 MHz.mm le rapport des amplitudes des composantes du déplacement sont :

$$\left(\frac{|U_2|}{|U_1|}\right)_{S_0} = 0.5 \quad \left(\frac{|U_2|}{|U_1|}\right)_{A_0} = 1.38$$

- Le mode S_0 permet de détecter des défauts situés aussi bien en surface qu'en volume
- L'amplitude de l'écho issu de défauts après la réflexion du mode S_0 est proportionnelle à la taille de celui-ci [13]

II.3-4 Mode de bout

Lors du contrôle non destructif d'une plaque par ondes de Lamb, il est difficile de détecter des défauts proches des bords de la plaque. Cette situation est encore plus critique si le mode incident, utilisé pour tester la plaque, possède, dans sa bande fréquentielle, la fréquence correspondant à une vibration propre symétrique du bord de la plaque, appelée « mode de bout » [2]. Ce phénomène de résonance implique que le bord rayonne, pendant une très longue durée, une onde dans la plaque. Ceci peut donc entraîner des superpositions de signaux qui peuvent gêner l'identification, ou masquer la présence de défauts au sein de la plaque.

Pour localiser la fréquence de résonance du mode de bout, Clézio [2] a utilisé une simulation par un code d'éléments finis. La fréquence utilisée est choisie avec une bande étroite centrée autour de la fréquence de résonance.

Le bord de la plaque vibre, en premier lieu, selon la forme temporelle de la force d'excitation. Ensuite, il possède un comportement résonant puisque ses déplacements semblent être permanents, et ne possède qu'une seule fréquence. Pour identifier la fréquence de résonance et l'évolution de la résonance avec la distance par rapport au bord de la plaque, les signaux sont prélevés à deux positions différentes.

- Les premiers signaux recueillis se font sur un des coins du bord de la plaque.

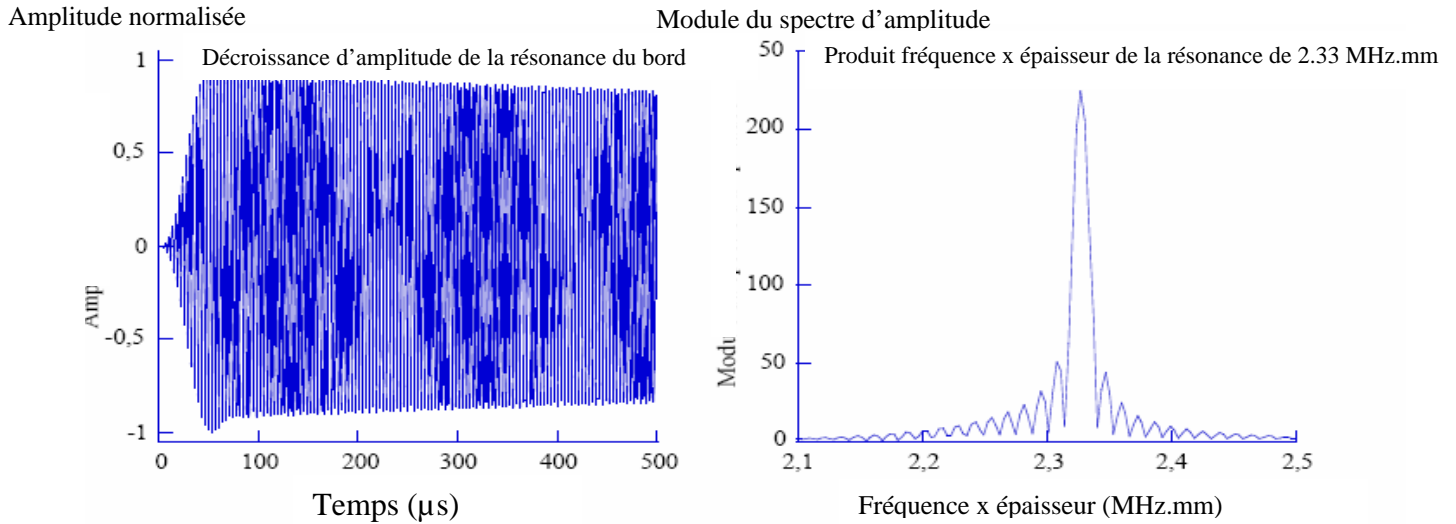


Figure II.3-11: Signaux recueillis au bord de la plaque a) temporel b) fréquentiel [2]

La résonance du bout n'est pas constante puisque son amplitude diminue avec le temps. Une partie de l'énergie est donc rayonnée dans la plaque. Le spectre fréquentiel montre que la résonance se produit pour un produit fréquence x épaisseur de 2.33 MHz.mm pour une plaque d'aluminium.

- Une seconde mesure est prise pour une distance de 30 cm du bord de la plaque. Les signaux recueillis sont donnés ci- dessous.

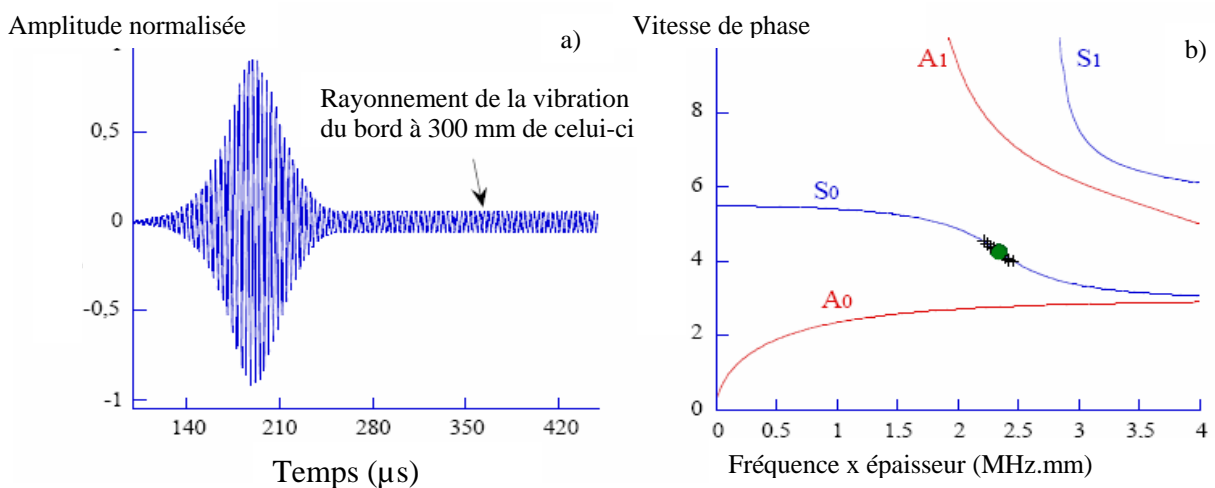


Figure II.3-12: a) Paquet d'onde recueilli à une distance de 300 mm du bord b) Vitesse de phase du mode S_0 (xxxx) premier paquet d'onde ● Traînée seule [2]

Le signal reçu contient deux parties.

- Le premier paquet d'onde correspond à la propagation du mode S_0 avec une bande de produit fréquence x épaisseur [2.2 MHz.mm ; 2.48 MHz.mm]
- Le second est une traînée mono fréquentielle qui correspond au rayonnement du bord, au seul produit fréquence x épaisseur de 2.33 MHz.mm pour une plaque d'aluminium, qui est celui de la résonance du bout de la plaque d'aluminium. La présence de cette traînée peut gêner l'interprétation des signaux réfléchis par la présence de défauts dans la plaque.

Il est donc préférable de travailler à un produit fréquence x épaisseur différent de celui de la résonance de bout afin, de pouvoir détecter des défauts situés près du bord des plaques. Ce produit dépend du matériau choisi. Pour l'aluminium, il est de 2.33 MHz.mm

II.4 Propagation du mode de Lamb S_0 dans une plaque

II.4-1 Réflexion du mode S_0 sur le bord libre d'une plaque

La réflexion d'un mode de Lamb sur le bord libre d'une plaque représente le cas le plus simple de diffraction d'une onde de plaque par un défaut. Dès lors que ces ondes se propageant dans une plaque, rencontrent une variation d'impédance acoustique, une partie de celle-ci est réfléchi et une autre partie est transmise. Or une très faible partie de l'onde est générée dans l'air entourant la plaque. On considère alors que le mode incident se propage dans une plaque saine jusqu'au bord de celle-ci, où la rupture d'impédance acoustique fait que l'onde se réfléchit sur elle-même avec un déphasage de π .

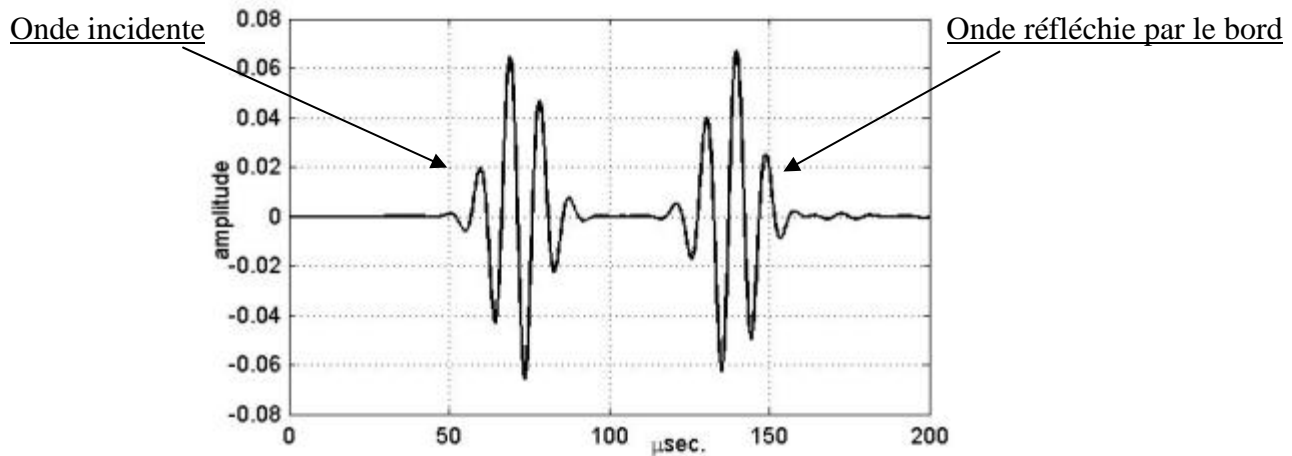


Figure II.4-1: Signal temporel reçu lors de la réflexion d'une onde de Lamb sur le bord libre de la plaque

Quelle que soit la nature de l'onde (symétrique ou antisymétrique), lorsque elle se réfléchit sur un défaut non symétrique, il y a conversion de mode (symétrique vers antisymétrique et réciproquement)[2]. Le bord de la plaque est considéré comme un défaut symétrique par rapport au plan médian de celle-ci. En effet la symétrie du bord de la structure impose qu'aucune conversion de mode ne soit possible d'une famille à l'autre (symétriques vers antisymétriques et réciproquement) [2] [18] lors de la réflexion d'un mode de Lamb symétrique sur celui-ci.

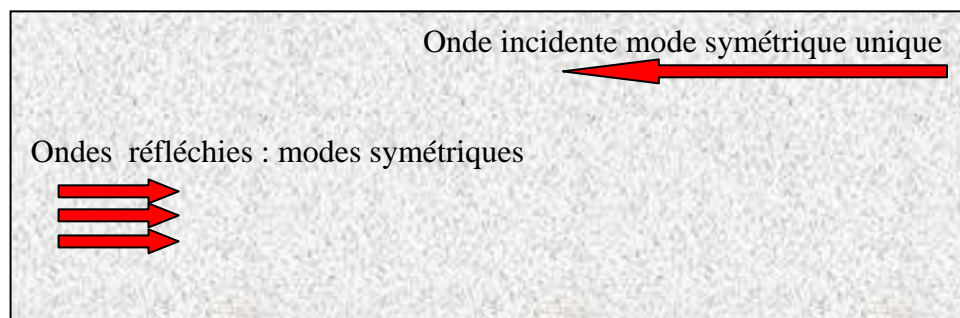


Figure II.4-2: Réflexion d'une onde de Lamb sur le bord libre d'une plaque

II.4-2 : Réflexion du mode S_0 sur un défaut

Lorsque la plaque contient des discontinuités, une partie de l'onde sera dans un premier temps réfléchi par le défaut et une partie sera transmise vers le bord libre de la plaque pour être à nouveau réfléchi par celui-ci vers le transducteur. Deux cas peuvent alors

se poser, le premier, lorsque la symétrie du défaut et de l'onde incidente sont identiques et le second lorsque leurs symétries sont opposées.

1. Une fente est considérée comme un défaut rectangulaire symétrique par rapport au plan médian de la plaque, un trou est considéré comme un défaut circulaire symétrique. Pour un défaut symétrique par rapport au plan médian de la plaque et une onde incidente symétrique, l'onde réfléchiée et l'onde transmise sont formées uniquement de modes symétriques pouvant se propager au produit fréquence x épaisseur choisi.

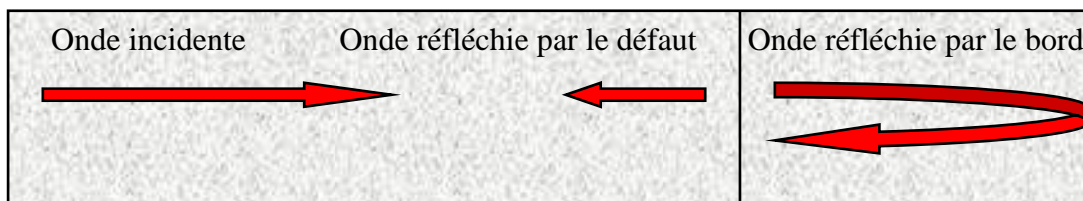


Figure II.4-3: Réflexion d'un mode symétrique sur une fente

2. Cependant, lorsque le défaut et l'onde incidente n'ont plus la même symétrie il y a alors conversion de mode d'une famille à l'autre lorsque le faisceau acoustique rencontre la discontinuité. L'onde réfléchiée par le défaut et l'onde transmise sont alors formées de modes symétriques et de modes antisymétriques pouvant se propager au produit fréquence x épaisseur choisi. Une fissure est considérée comme un défaut rectangulaire non symétrique par rapport au plan médian de la plaque de même un cratère est considéré comme un défaut circulaire non symétrique.

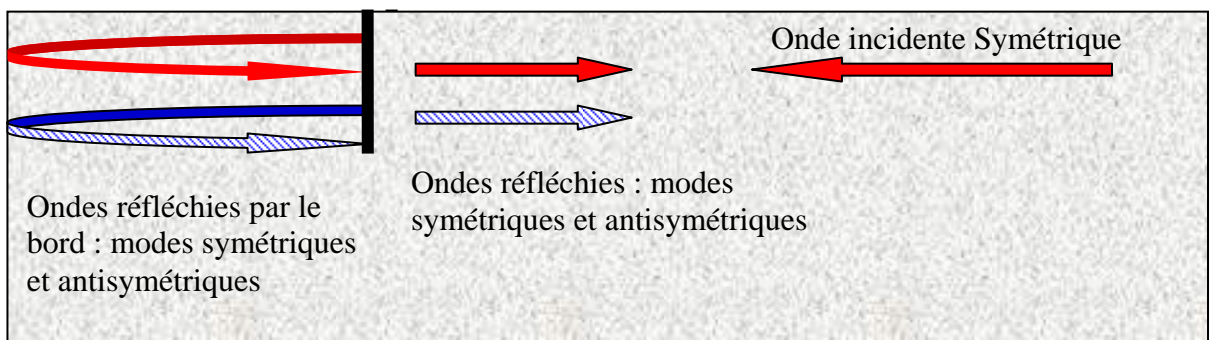


Figure II.4-4: Réflexion d'un mode symétrique de Lamb sur une fissure

On comprend alors la complexité d'un signal reçu, après réflexion de l'onde incidente sur un défaut. Il est primordial de connaître les modes susceptibles de se propager dans la plaque et leurs vitesses de groupe au produit fréquence x épaisseur du mode incident afin, d'identifier les modes réfléchis par un défaut quelconque. Chaque mode réfléchi par le défaut possède une vitesse de groupe différente, le signal reçu par le transducteur récepteur peut donc être formé de plusieurs échos traduisant la présence du même défaut. La présence de plusieurs défauts dans une plaque complique davantage le signal. Il est donc important de limiter le nombre d'échos réfléchis ou transmis par un défaut afin de faciliter l'interprétation des signaux recueillis et de déterminer le nombre et la position de chaque défaut. En choisissant la valeur du produit fréquence x épaisseur, il est possible de limiter le nombre de mode pouvant se propager dans la plaque. Le premier produit fréquence x épaisseur de coupure est celui du mode A_1 soit 1.55 MHz .mm, si l'on choisit de travailler à un produit fréquence x épaisseur inférieur au premier produit fréquence x épaisseur de coupure, seuls les modes A_0 et S_0 pourront se propager dans la plaque.

II.5 Méthodes de génération des ondes de Lamb

Les ultrasons sont des ondes mécaniques qui peuvent être générées à partir d'éléments piézo-électriques. Ces ondes sont transmises dans la pièce à contrôler par l'intermédiaire d'un milieu de couplage et se propagent à une vitesse qui dépend du matériau. Le milieu de couplage est un fluide ou un gel qui permet d'assurer une bonne transmission de l'énergie acoustique entre les transducteurs et le milieu à tester.

II.5-1 Méthode utilisant un transducteur à doigts

On place un transducteur sur l'une des surfaces de la plaque, posé sur des doigts de plexiglas espacés d'une distance λ qui correspond à la longueur d'onde du mode incident choisi. Les doigts sont couplés à la plaque par du gel pour faciliter la transmission des ondes acoustiques du transducteur à la plaque. Cette technique génère deux ondes de chaque côté du transducteur codé. Il faut placer le transducteur à une distance du bord de la plaque, de

telle sorte que le mode réfléchi par le premier bord de la plaque interfère de façon constructive avec celui se propageant de l'autre côté du transducteur codé.

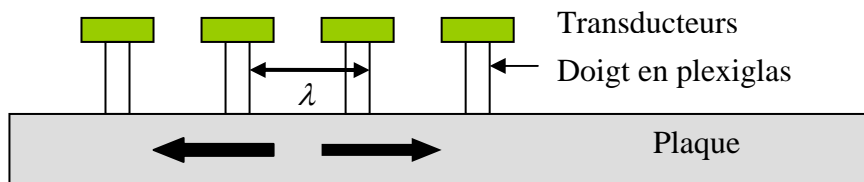


Figure II.5-1: Transducteurs codés

Le transducteur codé ne génère pas un mode de Lamb unique, cependant l'amplitude du mode choisi peut être plus importante que celle des modes de Lamb non souhaités. Pour limiter le nombre de modes pouvant se propager dans la plaque, on peut choisir de travailler à un produit fréquence x épaisseur tels que seuls les modes A_0 et S_0 puissent se propager.

Deux modes sont alors générés A_0 et S_0 avec des amplitudes différentes. Les amplitudes des modes générés dépendent du nombre de doigts en plexiglas utilisé. En effet plus le nombre de doigts augmente plus le rapport des amplitudes du mode choisi et des modes de Lamb non désirés augmente [10] [11]. En augmentant le nombre de doigts du transducteur (de 2 à 10) l'amplitude du mode choisie par rapport à celle du mode non souhaité augmente. Dès quatre doigts, le mode choisi a une amplitude 12 fois supérieure à celle du mode parasite. On peut alors considérer que l'on a généré un mode de Lamb unique [11].

Rapport des Amplitudes

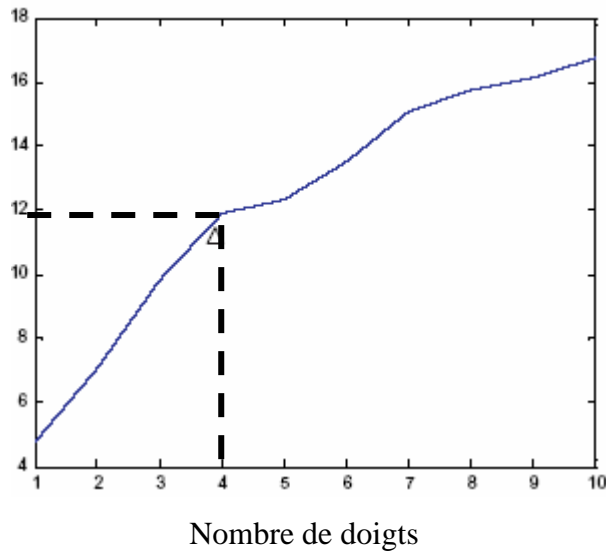


Figure II.5-2: Amplitude du mode choisi sur l'amplitude du mode non souhaité généré par codage pour une fréquence de 600 KHz, en fonction du nombre de doigts [11]

Le deuxième paramètre étudié, est la largeur du doigt en fonction de la distance λ séparant deux doigts. Pour le même nombre de doigt, on augmente progressivement leurs largeurs (de 1% à 90% de la longueur λ) [10]. La largeur des doigts n'influe pas sur le nombre de modes générés, ni sur le rapport des amplitudes entre le mode incident choisi et les modes parasites. Cependant, l'amplitude de tous les modes générés augmente avec la largeur des doigts jusqu'à ce que celle-ci soit égale à 50% de la longueur λ puis leurs amplitudes varient peu.

II.5-2 Méthode de génération sous incidence oblique

Pour générer un seul mode de Lamb, on peut orienter le transducteur d'un angle d'incidence θ . La génération sous incidence oblique est une méthode simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas de gros moyens. Toutefois, il existe plusieurs méthodes pour incliner le transducteur.

II.5-2-a Méthode par contact

La génération des ondes de Lamb par contact est une méthode très souvent utilisée en contrôle non destructif. Un nombre important de travaux de recherche a été réalisé, dans le but de développer des techniques pour générer des modes particuliers [2] [4] [5] [13]. Pour pouvoir incliner le transducteur piézoélectrique, il faut utiliser un milieu couplant (sabot en plexiglas) incliné d'un angle θ . L'angle d'incidence θ du transducteur est calculé par la loi de Snell-Descartes.

$$\boxed{\lambda_{\varphi} = \frac{\lambda_c}{\sin \theta}} \quad \text{(II-3) } \begin{array}{l} \lambda_c \text{ Longueur d'onde dans le milieu couplant} \\ \lambda_{\varphi} \text{ Longueur d'onde du mode de Lamb} \end{array}$$

En utilisant la vitesse de phase V_{φ} du mode incident choisi pour un produit fréquence x épaisseur donnée, et V_c la vitesse dans le milieu couplant on obtient :

$$\boxed{\sin \theta = \frac{V_c}{V_{\varphi}}} \quad \text{(II-4)}$$

Pour générer le mode de Lamb choisi, il suffit alors de placer le transducteur (écho mode) ou les transducteurs (émission réception) sur les sabots inclinés. Deux possibilités s'offrent à nous :

❖ Méthode en émission réception :

Il faut utiliser deux transducteurs pour travailler en mode émission réception. Le premier transducteur est utilisé pour l'émission des ondes de Lamb et le second pour la réception. L'eau ou un gel, peuvent être utilisés comme milieu intermédiaire couplant entre le transducteur et le sabot mais aussi entre le sabot et la plaque [2] [4].

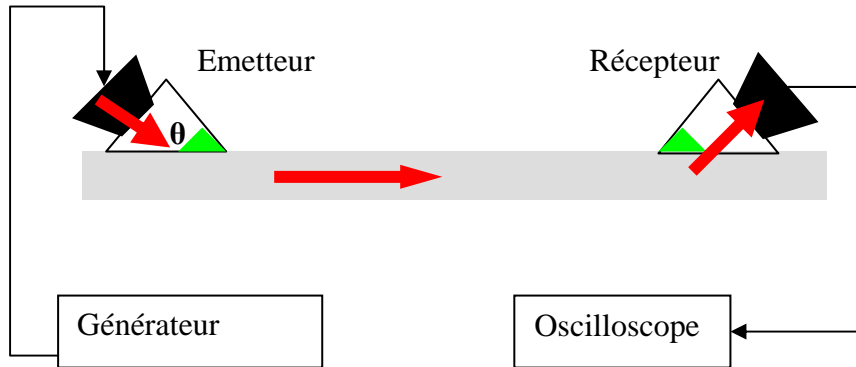


Figure II.5-3: Dispositif expérimental en émission réception

L'onde acoustique se propage le long de la plaque, puis elle est transmise par le transducteur récepteur à un oscilloscope, chargé d'information sur l'intégrité de la structure. La présence du défaut se traduit par :

- Une atténuation du signal reçu par le transducteur récepteur
- Une conversion de mode par le défaut

Pour un mode de Lamb à un produit fréquence x épaisseur donné, on fixe un angle d'incidence θ puis on taille un sabot en plexiglas. Cependant, dès que la fréquence ou l'épaisseur de la plaque change, le sabot ne peut plus être réutilisé. Pour éviter ce problème on peut utiliser des sabots de plexiglas à angle variable (figure II.5-4) [13] [16]. Le même sabot permet de générer des ondes de Lamb pour des plaques de différentes épaisseurs ou pour une même plaque avec des fréquences différentes



Figure II.5-4: Sabots en plexiglas à angle variable [16]

❖ Méthode en écho mode

Pour travailler en écho mode, nous utilisons le même transducteur pour l'émission et la réception. En effet le transducteur émet une onde acoustique qui se propage le long de la plaque. Dès que celle-ci rencontre le bord de la plaque, elle est réfléchi vers le transducteur qui renvoie le signal chargé d'information sur l'intégrité de la plaque, vers un oscilloscope. La présence de défaut se traduit alors par :

- L'apparition d'un écho supplémentaire réfléchi par un défaut
- La conversion de mode au passage de l'onde sur le défaut (mesure en écho mode ou en émission réflexion)

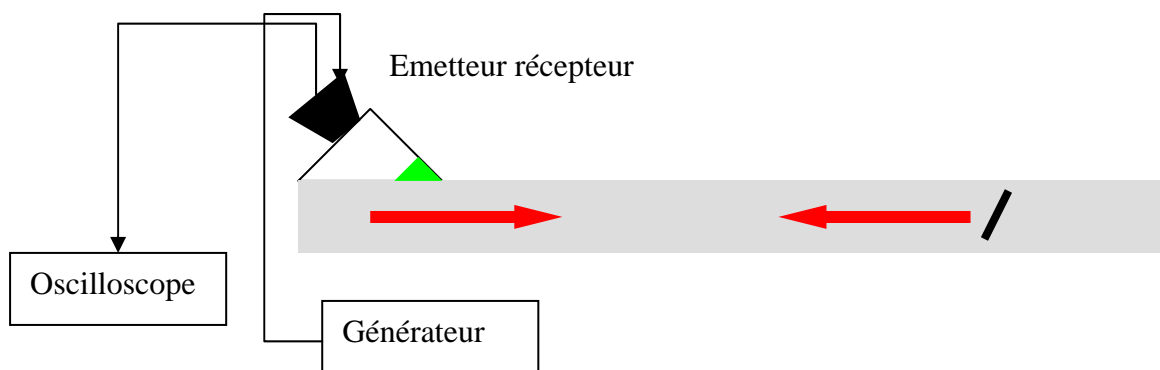


Figure II.5-5: Dispositif expérimental en écho-mode

Il est possible d'utiliser de l'eau comme milieu couplant lorsque l'on travaille par contact. Pour cela, on place sur la plaque une petite cuve remplie d'eau dans laquelle on plonge le transducteur. Si on travaille en écho mode, on utilise une seule cuve et si l'on veut travailler en émission réception on utilise deux cuves.

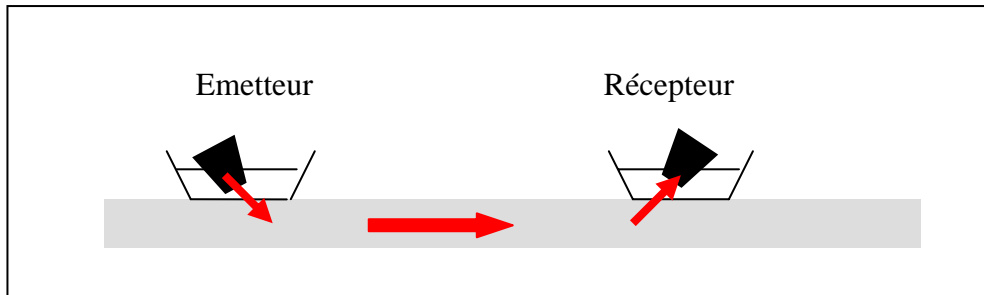


Figure II.5-6: Génération d'ondes par contact en utilisant comme milieu couplant l'eau

La plaque reste à l'air libre, donc ce mode d'excitation, ne perturbe pas la propagation de l'onde dans la plaque. En effet, seule une partie de l'onde se propage dans l'eau où elle est atténuée, le reste de l'onde se propage dans la plaque sans grande atténuation.

II.5-2-b Méthode par immersion

Pour générer des ondes de Lamb on peut travailler par immersion [2] [4] [14], dans ce cas, le milieu couplant est un liquide. La pièce à contrôler, et les transducteurs sont immergés dans un liquide de couplage (eau, pétrole, etc.). Le palpeur n'est pas en contact direct avec la pièce traitée, l'onde se propage dans le liquide sous une incidence calculée par la loi de Snell-Descartes. Cette méthode permet d'avoir un couplage constant entre l'émetteur et le récepteur. Cependant, l'eau atténue les ondes de plaques, on parle alors de « Leaky Lamb waves ». De plus, la présence d'impuretés à la surface des pièces et leur oxydation perturbent les transmissions et les réflexions ultrasonores.

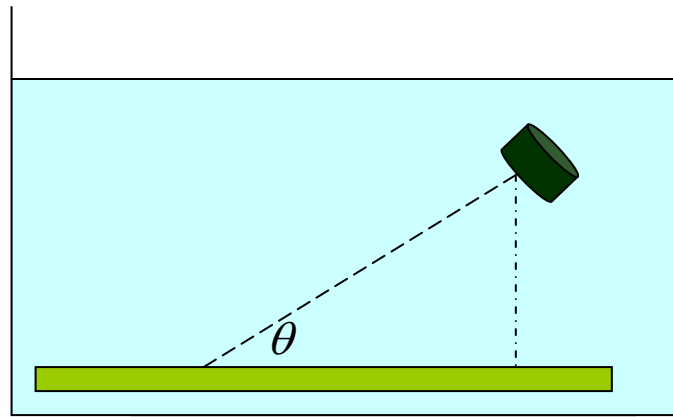


Figure II.5-7: Génération par immersion

Le tableau suivant nous donne les valeurs des angles d'incidence pour différents produits fréquence x épaisseur du mode S_0 lorsque le milieu couplant est de l'eau ou du plexiglas.

Produits fréquence épaisseur (MHz .mm)	Angle d'incidence par immersion $V_c = 1500 \text{ m / s}$	Angle d'incidence pour un sabot en plexiglas $V_c = 2730 \text{ m / s}$
0.5	16°	30.2°
1	16.3°	30.8°
1.2	16.3°	30.8°
1.5	16.9°	32°
2	18.5°	35.4°
3	27.2°	$56,3^\circ$

Tableau II.5-1 : Angle d'incidence pour générer le mode S_0 par immersion ou par contact à différent produits fréquence x épaisseur

On constate que l'angle d'incidence varie très peu, pour une méthode donnée, pour les produits fréquence x épaisseur entre [0.5 ; 1.2] MHz .mm, cela s'explique par le fait que dans cette plage de fréquence le mode S_0 est très peu dispersif. A partir de 1.5 MHz .mm, le mode S_0 devient dispersif est l'angle d'incidence varie plus rapidement quel que soit le milieu couplant.

II.5-2-c Méthode sans contact

Pour générer des ondes de Lamb sans contact, on peut utiliser une source laser ou des transducteurs couplés par air. Ces nouveaux transducteurs permettent de s'affranchir de la

rupture d'impédance acoustique entre l'air et les solides. Les premiers prototypes sont apparus dans les années 70 mais, la difficulté de mesure liée à une électronique peu performante n'a permis à ces systèmes de réellement émerger qu'à partir des années 90 [4]. Le prix de ces transducteurs reste encore très élevé.

Ces derniers possèdent de fortes qualités pour le contrôle non destructif [2] [4] puisqu'ils permettent de détecter des ultrasons dans l'air, sans contact avec la structure à tester. Cependant, comme les transducteurs piézo-électriques, il faut les orienter d'un angle d'incidence θ pour générer un seul mode incident. Leurs utilisations sont plus aisées puisqu'ils ne nécessitent aucun couplage (cuve à eau, gel ; etc.). On peut aussi les utiliser pour scanner une plaque puisque aucun milieu couplant ne gêne leur translation. Ce type de transducteur est très sensible à l'environnement (poussière, humidité, etc.).

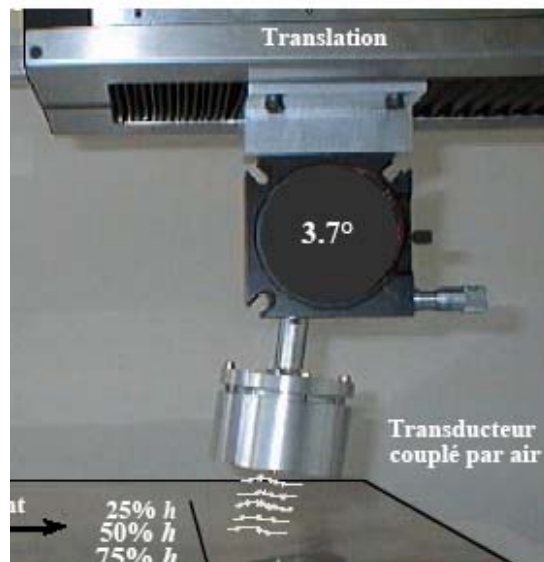


Figure II.5-8: Transducteur couplé par air [2]

Le mode de Lamb étant choisi, le phénomène de réflexion du mode S_0 par un défaut étant explicité, nous pouvons maintenant, choisir la méthode de génération appropriée, pour exciter sur les plaques à contrôler le mode de Lamb S_0 . Notre choix s'est porté sur la génération des ondes sous incidence oblique, par contact direct.

Le chapitre suivant résume le travail expérimental effectué sur des plaques saines et endommagées.

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale du comportement des ondes guidées de Lamb dans des plaques d'aluminium de faibles épaisseurs. Après avoir étudié les propriétés des différents modes de Lamb, et tracé leurs courbes de dispersion, nous avons choisi un mode de Lamb précis et une méthode pour le générer.

Le mode incident choisi est le mode S_0 pour un produit fréquence x épaisseur inférieur au produit fréquence x épaisseur de coupure du mode A_1 . Les expériences réalisées, concernent la génération d'un mode unique de Lamb dans une plaque saine, puis dans une plaque contenant des discontinuités de formes et de tailles différentes.

La majorité des structures planes à contrôler, dans l'industrie, sont protégées par une couche de peinture anticorrosion, ou par un autre revêtement (vernis, cire, film plastique, etc.), il est donc important de pouvoir détecter et localiser la présence de défaut sous la couche protectrice. Nous avons donc, dans une seconde étape, étudié la faisabilité d'utiliser le mode S_0 pour inspecter des structures planes recouvertes d'une bande adhésive ou de peinture.

III.2 Génération d'un mode de Lamb unique

Le dispositif expérimental se compose de plaques d'aluminium d'épaisseur 1 mm et 0.6 mm, d'un transducteur piézo-électrique (PlombZirconateTitane), de sabots en plexiglas, d'un générateur d'impulsions électriques et d'un oscilloscope numérique.

Le générateur comporte de deux connecteurs, le premier « R » utilisé lorsque l'on travaille en émission réception et le second « T/R » utilisé en mode écho. Pour nous mettre dans une situation de contrôle réel, nous choisissons de travailler en mode écho, donc avec un seul transducteur en émetteur récepteur. Le générateur fournit des impulsions électriques d'amplitude élevée (de l'ordre de 300 Volts) de courte durée et de fréquence ajustable, à un transducteur piézoélectrique qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique (effet piézoélectrique inverse). L'onde se propage dans le matériau et retourne vers le transducteur, après avoir rencontré un défaut, chargée d'informations sur l'intégrité de la structure. Le transducteur transforme alors l'énergie mécanique en énergie électrique (effet piézoélectrique direct). Le signal ainsi obtenu est envoyé à un

oscilloscope numérique. Cet oscilloscope permet de numériser le signal, afin de le traiter et d'enregistrer les données sur un PC.

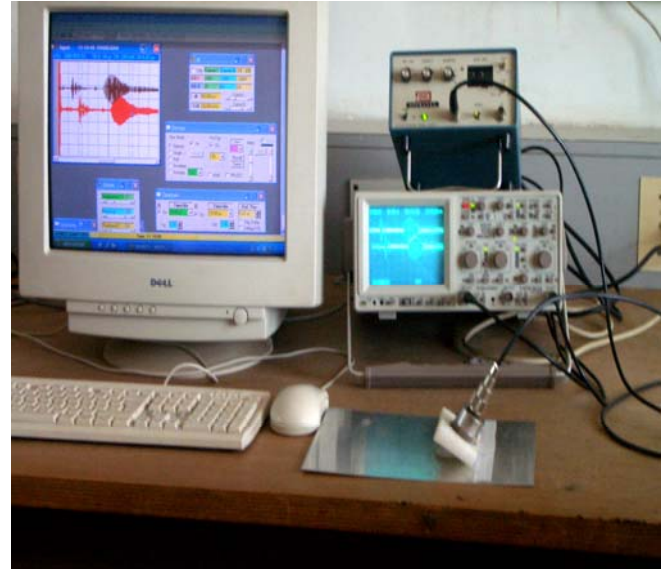
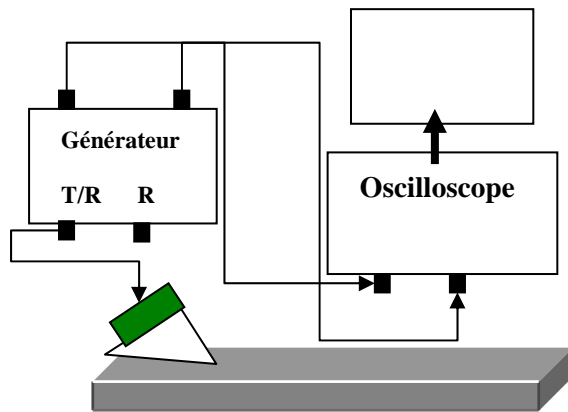


Figure III.2-1: Dispositif expérimental

Pour émettre et recevoir des ultrasons, nous utilisons un transducteur piézo-électrique (PZT). L'élément de base de la sonde est une céramique en PZT, faite d'un frittage de Plomb de Zirconate et de Titane. Les premières céramiques PZT ont été élaborées en 1954. Leur formule chimique est $Pb(Zr_x, Ti_{1-x})O_3$, selon la valeur de x les propriétés de la céramique changent. Le transducteur piézoélectrique utilisé, a un diamètre de 30 mm, sa fréquence centrale est de 2 MHz et sa bande passante à - 6 dB est comprise entre 1.6 MHz et 2.2 MHz.

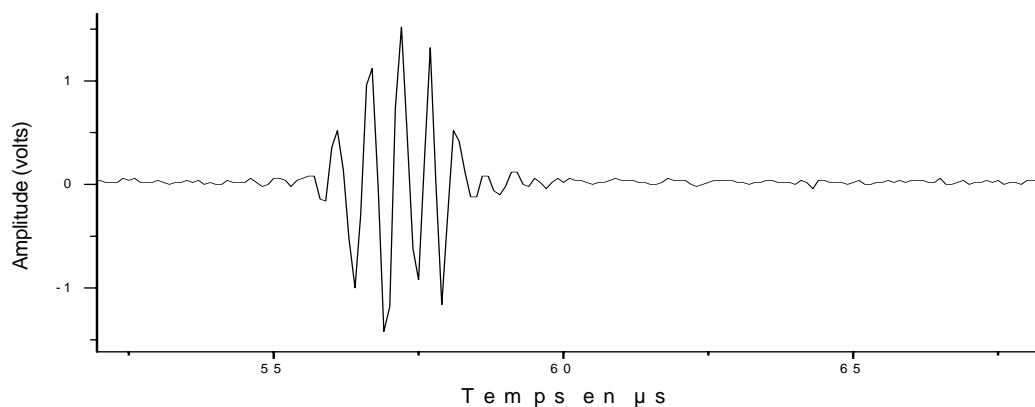


Figure III.2-2: Signal temporel émis par le transducteur

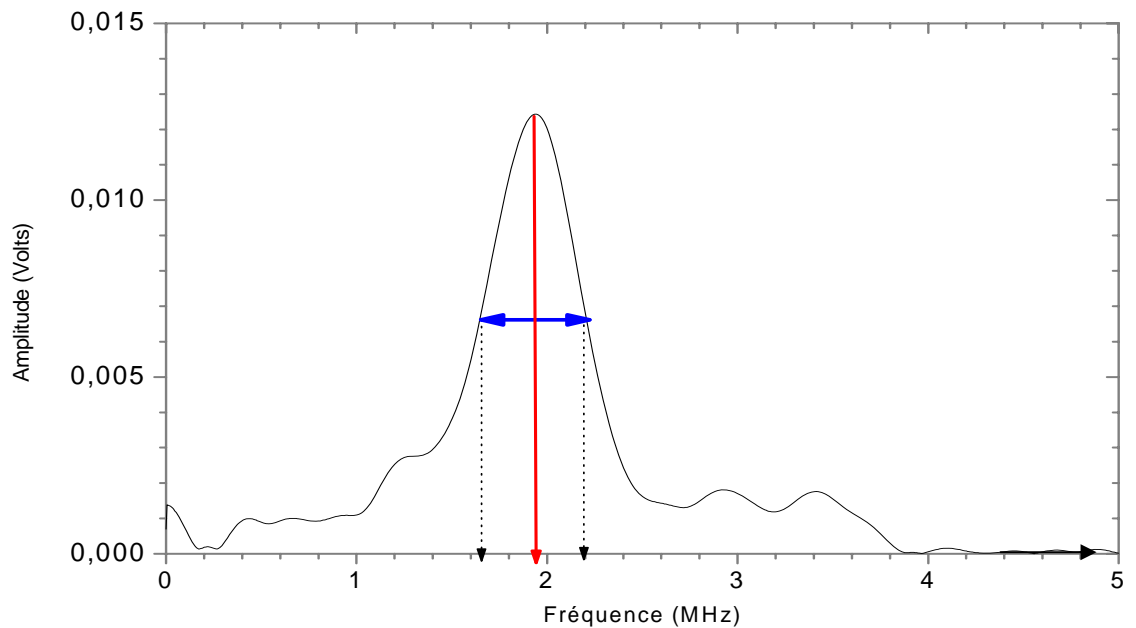


Figure III.2-3: Spectre fréquentiel du transducteur

III.3 Propagation du mode S_0 sur une plaque saine

La première expérience consiste à générer le mode de Lamb S_0 sur une plaque d'aluminium saine. L'orientation du transducteur émetteur récepteur se fait par le biais d'un sabot en plexiglas. Les ondes sont générées dans la plaque par le transducteur piézo-électrique de fréquence centrale 2 MHz fixé sur un prisme taillé sous un angle choisi pour générer le mode S_0 . Le milieu couplant utilisé est du gel pour ultrasons (figure III.2-1). Le transducteur vibre en épaisseur et génère dans le prisme en plexiglas des ondes longitudinales qui se propagent à la vitesse de 2730 m/s. Elles se transforment, à l'interface prisme plaque, en mode de plaque. L'onde se propage le long de la plaque, jusqu'au bord sur lequel elle se réfléchit.

Mode	Épaisseur de la plaque (mm)	Fréquence du transducteur (MHz)	Produit fréquence x épaisseur en (MHz . mm)	Angle du sabot
S_0	0.6	2	1.2	31°

Tableau III.3-1 : Récapitulatif des conditions expérimentales

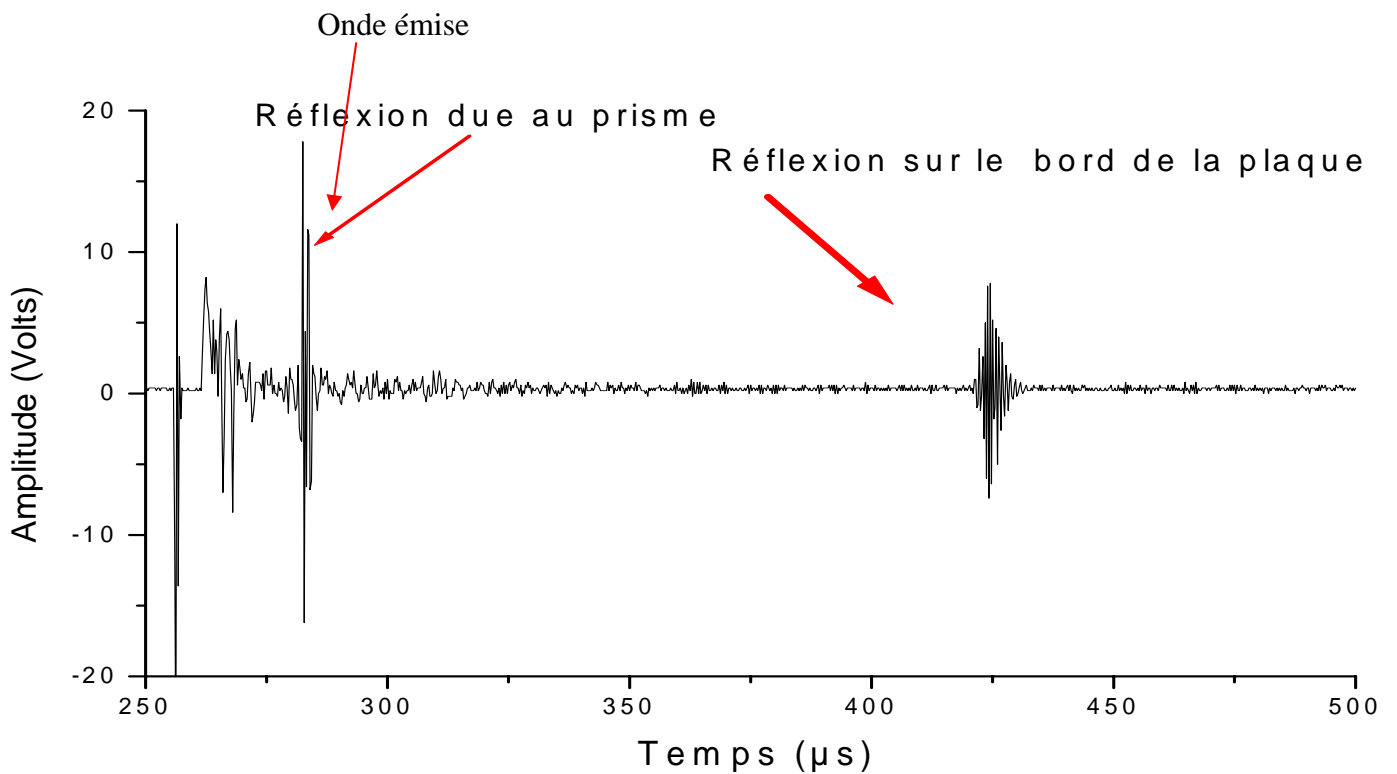


Figure III.3-1: Signal temporel reçu dans le cas d'une plaque saine

Le signal recueilli, nous permet de constater la présence de trois échos, le premier correspond à l'onde émise par le transducteur c'est l'onde incidente, le second traduit les réflexions à l'intérieur du prisme et le troisième représente la réflexion de l'onde incidente sur le bord de la plaque. Le dispositif expérimental nous a permis de générer un mode de Lamb unique. Pour cela, on calcule expérimentalement la vitesse de groupe du mode généré afin de la comparer à la vitesse théorique du mode S_0 .

Mode	Produit fréquence x épaisseur	Vitesse de phase (théorique)	Vitesse de groupe (théorique)	Temps de transit (aller retour)	Vitesse de groupe mesurée
S_0	1.2 MHz.mm	5288 m/s	5200m/s	166 µs	5300 m/s

Tableau III.3-2 : Mesure de la vitesse de groupe du mode généré (S_0)

Les résultats obtenus, confirment que le dispositif expérimental mis en place, nous permet de générer le mode de Lamb S_0 dans la plaque d'aluminium.

III.4 Propagation du mode S_0 en présence de défauts rectangulaires

III.4-1 Détection et localisation d'une fente

Dans cette expérience, nous souhaitons détecter et localiser la présence d'une fente sur une plaque d'aluminium, en utilisant le mode S_0 . Pour cela, nous avons usiné une fente de profondeur 100 % (épaisseur de la plaque), de largeur 1 mm et de longueur 2 cm sur une plaque d'aluminium d'épaisseur 0.6 mm de dimension 46 cm x 31cm.

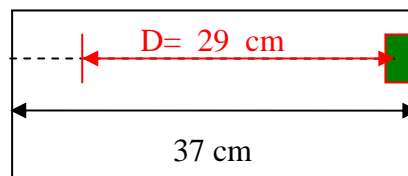


Figure III.4-1: Plaque avec une fente rectangulaire horizontale

Dans un premier temps, le transducteur est placé face à une partie saine de la plaque (signal temporel de couleur noire) afin d'identifier l'écho de bord, puis on déplace celui-ci vers la partie « endommagée » de la plaque (signal de couleur rouge) pour détecter et localiser le défaut. Les échos obtenus, suite à la réflexion de l'onde de Lamb, sur la fente et sur le bord de la plaque sont représentés ci-après :

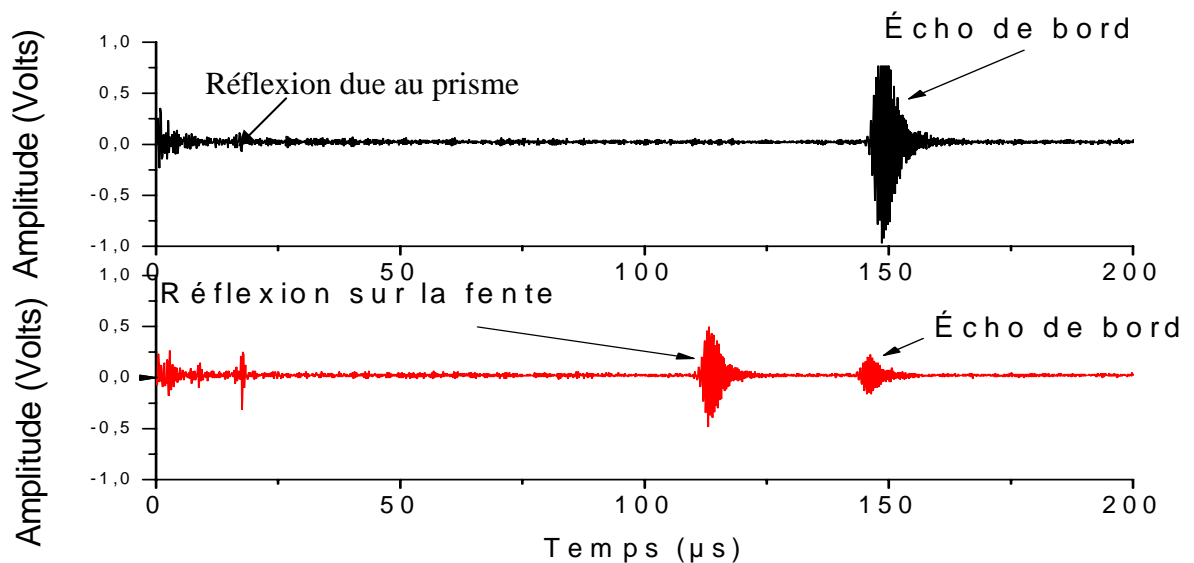


Figure III.4-2: Signaux temporels a) plaque saine b) plaque avec fente

Mode incident	Vitesse de groupe du mode incident	Position réelle de la fente	Temps aller retour du signal émis	Position de la fente, mesurée expérimentalement
S_0	5300 m/s	290 mm	111 μ s	$\frac{5.3 \times 111}{2} = 294$ mm

Tableau III.4-1 : Position mesurée expérimentalement et réelle de la fente

On constate que la position de la fente, trouvée expérimentalement, est voisine de la position réelle du défaut (avec une erreur d'environ 4 mm). La différence entre la position réelle de la fente et la position de celle-ci, trouvée expérimentalement, est due aux erreurs de lecture du temps de transit, et de la mesure de la distance parcourue par l'onde dans la plaque d'aluminium. Il est donc possible de localiser de façon assez précise la position d'un défaut sur la plaque. La précision sur la mesure du temps de vol, entre le signal du bord et celui revenant du défaut, peut être améliorée par différentes techniques de mesure usuelles [30], par exemple la méthode d'intercorrélation et la méthode de la transformée de Hilbert. La méthode d'intercorrélation n'est pas très efficace pour les signaux multimodaux ou fortement dispersifs dans lesquels, la variation de la fréquence devient significative, par contre, la méthode par transformée de Hilbert améliore les résultats, en présence de réponses multimodales ou dispersives. Notre travail consiste en une étude de faisabilité, donc nous nous sommes limités à une mesure 'grossière' du temps de vol entre les signaux.

III.4- 2 Détection et localisation d'une fissure

La seconde expérience consiste à étudier l'interaction du mode de Lamb S_0 avec un défaut rectangulaire non symétrique, une fissure. Pour cela, nous avons usiné une fissure de longueur 2 cm et de profondeur 50% (de l'épaisseur de la plaque). Les échos obtenus, suite à la réflexion de l'onde de Lamb, sur la fissure sont donnés ci-après

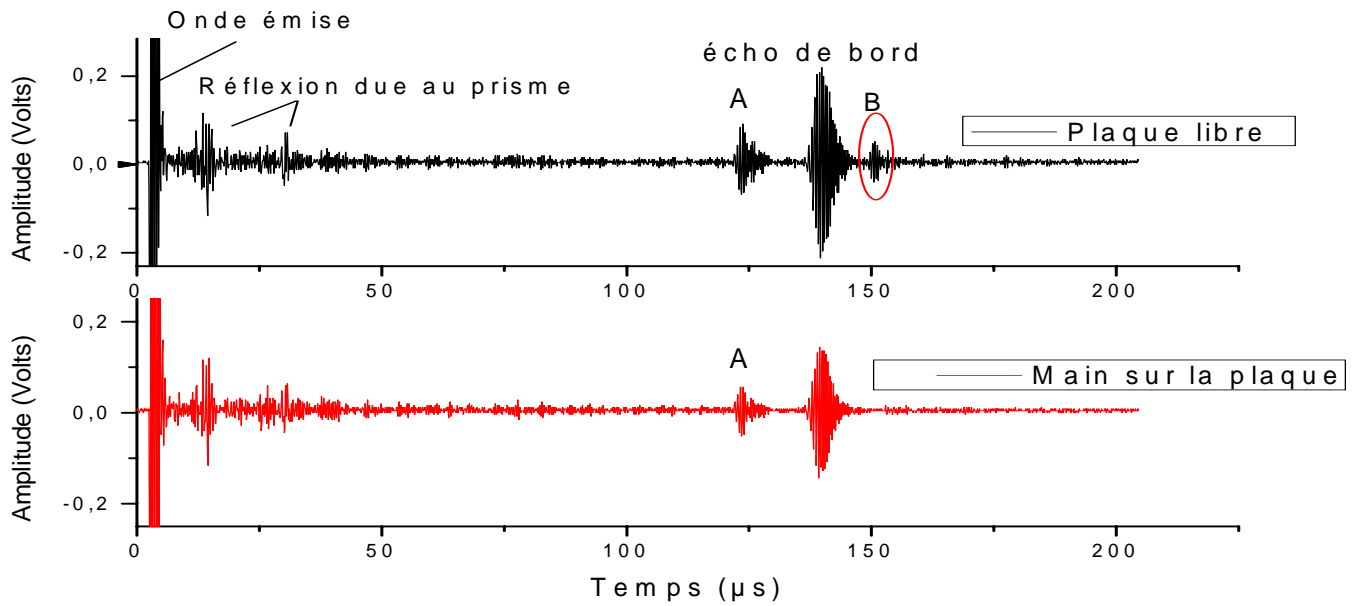


Figure III.4-3: Signaux temporels reçus par le transducteur lorsqu' il est face à la partie de la plaque: a) endommagée par une fissure b) même partie recouverte par la main.

Les premiers échos représentent l'onde émise et les différentes réflexions à l'intérieur du prisme.

Identification de l'écho de bord :

Mode incident	Vitesse de groupe du mode incident	Position réelle du bord de la plaque	Temps aller retour du signal écho de bord	Position du bord de la plaque mesurée expérimentalement
S_0	5300 m/s	360 mm	136 μ s	$\frac{5.3 \times 136}{2} = 360 \text{ mm}$

Tableau III.4-2 : Position mesurée expérimentalement et réelle du bord libre de la plaque

La différence entre la position réelle du bord de la plaque et la position trouvé expérimentalement, est très faible, ce qui confirme que l'écho de bord correspond à la réflexion de l'onde incidente sur le bord de la plaque [27].

Identification des échos réfléchis par la fissure :

Une fissure est un défaut non symétrique par rapport au plan médian de la plaque, l'onde incidente étant symétrique, le défaut réfléchit deux ondes l'une symétrique (S_0) et l'autre antisymétrique (A_0).

Identification de l'écho A

Connaissant la position réelle du défaut, et la vitesse de groupe du mode incident S_0 , il est possible de déterminer la position de l'écho correspondant à la réflexion de l'onde incidente sur la fissure sans conversion de mode soit le mode S_0 (temps aller et retour théorique) sur le signal temporel afin de la comparer avec la valeur lue sur l'oscilloscope (écho A).

Mode	Position réelle du défaut	Vitesse du mode S_0	Temps aller retour (écho A)	Position expérimentale du défaut
S_0	320 mm	5300 m/s	121 μ s	320 mm

Tableau III.4-3: Position mesurée expérimentalement et réelle de la fissure

La valeur expérimentale pour la position de la fissure est trouvée avec une erreur de quelques millimètre. Résultat remarquable par sa précision, vu les erreurs de lecture.

Identification de l'écho B

Le mode A_0 est plus sensible que le mode S_0 à toute modification extérieure (sa composante de déplacement transversale est plus importante à cette fréquence). Pour confirmer la présence de la conversion du mode S_0 en A_0 , nous avons posé la main sur la plaque (signal rouge figure III.4-3). On constate que les deux échos correspondant aux modes S_0 sont légèrement atténués, mais que l'écho correspondant à A_0 a totalement disparu. Ceci laisse penser que l'écho B correspond au mode de Lamb A_0 . Pour confirmer la nature de l'écho B, nous allons comparer la vitesse de groupe mesurée du mode A_0 et celle obtenue théoriquement.

Pour cela, il faut évaluer la vitesse de groupe mesurée du mode A_0 se propageant sur la plaque testée. L'onde correspondant à l'écho B parcourt deux fois la distance $d = 32\text{cm}$, une fois avec la vitesse du mode S_0 (aller), une fois réfléchi sur le défaut (retour), elle est convertie en A_0 . On en déduit la vitesse retour du mode (A_0):

$$V_{A_0} = \frac{V_{S_0} \times d}{\Delta t \times V_{S_0} - d} \quad \Delta t : \text{Temps de transit de l'écho B} = 150 \mu\text{s}$$

Mode	Temps de transit de l'écho B	Vitesse de groupe théorique du mode A_0	Vitesse de groupe mesuré du mode A_0
S_0 converti en A_0	150 μs	3400 m/s	3570 m/s

Tableau III.4-4 : Vitesse de groupe du mode A_0 généré par conversion du mode incident sur la fissure

L'écho B a été identifié comme étant, le mode de flexion A_0 , réflexion du mode de compression S_0 sur la fissure. La présence de l'écho B sur le signal temporel, permet de confirmer la présence d'une fissure sur la plaque. Cette propriété de conversion des ondes de Lamb, sur des défauts non symétriques, permet de savoir que la plaque est en train de se fissurer et qu'il faut intervenir rapidement.

Sur une structure plane, des défauts rectangulaires peuvent apparaître sous forme de fissures ou de fentes orientées de manière aléatoire. Dans ce qui suit, nous essayons d'utiliser les ondes guidées (mode de Lamb S_0) pour détecter et localiser un défaut rectangulaire quelle que soit son orientation.

III.4-3 Détection et localisation d'une fente d'orientation quelconque

On s'intéresse à l'interaction du mode S_0 avec des fentes de différentes orientations. Nos échantillons sont des plaques rectangulaires d'aluminium d'épaisseur 0.6 mm. On utilise le même transducteur pour l'émission et la réception (méthode écho mode). Le transducteur utilisé est piézoélectrique de fréquence centrale 2 MHz.

Sur l'échantillon nous avons usiné 3 fentes de dimensions égales mais d'orientation différentes. Nous avons façonné des fentes de longueur 2 cm et de largeur 1 mm. La première fente est orientée perpendiculairement au faisceau acoustique (orientation 90°), la seconde est orientée à 30° et la troisième à 45° .

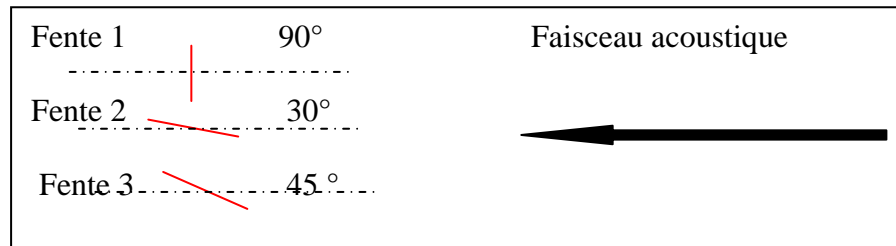


Figure III.4-4: Plaque avec trois fentes d'orientations différentes

On s'intéresse à l'interaction du mode S_0 avec des fentes orientées différemment par rapport au faisceau acoustique incident. La première fente étudiée est la fente 1, dont l'orientation est perpendiculaire au faisceau acoustique. On remarque que lorsque l'onde incidente rencontre la fente 1, il apparaît un écho supplémentaire qui indique la présence d'un défaut. La position de cet écho nous renseigne sur l'emplacement du défaut.

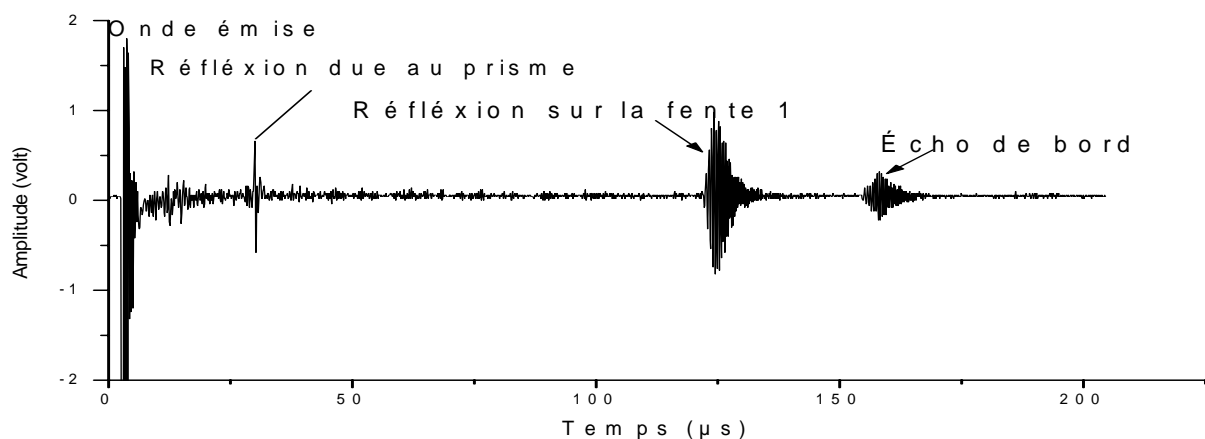


Figure III.4-5: Signaux temporels recueillis par le transducteur lors de la réflexion du mode S_0 par la fente 1

Le signal temporel reçu sur l'oscilloscope contient trois échos. Le premier correspond à la réflexion de l'onde à l'intérieur du prisme, le second à la réflexion sur la fente, et le troisième à la réflexion sur le bord libre de la plaque.

Par contre, lorsque le mode S_0 rencontre les fentes orientées de 30° et 45° par rapport au faisceau acoustique, il n'apparaît aucun écho supplémentaire alors que les fentes sont présentes. On remarque cependant une baisse d'amplitude de l'écho provenant du bord libre de la plaque.

On a alors procédé à un balayage vertical (figure III.4-6) autour de la fente 3 d'orientation 45° et on relève les trois signaux correspondant aux trois positions du transducteur.

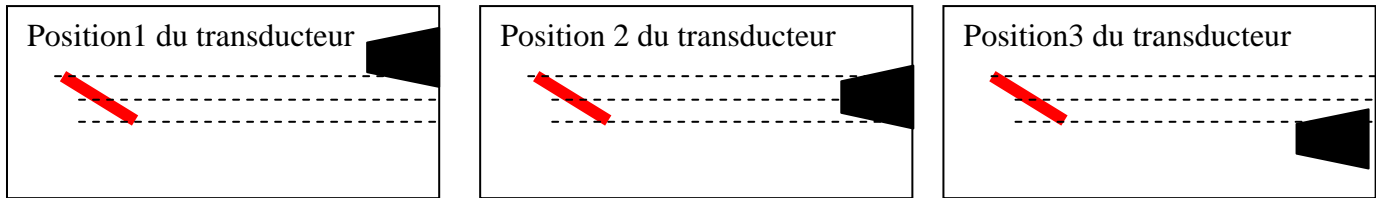


Figure III.4-6: Position du transducteur lors du balayage vertical: fente de 45° et 30°

On constate que l'amplitude de l'écho provenant de la réflexion du bord libre de la plaque diminue lorsque le transducteur est à la position 2 en face de la fente :

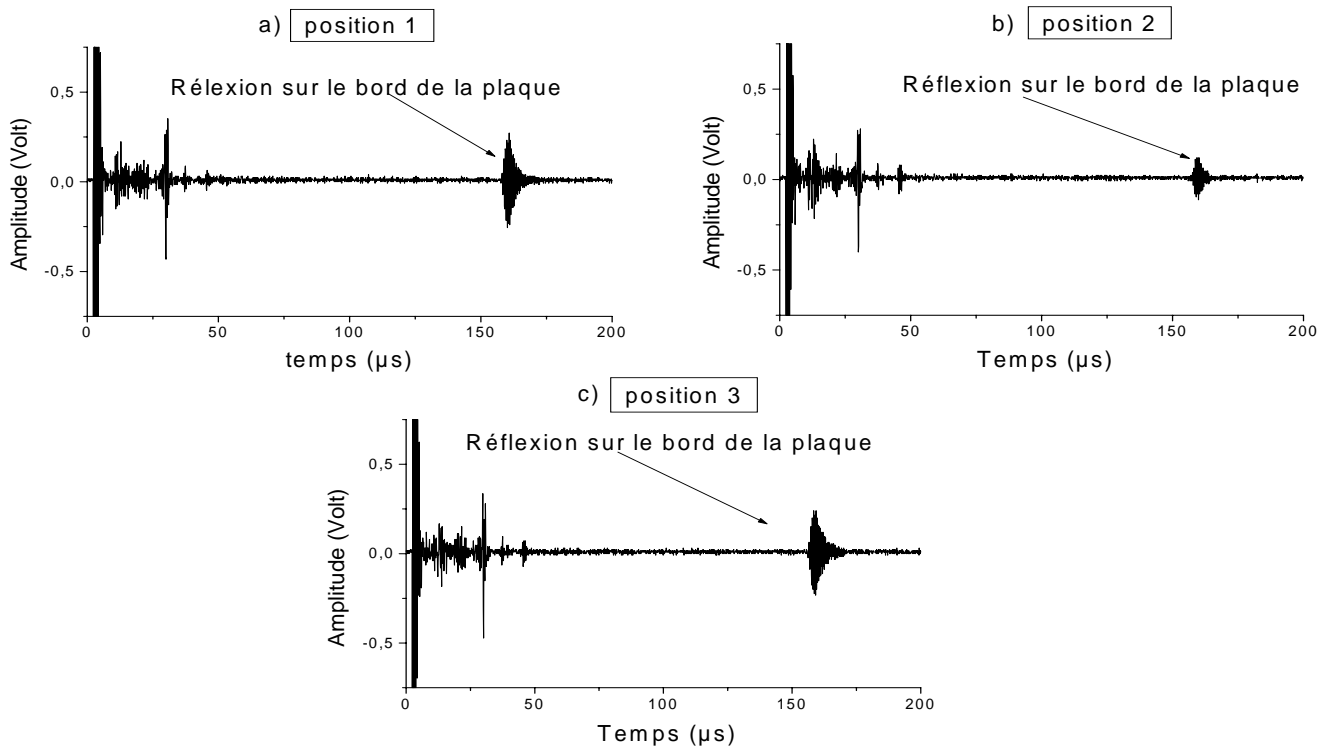


Figure III.4-7: Echos provenant de la réflexion sur le bord de la plaque pour les différentes positions du transducteur lors du balayage vertical
a) position 1 b) position 2 c) position 3

Lors d'un balayage vertical, si l'amplitude du signal réfléchi par le bord libre de la plaque diminue brusquement, nous pouvons supposer la présence de fentes dont

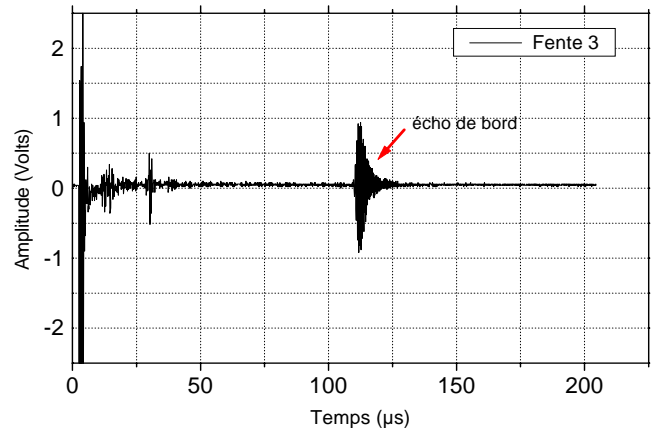
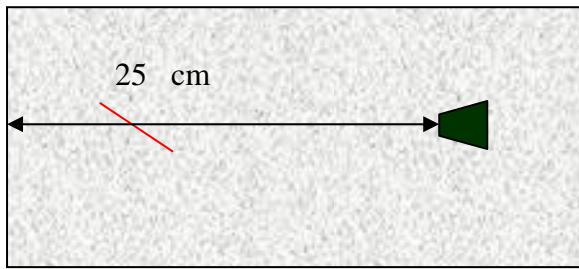


Figure III.4-9: Position initiale du transducteur . Signal temporel reçu pour cette position du transducteur

A la même position on commence la rotation du transducteur. Lorsque l’angle est égal à 45° il apparaît un écho d’amplitude importante, cet écho correspond à la réflexion de l’onde incidente sur la fente. La position de cet écho nous donne la distance entre la fente et le transducteur. On remarque que lorsque le transducteur n’est plus perpendiculaire au bord de la plaque l’écho de celle-ci n’apparaît plus. Le signal temporel, nous permet de localiser la fente.

Mode	Position réelle du défaut	Temps de transit	Position expérimentale du défaut
S ₀	190 mm	70.5µs	185 mm

Tableau III.4-5 Position mesurée expérimentalement et réelle de la fente 3

La valeur expérimentale pour la position du défaut est trouvée avec une erreur d’environ 5 mm

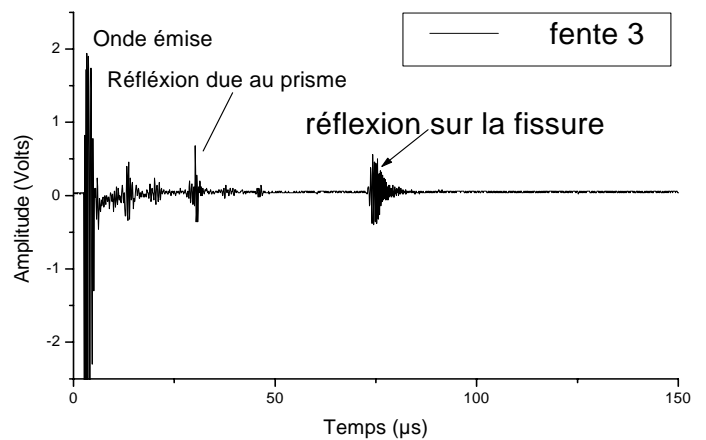
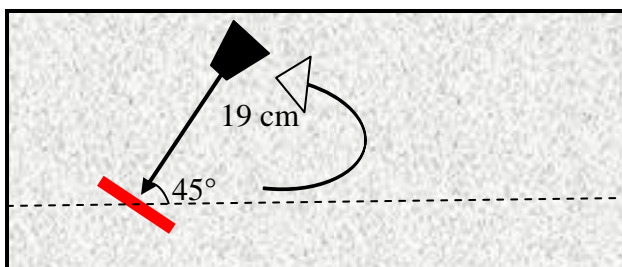


Figure III.4-10: Rotation de 45° du transducteur. Signal temporel reçu pour cette position du transducteur

On tourne le transducteur d'un angle quelconque, le transducteur ne reçoit alors aucun signal. Il est donc possible de détecter et de localiser des fentes de directions quelconques.

III.4-4 Détection et localisation de fentes d'orientations diverses recouvertes d'une bande adhésive

Dans un second temps, les fentes sont recouvertes par des bandes adhésives, on tente à nouveau de les détecter et de les localiser.

- La première fente étudiée est la fente **1** d'orientation 90° . Le transducteur génère une onde incidente (mode S_0) qui est réfléchiée par la fente puis par le bord libre de la plaque. La fente **1** d'orientation 90° recouverte par la bande adhésive est localisée et détectée par la présence d'un écho provenant de la réflexion de l'onde incidente sur la fente. On compare les résultats obtenus pour une fente visible et pour une fente cachée par une bande adhésive.

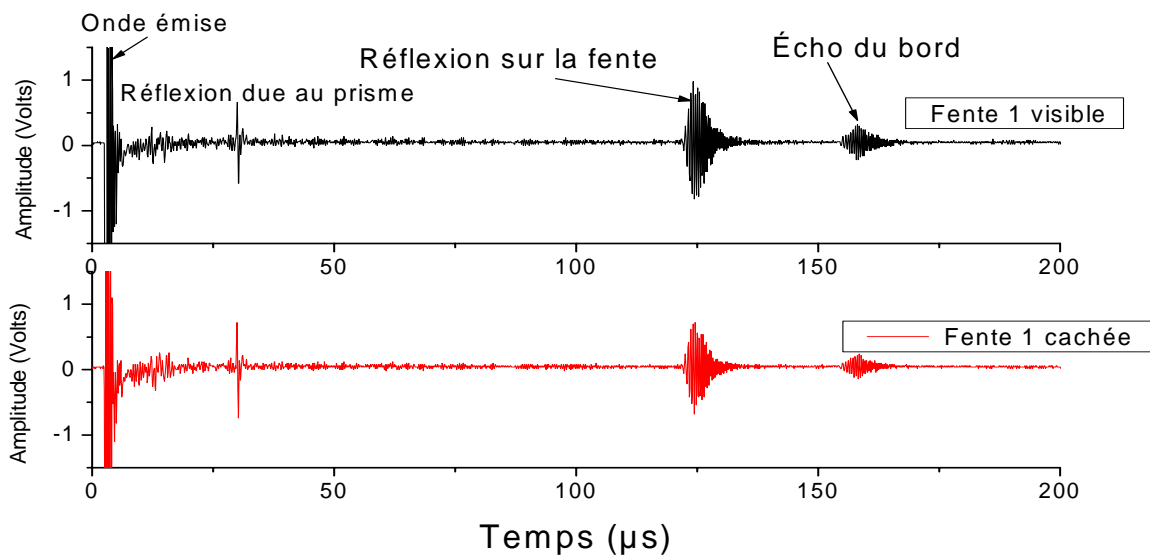


Figure III.4-11: Signaux temporels recueillis par le transducteur lors de la réflexion du mode S_0 sur la fente **1** d'orientation 90° a) plaque libre (signal noir) b) plaque recouverte par une bande adhésive (signal rouge)

On constate que les résultats obtenus pour une plaque libre et pour une plaque recouverte, coïncident parfaitement. Il est donc possible de détecter des fentes dont

l'orientation est perpendiculaire au faisceau acoustique, visibles ou cachées sous une bande adhésive.

- Pour la fente **2** on relève deux signaux l'un pour la position initiale du transducteur (faisceau acoustique perpendiculaire au bord de la plaque) et le second après une rotation de 60° du transducteur. Comme prévu sur le premier signal (figure III.4-13a), on trouve l'écho provenant de la réflexion du bord libre de la plaque, cependant l'écho provenant de la réflexion sur la fente n'est pas visible. Sur le signal reçu après la rotation du transducteur de 60° (figure III.4-13b) on remarque la présence d'un écho. La position de cet écho sur le signal temporel lu sur l'oscilloscope nous donne la position de la fente. Les signaux obtenus pour une fente visible et une fente recouverte par une bande adhésive sont similaires, on remarque cependant une baisse de l'amplitude lorsque la fente est recouverte par un adhésif. On peut alors confirmer que l'écho obtenu sur le signal correspondant à une fente cachée est bien la réflexion de l'onde incidente sur la fente **2**.

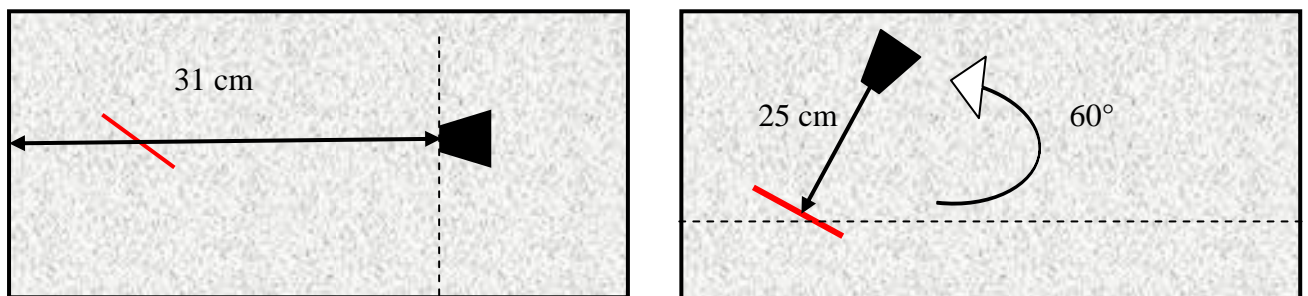


Figure III.4-12: Position initiale du transducteur

Position du transducteur après une rotation de 60°

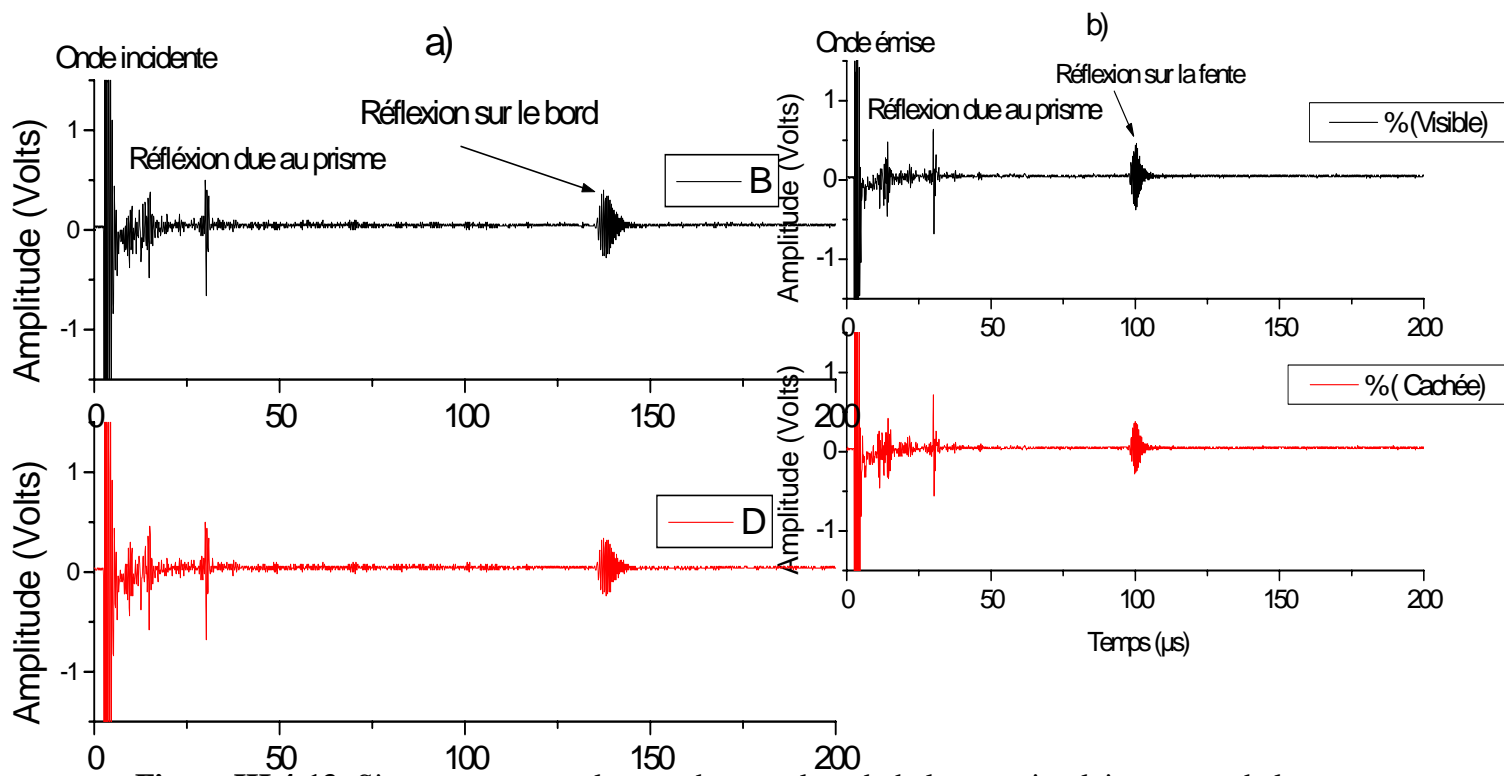


Figure III.4-13: Signaux reçus par le transducteur lors du balayage circulaire autour de la fente 2.

- a) Position initiale du transducteur c'est-à-dire perpendiculaire au bord de la plaque
 b) Signaux obtenus après une rotation du transducteur de 60°

- On procède de manière similaire pour la fente 3 d'orientation 45° . Lorsque le transducteur est en position initiale, la présence de la fente n'est pas déterminée directement sur le signal temporel. Après une rotation du transducteur de 45° on obtient un signal où apparaît un écho d'amplitude importante. Les résultats sont comparés avec ceux d'une fente visible; les échos provenant des différentes réflexions coïncident. D'où la confirmation que l'écho d'amplitude importante obtenu pour le signal temporel de la fente cachée est celui de la réflexion de l'onde incidente sur la fente. La présence et la position de cet écho nous permettent de détecter et de localiser la fente. On remarque toujours une baisse de l'amplitude pour les signaux provenant des fentes cachées.

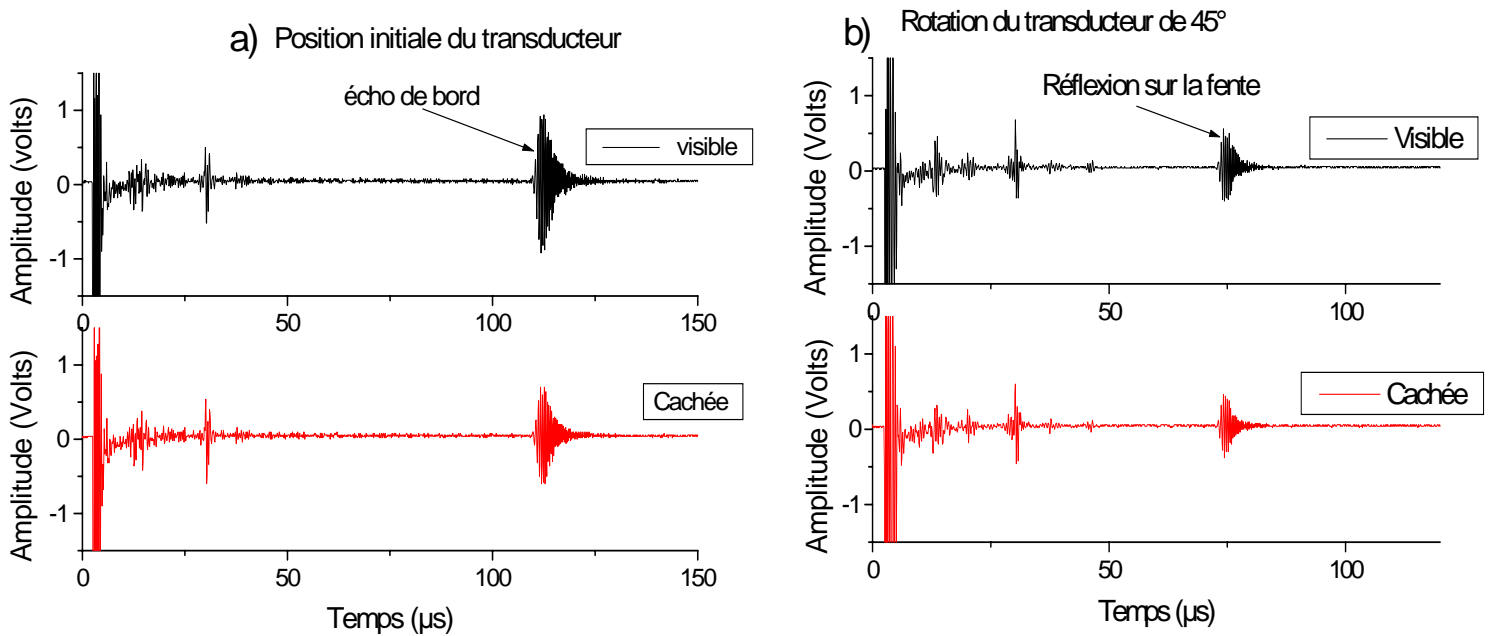


Figure III.4-14: Signaux reçus par le transducteur lors du balayage circulaire de 45°, autour de la fente **3** a) Position initiale du transducteur b) Signaux obtenus après rotation du transducteur.

Il est donc possible de détecter et de localiser des fentes recouvertes par des bandes adhésives d'orientation quelconque en utilisant la propagation des ondes de Lamb dans une plaque. Les fentes perpendiculaires au faisceau acoustique sont détectées et localisées directement par la lecture de la position de l'écho réfléchi par la fente. Pour les fentes dont l'orientation n'est pas perpendiculaire au faisceau acoustique, il est nécessaire de balayer verticalement la plaque. Lors d'une baisse brutale de l'amplitude de l'écho, réfléchi par le bord de la plaque, on peut supposer la présence d'un défaut. Le balayage circulaire autour de cette position confirme la présence ou l'absence de défaut.

Les résultats précédents confirment qu'il nous ait possible d'utiliser les ondes de Lamb pour détecter et localiser des défauts rectangulaires visibles ou invisibles dans des plaques, quelle que soit leur orientation par rapport au faisceau acoustique. Nous souhaitons à présent estimer leur longueur, en utilisant le mode de Lamb S_0 .

III.4-5 Mesure de la longueur d'une fente

III.4-5-a Balayage horizontal le long d'un défaut

On désire déterminer la longueur d'une fente rectangulaire en utilisant la réflexion du mode S_0 lorsqu'il rencontre une discontinuité. Pour ce faire, nous utilisons un balayage horizontal manuel d'un pas de 0.5 cm le long de la fente. On remarque alors que l'amplitude de l'écho réfléchi par la fente commence à augmenter puis à diminuer lors des différentes positions du transducteur. On constate que la variation de cette amplitude varie avec la taille de la fente, d'où l'idée d'essayer de mesurer la longueur d'une fente en utilisant la propagation du mode S_0 sur une plaque d'aluminium.

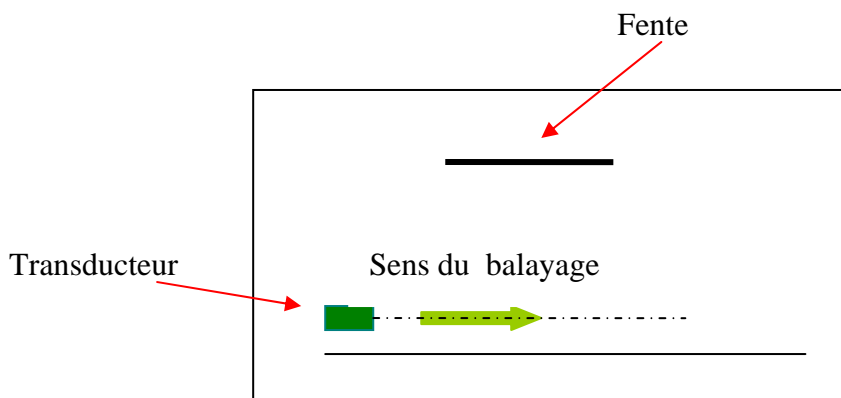


Figure III.4-15: Balayage horizontal le long de la fente

Trois positions du transducteur face à la fente nous intéressent particulièrement. La première lorsque le transducteur est à moitié face au défaut; la deuxième lorsque le transducteur est totalement face à la fente et la troisième lorsque le transducteur est à nouveau à moitié face à la discontinuité. Les différentes positions sont représentées ci-dessous :

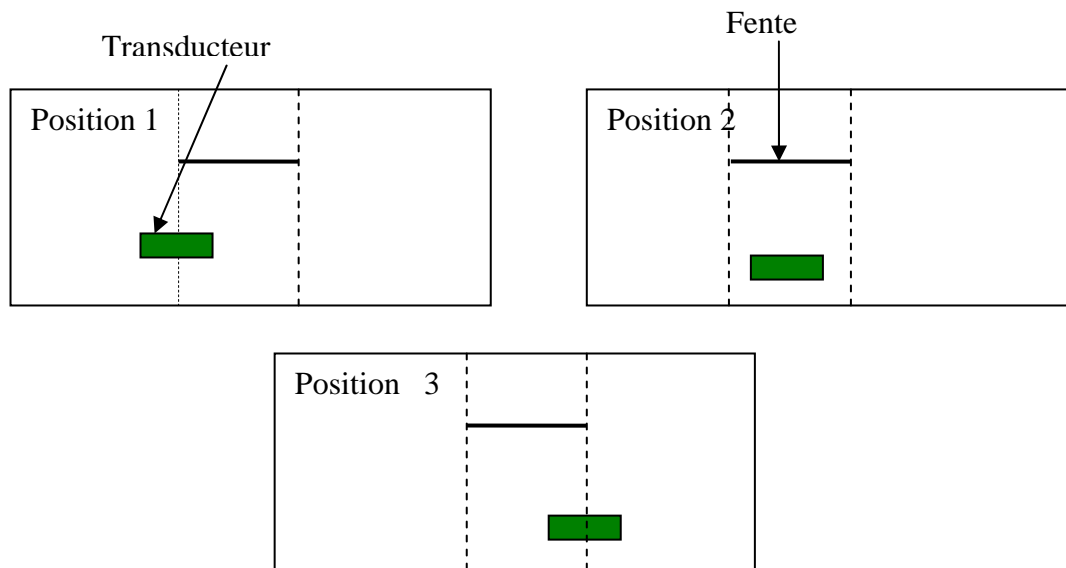


Figure III.4-16: Balayage horizontal du transducteur face au défaut

Pour la position 2 l'écho réfléchi par la fente est maximal. Pour les positions 1 et 3 la moitié du faisceau acoustique est réfléchi par la fente et l'autre moitié par le bord libre de la plaque. Ainsi, l'amplitude de l'écho provenant de la réflexion sur la fente est égale à la moitié de l'amplitude maximale. Lorsque le transducteur passe de la position 1 à 3 il aura balayé la longueur de la fente. On pourra ainsi déterminer la longueur de celle-ci. Pour cela, on doit tracer les différentes amplitudes de l'écho réfléchi par la fente et déterminer les positions du transducteur pour lesquelles l'amplitude est égale à la moitié de l'amplitude maximale.

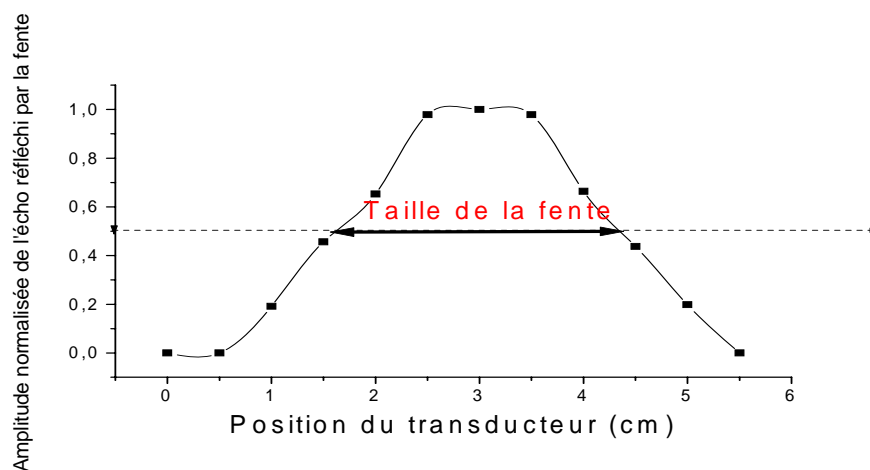


Figure III.4-17: Amplitude normalisée de l'écho réfléchi sur la fente, pour les différentes positions du transducteur le long de la fente

III.4-5-b Mesure de la longueur d'une fente visible

La plaque d'aluminium utilisée est rectangulaire de côté 20 cm x 26 cm, sur laquelle, nous avons créé une fente rectangulaire de longueur 2 cm



Figure III.4-18: Plaque d'aluminium utilisée

Le transducteur piézo-électrique est placé à une distance de 14 cm du défaut et 20 cm du bord, puis nous procédons à un balayage manuel d'un pas de 5 mm. Les conditions expérimentales sont regroupées dans le tableau suivant :

Mode incident	Produit fréquence x épaisseur MHz.mm	Vitesse de groupe du mode incident (m / s)	Temps aller retour du signal réfléchi par la fente (μ s)	Temps aller-retour du signal Réfléchi par le bord de la plaque (μ s)
S ₀	1.5	5060	55.33	75.1

Tableau III.4-6 : Récapitulatif des conditions expérimentales

Pour chaque position du transducteur, lors du balayage horizontal, nous relevons le signal temporel. L'amplitude des différents échos, varie en fonction de la position du transducteur. Nous étudions les variations de l'écho réfléchi par le défaut.

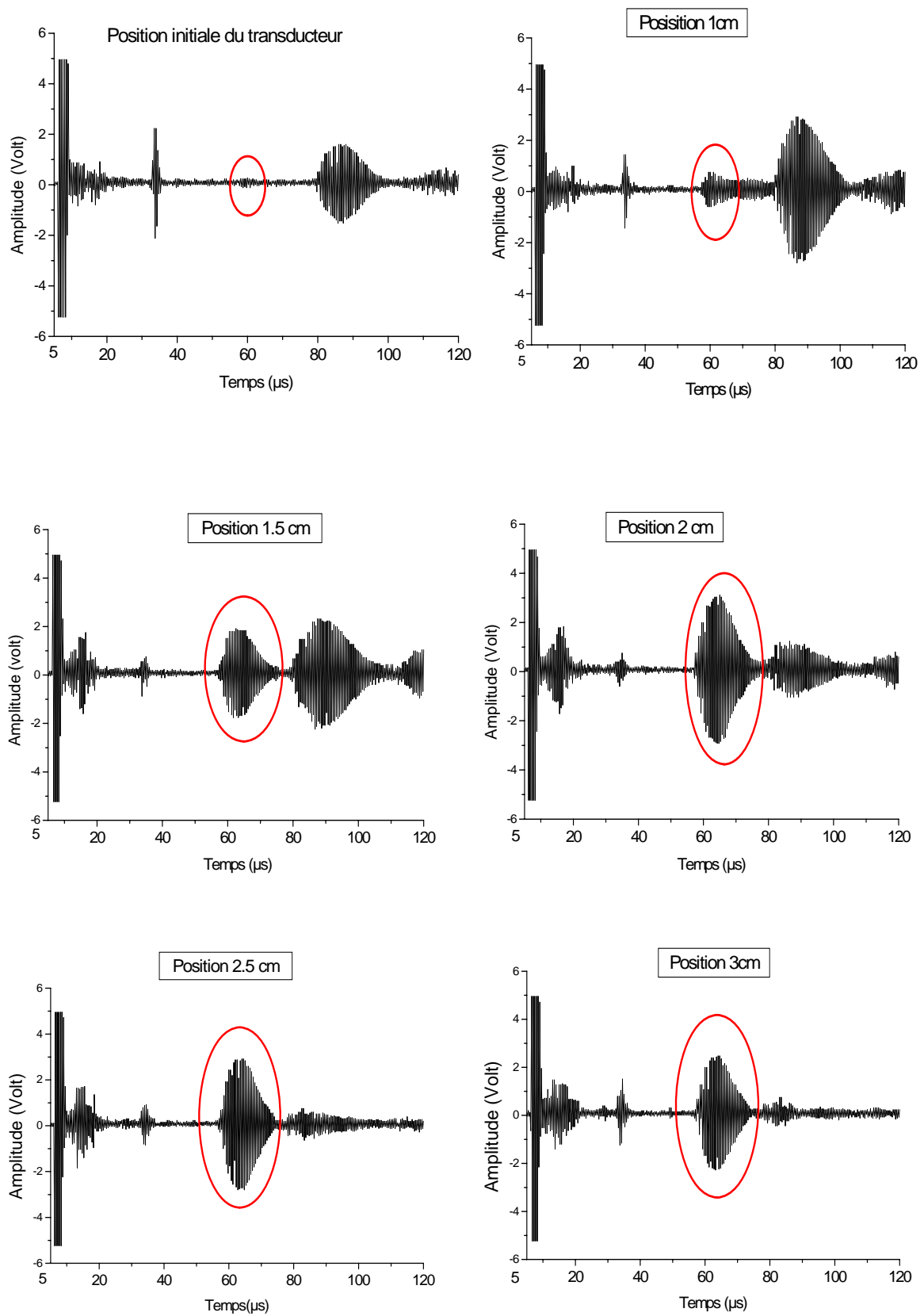


Figure III.4-19 a: Échos réfléchis par la fente et le bord de la plaque pour les différentes positions du transducteur

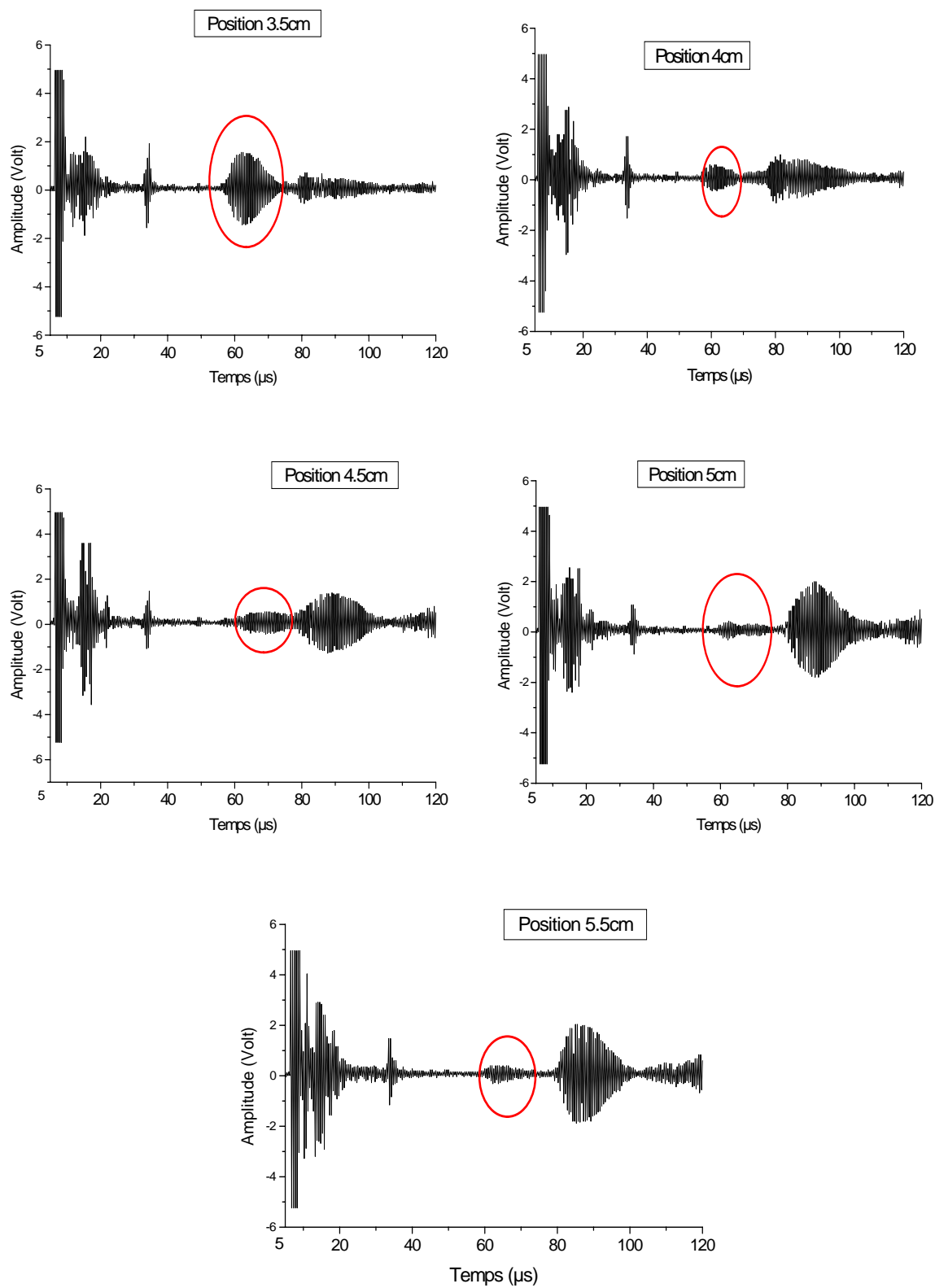


Figure III.4-19 b: Échos réfléchis par la fente et le bord de la plaque pour les différentes positions du transducteur

Nous relevons les amplitudes de l'écho provenant de la réflexion sur la fente pour chaque position du transducteur. L'amplitude est normalisée en la divisant par l'amplitude maximale réfléchi par la discontinuité.

Pour estimer la longueur du défaut, on représente l'amplitude normalisée du signal réfléchi par celui-ci, pour chaque position du transducteur (avec un pas de 0.5 cm). En effet, lorsque le transducteur est aux positions 1 et 3, le signal réfléchi par la fente a une amplitude égale à la moitié de l'amplitude maximale soit, une diminution de -6dB. Or lorsque le transducteur est passé de la position 1 à la position 3, il a balayé la longueur de la fente. En lisant la différence de position du transducteur sur l'axe des abscisses on en déduit ainsi une estimation de la longueur du défaut. Le premier défaut mesuré est une fente de longueur 2 cm :

Longueur de la fente réelle	Valeur mesurée expérimentale
2 cm	2.16 cm

Tableau III.4-6b : Estimation de la longueur d'une fente de 2 cm

On constate que la valeur expérimentale est proche de la mesure réelle de l'entaille (la différence est d'environ 1.6 mm). Les différentes amplitudes normalisées des échos réfléchis par la fente sont représentées ci-dessous.

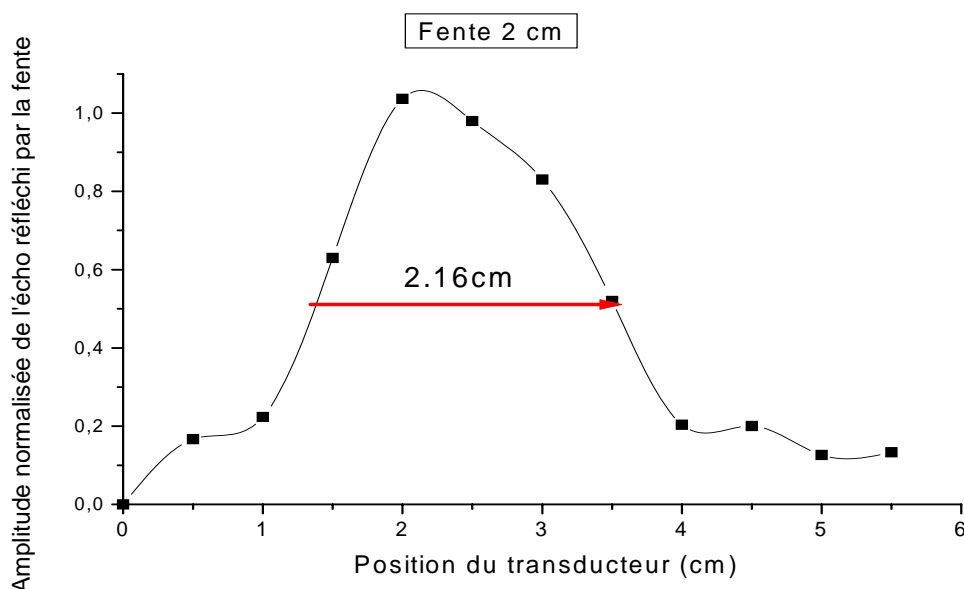


Figure III.4-20: Amplitude normalisée de l'écho réfléchi par la fente, pour les différentes positions du transducteur pour une fente de longueur 2 cm

On a renouvelé l'expérience sur des plaques d'aluminium identiques pour des fentes de tailles différentes. On a créé 5 fentes de largeur identiques et de longueur différentes 3 cm; 2.5 cm ; 1.5 cm; 1 cm et 0.5 cm.

Mode	Produit Fréquence épaisseur (MHz.mm)	Distance fente transducteur (cm)	Distance du transducteur au bord de la plaque (cm)
S ₀	1.5	14	20

Tableau III.4-7 Récapitulatif des conditions expérimentales

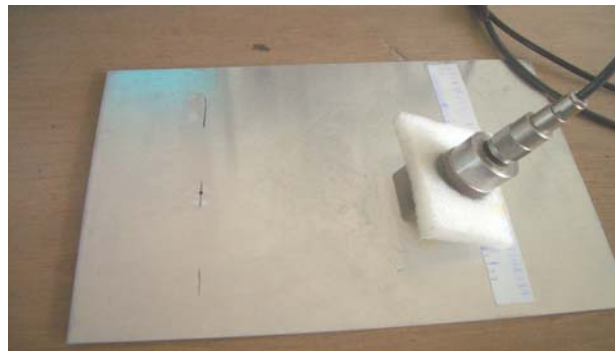


Figure III.4-21: Transducteur utilisé lors du balayage le long de la fente

Pour réduire les erreurs de mesure d'amplitude du signal réfléchi par la fente pour chaque position du transducteur nous avons renouvelé plusieurs fois le balayage le long d'une même fente. Puis nous avons estimé la longueur de la défectuosité, sur la courbe représentant la moyenne de tous les balayages le long de la fente.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Longueur réelle de la fente en (cm)	Longueur expérimentale de la fente visible en (cm)
3	3.05
2.5	2.61
2	2.16
1.5	1.7
1	1.7
0.5	1.7

Tableau III.4-8 : Longueur réelle de la fente et longueur de la fente mesurée expérimentalement

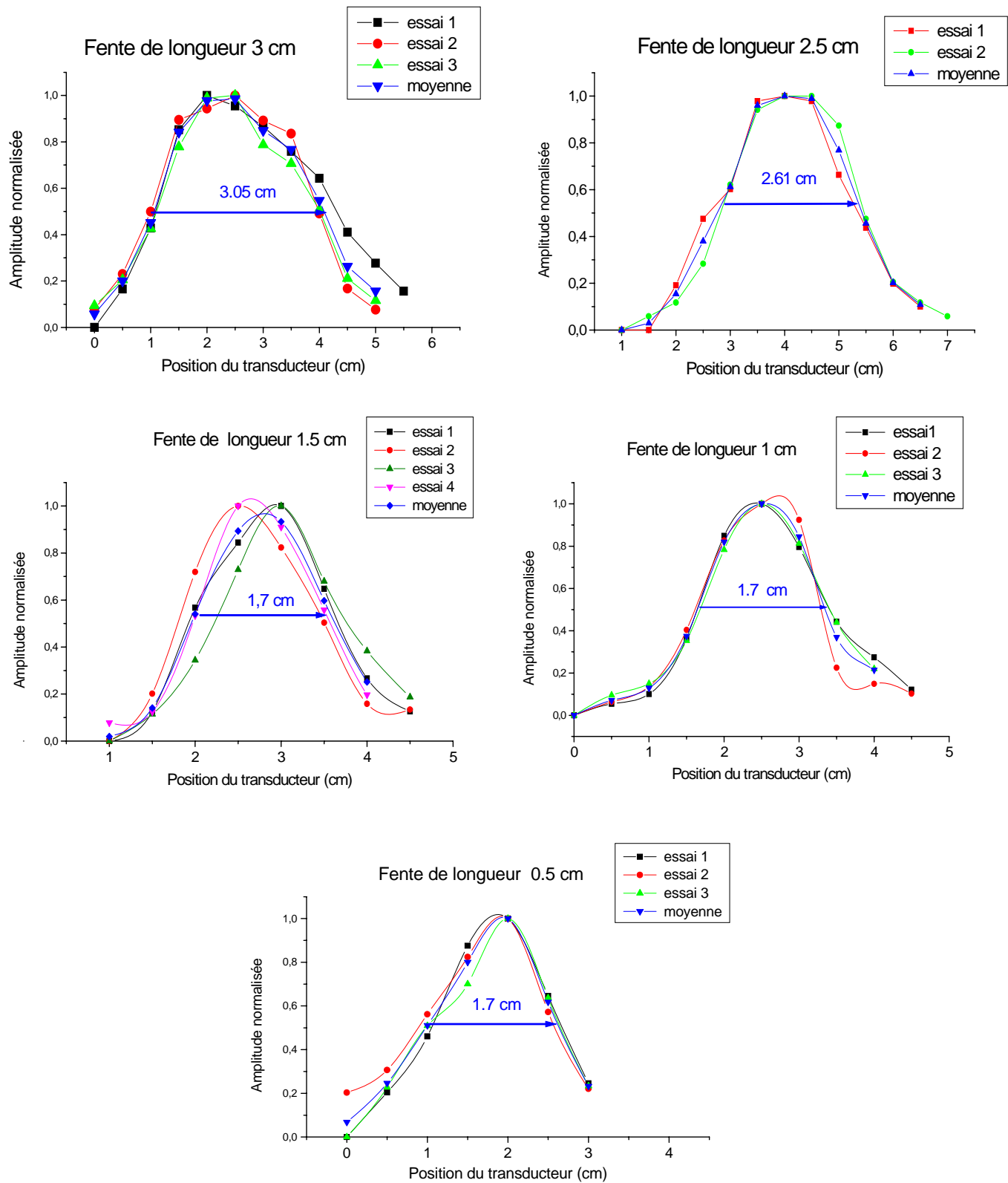


Figure III.4-22: Amplitude normalisée de l'écho réfléchi par la fente pour différentes positions du transducteur lors des balayages le long des différentes fentes

La méthode utilisée pour estimer la longueur d'une fente par un balayage parallèlement à celle-ci, nous donne des résultats corrects pour les fentes de longueur 3 cm ; 2.5 cm ; 2 cm et 1.5 cm. En effet, la différence entre les longueurs mesurées expérimentalement et les longueurs réelles est de l'ordre du millimètre. Cependant on remarque que l'erreur augmente lorsque la taille du défaut diminue. Car il faut tenir compte du diamètre du transducteur utilisé. Dans nos expériences nous avons utilisé un transducteur piézo-électrique de diamètre 3 cm. On remarque alors que le balayage horizontal ne permet pas de dimensionner des fentes dont la longueur est inférieure à la moitié de la taille du diamètre du transducteur. Cette méthode n'est donc pas adaptée pour ces deux fentes.

III.4-5-c Mesure de la longueur d'une fente recouverte d'une bande adhésive

Les premières mesures ont été faites pour des fentes visibles, nous avons pu ainsi comparer la longueur réelle de la fente et celle déterminée expérimentalement. Puis, nous avons recouvert les différentes fentes avec une bande adhésive afin de renouveler l'expérience. Nous constatons une baisse de 40 à 50 % de l'amplitude des échos provenant des différentes réflexions. On remarque le même phénomène si on pose une main ou un liquide sur la plaque. Pour une même position du transducteur nous avons relevé les échos pour une plaque libre et pour une plaque recouverte par une bande adhésive.

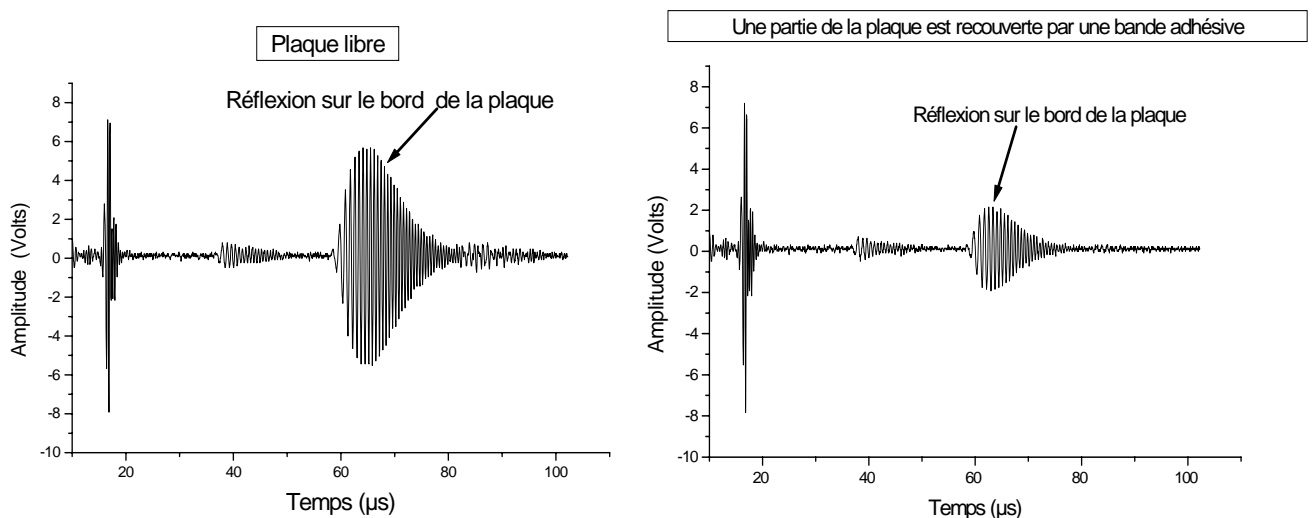


Figure III.4-23: Signaux temporels obtenus sur une plaque libre et sur une plaque recouverte d'une bande adhésive

Pour chaque fente nous reproduisons le même balayage horizontal le long du défaut, et le même calcul de longueur. Les courbes suivantes représentent l'amplitude normalisée de l'écho réfléchi par la fente lorsque celle-ci est caché sous une bande adhésive.

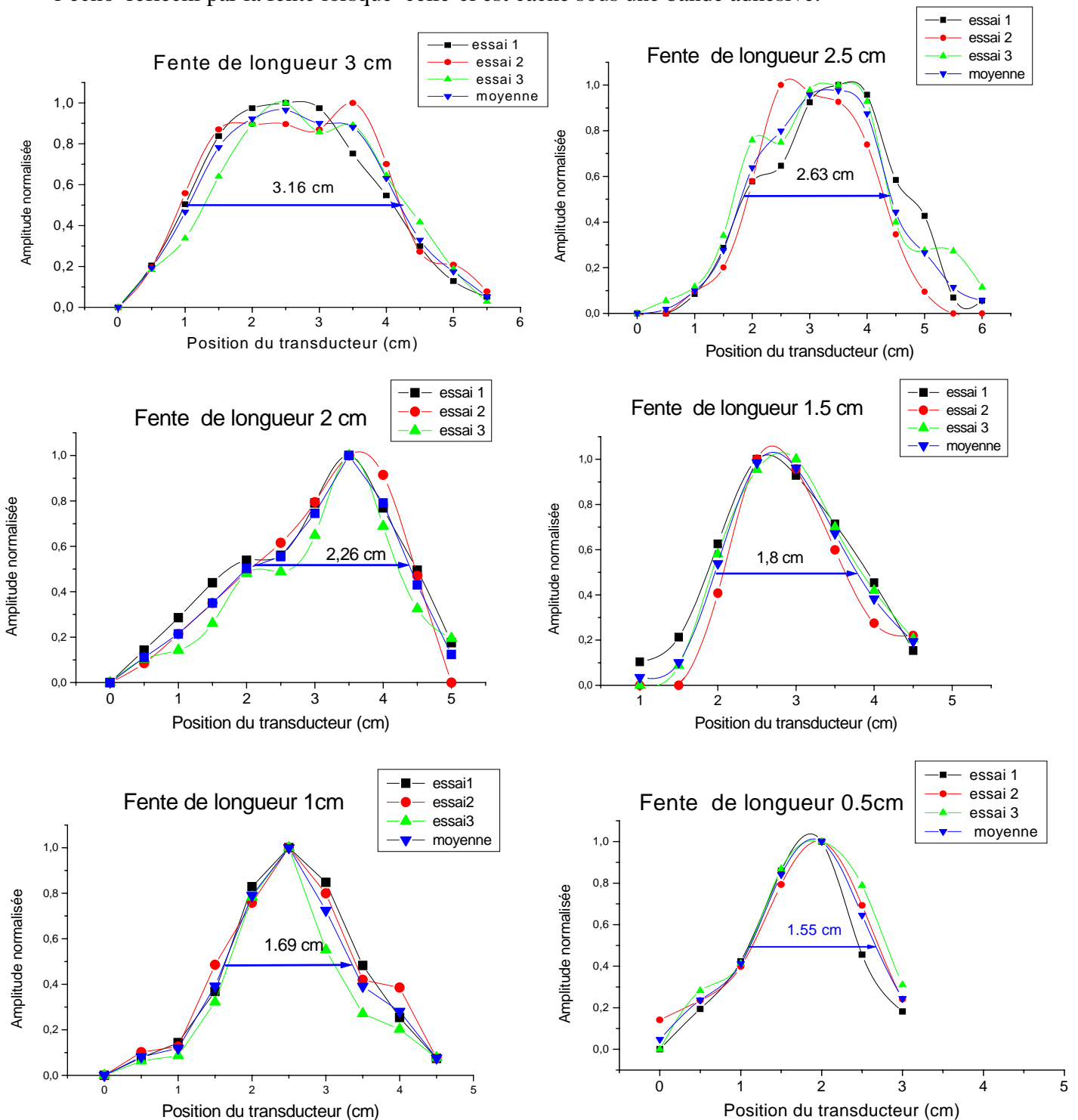


Figure III.4-24: Amplitude normalisée de l'écho réfléchi par la fente pour différentes positions du transducteur lors des balayages le long des différentes fentes recouvertes d'une bande adhésive

Les résultats obtenus pour une plaque libre et pour une plaque recouverte d'une bande adhésive sont donnés dans le tableau suivant:

Longueur réelle de la fente en (cm)	Longueur expérimentale de la fente visible en (cm)	Longueur expérimentale de la fente invisible en (cm)
3	3.05	3.16
2.5	2.61	2.63
2	2.16	2.26
1.5	1.7	1.8

Tableau III.4-9: Longueur de la fente visible et invisible mesurée expérimentalement

On constate que les mesures des longueurs des fentes, obtenues grâce au balayage parallèle à celles-ci, sont proches des valeurs réelles des différentes entailles. La différence entre les longueurs réelles et les longueurs mesurées expérimentalement, des fentes invisibles est minimale (de l'ordre de quelques millimètres). Il est donc possible d'estimer, de manière assez précise, la longueur d'une fente visible ou recouverte d'une bande adhésive.

Cependant, les mesures de longueurs pour les fentes invisibles sont généralement moins précises que celles des fentes visibles (voir tableau). Cela s'explique par le fait que les signaux temporels obtenus lors du balayage du transducteur parallèlement à la fente invisible, sont atténués par la présence de la bande adhésive, il est alors plus difficile de mesurer le maximum d'amplitude du signal réfléchi par la fente cachée.

L'étude précédente, montre qu'il est tout à fait possible de détecter et de localiser des fentes de tailles différentes visibles ou invisibles. Le transducteur utilisé pour nos expériences étant de diamètre 3 cm, nous avons réussi à estimer la longueur des fentes de tailles supérieures, à la moitié du diamètre du transducteur. Nous nous intéressons ensuite à un défaut rectangulaire non symétrique par rapport au plan médian de la plaque: une fissure. Les graphes ci-dessous représentent les courbes des moyennes, tracées pour une même fente visible puis invisible.

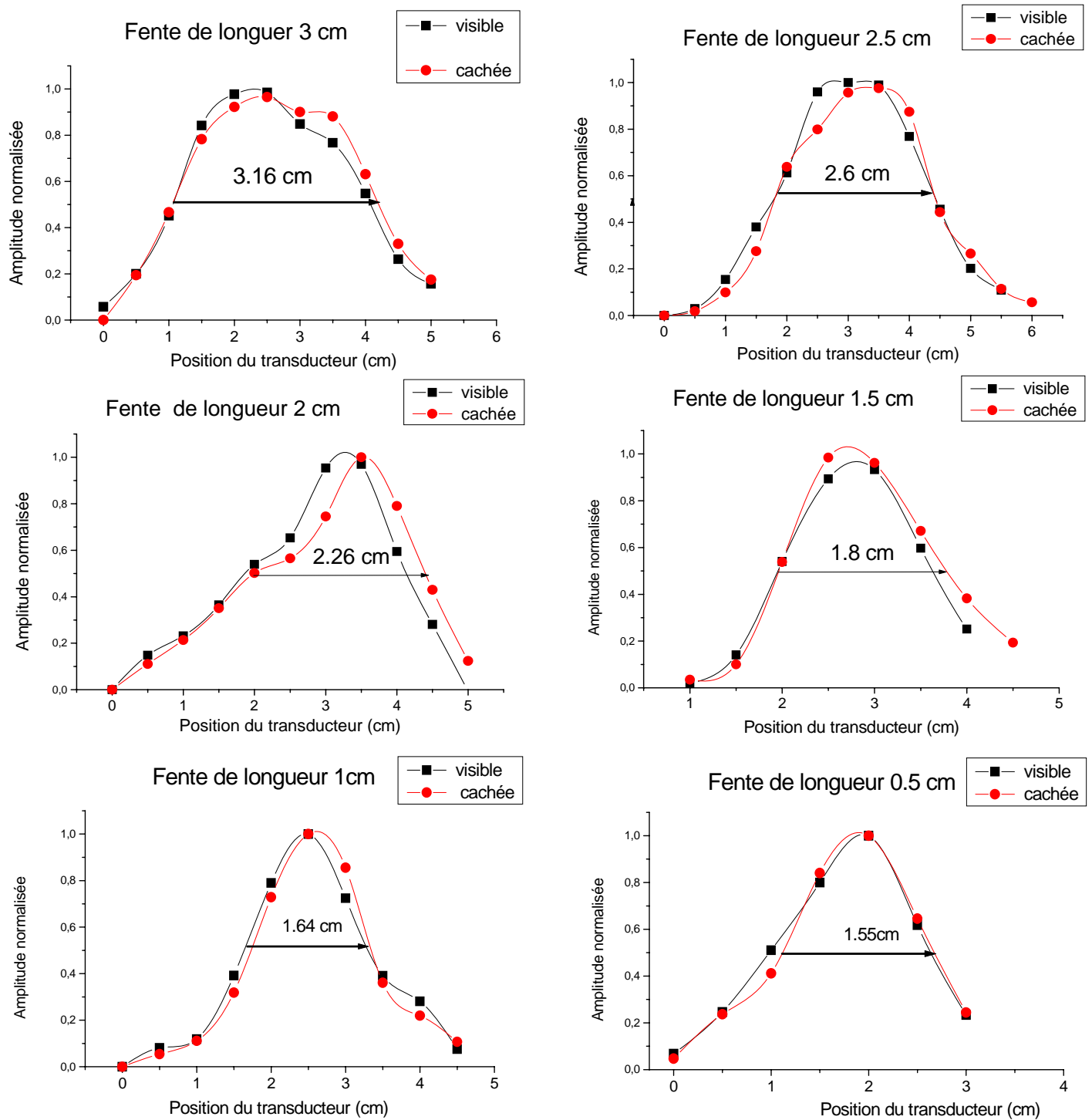


Figure III.4-25: Amplitude normalisée du signal réfléchi par la fente visible puis invisible lors du balayage horizontal.

III.4-6 Mesure de la longueur d’une fissure

Sur les même plaques d’aluminium nous avons usiné six fissures de longueurs différentes : 0.5 cm ; 1 cm ; 1.5 cm ; 2 cm ; 2.5 cm et 3 cm et de profondeur 50%. On a renouvelé la même expérience pour estimer leur longueur, pour chaque fente dans un premier

temps visible puis recouvertes par une bande adhésive. Les courbes suivantes représentent les amplitudes maximales normalisées de l'écho réfléchi par la fissure (visible et invisible) pour les différentes positions du transducteur.

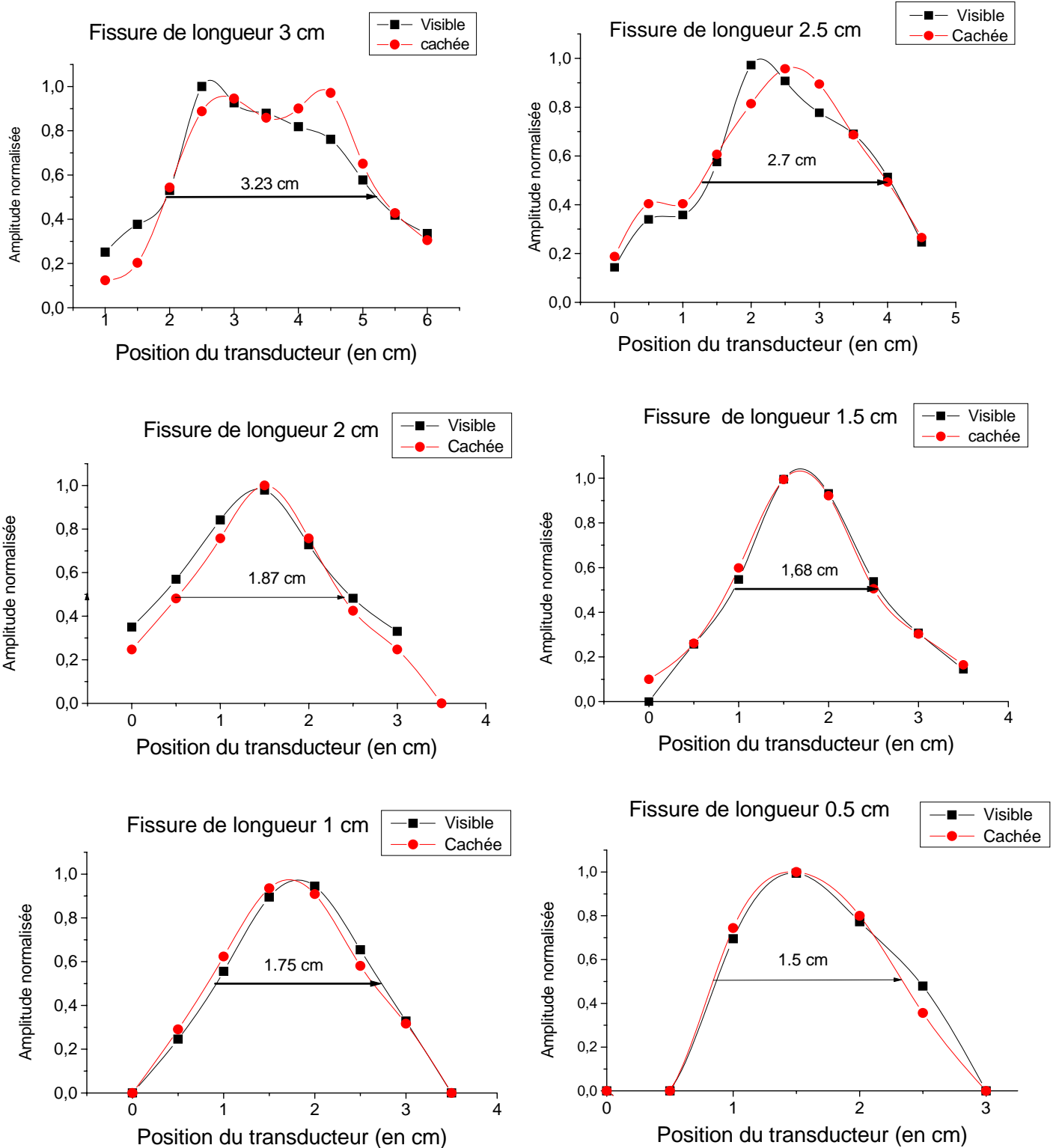


Figure III.4-26: Amplitudes normalisées du signal réfléchi par la fissure visible puis invisible lors du balayage horizontal.

On a regroupé tous les résultats dans le tableau suivant

Longueur réelle de la fissure en (cm)	Longueur expérimentale de la fissure visible en (cm)	Longueur expérimentale de la fissure invisible en (cm)
3	3.23	3.3
2.5	2.6	2.7
2	2.1	1.87
1.5	1.6	1.68

Tableau III.4-10: Longueur de la fissure visible et invisible mesurée expérimentalement

L'étude précédente, montre qu'il est tout à fait possible de détecter et de localiser des fentes de tailles différentes visibles ou invisibles. Le transducteur utilisé pour nos expériences étant de diamètre 3 cm, nous avons réussi à estimer la longueur des fentes de tailles supérieures, à la moitié du diamètre du transducteur. Nous nous intéressons ensuite à un défaut rectangulaire non symétrique par rapport au plan médian de la plaque: une fissure

La différence entre les longueurs réelles et les longueurs mesurées expérimentalement des fissures visibles ou invisibles est faible, elle est de l'ordre de quelques millimètres. On a pu ainsi, estimer la longueur d'une fissure recouverte d'une bande adhésive. On constate cependant que comme pour l'estimation de la longueur d'une fente, on ne peut utiliser cette méthode pour mesurer des fissures dont la taille est inférieure à 1.5 cm (1 cm ou 0.5 cm).

Le contrôle par ondes de Lamb permet donc de détecter de localiser et de dimensionner des défauts plans visibles, ou cachés sous une bande adhésive. Un autre défaut caché peut poser problème c'est le défaut situé sur la face interne (verso) de la plaque. En effet, les deux faces des structures planes ne sont pas toujours directement accessibles.

Comme les ondes de Lamb mettent en vibration la totalité de l'épaisseur de la plaque, nous les utilisons pour inspecter la face interne (verso) des plaques.

III.4-7 Détecter, localiser et dimensionner une fissure sur la surface interne(verso) de la plaque

Nous utilisons une plaque rectangulaire d'aluminium, d'épaisseur 0.6 mm, sur laquelle on a délibérément créé sur une des faces, une fissure de profondeur 50 %, de longueur 2 cm et d'épaisseur 1 mm, l'autre face de la plaque est laissée saine. Le transducteur utilisé est un transducteur piézo-électrique de fréquence centrale 2 Mhz. Le transducteur est placé sur la face saine de la plaque, le but de l'expérience est de vérifier, si les ondes de Lamb peuvent détecter un défaut situé sur la face interne de l'échantillon.

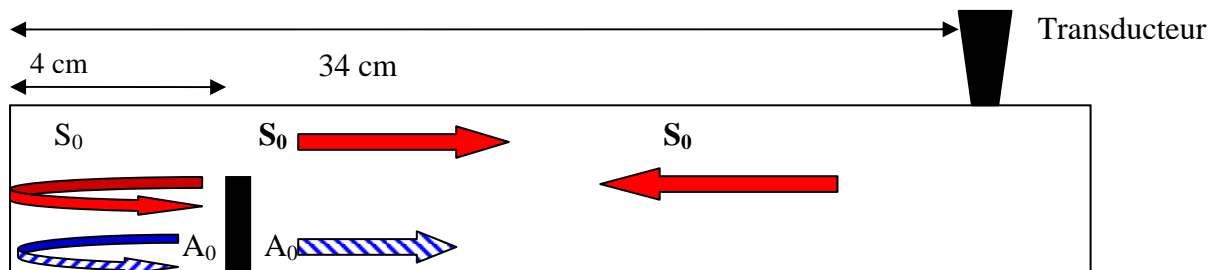


Figure III.4-27: Plaque d'aluminium avec une fissure sur sa partie interne.

Les différentes vitesses des modes susceptibles de se propager dans la plaque sont regroupées dans le tableau suivant :

Produit fréquence épaisseur	Vitesse du Mode S_0	Vitesse du Mode A_0
1.2 MHz.mm	5300 m/s	3570 m/s

Tableau III.4-11: Vitesses de groupe des modes se propageant dans la plaque à 1,2 MHz.mm

Les signaux temporels obtenus lors de l'interaction du mode de Lamb incident S_0 avec une fissure sur la face interne sont visualisés sur la figure ci-dessous

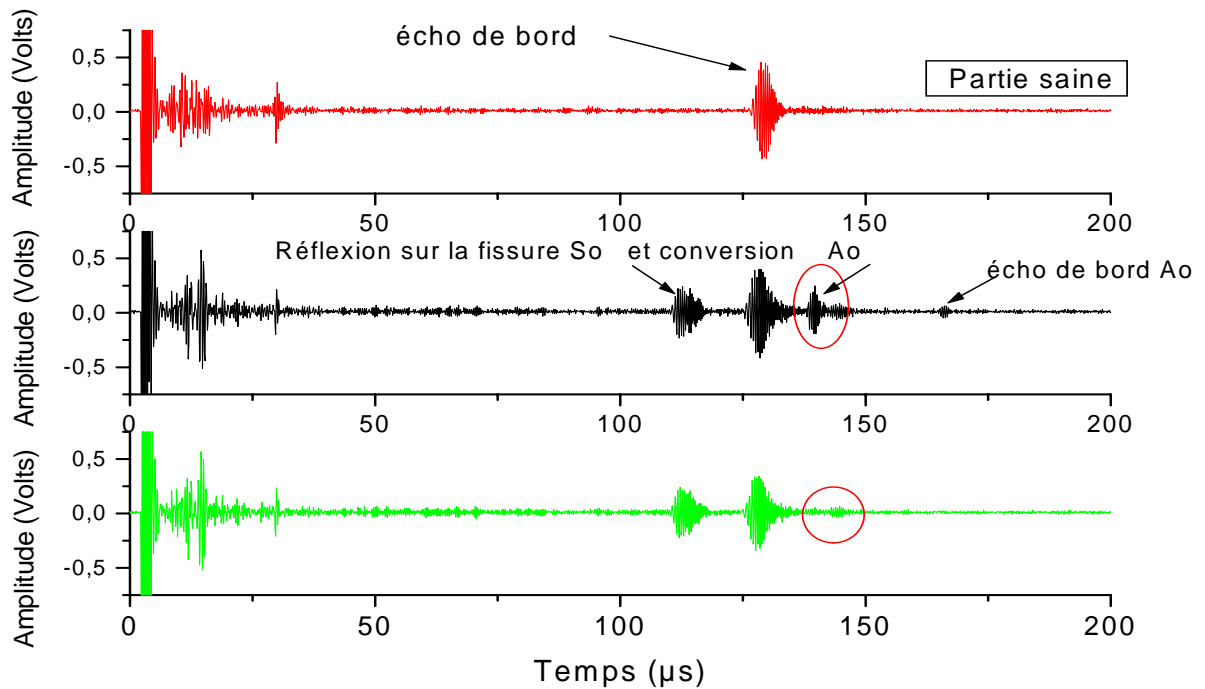


Figure III.4-28: Signaux temporels reçus par le transducteur lorsque celui-ci est face à : a) La partie saine de la plaque, b) La partie endommagée par la fissure, c) La partie endommagée de la plaque recouverte par la main

Le premier signal (rouge) correspond à la propagation du mode incident S_0 sur une partie saine de la plaque, afin de déterminer la position de l'écho de bord. Le second signal (noir) représente la propagation du mode incident S_0 sur une partie de la plaque où se trouve une fissure sur la face interne de celle-ci. Lorsque l'onde rencontre la fissure une partie est réfléchiée en S_0 et une autre convertie en A_0 ; de même une partie du signal est transmise au delà de la fissure en A_0 et S_0 .

On pose la main sur la plaque du même côté que le transducteur (Signal vert). Nous constatons alors que l'amplitude de tous les échos diminue. Les deux échos correspondant au mode S_0 diminuent légèrement. Cependant, les deux échos correspondant à A_0 diminuent fortement.

La fissure est détectée et localisée par la présence des échos provenant de la réflexion du mode S_0 incident sur la fissure. Le premier écho traduisant la présence de la fissure est la réflexion du mode S_0 en S_0 sur celle-ci. Le second écho est la conversion du mode S_0 en A_0

lorsque le mode incident se réfléchit sur la fissure. Connaissant les temps de transit des différents échos provenant de la réflexion de l'onde incidente sur le défaut et la vitesse de propagation des modes A_0 et S_0 à 1.2 MHz.mm, nous avons pu estimer la position de la fissure cachée sur la face interne de la plaque.

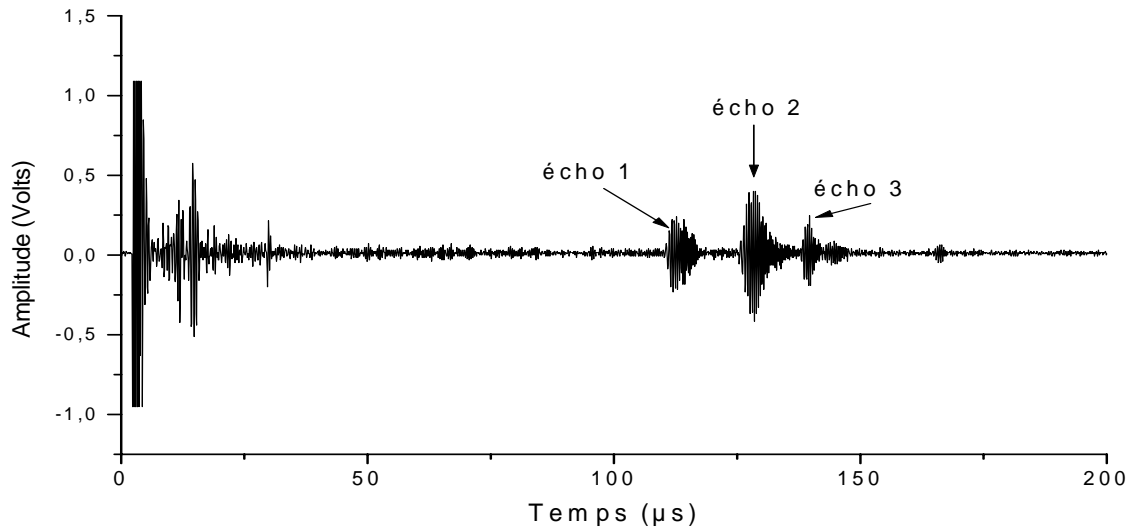


Figure III.4-29: Signal temporel donné par la réflexion sur une fissure située sur la partie interne

1. L'écho 1: Cet écho parcourt deux fois la distance $d = 30$ cm avec la vitesse du mode S_0 soit :

$$d = \frac{V_{S_0} \times \Delta t_1}{2}$$

Avec V_{S_0} vitesse de groupe du mode S_0 et Δt_1 temps aller-retour de l'écho 1

2. L'écho 2 : Parcourt deux fois la distance $d' = 34$ cm avec la même vitesse V_{S_0} soit :

$$d' = \frac{V_{S_0} \times \Delta t_2}{2}$$

Avec Δt_2 temps aller - retour de l'onde du transducteur au bord de la plaque du second écho.

3. L'écho 3 : Parcourt une première fois la distance d avec une vitesse du mode S_0 et une seconde fois la distance d avec une vitesse du mode A_0 soit :

$$\Delta t_3 = \frac{d}{V_{S_0}} + \frac{d}{V_{A_0}}$$

d'où

$$d = \frac{\Delta t_3 \times V_{S_0} \times V_{A_0}}{(V_{S_0} + V_{A_0})}$$

Avec V_{A_0} vitesse de groupe du mode A_0 et Δt_3 temps aller-retour de l'onde, du transducteur au cratère.

Echos	Echo correspondant à la réflexion S_0 en S_0	Echo correspondant à la réflexion S_0 en A_0
Position de la fissure, mesurée expérimentalement	$\frac{5.3 \times 111}{2} = 294 \text{ mm}$	$\frac{139 \times (5.3 \times 3.57)}{5.3 + 3.57} = 296 \text{ mm}$

Tableau III.4-12: Localiser une fissure située sur la partie interne de la plaque

La valeur expérimentale de la position de la fissure est trouvée avec une erreur de quelques millimètres (4 ou 6.5mm selon le mode réfléchi), ceci montre qu'il est assez aisé de repérer le défaut en procédant de cette manière, quitte à affiner la mesure, dans une seconde étape, en se rapprochant du défaut.

Dans une seconde partie on souhaite estimer la longueur de la fissure. Pour cela, on procède à un balayage horizontal sur la face de la plaque qui ne contient pas de défaut. Les amplitudes normalisées des échos réfléchis par la fissure pour différentes positions du transducteur sont représentées ci-dessous.

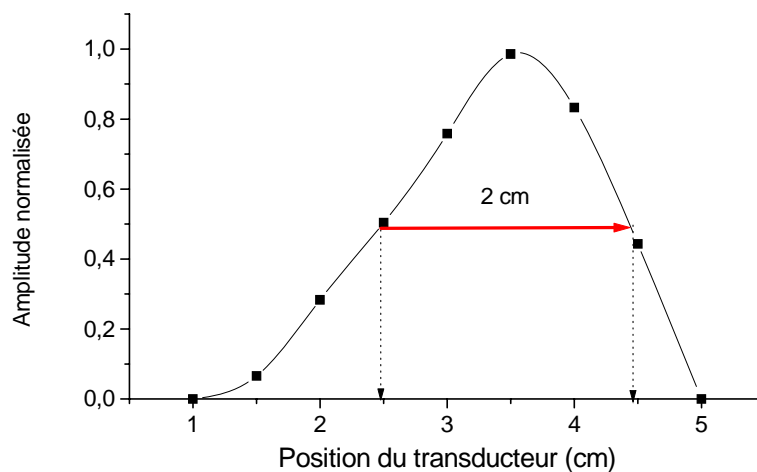


Figure III.4-30: Mesure de la taille d'une fissure placée sur la face « verso » de la plaque

La mesure de la longueur expérimentale coïncide parfaitement avec la taille réelle de la fente soit 2 cm. Lorsqu'une fissure se trouve sur une face de la plaque qui n'est pas directement accessible au transducteur il est tout de même possible de la détecter de la localiser et de la dimensionner.

Ces derniers résultats permettent de confirmer que les ondes de Lamb permettent d'inspecter les faces internes d'un réservoir ou d'un container qui ne sont pas directement accessibles. Ce contrôle peut alors se faire sans que l'on soit obligé de les vider. Le contrôle par ondes de Lamb, nous renseigne sur l'intégrité de la face interne des structures planes.

III.5 Propagation du mode S_0 en présence de défaut circulaire

III.5-1 Réflexion du mode S_0 sur un trou

On veut détecter et localiser la présence de défauts circulaires en utilisant les ondes de Lamb. Pour cela, on perce la plaque d'aluminium de deux trous différents, de diamètre 1 mm et 2 mm. On utilise comme mode incident le mode S_0 à un produit fréquence x épaisseur de 1.5 MHz.mm

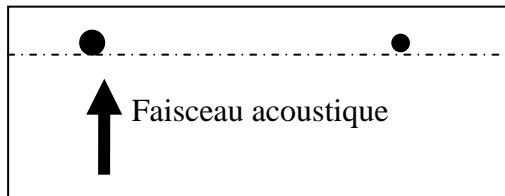


Figure III.5-1: Plaque d'aluminium d'épaisseur 1 mm avec deux défauts circulaires de diamètres 1 et 2 mm

Dans un premier temps nous avons placé le transducteur face à une partie saine de la plaque (signal rouge). Ceci nous a permis d'identifier l'écho de bord. Puis le transducteur est placé face à la partie endommagée (trouée) de la plaque. Les signaux temporels obtenus, suite à la réflexion de l'onde, sur les différents trous, sont donnés ci-dessous :

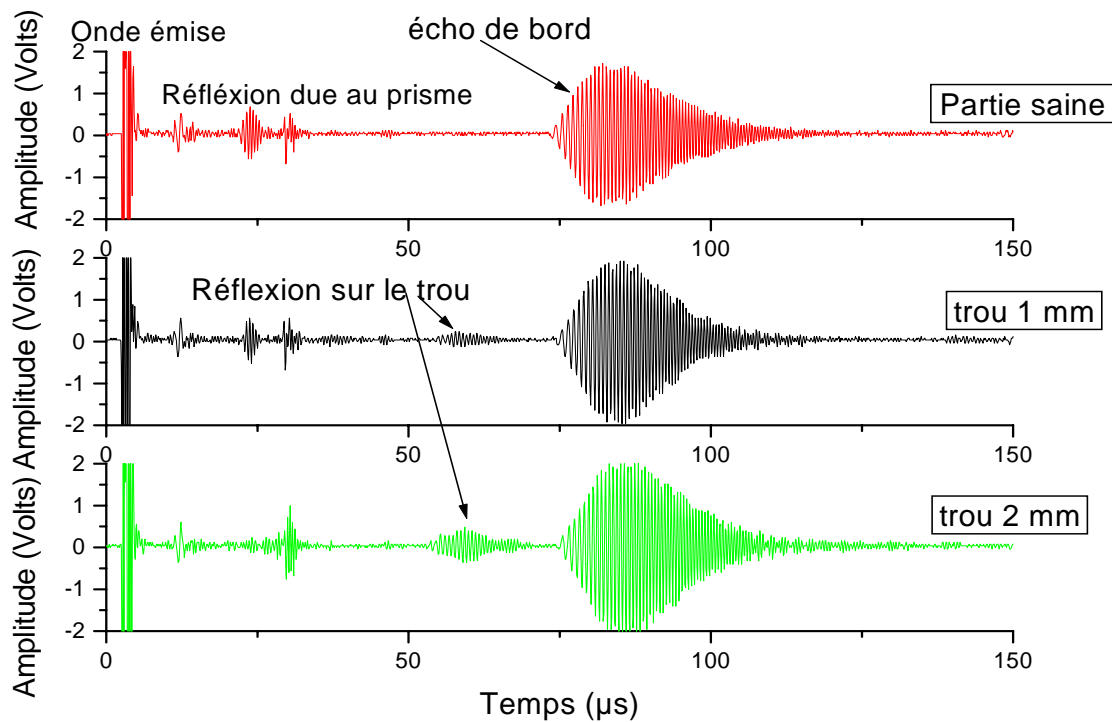


Figure III.5-2: Signaux temporels reçus lorsque le transducteur est en face de: la partie saine de la plaque (rouge); de la partie de la plaque endommagée par un trou de diamètre 1 mm (noir); puis d'un trou de 2mm (vert)

Lorsque le transducteur est face à un trou, une partie de l'onde incidente est réfléchi par le trou dans toutes les directions. Seule une petite partie du signal réfléchi, revient vers le transducteur, d'où la faible amplitude de l'écho correspondant à la réflexion du mode incident sur le trou reçu sur le signal temporel. La position de cet écho, nous permet de déterminer la position du trou expérimentalement.

Mode incident	Vitesse de groupe du mode incident	Position réelle du trou	Temps aller retour du signal émis	Position du trou, mesurée expérimentalement
S_0	5060 m/s	140mm	54 μ s	$\frac{5.06 \times 54}{2} = 137mm$

Tableau III.4-13: Position des trous (1 mm et 2 mm) mesurée expérimentalement

On constate que la position du trou trouvée expérimentalement, est voisine de la distance réelle du défaut (avec une erreur de quelques millimètres). Il est donc possible de localiser de façon assez précise la position du défaut circulaire sur la plaque. On note que l'amplitude du signal réfléchi par le trou augmente avec la taille du diamètre. Le graphe ci-dessous représente l'amplitude de l'onde réfléchie par le défaut, en fonction du diamètre du trou.

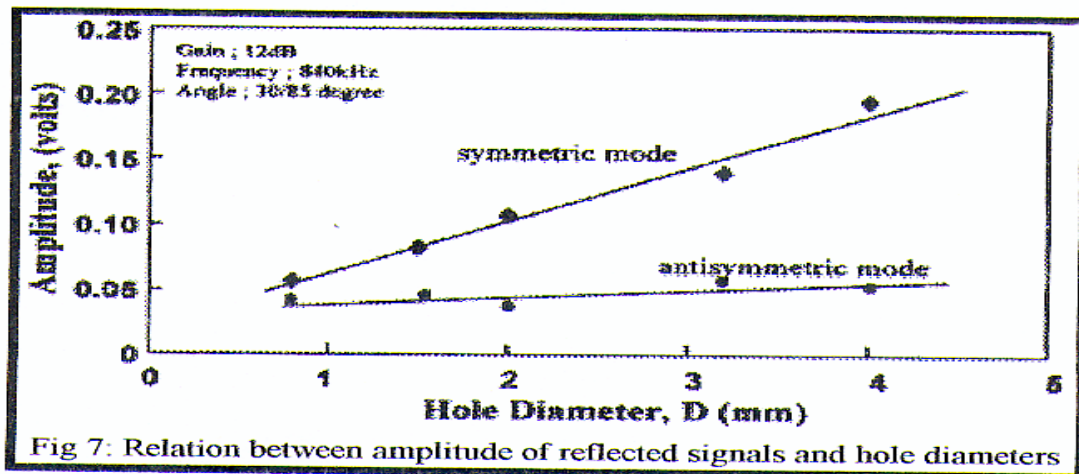


Figure III.5-3: Amplitude du signal réfléchi par un trou en fonction du diamètre [13]

Lorsque le mode incident est S_0 , l'amplitude de l'écho réfléchi par le défaut est proportionnelle à la taille de celui-ci. Cette propriété du mode de Lamb symétrique S_0 permet, connaissant l'amplitude du signal réfléchi par le trou, d'estimer la taille du défaut circulaire.

III.5-2 Réflexion du mode S_0 sur un cratère

Le mode incident choisi est S_0 , cette onde se propage jusqu'au défaut circulaire puis est diffractée par celui-ci dans toutes les directions. Sur une simulation en 3 dimensions [7], il est représenté la diffraction d'un mode de Lamb incident S_0 par un défaut circulaire de profondeur 50% et de diamètre 5 cm. Le produit fréquence x épaisseur du mode incident (300 KHz .mm) est choisi de telle sorte que seuls les modes S_0 et A_0 peuvent se propager dans la plaque. L'onde incidente se propage jusqu'au défaut circulaire non symétrique, puis elle est diffractée par celui-ci, dans toutes les directions et forme des ondes circulaires centrées sur le défaut. On remarque alors que les amplitudes des déplacements des particules au voisinage du

défaut sont les plus importantes. D'où, nous pouvons considérer le défaut comme un émetteur virtuel du mode A_0 (défauts non symétriques par rapport au plan médian de la plaque).

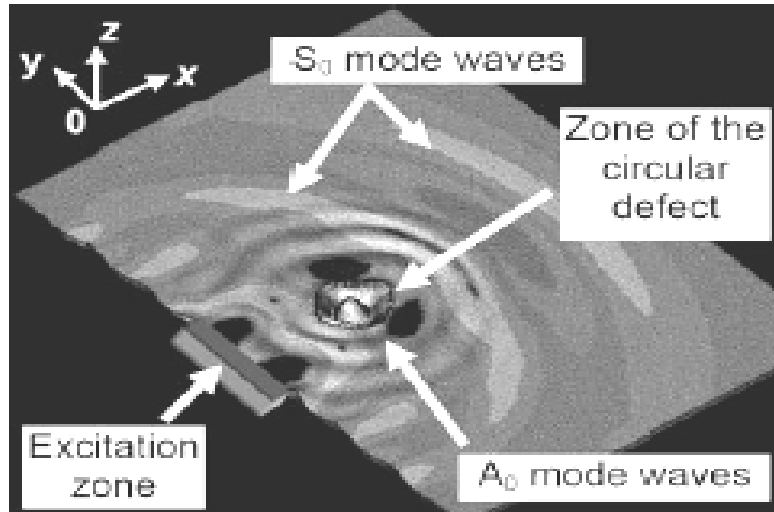


Figure III.5-4: Diffraction du mode S_0 par un défaut circulaire de profondeur 50% et de diamètre 5 cm [7]

Pour détecter et localiser la présence d'un défaut circulaire non symétrique: un cratère. Nous avons usiné un cratère de diamètre 3 mm et de profondeur 70%. Ce défaut n'étant pas symétrique par rapport au plan médian, il apparaît une conversion de mode d'une famille à l'autre lorsque l'onde incidente rencontre le cratère. En effet, on constate une conversion du mode S_0 incident en A_0 qui se propage aussi dans toutes les directions, donc une petite partie seulement revient vers le transducteur. D'où, les faibles amplitudes des signaux reçus sur l'oscilloscope correspondant à la réflexion sur le cratère.

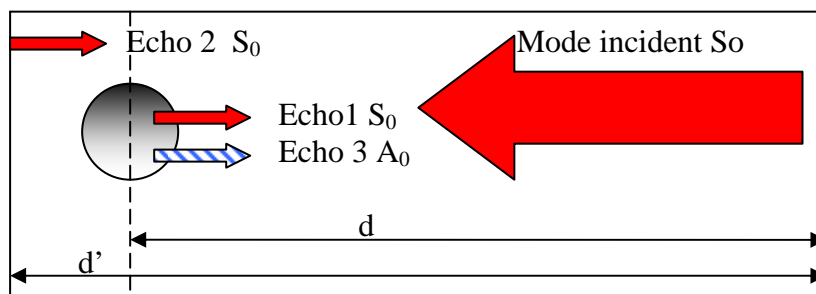


Figure III.5-5: Diffraction du mode de Lamb S_0 incident sur un cratère, dans une plaque à un produit fréquence x épaisseur inférieur à 1.55 MHz.mm

Les conditions expérimentales sont données dans le tableau suivant :

Mode incident	Produit fréquence x épaisseur	Vitesse de groupe du mode S_0	Vitesse de groupe du mode A_0	Distance du bord de la plaque au transducteur	Distance du cratère au transducteur
S_0	1.2 MHz.mm	5300 m/s	3570 m/s	30 cm	26cm

Tableau III.5-1 : Récapitulatif des conditions expérimentales

Le signal temporel obtenu suite à la réflexion du mode S_0 sur le cratère et sur le bord de la plaque est donné comme suit :

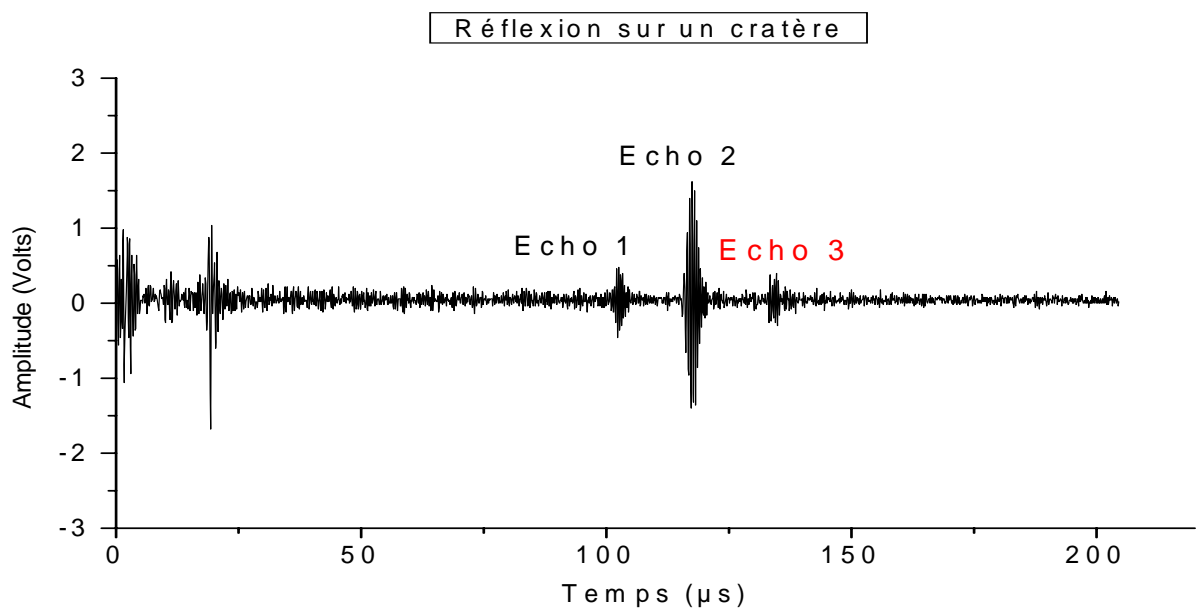


Figure III.5-6: Signal temporel correspondant à la réflexion du mode S_0 sur un cratère visible

Sur le signal temporel on remarque la présence de trois échos. L'écho 1, correspond à la réflexion de l'onde incidente sur le cratère sans conversion de mode. Le second correspond à la réflexion du mode incident sur le bord libre de la plaque. Le défaut n'étant pas symétrique par rapport au plan médian de la plaque, le troisième écho correspond à la conversion du

mode incident sur le cratère en A_0 . C'est ce troisième écho qui traduit la présence d'un défaut non symétrique par rapport au plan médian soit un cratère de profondeur différente de 100% de l'épaisseur de la plaque. En effet si le cratère se transforme en trou cet écho disparaît. Pour localiser le défaut, il est possible d'utiliser les temps de transit de l'un des échos provenant de la réflexion de l'onde incidente sur le cratère.

III.5-3 Détecter et localiser un défaut circulaire sous de la peinture

Dans une seconde partie, on recouvre le cratère de plusieurs couches de peinture. Le but de cette expérience est de vérifier si le mode de Lamb S_0 permet de détecter et de localiser le cratère caché. Les conditions expérimentales sont données dans le tableau suivant:

Mode incident	Produit fréquence x épaisseur	Vitesse de groupe du mode S_0	Vitesse de groupe du mode A_0	Distance du bord de la plaque au transducteur	Distance du cratère au transducteur
S_0	1.2 MHz.mm	5300 m/s	3570 m/s	33 cm	29 cm

Tableau III.5-2 : Récapitulatif des conditions expérimentales

Le signal temporel obtenu suite à la réflexion du mode S_0 sur le cratère recouvert de peinture et sur le bord libre de la plaque est donné ci dessous :

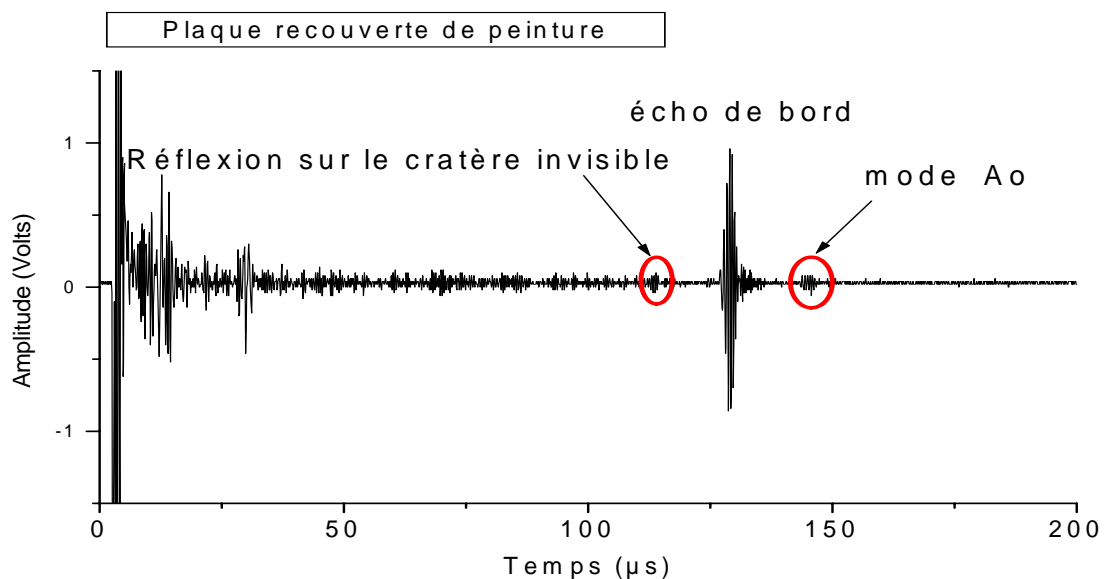


Figure III.5-7: Signal temporel réflexion du mode S_0 sur un cratère recouvert de peinture

On constate que les échos réfléchis sur le cratère recouvert de peinture sont présents mais de faible amplitude. Ceci est dû à l'atténuation de l'onde de Lamb incidente, par la présence sur la plaque de peinture. Cependant leur présence confirme l'existence d'un défaut caché sous la peinture. Les valeurs des temps des allers-retours sur le signal temporel, nous permettent de calculer la position du défaut caché par rapport au transducteur. Nous pouvons déterminer la position du cratère en utilisant, le temps de transit de l'un des deux échos provenant de la réflexion sur le défaut.

Différents échos	Echo correspondant à la réflexion de S_0 en S_0 sur le cratère	Echo correspondant à la réflexion de S_0 en A_0 sur le cratère
Position mesurée expérimentalement d'un cratère caché sous une couche de peinture	$\frac{5.3 \times 112}{2} = 297mm$	$\frac{140 \times (5.3 \times 3.57)}{5.3 + 3.57} = 298mm$

Tableau III.5-3 : Position mesurée expérimentalement du cratère caché sous une couche de peinture

Le mode de Lamb S_0 permet donc de détecter, de localiser et de dimensionner des défauts circulaires visibles ou recouverts de peinture.

Conclusion :

Ce chapitre, a été consacré à l'étude du comportement des ondes guidées de Lamb pour des plaques saines et des plaques endommagées. Le mode choisi, S_0 , a été généré en utilisant un transducteur piézo-électrique de fréquence centrale de 2 MHz . Nous avons étudié l'interaction des ondes de Lamb avec des défauts rectangulaires et circulaires visibles puis invisibles. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux défauts cachés sous une bande adhésive, sous une couche de peinture ou situés sur la face interne de la plaque. L'utilisation du mode de Lamb S_0 , pour contrôler des structures planes, nous a permis de détecter et de localiser des défauts de taille de 1 mm à 3 cm. De plus, cette méthode nous a permis d'estimer des défauts plans dont la longueur est supérieure à la moitié du diamètre du transducteur. Pour les défauts circulaires, l'utilisation du mode S_0 comme mode incident, permet de déterminer la taille du diamètre du défaut.

Conclusion

Les plaques minces sont un élément indispensable dans le domaine industriel (aéronautique, industrie de l'automobile, industrie alimentaire, containers etc.). Ces plaques, sont généralement formées de métal, élément très sensible à la corrosion et à la fatigue. Pour pallier à ce problème, une des solutions est de protéger ces plaques par différents revêtements (peinture, plastique, etc.). Cette solution, assez efficace par ailleurs, a pour inconvénient d'empêcher le contrôle visuel des plaques corrodées.

Il m'a donc été demandé d'étudier la possibilité d'inspecter des plaques métalliques, « défectueuses », revêtues de plastique ou de peinture. Les ondes guidées sont un outil très intéressant pour l'inspection non destructive de guides plans ou autres (cylindrique, tubulaire). Sur une plaque peuvent se propager deux familles d'ondes : les ondes de RAYLEIGH (très sensibles à l'environnement) et les ondes de LAMB. Notre choix s'est porté sur les ondes de LAMB.

Une étude théorique, de ces différentes familles, nous a conduit à tracer les courbes de dispersion des vitesses de phase et de groupe, des différents modes qui se propagent dans une plaque. Parmi tous les modes possibles, deux modes principaux, ont retenu notre attention : le mode de Lamb symétrique S_0 et le mode de Lamb antisymétrique A_0 . Le mode que nous avons choisi pour contrôler nos plaques, devait être non dispersif (pour avoir un signal d'amplitude constante lors de la propagation), facile à générer et avoir un déplacement mécanique quasi longitudinal pour éviter les perturbations extérieures. Le mode S_0 répond à ces critères pour les bas produits fréquence x épaisseur.

Le mode de Lamb symétrique S_0 ayant été choisi, il est généré par le biais d'un transducteur piézoélectrique PZT, de fréquence centrale 2 MHz incliné, grâce à un support en plexiglas, d'un angle précis déterminé en utilisant les courbes de dispersion.

Pour déterminer la vitesse de groupe réelle, nous avons utilisé une plaque de longueur 44 cm et de largeur 30 cm, la vitesse mesurée a été trouvée égale à 5300 m/s. Une première expérience nous a permis de localiser une fente de longueur 2 cm et de largeur 1 mm située à 29 cm du transducteur. La mesure expérimentale étant de 29,4 cm. Ce résultat montre que ce mode permet une localisation du défaut avec une erreur de quelques millimètres. De la même façon, nous avons réussi à détecter et à localiser un défaut rectangulaire non symétrique avec une erreur de 1mm.

Les fentes d'orientations non perpendiculaires au faisceau acoustique ne sont pas directement détectées et localisées par les ondes de Lamb. Pour contourner cette difficulté, nous avons fait deux balayages : l'un parallèle au défaut, et l'autre autour du défaut, ceci nous a permis de détecter et de localiser des fentes dont l'orientation avec le faisceau acoustique était de 30° et 45°.

Ces expériences ont été réalisées, respectivement, pour des défauts visibles et pour des défauts invisibles c'est-à-dire cachés sous une bande d'adhésif. Dans les deux cas, le défaut a été détecté et localisé avec une très bonne précision.

Les défauts plans étant détectés et localisés avec une bonne précision (quelques millimètres), nous avons tenté de mesurer la longueur des différentes fentes et fissures dans un premier temps visibles puis recouvertes par une bande adhésive. Les mesures ont permis d'estimer la longueur des défauts dont la longueur est supérieure à la moitié de la taille du diamètre du transducteur utilisé. Nous avons ainsi, réussi à mesurer la longueur de défaut de 3 cm, 2.5 cm, 2 cm et 1.5 cm avec une erreur de quelques millimètres.

Lorsque les plaques servent à fabriquer des containers, il est difficile d'accéder à la face interne de la plaque qui subit, souvent en premier les détériorations car en contact avec le fluide. Il est donc, important de pouvoir contrôler les deux faces d'une plaque. Cependant, la face interne n'est pas toujours directement accessible au contrôleur, d'où l'idée d'utiliser les ondes de Lamb afin de l'inspecter. Pour cela nous avons créé un défaut sur une face de la plaque, puis nous l'avons retournée pour générer le mode S_0 sur la face restée saine. Le défaut se trouve à une distance de 30 cm du transducteur, la valeur trouvée expérimentalement est de 29,6 cm. Ce résultat montre de façon claire qu'il est possible de « voir » ce qui se cache sous la face excitée.

Les seconds défauts étudiés sont circulaires. L'onde incidente se propage jusqu'au défaut puis elle est diffractée par celui-ci. On constate que l'onde diffractée se propage dans toutes les directions et forme des ondes circulaires centrées sur le défaut. Ceci explique la faible amplitude des signaux reçus sur l'oscilloscope correspondant à la réflexion de l'onde incidente par un défaut circulaire. Des trous de diamètre 1 mm et 2 mm situés à une distance de 14 cm ont été détectés et localisés à une distance de 13,7 cm. Les ondes de Lamb permettent donc de détecter et de localiser des défauts de formes circulaires. Les défauts circulaires non symétriques par rapport au plan médian de la plaque (cratère de diamètre 3 mm et de profondeur 70 %), ont été détectés et localisés dans un premier temps sur une plaque saine, puis sur une plaque recouverte de peinture.

Il serait utile de poursuivre ce travail de recherche, en essayant de contrôler des plaques complexes (délaminations dans les matériaux composites), de détecter des corps étrangers, qui encrassent les plaques (industries alimentaires, etc.) de vérifier les revêtements plans.