

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. ZITOUNE Hachemi

Sujet :

Utilisation des ondes ultrasonores guidées pour
l'inspection interne de structures tubulaires :
Application aux tubes de l'industrie alimentaire

Soutenu publiquement le : 17 /12/2008, devant le Jury composé de :

M. M. BENDAOU	Professeur	USTHB	Président
M. F. BOUBENIDER	Professeur	USTHB	Directeur de thèse
M. D. BRADAI	Professeur	USTHB	Examineur
M. T. BOUTKEDJIRT	Maître de conférences	USTHB	Examineur

Remerciements

Ce travail à été réalisé au Laboratoire Physique des Matériaux, équipe de recherche « Ondes et Acoustique » de la Faculté de Physique de l'U.S.T.H.B, Alger.

*J'exprime ma profonde gratitude et mes sincères remerciements au Professeur **F. BOUBENIDER** pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche. Durant ma formation, j'ai pu profiter de sa riche expérience pour approfondir mes connaissances dans tous les domaines. Je tiens aussi à lui exprimer ma reconnaissance pour m'avoir guidé tout au long de mon travail de recherche. Ainsi que pour tous les conseils avisés, qu'il a bien voulu me donner.*

*Je suis très sensible à l'honneur que me fait monsieur **M. BENDAOU** professeur et doyen de la faculté de physique à l' USTHB, en acceptant de présider le jury de cette thèse.*

*J'adresse mes vifs remerciements à monsieur **D. BRADAI**, professeur à l' USTHB, pour avoir accepté de faire partie du jury et pour l'intérêt qu'il porte à ce travail .*

*Ma gratitude est adressée 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 acceptant d'être membre du jury.*

*Je ne saurai oublier de remercier messieurs **A.DAHEL**, **R. REZOUG**, **A. BENNAMANE** pour leur disponibilité, leur sympathie et leur aide.*

*Je remercie le groupe **CEVITAL** (unité de Bejaïa) de l'aide qu'il m'a apportée.*

Je remercie chaleureusement tous mes collègues de l'équipe « Ondes et Acoustique » : (M. AIT OURABI ; S. TOUMI ; A. ALILOUCHE ; Y. ABBAS ; S. SAIT ; H.DAOUI), ainsi que tous les membres de l'équipe « Transformations de phases, Microstructures et Texture » surtout N. ZIBOUCHE ; H. AZZEDDINE A.TERBOUCHE pour leur soutien et leurs encouragements.

Je voudrai également remercier toutes les autres personnes qui, de façon directe ou indirecte, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I

THEORIE DES ONDES ELASTIQUES GUIDEES, DANS UN CYLINDRE CREUX

I.1 Introduction.....	4
I.2 Ondes élastiques guidées	4
I.2.1 Définition.....	4
I.2.2 caractéristiques des ondes guidées	5
I.2.3 Atténuation et absorption des ondes guidées.....	6
I.3 Propagation des ondes élastiques guidées dans un milieu homogène continu et isotrope.....	7
I.3.1 Tenseur des déformations.....	7
I.3.2 Tenseur des contraintes	7
I.3.3 Relation entre contraintes et déformations.....	8
I.3.3.1 Loi de Hooke généralisée	8
I.3.3.2 Cas d'un solide isotrope.....	9
I.3.4 Equation de propagation d'une onde acoustique.....	9
I.3.5 Equation d'onde	10
I.4 Ondes élastiques dans un tube et dispersion.....	13
I.5 Cylindre creux dans le vide.....	21
I.5.1 Courbes de dispersion des ondes guidées	21
I.5.2 Modes dans un tube	23
I.5.3 Modes axisymétriques et modes non axisymétriques.....	24
I.5.3.1 Modes axisymétriques.....	24
I.5.3.2 Modes antisymétriques ou de flexion.....	27
I.6 Conclusion.....	28

Chapitre II

METHODES ET TECHNIQUES UTILISANT LES ONDES GUIDEES DANS LE DOMAINE DU CONTROLE NON DESTRUCTIF

II.1 Introduction	29
II.2 Méthodes utilisées pour l'inspection interne d'un tube encrassé	30
II.2.1 Méthode des ondes de volume	30
II.2.2 Méthodes des ondes guidées	31
II.2.2.1 Avantages de la technique des ondes guidées	32
II.2.2.2 Inconvénients de la technique des ondes guidées	33
II.3 Techniques de génération des ondes guidées sous une incidence oblique	33
II.3.1 Méthodes par contact avec le guide d'ondes	33
II.3.1.1 Technique des ondes guidées axiales (Axisymétriques)	33
II.3.1.2 Technique des ondes guidées circonférentielles (Non axisymétriques)	34
II.3.2 Méthodes par immersion	35
II.4 Propriétés des modes guidés et la sélection des modes	35
II.4.1 Le choix de l'angle d'incidence	35
II.4.2 Propriétés des modes guidés	36
II.4.3 La sélection des modes	36
II.5 Courbes de déplacements en fonction de la fréquence	38

Chapitre III

CONCEPTION ET REALISATION D'UN DISPOSITIF A ANGLE VARIABLE, POUR LA GENERATION ET LA DETECTION DES ONDES ELASTIQUES GUIDEES

III.1 Introduction	40
III.2 Conception expérimentale	41
III.2.1 Principe de génération et détection des ondes sous incidence oblique	41

III.2.2 Ondes incidentes, réfléchies et transmises.....	42
III.2.3 Eléments constitutifs du dispositif.....	42
III.2.3.1 Transducteurs piézoélectriques pour ondes de volume	42
III.2.3.2 Adaptation des impédances acoustiques.....	43
III.3 Réalisation du dispositif expérimental à angle variable.....	44
III.4 Principe d'utilisation.....	46
III.5 Conclusion.....	48

Chapitre IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

IV.1 Introduction.....	49
IV.2 Procédés expérimentaux.....	50
IV.2.1 Dispositif expérimental.....	50
IV.2.2 Caractérisation des transducteurs.....	52
IV.2.2.1 Caractérisation du palpeur de fréquence centrale 2, 25 MHz	52
IV.2.2.2 Caractérisation du palpeur de fréquence centrale 1 MHz	54
IV.2.2.3 Caractérisation du palpeur de fréquence centrale 0,5 MHz.....	55
IV.3 Résultats expérimentaux et interprétation.....	56
IV.3.1 Génération du mode L (0, 3).....	57
IV.3.1.1 Génération du mode L (0,3) dans un tube vide non encrassé.....	58
IV.3.1.2 Sensibilité du mode L (0,4) dans un tube plein d'eau.....	59
IV.3.2 Génération du mode L (0, 4).....	59
IV.3.2.1 Génération du mode L (0, 4) dans un tube non encrassé.....	60
IV.3.2.2 Sensibilité du mode L (0. 4) à l'eau (dans le tube).....	61
IV.3.2.3 Sensibilité du mode L (0. 4) au lait.....	62
IV.3.2.4 Sensibilité du mode L (0. 4) à L'huile.....	63
IV.4 Relation entre viscosité et atténuation.....	63
IV. 5 Inspection des tubes encrassés.....	64
IV.5.1 Mode L (0, 4) sur un tube sain, non encrassé et vide.....	64
IV.5.2 Mode L (0, 4) sur un tube avec dépôt de gel sur la surface interne.....	64

IV.5.3 Mode L (0, 4) sur un tube avec un dépôt solide sur la surface interne.....	66
IV.6 Conclusion	69
Conclusion générale	69
ANNEXE	71
Bibliographie	72

Introduction générale

L'intégrité des structures utilisant des tubes est vitale, aussi bien dans le domaine de l'industrie que dans la vie quotidienne. Néanmoins, l'utilisation de la structure tubulaire dans différents domaines industriels nécessite, pour assurer la sécurité publique, protéger l'environnement (dans le cas de tubes utilisés dans les centrales nucléaires, par exemple) et maintenir l'installation en activité, un contrôle préventif non destructif. L'importance de ces applications suggère donc des méthodes d'investigation qui pourraient nous fournir toutes les informations possibles sur les anomalies pouvant endommager ou perturber le bon fonctionnement de ce genre de structures.

Les méthodes dites de **Contrôle Non Destructif (CND)**, en utilisant les ondes guidées, permettent un test de qualité d'une structure, sans provoquer de modifications irréversibles. Elles consistent à examiner l'objet sur les éventuels défauts matériels, internes ou surfaciques ou sur l'encrassement de ses surfaces, sans perturber ou démonter l'installation. L'évolution de la compréhension des bases de la physique associée aux ondes mécaniques guidées, pour l'inspection des structures industrielles, a conduit à l'utilisation, de plus en plus importante, du CND. Ce qui représente un enjeu économique important [1].

La méthode la plus fréquemment utilisée, sur les structures cylindriques creuses, consiste à utiliser le contrôle par ultrasons. Dans ce cas, pour un contrôle de qualité, un accès total, à toute la pièce à contrôler, est nécessaire. Dans ce cas, la sonde doit être déplacée sur toute la surface de l'objet à tester. Le technicien prend beaucoup de temps à réaliser tous ces tests ; cette technique pénible revient trop chère [2].

La méthode alternative pour éviter les déplacements du technicien (donc de la sonde), est d'utiliser des ondes élastiques guidées qui se propagent le long de la structure. Lorsque ces ondes rencontrent des variations d'impédance acoustique (fissures [18], corrosions [19, 2], encrassements [15] etc.) une partie de leur énergie revient vers l'émetteur, une autre diffuse et une partie sera transmise, tous ces signaux sont chargés d'informations sur « l'obstacle ».

L'avantage d'utiliser des ondes guidées est lié au fait qu'elles se propagent sur de longues distances ; cette propagation dépend de la matière et de la géométrie de l'objet [10]. L'épaisseur de la structure (plaque, coque, etc.) doit être inférieure ou égale à la longueur d'onde. Les limites du guide confinent l'onde et lui permettent de se propager rapidement sur

de longues distances, ce qui permet ainsi de tester une grande partie du milieu [3]. Ce procédé fait gagner du temps et évite le balayage de toute la surface à contrôler. En outre, ces ondes peuvent accéder aux installations éloignées ou immergées.

Les ultrasons sont utilisés dans de nombreuses applications et installations dans l'industrie alimentaire. L'encrassement des tubes, servant à conduire les produits alimentaires (lait, huile, yaourt, beurre, sucre, etc.) peut être dû à la corrosion ou à l'accumulation, sous forme de couches de « crasse », de ces produits, sur la paroi interne de la structure. L'existence de ces couches qui peuvent être visqueuses, semi-solides ou solides, gêne le fonctionnement de la structure : ces encrassements, peuvent diminuer le flux de chaleur et perturber la vitesse d'écoulement du liquide. La réduction du diamètre de la structure a un impact négatif sur la qualité du produit et expose l'installation aux dangers de contamination et d'explosion. Dans l'usine de lait « COLAITAL » (Alger), il nous a été reporté que le nettoyage de la tuyauterie se faisait régulièrement une fois tous les jours et parfois deux fois par jour si la qualité du lait n'était pas celle souhaitée. Ce nettoyage onéreux se fait parfois inutilement si la qualité du produit est altérée par un facteur étranger à l'encrassement.

Pour optimiser ces techniques ultrasonores et déterminer leurs sensibilités, il est nécessaire de comprendre les mécanismes de propagation et de réflexion de ces ondes guidées lorsqu'elles interagissent avec les différentes formes de couches de crasse [3, 6], sur la surface interne du tube à tester.

Le but de ce travail est l'utilisation de la méthode non destructive pour détecter la présence des fluides et des dépôts de crasse en contact avec la surface interne d'une structure tubulaire, en acier inoxydable, en utilisant les ondes guidées.

Les ondes ultrasonores guidées seront utilisées dans une configuration simple émission-réception et mode écho. Les ondes seront générées le long du guide. Suite à l'interaction avec les dépôts de crasse, une partie de l'énergie de l'onde émise sera dissipée dans ces derniers. L'onde reçue par le récepteur aura une amplitude plus ou moins diminuée (qui renseignera sur la nature de la crasse : molle ou dure). De plus, la mesure du temps de parcours de l'écho réfléchi par « l'obstacle » permettra de la localiser.

L'utilisation de modes spécifiques demande une connaissance précise des 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 dans un tube en acier inoxydable homogène et isotrope et de tracer les courbes de dispersion des vitesses de phase et de groupe en fonction de la fréquence, révélant ainsi, les différentes familles de modes susceptibles de se propager sur une telle structure.

Afin de faciliter l'interprétation des signaux atténués par la présence d'éventuels dépôts de crasse sur la surface interne de la structure, il est nécessaire de générer un mode incident unique. D'où, l'objet du deuxième chapitre de notre travail, qui consiste à choisir un mode incident parmi tous les modes susceptibles de se propager dans un tube à la fréquence choisie. Les méthodes et les techniques de génération des ondes guidées seront exposées.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et à la réalisation d'un dispositif expérimental à angle variable pour la génération et la réception des ondes élastiques guidées. Le mode incident étant choisi, nous avons mis au point un dispositif expérimental afin de générer le mode désiré à une fréquence et sous un angle précis.

Le dernier chapitre, sera consacré à la validation de l'étude théorique par le biais d'une série d'expériences, utilisant les modes choisis (L (0,3) et L(0,4)) supposés sensibles à la surface interne du tube. Le tube sera, successivement, rempli d'eau, de fluide visqueux et d'encrassement alimentaire.

PARTIE THEORIQUE

Chapitre I

ETUDE THEORIQUE DES ONDES ELASTIQUES GUIDEES, DANS UN CYLINDRE CREUX

I.1 Introduction

Préalablement aux essais expérimentaux, ce chapitre sera consacré à la définition et à la détermination des constantes physiques caractérisant la propagation des ondes guidées dans un milieu cylindrique creux. Nous déterminerons également les relations entre les contraintes et les déformations. Ensuite, nous établirons l'équation de propagation dans un milieu continu homogène et isotrope.

En se basant sur la géométrie et les propriétés matérielles du milieu, nous pouvons déterminer quelles résonances peuvent exister, dans l'ordre qui satisfait les conditions aux limites et les caractéristiques de la propagation des ondes guidées dans l'épaisseur d'une structure. Ces résonances contrôlent quelles ondes ultrasonores seront guidées dans un tube et quelles sont les propriétés de chacune de ces ondes.

Enfin, nous tracerons la variation des vitesses de phase et de groupe en fonction de la fréquence, des modes susceptibles de se propager sur un tube en acier inoxydable.

I.2 Ondes élastiques guidées

I.2.1 Définition

Les ondes guidées sont des ondes élastiques se propageant sous forme de déformations mécaniques dans un milieu matériel. Elles apparaissent quand les ondes élastiques sont piégées entre deux surfaces d'une plaque ou d'une coque. La superposition (interférence) des

ondes de compression et de cisaillement, causée par les multiples réflexions sur les bords de la structure, forme le paquet d'ondes guidées. Les différents modes qui peuvent se propager sur la structure ont des vitesses différentes.

Les ondes guidées sont des solutions très particulières des modèles de propagation d'ondes : ce sont des ondes qui se propagent dans une direction privilégiée et dont l'énergie reste confinée dans une région limitée dans les directions orthogonales à cette direction privilégiée (directions transverses). Ceci n'est en général rigoureusement possible que si le milieu de propagation a une structure cylindrique (on parle alors de guide d'ondes) [15]. Toutefois, les ondes guidées décrivent bien les phénomènes que l'on observe dans des structures presque cylindriques, situation qui se rencontre fréquemment dans les applications. Une des caractéristiques de ces ondes est d'être généralement dispersives, la vitesse de propagation dépend de la longueur d'onde donc de la fréquence et ce, même lorsque le modèle de propagation n'est pas intrinsèque. On a l'habitude de distinguer les guides d'ondes fermés qui correspondent au cas où le confinement de l'énergie transverse est simplement dû au fait que le milieu de propagation est borné dans les directions transverses, des guides d'ondes ouverts qui correspondent au cas où le confinement de l'énergie est dû à un mécanisme physique qui dépend des propriétés du modèle de propagation. En résumé, une onde est dite guidée si elle se propage suivant l'axe horizontal, dans un couloir délimité par des parois qui constituent des plans nodaux [12].

I.2.2 Caractéristiques des ondes guidées

La propagation d'une onde élastique diffère d'un solide à un autre, selon la forme et les propriétés matérielles de celui-ci. Une rupture locale de l'équilibre crée une perturbation qui se propage : c'est une onde progressive. Lorsque le milieu est limité, cette onde se réfléchit sur les bords, il apparaît alors une onde stationnaire ou une onde guidée.

Les ondes guidées sont caractérisées par [8]:

- la vitesse de propagation de la déformation,
- la polarisation,
- la fréquence d'oscillation de la matière,
- la direction de propagation ou le vecteur d'onde.

I.2.3 Atténuation et absorption des ondes guidées

Dans un matériau, solide ou liquide, homogène et isotrope, la pression acoustique d'un faisceau ultrasonore n'est affaiblie que dans le champ lointain [24]. Dans le cas d'une onde plane (pour qu'il n'y ait pas de divergence du faisceau), l'amplitude de la vibration en fonction du trajet parcouru par l'onde décroît de façon exponentielle.

$$A = A_0 e^{-ax} \quad (\text{I.1})$$

A : amplitude après un parcours d'une distance x.

A_0 : amplitude initiale.

a : coefficient d'atténuation.

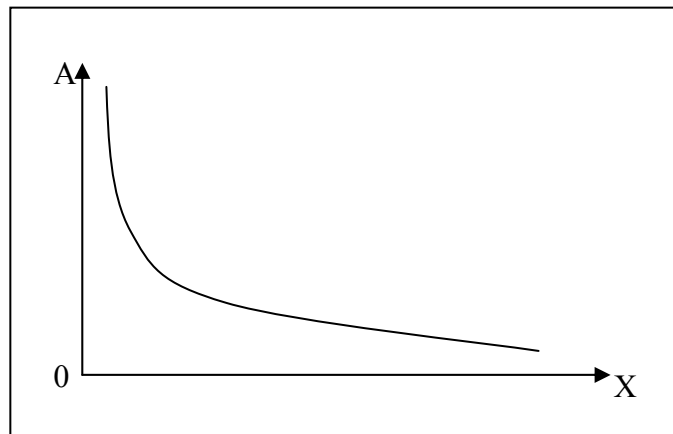


Figure I.1 : variation exponentielle de l'amplitude du signal en fonction de la distance

L'atténuation de l'onde guidée est **proportionnelle au carré de la fréquence** [31]. Cette atténuation est due principalement au phénomène d'absorption et de diffusion. L'absorption est la conversion de l'énergie ultrasonore en chaleur à cause des frottements internes au sein du matériau. Elle se traduit uniquement par une atténuation en fonction de sa propagation [15]. La diffusion est due au fait que l'énergie se répand dans toutes les directions.

I.3 Propagation des ondes élastiques guidées dans un milieu homogène continu et isotrope

La description générale d'une onde guidée se déduit de la loi de HOOKE qui exprime la relation entre le tenseur des déformations et le tenseur des contraintes, de l'équation de propagation et des conditions aux limites.

I.3.1 Tenseur des déformations

Le but de la théorie de l'élasticité est l'étude de la mécanique des corps solides, considérés comme des milieux continus. Sous l'effet de l'ensemble des forces qui leur sont appliquées, ces corps subissent une déformation, se traduisant par le changement de leur forme et de leur volume.

Les déformations internes au solide sont alors représentées par un tenseur de rang 2, noté $\overline{\overline{S}}$, qui est symétrique ($\overline{\overline{S}}_{ij} = \overline{\overline{S}}_{ji}$) et donné par :

$$\overline{\overline{S}}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} \right) \quad (\text{I.2})$$

Cependant, dans le cas de faibles déplacements à l'intérieur des matériaux, on peut appliquer l'hypothèse des petites perturbations qui permet de négliger le second ordre dans l'expression précédente :

$$\overline{\overline{S}}_{ij} = \overline{\overline{S}}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{I.3})$$

Les coefficients $\overline{\overline{S}}_{ii}$ (éléments diagonaux) sont les déformations longitudinales ou de compressions et les coefficients $\overline{\overline{S}}_{ij}$ ($i \neq j$) (composantes non diagonales) sont appelés déformations transversales ou de cisaillements [30].

I.3.2 Tenseur des contraintes

Dans un solide déformé par l'action de forces extérieures apparaissent des tensions mécaniques appelées contraintes qui tendent à le ramener à sa position de repos et assurent

ainsi l'équilibre de la matière. Ces contraintes se transmettent de proche en proche par les forces de liaison entre les atomes.

Le tenseur des contraintes est représenté par le symbole T_{ij} . Le premier indice désigne la direction de la contrainte, le deuxième indice indique le plan dans laquelle elle agit (plan perpendiculaire à la direction de la contrainte). Il est défini comme la limite, lorsque l'élément

$$\text{de surface } \Delta S_j \text{ tend vers zéro, du rapport : } \frac{\Delta \vec{F}_i}{\Delta S_j} ; T_{ij} = \lim_{\Delta S_j \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F_i}{\Delta S_j} \right) \quad (I.4)$$

\vec{F}_i : sont les forces qui agissent sur un élément de volume.

En tenant compte des conditions d'équilibre, quel que soit le volume, ce tenseur est symétrique ($T_{ij}=T_{ji}$). Il ne contient que 6 composantes indépendantes permettant de définir l'état de contrainte du matériau : 3 composantes normales et 3 composantes tangentielles.

I.3.3 Relation entre contraintes et déformations

I.3.3.1 Loi de Hooke généralisée

Par définition, un corps est élastique s'il retrouve son état initial lorsque les forces extérieures qui lui étaient appliquées sont supprimées. Le retour à l'état initial étant dû aux contraintes internes. Il existe donc une relation entre les contraintes et les déformations qui, dans l'hypothèse des petites déformations, est une relation linéaire :

$$\mathbf{T}_{ij} = \mathbf{C}_{ijkl} \cdot \mathbf{S}_{kl} \quad (I.5)$$

Les coefficients $C_{ijkl} = \left(\frac{\partial T_{ij}}{\partial S_{kl}} \right)_{S_{kl}=0}$, qui traduisent la relation linéaire la plus générale

entre les tenseurs de rang deux S_{kl} et T_{ij} , sont les composantes d'un tenseur de rang quatre appelé tenseur de rigidité élastique. Ces tenseurs étant symétriques, les constantes élastiques ne changent pas lors d'une permutation des deux premiers ou des deux derniers indices ($C_{ijkl} = C_{jikl}$ et $C_{ijkl} = C_{ijlk}$) [11]. Donc, il est possible d'utiliser la contraction des indices suivants : $\alpha \leftrightarrow (ij)$, $\beta \leftrightarrow (kl)$ et la loi de HOOKE devient :

$$\mathbf{T}_\alpha = \mathbf{C}_{\alpha\beta} \mathbf{S}_\beta \quad (I.6)$$

avec

$$(11) \leftrightarrow 1; (22) \leftrightarrow 2; (33) \leftrightarrow 3; (23) = (32) \leftrightarrow 4; (13) = (31) \leftrightarrow 5; (12) = (21) \leftrightarrow 6 \quad (1.7)$$

I.3.3.2 Cas d'un solide isotrope

Les constantes physiques d'un matériau isotrope sont, par définition, indépendantes des axes choisis. Le tenseur C_{ijkl} doit être invariant dans tous les changements d'axes, or seul un scalaire ou un tenseur unité δ_{ij} est insensible à des transformations orthogonales. En conséquence, chaque composante C_{ijkl} doit s'exprimer en fonction du tenseur unité.

Le tenseur de rigidité s'écrit alors :

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (1.8)$$

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = \lambda + 2\mu$$

$$C_{12} = C_{23} = C_{13} = \lambda$$

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} = \mu$$

Les autres coefficients sont nuls. Ainsi les propriétés mécaniques d'un milieu isotrope sont définies par les deux constantes de LAME [30].

I.3.4 Equation de propagation d'une onde acoustique

L'équation de propagation résulte de la loi fondamentale de la dynamique, appliquée à un élément de volume :

$$\vec{F} = m \vec{a} \quad (1.9)$$

où m est la masse du corps soumis à l'action de la force \vec{F} , \vec{a} étant accélération des particules.

En appliquant cette loi sur un petit volume cubique (volume élémentaire), nous obtenons la formule suivante :

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (1.10)$$

Où ρ est la densité du matériau.

En utilisant la loi de HOOKE :

$$T_{ij} = C_{ijkl} \frac{\partial U_l}{\partial x_k} \quad (\text{I.11})$$

L'équation de propagation (I.10) devient :

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_l}{\partial x_j \partial x_k} \quad (\text{I.12})$$

$i, j, k, l = 1, 2, 3$.

I.3.5 Equation d'onde

En élasticité dynamique ou acoustique, on s'intéresse au phénomène de propagation. L'équation de propagation pour un milieu anisotrope tridimensionnel possède une solution générale, $\mathbf{U}(\vec{x}, \mathbf{t})$, sous la forme d'une onde progressive se propageant dans la direction $\mathbf{n}(\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3)$ perpendiculaire à l'onde plane. Cette solution s'écrit sous la façon suivante :

$$\mathbf{U}_i(\vec{x}, \mathbf{t}) = \mathbf{A} \vec{P}_i \exp \left[i \omega \left(\mathbf{t} - \frac{\vec{n} \cdot \vec{x}}{V_\varphi} \right) \right] \quad (\text{I.13})$$

Elle représente une vibration créée en chaque position x , par la propagation de l'onde dans la direction \vec{n} , V_φ est la vitesse de phase, \mathbf{A} est l'amplitude de la vibration et \vec{P} est la polarisation de l'onde (direction du déplacement des particules).

Cette solution peut être mise sous la forme d'une somme d'ondes harmoniques se propageant dans des directions opposées. La forme typique de l'équation (I.12) est donnée par : $\exp(\omega \mathbf{t} - \mathbf{k} \mathbf{x})$ où ω est la fréquence de la vibration et \mathbf{k} le nombre d'onde. L'argument $(\omega \mathbf{t} - \mathbf{k} \mathbf{x})$ désigne la phase. Cette fonction représente l'onde se propageant dans la direction \mathbf{x} .

La vitesse de propagation est la vitesse de phase : $V_\varphi = \frac{\omega}{k}$;

La quantité \mathbf{kx} mesure la différence de phase à un temps donné entre la vibration des plans séparés dans l'espace par la distance \mathbf{x} [12]. Cependant, c'est en considérant la phase que la vitesse de propagation peut être associée au mouvement. Par conséquent, en supposant que les solutions sont sous forme d'ondes harmoniques propagatives et en les introduisant dans l'expression (I.12), on obtient l'équation du mouvement dans une nouvelle forme :

$$\rho\omega^2 P_i \exp[i\omega(t - \frac{\vec{n} \cdot \vec{x}}{V})] = C_{ijkl} \frac{\omega^2 n_j n_k}{V^2} P_l \exp[i\omega(t - \frac{\vec{n} \cdot \vec{x}}{V})] \quad (\text{I.14})$$

Cette équation se simplifie en :

$$\rho^2 V^2 P_i = C_{ijkl} n_j n_k P_l \quad (\text{I.15})$$

Pour arriver enfin à l'équation de CHRISTOFFEL :

$$k^2 \Gamma_{il} U_l = \rho\omega^2 U_i \quad (\text{I.16})$$

où le tenseur de second rang :

$$\Gamma_{il} = C_{ijkl} n_j n_k \quad (\text{I.17})$$

est appelé tenseur de CHRISTOFFEL. Ses éléments sont seulement fonction de la direction de propagation de l'onde plane et des constantes de rigidités du milieu. Ce tenseur est symétrique. Ceci induit que ses valeurs propres $\gamma = \rho V^2$ sont réelles et que ses vecteurs propres (polarisation de l'onde) sont orthogonaux.

Dans un milieu continu, isotrope et homogène et pour une direction de propagation donnée, il existe deux types de propagation.

a. Propagation longitudinale

Les ondes longitudinales encore appelées ondes de compressions ou ondes primaires \mathbf{P} entraînent une variation de volume. Ce type d'onde se caractérise par un déplacement particulier parallèle à la direction de propagation. La dilatation volumique se propage dans le solide avec la vitesse :

$$V_L = \sqrt{\left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}\right)} \quad (\text{I.18})$$

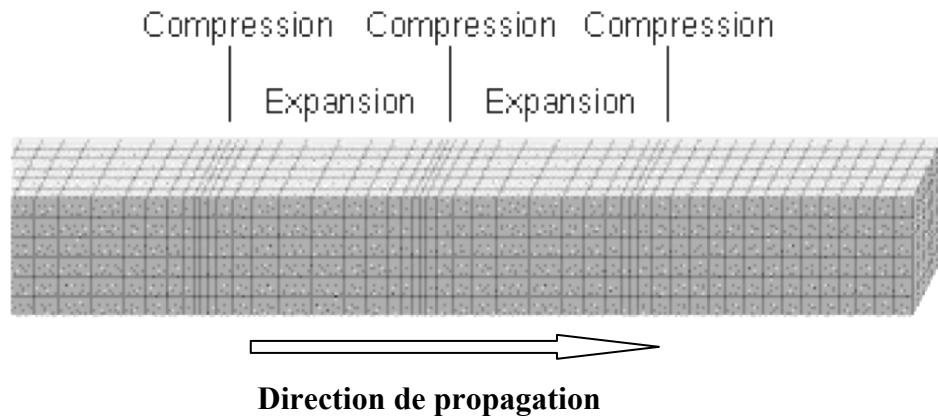


Figure I.2 : déformation engendrée par les ondes de compression

b. Propagation transversale

Les ondes transversales, appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes secondaires S , se caractérisent par un déplacement particulaire perpendiculairement à la direction de propagation et par un glissement des plans cristallins ou réticulaires. La déformation se propage, sans donner lieu à aucune variation de volume, avec une vitesse :

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (\text{I.19})$$

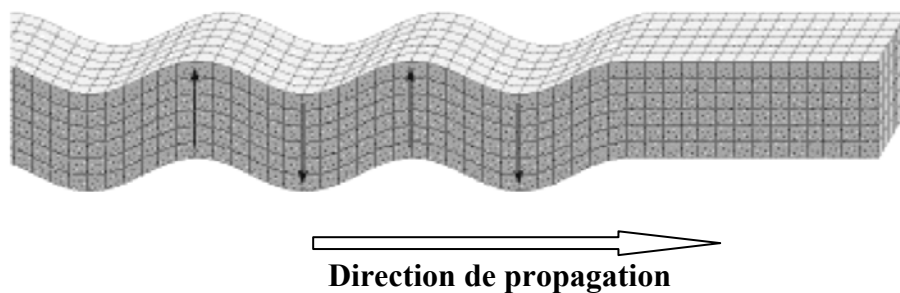


Figure I.3 : déformation engendrée par les ondes de cisaillement.

Les ondes longitudinales et transversales sont les deux types d'ondes principales utilisées dans l'étude de la propagation des ondes élastiques dans les solides. La vitesse de propagation des ondes transversales est, en général, toujours inférieure à celle des ondes

longitudinales. Ces vitesses, indépendantes de la direction de propagation, sont de l'ordre de quelques milliers de mètres par seconde.

Dans un solide anisotrope, trois ondes planes peuvent se propager suivant une direction quelconque [29].

- Une onde quasi longitudinale
- Une onde quasi transversale rapide
- Une onde quasi transversale lente

I.4 Ondes élastiques dans un tube et dispersion

Les propriétés des ondes élastiques de volumes (longitudinales et transversales) ne dépendent pas de la fréquence : les ondes élastiques ne sont donc pas intrinsèquement dispersives. Toutefois, des milieux stratifiés suscitent des conditions aux limites sur les parois du guide qui peuvent rendre la propagation dispersive : la vitesse de propagation, de phase ou de groupe, dépend de la fréquence.

Donc, pour choisir la forme et la fréquence de l'onde à générer, il est nécessaire d'examiner les courbes de dispersion des différents modes susceptibles de se propager dans une structure cylindrique creuse. Mais, au préalable, et en prenant le cas d'un solide élastique homogène et isotrope, nous rappellerons les équations du mouvement des ondes acoustiques dans un tube en fonction des caractéristiques mécaniques du milieu.

Equation du mouvement

L'équation caractéristique propre à un cylindre creux peut être obtenue par les potentiels d'HELMHOLTZ pour des valeurs arbitraires des paramètres physiques complexes ; sa solution générale, sous forme d'une onde harmonique, a été traitée pour la première fois par GAZIS en 1959 [22]. L'équation caractéristique est donnée, dans la théorie de l'élasticité, pour des modes propres d'un milieu isotrope et illimité, en écrivant les conditions aux limites sur les deux surfaces cylindriques. Cette équation apparaît plutôt simple, mais son évaluation peut toujours être achevée numériquement en utilisant un ordinateur.

Considérons un cylindre creux de section droite circulaire, infini suivant z , de rayon interne \mathbf{a} et de rayon externe \mathbf{b} (Figure I.4).

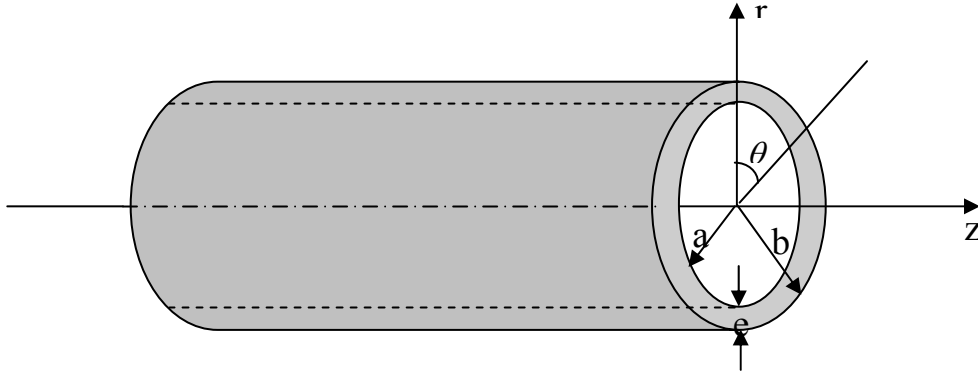


Figure I.4 : représentation d'un tube de rayon interne a et de rayon externe b .
 e représente l'épaisseur du tube et θ , r , z sont les coordonnées cylindriques

L'équation du mouvement de l'onde dans un milieu élastique et isotrope s'écrit sous la forme suivante :

$$\mu \nabla^2 \vec{U} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \vec{U} = \rho \left(\frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2} \right) \quad (\text{I.20})$$

où \vec{U} est le vecteur de déplacement, ρ est la densité du matériau, λ et μ sont les constantes de LAME qui relie les contraintes aux déformations et ∇^2 est l'opérateur de Laplace tridimensionnel, tel que :

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (\text{I.21})$$

Les fonctions des potentiels

D'après HELMHOLTZ, le champ du déplacement peut être obtenu par la combinaison des gradients du champ potentiel scalaire ϕ et du champ potentiel vecteur \vec{H} .

$$\vec{U} = \vec{\nabla} \phi + \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad (\text{I.22})$$

En remplaçant l'équation (I.22) dans l'équation (I.20), et en posant les identités :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \phi = \nabla^2 \phi \quad \nabla^2 (\vec{\nabla} \phi) = \vec{\nabla} (\nabla^2 \phi) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = 0$$

Nous aurons :

$$\vec{\nabla} \left\{ (\lambda + 2\mu) \vec{\nabla}^2 \phi - \rho \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) \right\} + \vec{\nabla} \Lambda \left\{ \mu \vec{\nabla}^2 \vec{H} - \rho \left(\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \right\} = 0 \quad (\text{I.23})$$

Pour que l'équation (I.23) soit satisfaite, il faut que les termes se trouvant dans les accolades soient nuls, ce qui nous conduit aux équations de propagation indépendantes pour les potentiels scalaire et vecteur :

$$(\lambda + 2\mu) \vec{\nabla}^2 \phi - \rho \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (\text{I.24-a})$$

$$\mu \vec{\nabla}^2 \vec{H} - \rho \left(\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (\text{I.24-b})$$

La résolution des équations (I.24) nous donne:

$$\vec{\nabla}^2 \phi = \frac{1}{V_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad \text{où} \quad V_L^2 = \frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho} \quad (\text{I.25-a})$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{H} = \frac{1}{V_T^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad \text{où} \quad V_T^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{I.25-b})$$

L'équation (I.25-a) représente le mouvement de l'onde longitudinale et l'équation (I.25-b) représente le mouvement de l'onde transversale. Les solutions théoriques complètes de ces deux équations donnent tous les modes se propageant dans un tube [23] : modes guidés axialement symétriques et non symétriques.

Solutions des fonctions de potentiels pour des géométries cylindriques

Puisque l'équation d'Helmholtz (I.22) est séparable, la solution peut être divisée en produit de fonctions pour chaque dimension spatiale. Si nous supposons que la source de l'oscillation est harmonique, les solutions des équations (I.25) seront :

$$[\vec{H}, \phi] = \Psi_1(r) \Psi_2(\theta) \Psi_3(z) \exp i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (\text{I.26})$$

Où \vec{k} est le nombre d'onde, r est le vecteur position, ω est la pulsation et $\Psi_1(r)$, $\Psi_2(\theta)$, et $\Psi_3(z)$ décrivent les champs qui varient pour chaque coordonnée spatiale.

Supposons que l'onde ne se propage pas dans la direction \vec{U}_r et que le champ de déplacement ne varie pas dans les directions \vec{U}_z et \vec{U}_θ alors, nous pouvons réécrire l'équation (I.26) de la façon suivante [9]:

$$[\vec{H}, \phi] = \Psi_1(r) \exp i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (\text{I.27})$$

En régime harmonique et en coordonnées cylindriques r, θ, z les équations (I.25) s'écrivent :

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{V_L^2} \right) \phi = 0 \quad (\text{I.28.a})$$

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{V_T^2} \right) H = 0 \quad (\text{I.28.b})$$

En remplaçant le Laplacien par son expression (I.21), les équations (I.28) deviennent :

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{V_L^2} \right) \phi = 0$$

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{V_T^2} \right) H_z = 0 \quad (\text{I.29})$$

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{r^2} + \frac{\omega^2}{V_L^2} \right) H_\theta + \frac{2}{r^2} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} = 0$$

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{r^2} + \frac{\omega^2}{V_T^2} \right) H_r + \frac{2}{r^2} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} = 0$$

Ainsi, nous avons les équations de propagation pour chaque champ dans les trois directions. En prenant en compte la périodicité de la coordonnée θ , les équations ci-dessus s'écrivent sous la forme suivante [22]:

$$\begin{aligned}
 \phi &= f(r) \cos(n\theta) \cos(\omega t - kz) \\
 H_r &= g_r(r) \sin(n\theta) \sin(\omega t - kz) \\
 H_\theta &= g_\theta(r) \cos(n\theta) \sin(\omega t - kz) \\
 H_z &= g_z(r) \sin(n\theta) \cos(\omega t - kz)
 \end{aligned} \tag{I.30}$$

$f(r)$, $g_r(r)$, $g_\theta(r)$, $g_z(r)$ sont des fonctions de Bessel

n : un entier positif ou nul ; il représente l'ordre circonférentiel

k : vecteur d'onde dans le direction axiale

$\omega = 2\pi f$: pulsation

En substituant les expressions des potentiels scalaire et vecteur de l'équation (I.30) dans les équations (I.29), on aura :

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dr} + \left[\frac{n^2}{r^2} - \left(\frac{\omega^2}{V_L^2} - k^2 \right) \right] f = 0 \tag{I.31.a}$$

$$\frac{d^2 g_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg_r}{dr} + \left(-n^2 g_r + 2ng_\theta - g_r \right) - k^2 g_r + \frac{\omega^2}{V_T^2} g_r = 0 \tag{I.31.b}$$

$$\frac{d^2 g_\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg_\theta}{dr} + \left(-n^2 g_\theta + 2ng_r - g_\theta \right) - k^2 g_\theta + \frac{\omega^2}{V_T^2} g_\theta = 0 \tag{I.31.c}$$

$$\frac{d^2 g_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg_z}{dr} + \left[\frac{n^2}{r^2} - \left(\frac{n^2}{V_T^2} - k^2 \right) \right] g_z = 0 \tag{I.31.d}$$

Les solutions des équations différentielles (I.31) sont des fonctions de Bessel dont l'opérateur différentiel est défini par :

$$B_{n,r} = \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \left(\frac{n^2}{r^2} - 1 \right) \right] \tag{I.32}$$

où

$$B_{n, \alpha r}[f(r)] = 0 \quad (\text{I.33})$$

L'équation (I.33) est une solution valide pour la fonction de potentiel ϕ quand

$\alpha^2 = \frac{\omega^2}{V_L^2} - k^2$; α^2 correspond à la composante radiale du vecteur d'onde qui est utilisé pour

décrire la variation radiale du potentiel scalaire ϕ .

Pour l'équation (I.31.d), la forme de la solution est la suivante :

$$B_{n, \beta r}[g_3] = 0 \quad \text{où} \quad \beta = \frac{\omega^2}{V_T^2} - k^2 \quad (\text{I.34})$$

Et les solutions des équations (I.31.b) et (I.31.c) sont de la forme :

$$B_{n+1, \beta r}[g_r - g_\theta] = 0 \quad (\text{I.35})$$

$$B_{n+1, \beta r}[g_r + g_\theta] = 0$$

Ainsi, on aura les équations (I.31) sous la forme [25] :

$$\begin{aligned} & \left[\frac{d^2}{d(\alpha r)^2} + \frac{1}{\alpha r} \frac{d}{d(\alpha r)} - \left(\frac{n^2}{(\alpha r)^2} - 1 \right) \right] f = 0 \\ & \frac{d^2}{d(\beta r)^2} + \frac{1}{\beta r} \frac{d}{d(\beta r)} - \left(\frac{(n-1)^2}{(\beta r)^2} - 1 \right) (g_r + g_\theta) = 0 \\ & \frac{d^2}{d(\beta r)^2} + \frac{1}{\beta r} \frac{d}{d(\beta r)} - \left(\frac{(n+1)^2}{(\beta r)^2} - 1 \right) (g_r - g_\theta) = 0 \\ & \left[\frac{d^2}{d(\beta r)^2} + \frac{1}{\beta r} \frac{d}{d(\beta r)} - \left(\frac{n^2}{(\beta r)^2} - 1 \right) \right] g_3 = 0 \end{aligned} \quad (\text{I.36})$$

Pour choisir une forme arbitraire des fonctions $f(r)$, $g_r(r)$, $g_\theta(r)$ et $g_3(r)$, on pose : $g_r = -g_\theta = g_1$ avec $g_2 = 0$. Ainsi, nous obtenons les trois fonctions du potentiel $f(r)$, $g_1(r)$ et $g_3(r)$ qui satisfont les équations différentielles.

Les fonctions standard qui satisfont les équations différentielles (I.36) sont des fonctions de Bessel de première et de seconde espèce J_n , Y_n d'argument $\alpha_1 r = |\alpha r|$ et $\beta_1 r = |\beta r|$ (α et β sont réels ou imaginaires). Ces fonctions représentent les oscillations de la propagation d'onde. Les fonctions de Bessel modifiées I_n , K_n , sont utilisées lorsque l'argument est complexe.

Selon la vitesse de phase, $V = \frac{\omega}{k}$, les fonctions de Bessel utilisées sont portées dans le tableau suivant.

Tableau I.1 : Fonctions de Bessel utilisées dans chaque intervalle de vitesse.

$V_{ph} > V_L$	$V_L > V_{ph} > V_T$	$V_{ph} < V_T < V_L$
$\alpha^2 > 0$	$\alpha^2 < 0$	$\alpha^2 < 0$
$\alpha = \sqrt{\alpha^2}$	$\alpha = \sqrt{-\alpha^2}$	$\alpha = \sqrt{-\alpha^2}$
$\beta^2 > 0$	$\beta^2 > 0$	$\beta^2 < 0$
$\beta = \sqrt{\beta^2}$	$\beta = \sqrt{\beta^2}$	$\beta = \sqrt{-\beta^2}$
$Z_n(\alpha r) = J_n(\alpha r)$	$Z_n(\alpha r) = I_n(\alpha r)$	$Z_n(\alpha r) = I_n(\alpha r)$
$W_n(\alpha r) = Y_n(\alpha r)$	$W_n(\alpha r) = K_n(\alpha r)$	$W_n(\alpha r) = K_n(\alpha r)$
$Z_n(\beta r) = J_n(\beta r)$	$Z_n(\beta r) = I_n(\beta r)$	$Z_n(\beta r) = I_n(\beta r)$
$W_n(\beta r) = Y_n(\beta r)$	$W_n(\beta r) = K_n(\beta r)$	$W_n(\beta r) = K_n(\beta r)$

Dans ce tableau, des fonctions Z_n et W_n sont introduites : elles seront utilisées dans le reste de la dérivation des fonctions de Bessel. La fonction Z_n peut être substituée par J_n , ou I_n et la fonction W_n peut être remplacée par Y_n ou K_n .

De cette façon, nous aurons respectivement les solutions générales des équations (I.36) en coordonnées cylindriques [25] :

$$\begin{aligned}
 f &= A Z_n(\alpha_1 r) + B Z_n(\alpha_1 r) \\
 2g_1 &= (g_r - g_\theta) = 2A_1 Z_{n+1}(\beta_1 r) + 2B_1 W_{n+1}(\beta_1 r) \\
 2g_1 &= (g_r + g_\theta) = 2A_2 Z_{n-1}(\beta_1 r) + 2B_1 W_{n-1}(\beta_1 r) \\
 g_3 &= A_3 Z_n(\beta_1 r) + B_3 W_{n+1}(\beta_1 r)
 \end{aligned} \tag{I.37}$$

A, B, A₁, B₁, A₂, B₂, A₃, B₃, sont des constantes arbitraires qui dépendent des conditions initiales.

Expressions analytiques des champs de déplacement et de déformation

Compte tenu de la relation (I.2), les composantes de déplacement dans les directions radiale, circonférentielle et axiale sont données par :

$$\begin{aligned}
 U_r &= \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial z} \\
 U_\theta &= \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \\
 U_z &= \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r H_z)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta}
 \end{aligned} \tag{I.38}$$

En remplaçant les expressions des potentiels scalaire et vecteur de l'équation (I.30), on retrouve les expressions des composantes du champ de déplacement :

$$\begin{aligned}
 U_r &= \left[\frac{\partial f}{\partial r} + \frac{n}{r} g_3 + k g_1 \right] \cos(n\theta) \cos(\omega t - kz) \\
 U_\theta &= \left[-\frac{n}{r} f + k g_1 - \frac{\partial g_3}{\partial r} \right] \sin(n\theta) \cos(\omega t - kz) \\
 U_z &= \left[k f - \frac{\partial g_1}{\partial r} + (n+1) \frac{g_1}{r} \right] \cos(n\theta) \sin(\omega t - kz)
 \end{aligned} \tag{I.39}$$

Conformément à la théorie de l'élasticité linéaire, les relations de déformations sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
 S_{rr} &= \frac{\partial U_r}{\partial r} \\
 S_{rz} &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r} \right] \\
 S_{r\theta} &= \frac{1}{2} \left[r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} \right]
 \end{aligned} \tag{I.40}$$

Expressions analytiques du tenseur des contraintes

Connaissant les expressions du déplacement et les relations entre les déplacements et les contraintes (loi de HOOKE), nous pouvons déterminer les composantes du tenseur des contraintes, en fonction des constantes de LAME λ et μ et de la dilatation locale Δ tel que :

$$\Delta = \nabla^2 \phi = -(\alpha^2 + k^2) f \cos(n\theta) \cos(\omega t - kz) \quad (\text{I.41})$$

$$T_{rr} = \lambda \Delta + 2S_{rr} = \left\{ -\lambda(\alpha^2 + k^2)f + 2\mu \left[\frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{n}{r} \left(\frac{\partial^2 g_3}{\partial r^2} - \frac{g_3}{r} \right) + k \frac{\partial g_1}{\partial r} \right] \right\} \cos(n\theta) \cos(\omega t - kz)$$

$$T_{rz} = 2\mu S_{rz} = \mu \left\{ -k \frac{\partial f}{\partial r} - \frac{n}{r} \left[\frac{\partial g_1}{\partial r} + \left(\frac{n+1}{r} + \frac{r}{n} [k^2 - \beta^2] \right) g_1 \right] \frac{nk}{r} g_3 \right\} \cos(n\theta) \sin(\omega t - kz)$$

(I.42)

$$T_{r\theta} = 2\mu S_{r\theta} = \mu \left\{ -\frac{2n}{r} \left(\frac{\partial f}{\partial r} - \frac{f}{r} \right) - \left(2 \frac{\partial^2 g_3}{\partial r^2} + \beta^2 g_3 \right) - k \left(\frac{n-1}{r} g_1 \frac{\partial g_1}{\partial r} \right) \right\} \sin(n\theta) \cos(\omega t - kz)$$

I.5 Cylindre creux dans le vide

I.5.1 Courbes de dispersion des ondes guidées

Pour décrire le comportement d'un tube dans le vide lorsqu'il est mis en vibration, il est nécessaire de définir et de tracer, en fonction de la fréquence, les vitesses de phase et de groupe ainsi que l'angle d'incidence sous lequel on excite le tube.

Vitesse de phase

La vitesse de phase correspond à la vitesse de propagation des fronts d'ondes à l'intérieur d'un paquet d'onde. Elle est donnée par la relation suivante :

$$V_{ph} = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega \lambda}{2\pi} \quad (\text{I.44})$$

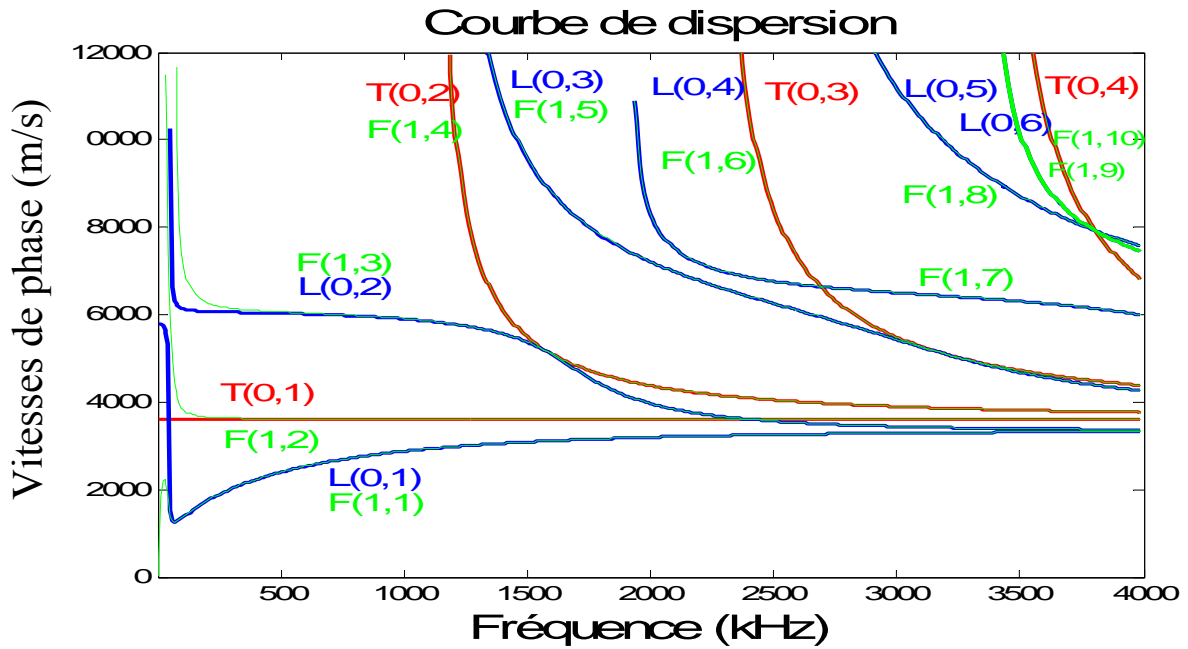


Figure I.5 : Courbe de dispersion de la vitesse de phase en fonction de la fréquence pour un tube de diamètre externe 40 mm et d'épaisseur 1,6 mm [26]

Les courbes de dispersion de la vitesse de phase représentent toutes les vitesses de phase possibles pour chaque fréquence de tous les modes d'ondes guidées existants. Elles nous informent sur les zones dispersives et non dispersives de chaque mode à générer : on dit que le mode est non dispersif dans un intervalle si sa vitesse de phase est constante. Si un mode est non dispersif le paquet d'ondes ne se déforme pas lors de sa propagation le long du tube.

Vitesse du groupe

La vitesse de groupe est la vitesse de propagation d'un paquet d'ondes le long d'une structure. Elle est exprimée en fonction de la variation de la pulsation et du nombre d'onde par la relation :

$$V_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = V_\varphi + k \frac{\partial V_\varphi}{\partial k} \quad (\text{I.43})$$

donc la vitesse de groupe peut être calculée à partir du temps de vol (lu sur l'oscilloscope) de l'onde générée ayant parcourue une distance donnée. Elle correspond à la vitesse de propagation de l'énergie transportée par l'onde. La valeur de cette vitesse nous permet d'identifier le mode généré.

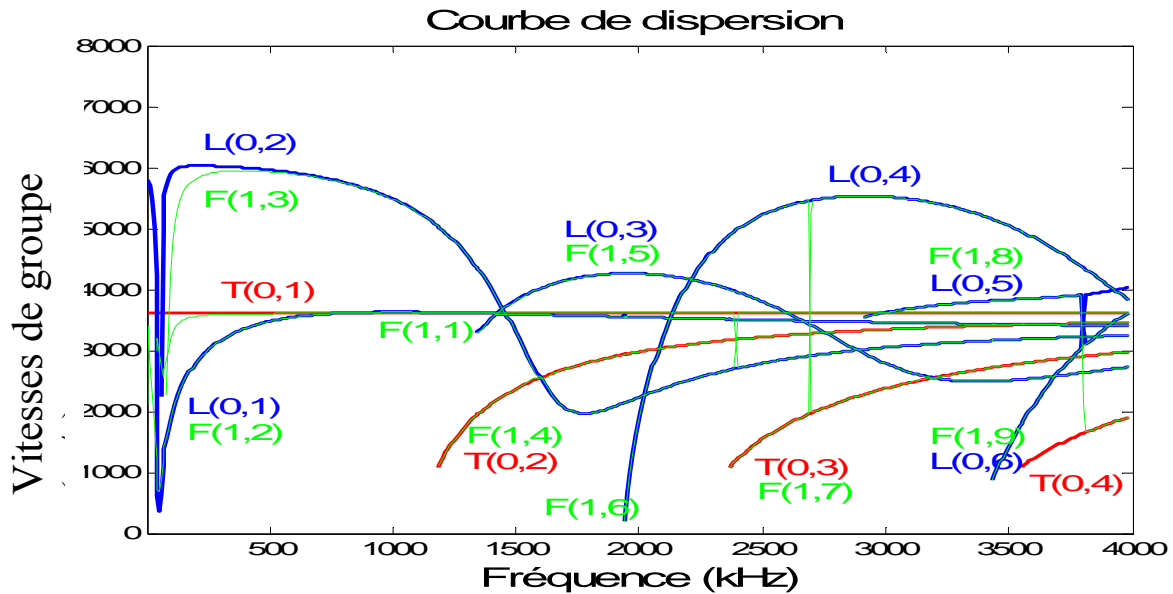


Figure I.6 : Courbe de dispersion de la vitesse de groupe, en fonction de la fréquence, pour un tube de diamètre externe 40 mm et d'épaisseur 1,6 mm [26].

Angle d'incidence

Les courbes de dispersions nous aident également à chercher l'angle pour lequel un mode particulier peut être généré à une fréquence donnée. La vitesse de phase et l'angle d'incidence sont reliés par la loi de Snell-Descartes [9]:

$$\sin \theta = \frac{V_i}{V_{ph}} \quad (\text{I.45})$$

θ = l'angle d'incidence.

V_i = vitesse d'incidence dans le matériau couplant.

V_{ph} = la vitesse de phase du mode recherché.

Ainsi, la valeur de θ peut être calculée par la relation (I.45).

I.5.2 Modes dans un tube

Trois types d'ondes peuvent être répertoriés sur les courbes de dispersion. Tous ces modes peuvent se propager le long de l'axe du tube Oz. Il existe une infinité de modes de compression, une infinité de modes de torsion et une infinité de modes de flexion. Ces modes sont désignés comme suit [9, 27] :

- **Modes longitudinaux, L (0, m)** : ce sont des modes axisymétriques dont le déplacement est à prédominance longitudinal. Ce sont des modes de compression.

- **Modes de Torsion, T (0, m)** : ce sont des modes axisymétriques, dont le déplacement des particules se fait principalement dans la direction angulaire.
- **Modes de flexion, F (n, m)** : ce sont des modes non axisymétriques avec un ordre circonférentiel non nul.

$m = 1, 2, 3 \dots$ représente le numéro du mode. Pour les modes de flexion, n , représente le nombre de longueurs d'onde autour de la circonférence. Les modes longitudinaux et de torsion ($n = 0$) sont axisymétriques. Pour les autres ordres circonférentiels ($n \neq 0$), les déplacements ne sont plus symétriques par rapport à l'axe Oz, dans ce cas les modes sont antisymétriques : ce sont des modes de flexion.

I.5.3 Modes axisymétriques et modes non axisymétriques

I.5.3.1 Modes axisymétriques

Lorsque $n = 0$, les modes sont axialement symétriques. Les composantes des champs vectoriel et scalaire ne dépendent pas de l'angle, ils sont en fonction de r et z seulement. Donc H_r, H_z deviennent nuls et H_θ, ϕ sont en fonction de r et z . Il s'agit des modes longitudinaux et de torsion.

Ondes de compression

Les modes de compression ont un vecteur de déplacement de matière polarisé dans le plan (r, z) , de sorte qu'il n'y ait aucune composante circonférentielle de déplacement ($u_\theta = 0$).

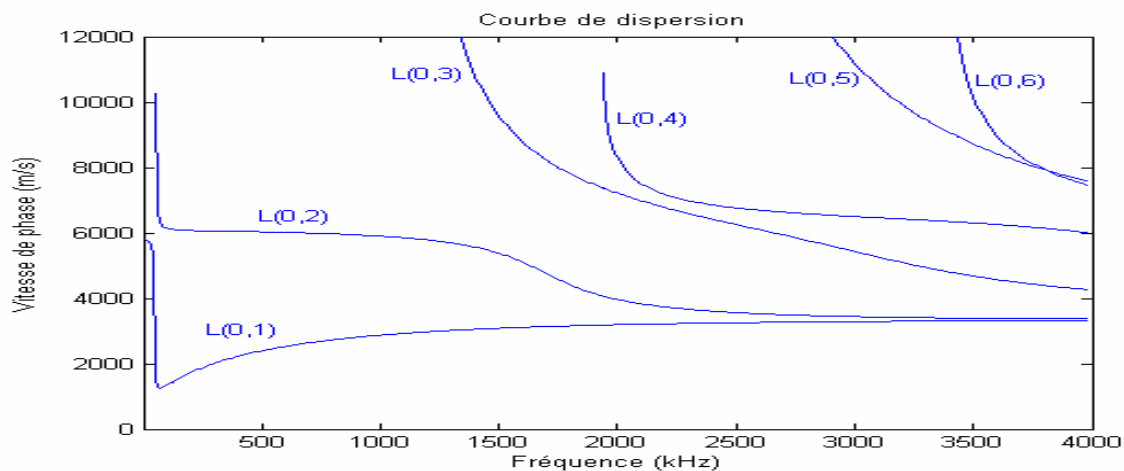


Figure I.7.a: Courbe de dispersion de la vitesse de phase des modes de compression en fonction de la fréquence pour un tube de diamètre externe 40 mm et d'épaisseur 1,6 mm [26]

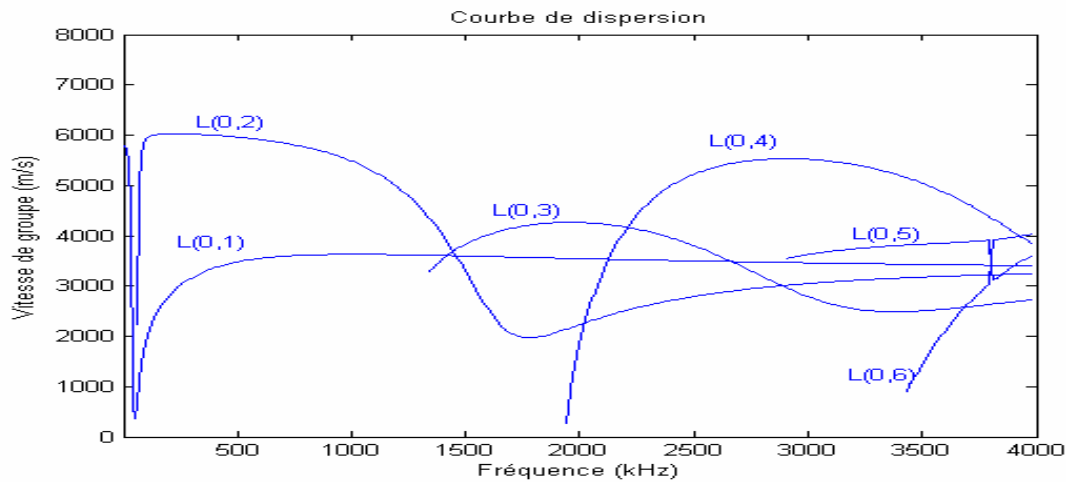


Figure I.7.b: Courbe de dispersion de la vitesse de groupe des modes de compression en fonction de la fréquence pour un tube de diamètre externe 40 mm et d'épaisseur 1,6 mm [26]

Elles sont appelées aussi les ondes longitudinales. Le mouvement de cette onde est décrit par deux composantes U_r et U_z du déplacement indépendant de θ ($n = 0$). Celui-ci est axialement symétrique. Lorsque le rayon du cylindre est suffisamment petit devant la longueur d'onde λ , les fronts d'onde sont des plans perpendiculaires à l'axe du cylindre. Ce type d'ondes est dispersif [29].

La superposition de deux ondes de compression, de mêmes amplitudes, se propageant dans deux directions opposées produit des ondes stationnaires, z constant, équivolument sur la section plane du tube [22].

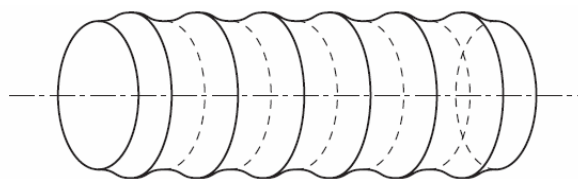


Figure I.7.c: Ondes de compression ; la déformation est indépendante de l'angle

Ondes de torsion

Les ondes de torsion sont des ondes symétriques axialement, dont le déplacement mécanique, indépendant de θ , a pour unique composante U_θ en fonction de r et z . Elles dérivent du seul potentiel H_z (relation (I.30)). Chaque section du cylindre tourne autour de son centre, le déplacement est proportionnel au rayon.

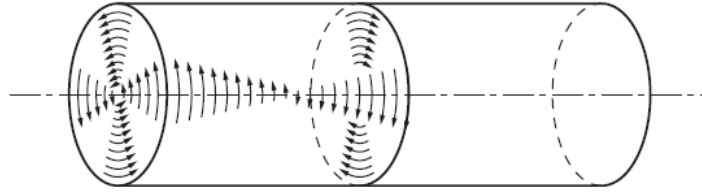


Figure I.8.a: Ondes de torsion ; chaque section tourne autour de son centre

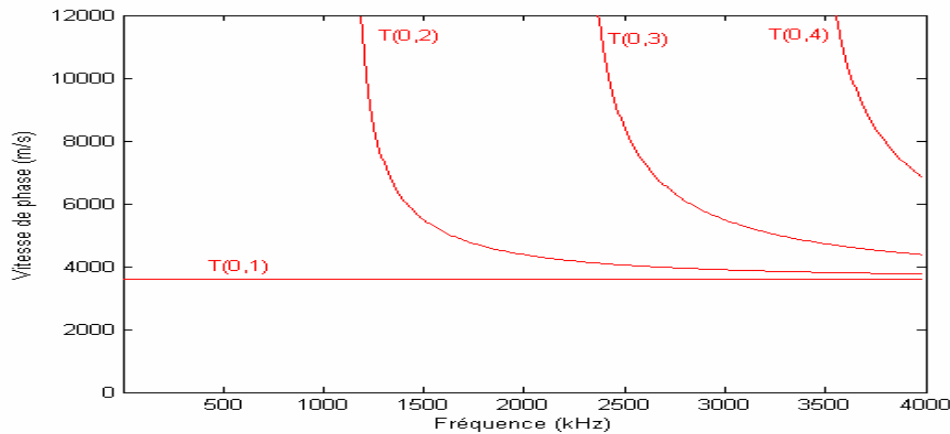


Figure I.8.b : Courbes de dispersion de la vitesse de phase des modes de torsion en fonction de la fréquence, pour un tube de diamètre externe 40 mm et d'épaisseur 1,6 mm [26]

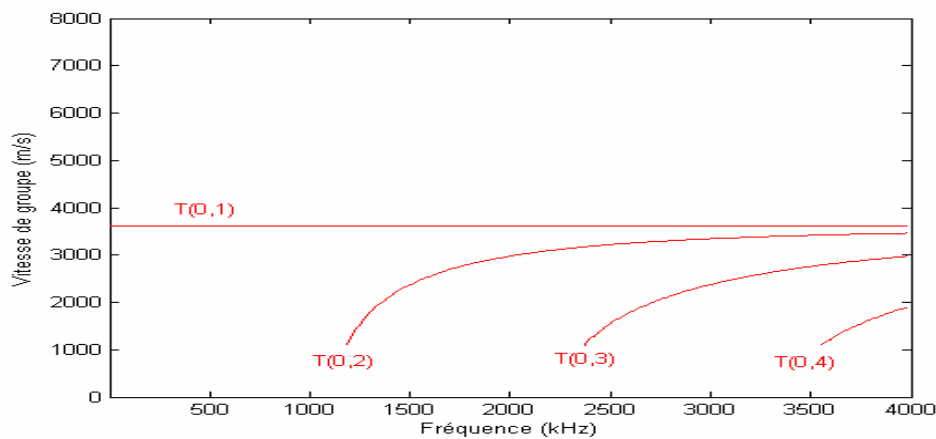


Figure I.8.c : Courbes de dispersion de la vitesse de groupe des modes de torsion en fonction de la fréquence, pour un tube de diamètre externe 40 mm et d'épaisseur 1,6 mm [26]

Nous remarquons, sur les figures, que les modes de compression sont plus nombreux que les modes de torsion. Les modes de torsion sont dispersifs sauf $T(0, 1)$: ils varient rapidement avec la fréquence. Employer les ondes guidées longitudinales avec le déplacement radial minimal et un déplacement axial important à la surface est comparable à employer des modes de torsion [28, 40].

Les modes longitudinaux sont générés exclusivement quand la source d'excitation est symétrique. Ces modes ont une distribution d'énergie symétrique autour de la circonférence.

I.5.3.2 Modes antisymétriques ou de flexion

Les vecteurs de déplacement des modes de flexion ($n \neq 0$) sont polarisés dans le plan (r, θ, z) : ils sont tridimensionnels. Pratiquement, il est très difficile de générer un mode de flexion unique [5]: La légère différence entre les valeurs de la vitesse de phase aux hautes fréquences crée une interférence entre les modes. Les modes antisymétriques peuvent être générés par une source d'excitation qui couvre seulement une partie de la circonférence.

En raison de leur complexité (les trois composantes de déplacement existent), ces modes de flexion sont habituellement évités dans les applications [28].

Le mouvement des ondes de flexion est décrit par les trois composantes du déplacement $U_r = u(r) \cos \theta$, $U_z = u(r) \sin \theta$ et $U_\theta = u(r) \sin \theta$ qui varient en fonction de θ .

L'examen, en fonction de l'angle θ , des variations du déplacement U_r (selon r), U_θ (selon θ), U_z (selon z) explique l'appellation ondes de flexion. En effet, pour $\theta = 0$, $U_\theta = 0$ donc les points du plan xz se déplacent dans ce plan, pour $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$, seul $U_\theta \neq 0$, les points du plan yz se déplacent parallèlement au plan xz [29].

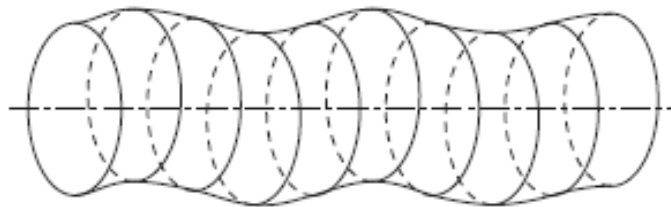


Figure I.9.a: Ondes de flexion ; le cylindre ondule

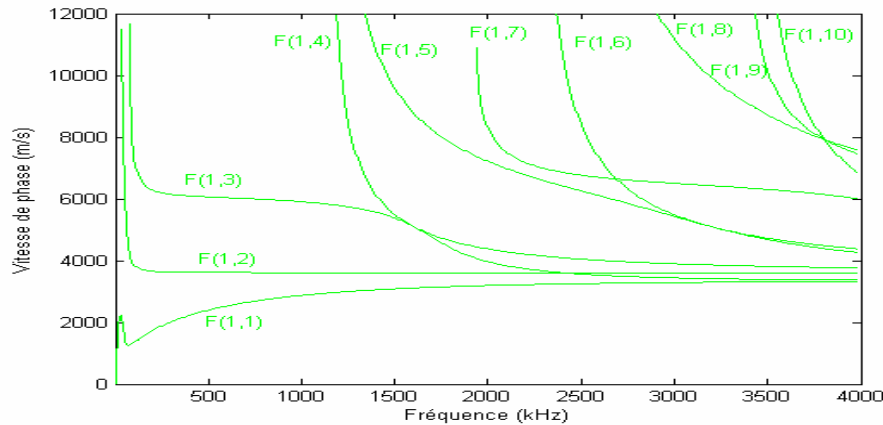


Figure I.9.b : Courbe de dispersion de la vitesse de phase des modes de flexion en fonction de la fréquence pour un tube de diamètre externe 40 mm et d'épaisseur 1,6 mm [26]

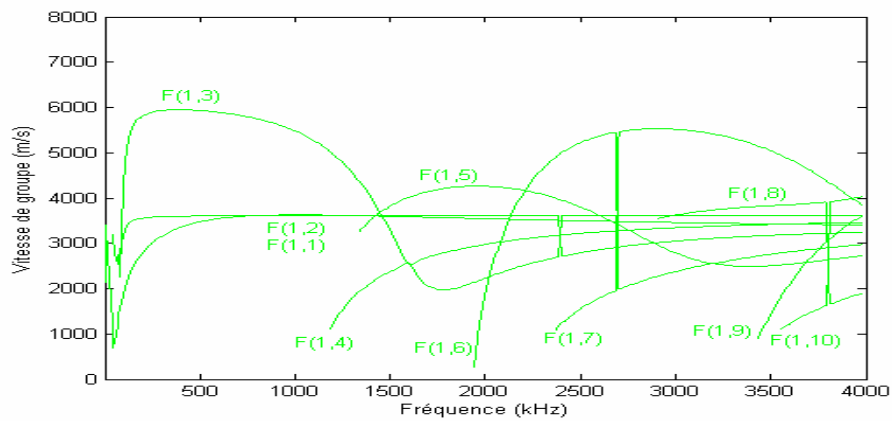


Figure I.9.c : Courbe de dispersion de la vitesse de groupe des modes de flexion en fonction de la fréquence pour un tube de diamètre externe 40 mm et d'épaisseur 1,6 mm [26]

I.6 Conclusion

En résumé, les courbes de dispersion mettent en évidence, tous les modes guidés qui peuvent exister dans une structure cylindrique creuse. Elles sont indispensables pour déterminer les procédures expérimentales pour générer et détecter ces modes.

Il y a trois types d'ondes qui peuvent se propager dans une structure tubulaire et il existe plusieurs méthodes pour les générer. Le chapitre suivant traitera de la possibilité d'utiliser différentes méthodes et techniques pour inspecter une structure tubulaire. Les avantages et les inconvénients de ces techniques de génération seront également abordés.

Chapitre II

METHODES ET TECHNIQUES POUR LA GENERATION ET LA DETECTION DES ONDES GUIDEES DANS LE DOMAINE DU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF

II.1 Introduction

L'analyse de la propagation et de la réflexion des ondes guidées dans une structure cylindrique creuse présentant des défauts, dus à la fatigue ou autre, est complexe. Pouvoir générer et détecter un mode spécifique, demande de faire appel à des techniques diverses.

Dans ce chapitre, nous aborderons les méthodes et techniques utilisées pour une inspection interne d'un tube encrassé, dans l'air. Nous discuterons les avantages et les inconvénients d'une des méthodes : la méthode des ondes guidées. Dans une seconde étape, nous expliquerons notre choix quant à prendre la technique des ondes guidées, dans une structure tubulaire symétrique choisie pour nos expériences.

II.2 Méthodes utilisées pour l'inspection interne d'un tube encrassé

II.2.1 Méthode des ondes de volume

En 1996, Withers a fait un résumé intéressant sur les techniques utilisant les ondes de volume ultrasonores pour la détection de dépôts de crasse sur les surfaces d'un tube ou d'une plaque [15]. Il s'est focalisé essentiellement sur les ondes longitudinales car, dans la plupart des cas, la propagation à travers un liquide non visqueux, ne permet pas la propagation des ondes transversales.

Les ondes longitudinales et les ondes transversales peuvent être générées dans un milieu volumique. Pour la localisation des dépôts de crasse à l'intérieur du tube, on mesure l'atténuation des modes incidents : plus l'atténuation est importante plus la couche est solide

ou épaisse. La différence entre la technique des ondes longitudinales et celle des ondes transversales est que cette dernière n'est pas sensible aux liquides dans le tube. Les ondes transversales ne s'atténuent que lorsque la surface interne du tube est encrassée par des couches visqueuses ou solides.

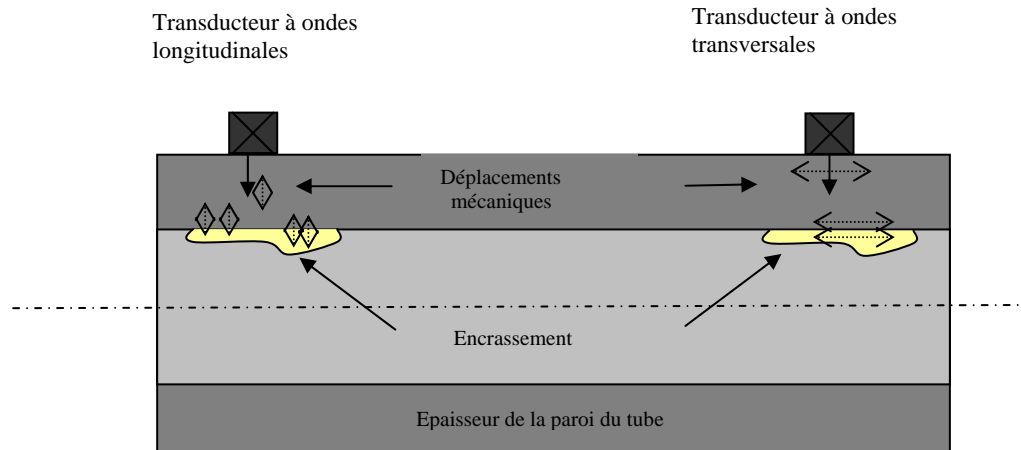


Figure II.1 : Propagation des ondes de volume dans l'épaisseur de la paroi d'un tube encrassé.

La technique des ondes de volume est la technique de point par point où, seulement, la zone sous le transducteur est contrôlée (Figure II.1). Cependant, la sonde doit être manœuvrée manuellement ou automatiquement autour de la circonférence et suivant l'axe de la structure pour obtenir des informations détaillées sur le degré d'encrassement. La mesure de l'épaisseur de la couche de crasse est difficile car le film crasseux n'est pas uniforme et les propriétés de la matière que constitue cette couche ne sont pas homogènes. Cette technique n'est pas beaucoup utilisée dans le contrôle non destructif car le temps de vol mis par l'onde pour revenir vers l'émetteur est très court et nécessite d'utiliser un traitement du signal approprié (méthode d'intercorrélacion, Transformée de Hilbert, etc.). De plus, pour contrôler l'intégrité de la structure, l'opérateur devra balayer toute la surface de la structure à tester.

II.2.2 Méthode des ondes guidées

En plus de l'utilisation des ondes de volume, il est possible d'utiliser les différents modes d'ondes guidées, ce que nous nous proposons de faire dans nos applications expérimentales.

Les structures, utilisées généralement dans les usines de fabrication de produits alimentaires, sont des tubes ou des plaques métalliques, pouvant jouer le rôle de guides

d'ondes pouvant supporter différents types de modes d'ondes guidées. Ces modes peuvent caractériser et inspecter entièrement ou partiellement un tube ou une plaque en se déplaçant dans l'épaisseur de la paroi de l'objet. Les ondes longitudinales, de torsion et de flexion se propagent dans la direction axiale. Sur la plaque, les modes de torsion n'existent pas, seuls les modes (de LAMB) de compression, de flexion et les ondes horizontales transversales (T.H.) existent [15].

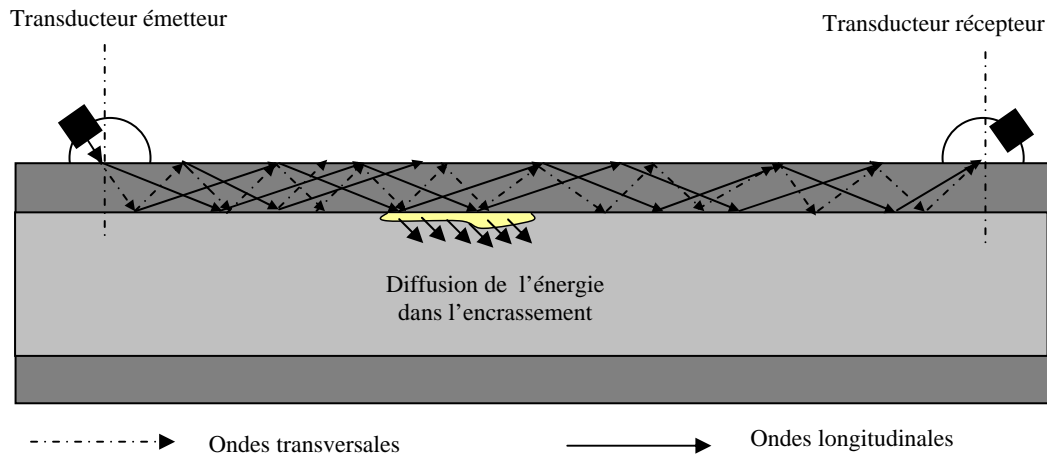


Figure II. 2 : Ondes guidées à travers la paroi du guide

Pour la détection des dépôts de crasse, il est préférable d'utiliser le ou les modes capables de faire la différence entre le liquide et les couches visqueuses ou solides sur la surface interne d'un tube. Par conséquent, dans ce cas, l'atténuation du signal sera plus ou moins importante selon la nature du corps en contact avec la surface interne du tube. Ces modes devront être capables de faire la distinction entre des liquides de différentes viscosités et des couches visqueuses, semi solides ou solide accumulées sur la surface interne du tube [15]. La qualité du test peut être améliorée en utilisant les ondes circonférentielles car la surface interne peut être inspectée entièrement avec une seule position du transducteur.

Relativement aux ondes de volume, les ondes guidées restent les plus utilisées dans les applications du contrôle non destructif : nous exposons ci-contre les avantages et les inconvénients de cette méthode.

II.2.2.1 Avantages de la technique des ondes guidées

La technique des ondes guidées dans le contrôle non destructif a connu un grand succès, relativement aux méthodes classiques. Ces avantages sont les suivants [1, 36]:

- Une sensibilité supérieure à celle obtenue en contrôle ordinaire par les ultrasons en incidence normale ou autre technique de contrôle non destructif.
- Inspection sur de longues distances pour une seule position du transducteur.
- Possibilité d'inspecter des structures immergées, couvertes de matière protectrices, enfouies et des structures multicouches avec une excellente sensibilité.
- En réglant la fréquence et l'angle d'incidence, on peut générer un mode précis pour une caractérisation bien déterminée.
- Les modes multiples existants, permettent de détecter, localiser et dimensionner des défauts ou des couches de dépôt alimentaire sur les surfaces des structures.
- Moindre coût, vu la simplicité et la rapidité des applications.
- Possibilité de l'utiliser pour différents matériaux : ferromagnétiques ou non ferromagnétiques.
- Vaste domaine d'utilisation de la technique avec un résultat immédiat.

II.2.2.2 Inconvénients de la technique des ondes guidées

- Avec la même fréquence et un angle d'incidence donné, il est difficile de générer un mode seul.
- Le phénomène de la dispersion étale le signal, qui se déforme et perd progressivement de son amplitude [32].
- Difficultés rencontrées dans le traitement des signaux : phénomène de conversion de modes [20].

II.3 Techniques de génération des ondes guidées sous une incidence oblique

II.3.1 Méthodes par contact

Cette méthode de génération est la plus utilisée en pratique. Dans le cas de l'incidence normale, le transducteur piézoélectrique peut être couplé directement avec la pièce à tester. Le couplage se fait par un film fluide très fin comme l'eau, le gel échographique, la graisse etc. Dans le cas où on veut incliner les sondes, émettrice et réceptrice, il est nécessaire

d'utiliser un sabot, milieu intermédiaire, à angle variable, comme dans notre cas (voir chapitre III).

En considérant la propagation des ondes guidées dans un tube, deux types de modes principaux peuvent être classifiés : les modes axisymétriques (les modes longitudinaux et de torsion) et les modes non axisymétriques (les modes de flexion).

II.3.1.1 Technique des ondes guidées axiales

Cette technique [33] de génération, utilisée sur des structures tubulaires dans le domaine du contrôle non destructif, est en plein développement. Elle peut être appliquée pour examiner un tube sur une longue distance. Cependant, parce qu'un nombre infini de modes est théoriquement possible, et que la vitesse de propagation des modes change en fonction de la fréquence, le choix de l'angle d'incidence doit être judicieusement fait. Basée sur des principes physiques, les courbes de dispersion des vitesses de phase et de groupe ont été tracées, à l'aide d'un programme Matlab, pour un diamètre et une épaisseur donnée (figures I.5 et I.6). Les modes et les fréquences pourront être optimisés par l'étude de la courbe de dispersion de la vitesse de groupe. L'angle d'incidence du transducteur ultrasonore peut être déterminé à partir de la vitesse de phase.

.Les modes longitudinaux et les modes de flexion sont souvent superposés, excepté pour les basses fréquences. Les modes longitudinaux sont mieux détectés en positionnant l'émetteur et le récepteur en regard. Par contre, pour mieux détecter les modes de flexion il est préférable, vu leur composante angulaire, de positionner à 180° l'émetteur et le récepteur symétriquement par rapport à l'axe du tube.

II.3.1.2 Technique des ondes guidées circonférentielles

Il est possible d'inspecter l'épaisseur d'un tube, sur un périmètre. Les ondes guidées, par cette épaisseur, ondes circonférentielles, sont analogues aux ondes de LAMB dans une plaque. Ces ondes permettent d'ausculter l'épaisseur, mais aussi de donner des indications sur la surface externe et interne du tube [5, 7]. A cause de la courbure du tube, il n'est pas facile de contrôler l'angle d'incidence des ondes guidées circonférentielles, à savoir la valeur de l'angle critique. Pratiquement, le signal reçu peut être amélioré par le mouvement rotatoire du transducteur ultrasonore. Ce qui nous permet de faire une cartographie des encrassements sur la surface interne du tube.

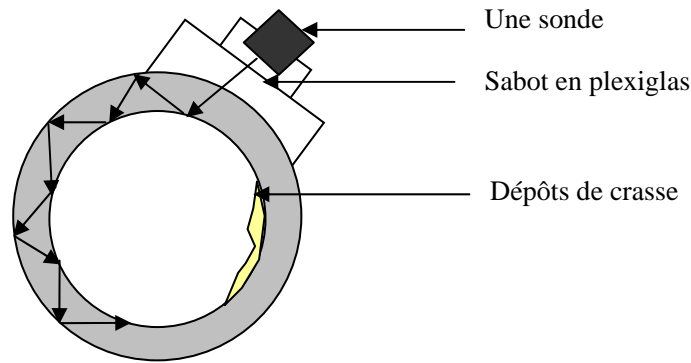


Figure II.3 : Ondes circumférentielles sous incidence oblique dans un tube encrassé

Pratiquement, on travaille beaucoup plus avec les ondes non axisymétriques que les ondes axisymétriques parce que les premières sont plus simples à générer et l'accès est généralement limité à la circonférence des structures à tester.

II.3.2 Méthode par immersion

Pour plus de facilité, et pour un meilleur contact, lorsque les pièces à contrôler sont maniables, il est recommandé d'immerger la structure dans l'eau, ceci ayant pour effet d'insoner la pièce avec une onde de compression sous un angle variable selon le mode à générer. Cette méthode permet d'avoir un couplage constant entre l'émetteur et le récepteur. Cependant, l'eau atténue légèrement les ondes [41, 35] et expose la structure à l'oxydation qui forme des couches qui perturbent la transmission des ondes ultrasonores. Cette technique est peu pratique lorsque les pièces sont lourdes et encombrantes [25].

II.4 Propriétés des modes guidés et sélection des modes

II.4.1 Choix de l'angle d'incidence

La sélection de l'angle d'incidence des modes propagateurs est très importante. Pour chaque mode, l'angle est déterminé à partir de la courbe de dispersion de la vitesse de phase en utilisant la formule suivante :

$$\cos \theta = \frac{V_p}{V_{ph}} \quad \Rightarrow \quad \theta = \arccos \frac{V_p}{V_{ph}} \quad (\text{II.1})$$

V_p : vitesse de l'onde dans le plexiglas.

V_{ph} : vitesse de phase du mode à générer (voir chapitre I)

θ : angle de génération du mode.

L'émetteur et le récepteur doivent être alignés parfaitement et être inclinés sous le même angle. Ces angles seront ajustés de telle façon à obtenir le mode désiré avec une amplitude importante. Dans notre expérience, nous voulons générer des modes de compression, axisymétriques, sensibles à la surface interne du tube.

II.4.2 Sélection des modes

Deux facteurs majeurs doivent être considérés lors de la sélection des modes à générer si l'on veut faire une inspection interne du tube :

- la sensibilité aux liquides et aux dépôts de crasse, en contact avec la surface interne
- la possibilité de parcourir de longues distances sans perdre beaucoup d'énergie.

Les courbes de dispersion et les courbes des déplacements et des contraintes nous permettent de faire une sélection précise des modes remplissant les critères ci-dessus. Ces courbes nous aident à situer les zones dispersives et non dispersives et à déterminer l'angle de génération ainsi que les variations des déplacements sur la paroi de la structure : il faut éviter les zones où les modes sont dispersifs dans ce cas, le signal se déforme en se propageant.

Pour un tube sain, vide et non encrassé, l'énergie perdue est théoriquement nulle et l'onde peut se propager sur plusieurs mètres sans pertes significatives en énergie. Si maintenant le tube est en contact, sur ses deux surfaces, interne et externe, avec des liquides et des couches, solides, semi-solides ou visqueuses, l'énergie sera transférée automatiquement, plus ou moins, dans ces derniers [35]. Dans ce cas, on constate la diminution en amplitude du signal détecté.

En observant les courbes de dispersion (Figure I.6), on remarque six modes susceptibles de nous intéresser : L (0, 2), L (0, 3), L (0, 4), F (1, 3), F (1, 5) et F (1, 6). Ce sont des modes rapides pouvant se propager sur de longues distances.

Pour choisir tel mode ou tel autre, pour détecter un fluide visqueux ou non visqueux, à l'intérieur du guide, il faut au préalable étudier le comportement mécanique, en fonction de la fréquence, du tube. Le comportement des composantes mécaniques, transversales, radiales et angulaires, à une fréquence donnée, permettra de choisir les modes utiles pour détecter des fluides visqueux ou non visqueux. Si le but est de détecter des fluides non visqueux, ou peu

visqueux ou des dépôts, il faut sélectionner un mode, dont la composante radiale est minimale, car dans ce cas l'onde sera insensible au fluide et l'amplitude du signal (signal, lorsque le tube est vide) ne variera pas ou, très peu. Pour les fluides ou dépôts visqueux, le mode choisi devra posséder un déplacement axial important, cisaillement apprécié par le fluide ou le dépôt visqueux, d'où une forte atténuation du signal d'origine.

Les contraintes ne nous permettent pas de prédire le comportement de l'onde lorsqu'un liquide ou un dépôt se trouve au contact de la surface interne du tube. Elles ne sont qu'une indication de l'état de contrainte de l'épaisseur du tube.

Dans ce qui suit, une série de courbes, représentant les déplacements et les contraintes, à une fréquence de 2.6 MHz, a été tracée.

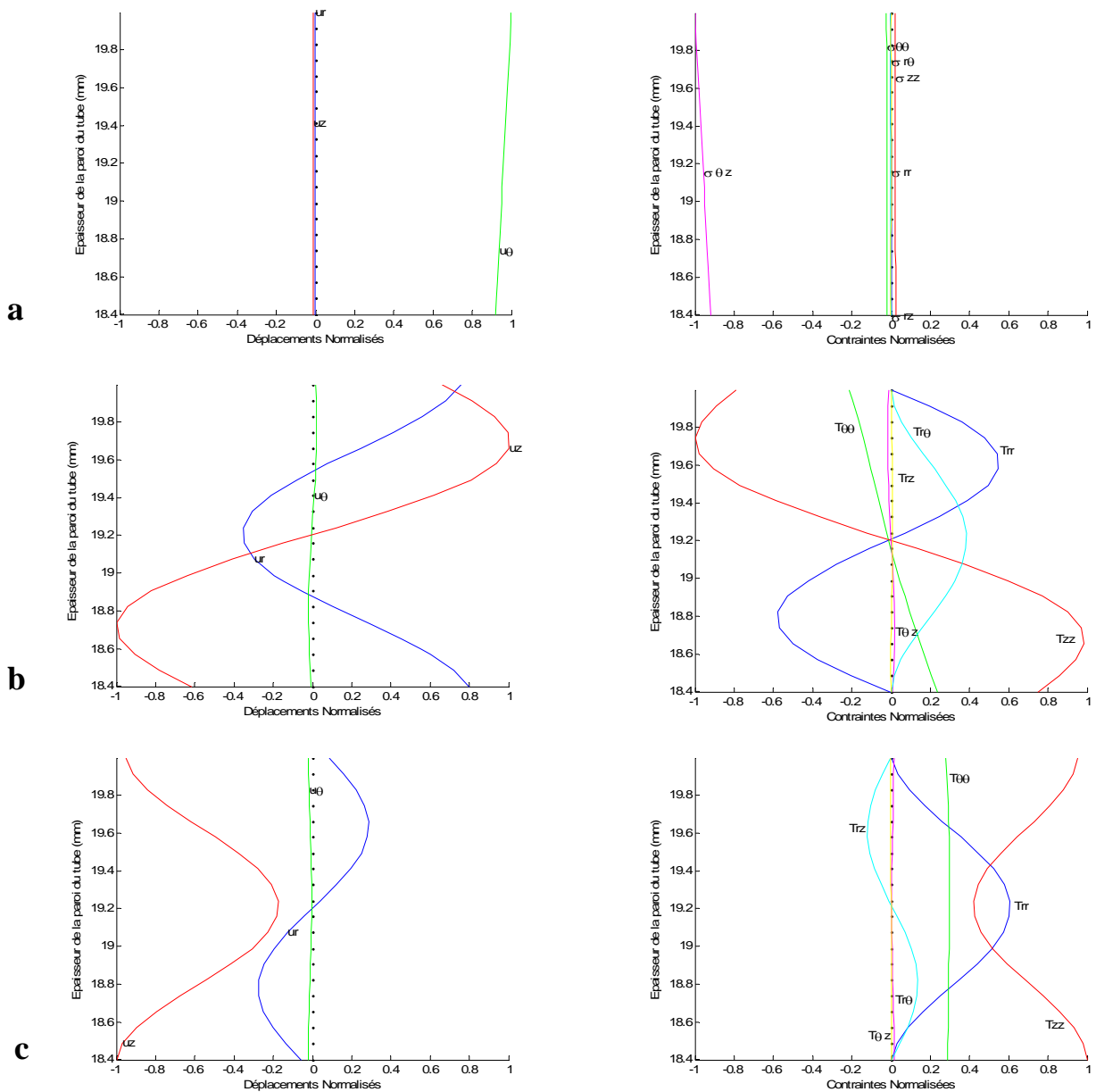


Figure II.4 : Représentation des déplacements et des contraintes normalisés sur la paroi du tube des modes, a : F(1, 3), b :F(1, 5),c :F(1, 6) à $f = 2.6$ MHz.

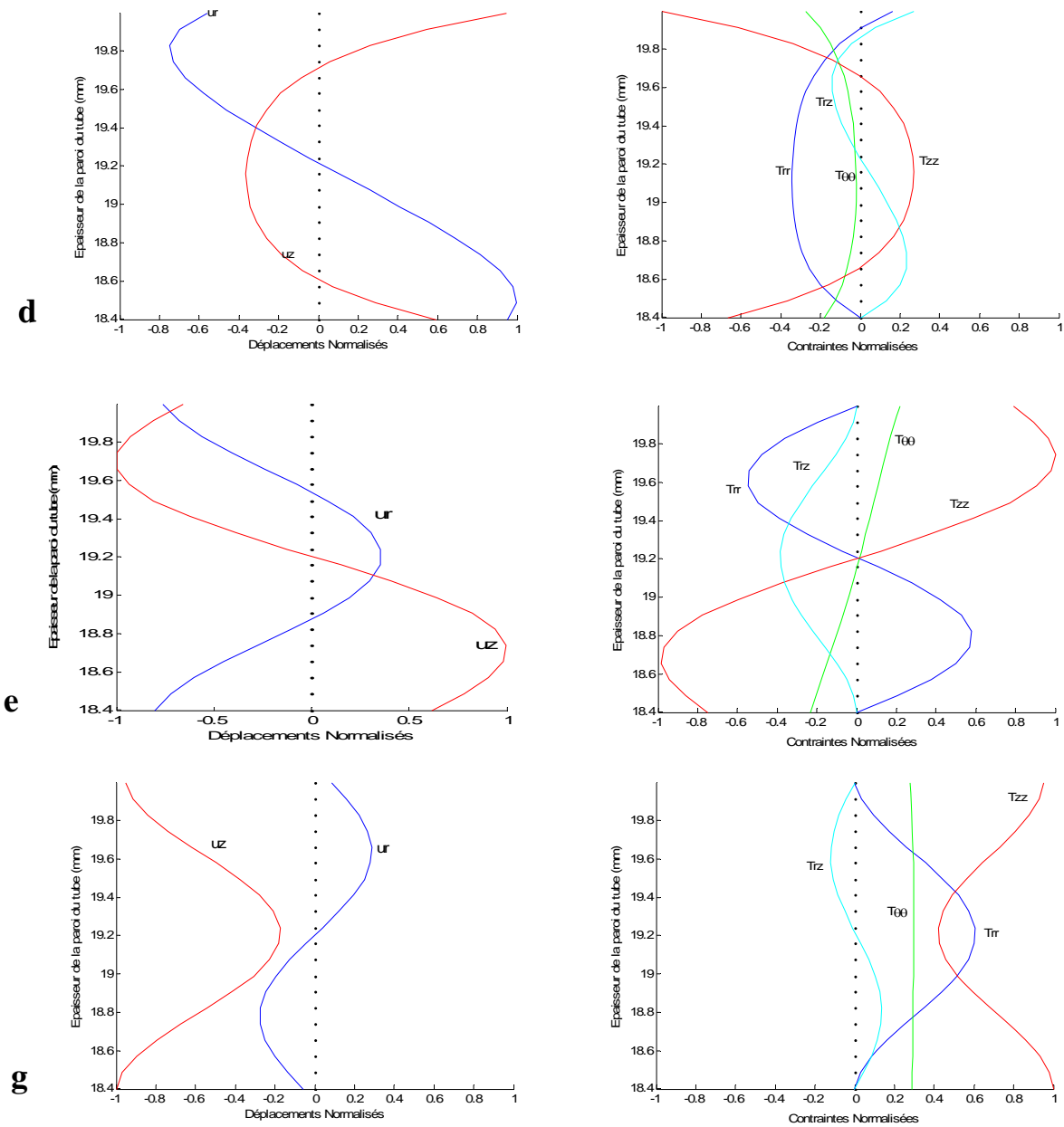


Figure II.5 : Déplacements et contraintes normalisés de la paroi du tube des modes d : L (0, 2), e :L (0, 3), f :L (0, 4) à $f = 2.6$ MHz

En observant les courbes de déplacement des modes F (1, 3) et L (0, 2), nous constatons qu'ils ne répondent pas aux critères sus-cités : le déplacement radial ne tend pas vers zéro. Il ne reste que quatre modes L (0, 3), L (0, 4), F (1, 6) et F (1, 5). L'étude des courbes de dispersion (Figures I.5 et I.6.) des déplacements et des contraintes, montrent que, mécaniquement parlant, les modes L (0, 3) et F (1, 6) se valent ainsi que les modes L (0, 4) et F (1, 5). En ce qui nous concerne, nous essayerons de générer les modes de compression même s'ils restent indiscernables des modes de flexion sus-cités.

II.5 Courbe de déplacements en fonction de la fréquence

Les déplacements mécaniques $\frac{|U_r|}{|U_z|}$ des modes de propagation L (0, 3) et L (0, 4) nous informent précisément sur la sensibilité de ces modes aux différents milieux, en contact avec la surface interne du tube, pour différentes fréquences.

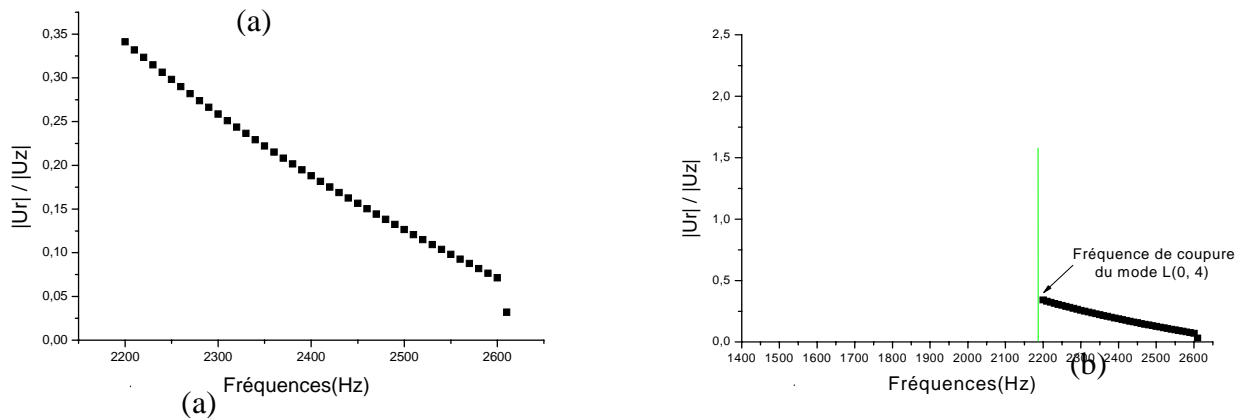


Figure II. 5 : Rapport des modules des déplacements mécaniques $\frac{|U_r|}{|U_z|}$ du mode L (0, 4) en fonction de la fréquence

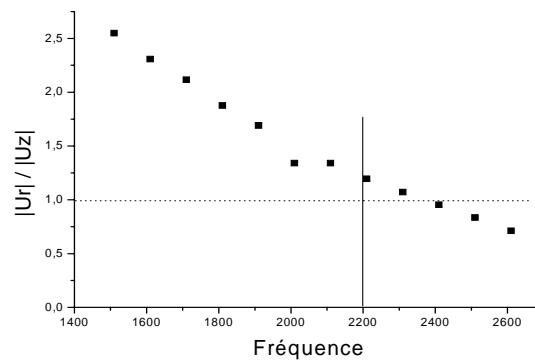


Figure II. 6 : Rapport des modules des déplacements mécaniques $\frac{|U_r|}{|U_z|}$ du mode L (0, 3) en fonction de la fréquence

La prédominance de la composante longitudinale est confirmée pour le mode L (0, 4) à toutes les fréquences, au-delà de sa fréquence de coupure qui est de l'ordre de 2,4 MHz. Ce mode, pour des fréquences supérieures à sa fréquence de coupure, pourra être utilisé pour détecter des dépôts ou des fluides plus ou moins visqueux, sur la surface interne du tube. Par contre, pour le mode L (0, 3), la composante transversale l'emporte, en général,

sur la composante longitudinale, ceci rend intéressant ce mode pour détecter des corps non visqueux ou très peu visqueux.

L'étude théorique précédente, nous a permis de comprendre comment se comporte un tube, lorsqu'une onde ultrasonore le parcourt. Les méthodes de génération et de détection ont été exposées et les déplacements mécaniques ont été tracés. Il ressort de cette étude que nous pouvons utiliser un mode de compression ou un autre selon le besoin. La partie expérimentale qui suit, permettra de valider notre étude théorique. Pour cela nous avons besoin de générer les ondes élastiques sous des angles précis. Donc, au préalable, nous décrirons un système de génération et de détection à angle variables, de notre conception, que nous avons réalisé.

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre III

CONCEPTION ET REALISATION D'UN DISPOSITIF A ANGLE VARIABLE, POUR LA GENERATION ET LA DETECTION DES ONDES ELASTIQUES GUIDEES

III.1 Introduction

Pour bien mener nos expériences, sur l'inspection interne d'un tube encrassé en utilisant les ondes guidées, en utilisant la méthode par contact, nous avons conçu et réalisé un dispositif expérimental à angle variable nous permettant de générer et de détecter les signaux réfléchis par d'éventuels défauts.

La réalisation de ce système demande donc la prise en compte de certaines conditions:

- permettre au transducteur de tourner librement pour que l'opérateur puisse choisir l'angle de génération et de détection désiré
- choisir la matière avec laquelle sera fait le sabot, qui doit être favorable à la propagation des ondes élastiques et servir de milieu intermédiaire entre le guide et les sondes.

Pour procéder à la réalisation de ce dispositif, en respectant les conditions précédentes, nous devons fabriquer plusieurs pièces indépendantes et faire ensuite le montage de telle façon à réaliser un système pivotant, épousant parfaitement le guide.

III.2 Schéma fonctionnel

Le choix des modes susceptibles de satisfaire nos objectifs nous pousse à chercher un moyen de les générer, ce moyen est le changement d'angle d'incidence. Il nous faut, donc, un transducteur à angle variable. Notre conception sera basée sur le schéma fonctionnel suivant :

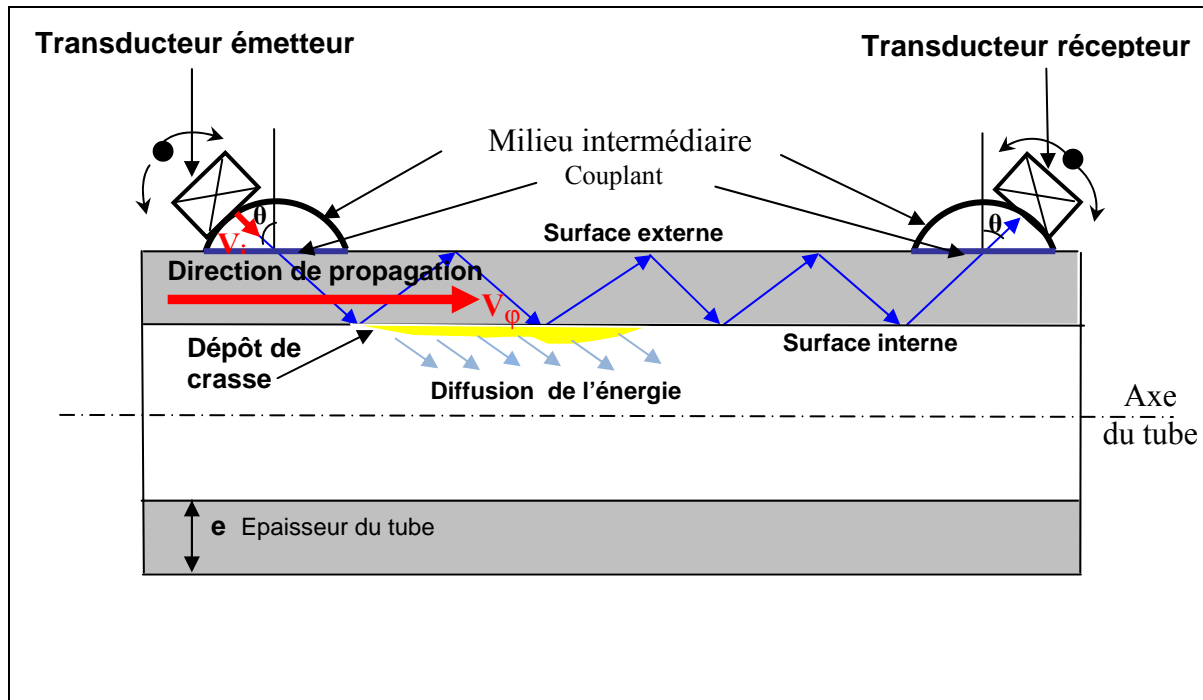


Figure III.1 : Schéma fonctionnel de l'expérience

III.2.1 Principe de génération et de détection des ondes sous incidence oblique

Le faisceau acoustique ultrasonore généré, sous incidence oblique, par le transducteur émetteur se propage dans la structure en passant par un milieu intermédiaire. Ce dernier doit permettre une meilleure propagation du faisceau acoustique; pour ce faire, une adaptation des milieux est assurée afin de palier aux problèmes d'atténuation et de réflexion des ondes.

En arrivant sur la coque du tube, une partie de l'onde se réfléchit et une autre se transmet dans le solide : La vibration du transducteur émise sous un angle donné, calculée selon la loi de SNELL-DESCARTES, génère le mode désiré, celui-ci sera détecté sous le même angle par le transducteur récepteur. La loi de SNELL-DESCARTES relie la vitesse

de phase de l'onde incidente V_φ à la vitesse longitudinale dans le milieu intermédiaire (i) à l'angle d'incidence θ .

$$\sin \theta = V_i / V_\varphi \quad (\text{III.1})$$

III.2.2 Choix de la matière intermédiaire

Pour permettre au transducteur de s'aligner sous un angle d'incidence choisi, nous devons réaliser un système qui le tienne et qui lui permette de pivoter. La matière dans laquelle ce système sera fabriqué doit, nécessairement, être favorable à la propagation des ondes acoustiques. Dans ce cas, la vitesse acoustique dans cette matière intermédiaire (celle qui relie le transducteur et le tube) doit être inférieure à la vitesse dans le guide, ceci afin d'éviter la réflexion totale sur le guide. Notre choix s'est porté sur le **plexiglas** qui remplit les conditions citées précédemment. La vitesse dans le plexiglas, mesurée au laboratoire, est de 2788 m/s.

III.2.3 Eléments constitutifs du dispositif

III.2.3.1 Transducteurs piézoélectriques pour ondes de volume

L'étude expérimentale de la propagation des ondes acoustiques nécessite des dispositifs, appelés transducteurs, aptes à engendrer ces ondes et à les détecter efficacement. Les transducteurs, appelés aussi palpeurs, sondes ou traducteurs, fonctionnent par effet piézoélectricité directe ou inverse. La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique (effet direct) et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet inverse).

Ils comprennent essentiellement un matériau piézoélectrique portant deux électrodes métalliques. Le champ électrique du signal appliqué entre les électrodes met en vibration le solide piézoélectrique, dont l'épaisseur est de l'ordre de la longueur d'onde élastique. L'électrode interne fixée sur le milieu de propagation est traversée par le faisceau d'ondes élastiques dont les dimensions sont imposées par l'électrode extérieure. L'orientation cristallographique du solide piézoélectrique est choisie pour que le mode élastique désiré soit excité [11, 14, 42]. En résumé, les matériaux piézoélectriques

permettent de convertir une contrainte mécanique en polarisation électrique et réciproquement.

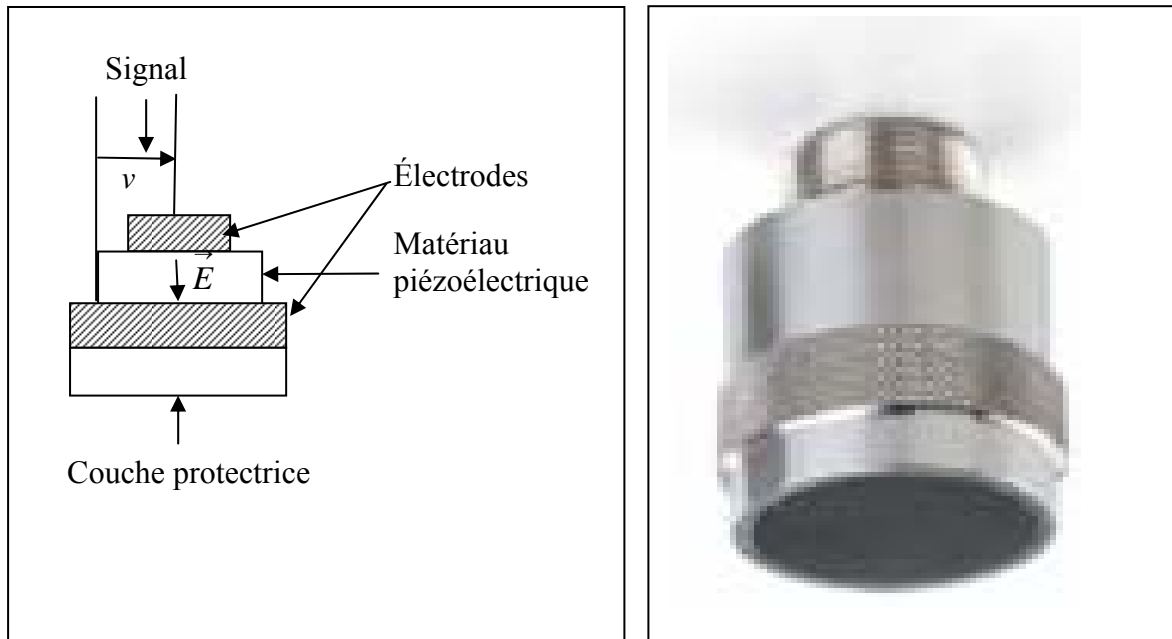


Figure III.2 : Structure d'un transducteur.

Le matériau piézoélectrique est excité par le champ électrique \vec{E} du signal v appliqué entre les deux électrodes [11].

La réalisation d'un transducteur doit être guidée par son utilisation ultérieure. Les principaux choix de son élaboration, et en particulier pour les matériaux vibrants sont :

- Domaine d'application, forte ou faible puissance,
- Le domaine de fréquence,
- Le domaine de température utilisé,
- L'utilisation en émission, en réception ou les deux à la fois,
- La nature des signaux fournis, ondes continues ou signal bref.

III.2.3.2 Adaptation des impédances acoustiques

Pour que le maximum d'énergie puisse être transféré au guide d'ondes, il est nécessaire d'avoir un milieu intermédiaire entre celui-ci et le transducteur.

Les ondes ultrasonores sont réfléchies ou atténuées pour tout changement d'impédance. L'impédance acoustique Z caractérise le matériau du point de vue élastique

lorsqu'il est parcouru par une onde longitudinale : on peut définir son impédance acoustique Z comme le produit de sa section S , de sa masse volumique ρ et de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores longitudinales V dans celui-ci :

$$Z = \rho .S.V \quad \text{(III.3)}$$

Dans nos expériences nous avons quatre milieux, donc quatre impédances distinctes : Z_1 pour le matériau cristallin piézoélectrique, le Zirconate-Titanate de Plomb ($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ ou PZT) [17] de la sonde, Z_2 pour le support, Z_3 pour le fluide adaptateur et Z_4 pour le guide.

La superposition des pièces du sabot peut perturber l'onde incidente. Cependant pour éviter ce problème, nous devons choisir une matière qui servira d'adaptateur d'impédance. Cette matière peut être du gel, de l'eau, du plexiglas, etc. Comme la méthode de génération par contact exige un adaptateur solide, notre choix s'est porté sur le plexiglas.

Les tubes utilisés dans les industries de produits alimentaires, sont des guides d'ondes naturels pouvant supporter différents types d'ondes guidées : ondes de compression, de torsion et de flexion [15].

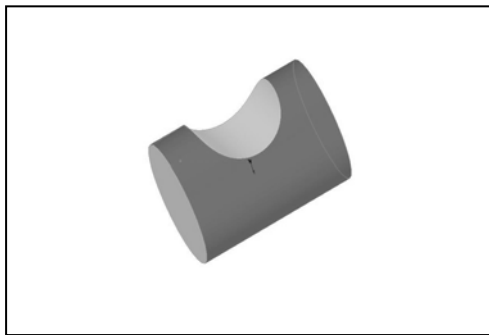
Pour nos expériences, dans la caractérisations des fluides et la détection des accumulations des produits alimentaires sur la surface interne des tubes, nous utiliserons un tube en acier inoxydable de type 316L (norme américaine) [16] de 40 mm de diamètre extérieur et de 38,4 mm de diamètre intérieur (épaisseur 1,6 mm).

III.3 Réalisation du dispositif expérimental à angle variable

La réalisation du dispositif, qui nous servira pour la génération et la détection des modes d'ondes désirés, sera conçue de telle manière à satisfaire toutes les conditions fixées dans la partie théorique ; la fréquence, l'angle de génération et les vitesses de groupe et de phase. Trois pièces à concevoir pour ce dispositif ont été conçues.

La première pièce conçue, à partir d'un cylindre de plexiglas, est celle qui va épouser parfaitement le guide d'ondes, elle devra permettre à la deuxième pièce de pivoter. Elle est usinée de façon précise, car elle doit être centrée, puis polie pour que la surface de contact soit lisse. Sur les deux cotés de la pièce, on fore des trous sur mesure d'un boulon de 10 mm pour pouvoir serrer toutes les pièces du sabot, en utilisant une autre pièce, avec

un écrou. La surface circulaire du cylindre est graduée, de sorte à pouvoir orienter le transducteur de façon précise selon l'angle désiré.



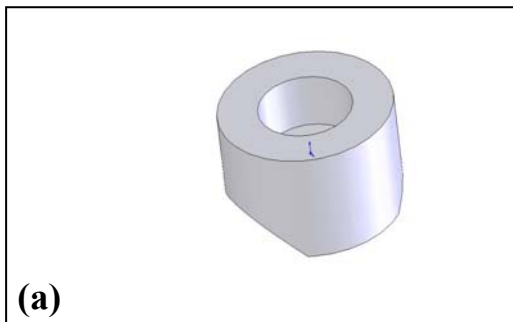
(a)



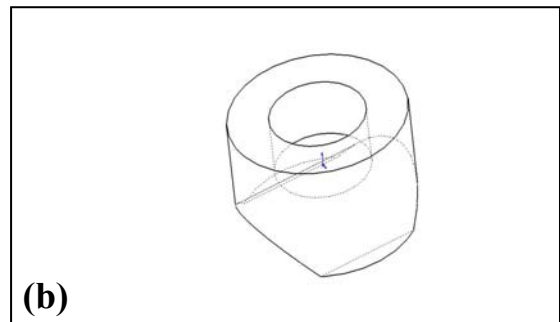
(b)

Figure III.3 : Réalisation de la première pièce qui épousera le guide d'onde
(a) : Schéma de la deuxième pièce. (b) : Photo de la deuxième pièce.

La deuxième pièce, conçue et réalisée, relie la première à la sonde. Elle doit avoir la liberté de tourner en tenant le transducteur. Pour cela, on usine l'une des surfaces de la pièce de manière à ce qu'elle épouse parfaitement la première pièce.



(a)



(b)

Figure III.3 : Schéma de la deuxième pièce (a et b)



Figure III.4 : Photo de la deuxième pièce servant à relier la sonde à la première pièce

La troisième pièce sert à relier les deux autres pièces au transducteur.



Figure III.5 : Photo de la troisième pièce

Réalisation du sabot à angle variable

En assemblant toutes les pièces usinées, nous aurons un système à angle variable, pour la génération et la détection des ondes élastique guidées (figure suivante).



(a)

Figure III.6 : Photo du dispositif à angle variable pour la génération et la détection des ondes guidées.

(a) : Vue de face ; (b) : Vue de profil



(b)

III.4 Principe d'utilisation

Le système de génération et de détection des ondes guidées à angle variable, réalisé au sein de l'équipe « Ondes et Acoustique », est utilisé pour la méthode par contact : l'émetteur est directement appliqué sur la structure à contrôler en utilisant le sabot en plexiglas comme milieu intermédiaire satisfaisant à la condition de pivotement du

transducteur autour de la circonférence du tube. Entre les pièces, le couplage se fait par des films de fluide du gel.

Nous pouvons utiliser deux transducteurs, l'un comme émetteur et l'autre comme récepteur ou un seul transducteur jouant le rôle d'émetteur et de récepteur. Cette dernière technique est la plus répandue dans le contrôle non destructif [30].

Dans notre travail, nous voulons générer, sous un angle déterminé préalablement, deux modes de compression L (0, 3) et L (0, 4) et les utiliser ensuite pour classer, par rapport à l'eau, des fluides selon leurs viscosités et détecter des dépôts d'aliments (encrassement) collés à la surface interne d'un tube.

Pour bien mener nos expériences, nous avons, au préalable, tracé les courbes reliant l'angle de génération à la fréquence. Cette courbe nous permet de choisir la fréquence d'excitation du transducteur pour éviter de générer les deux modes simultanément.

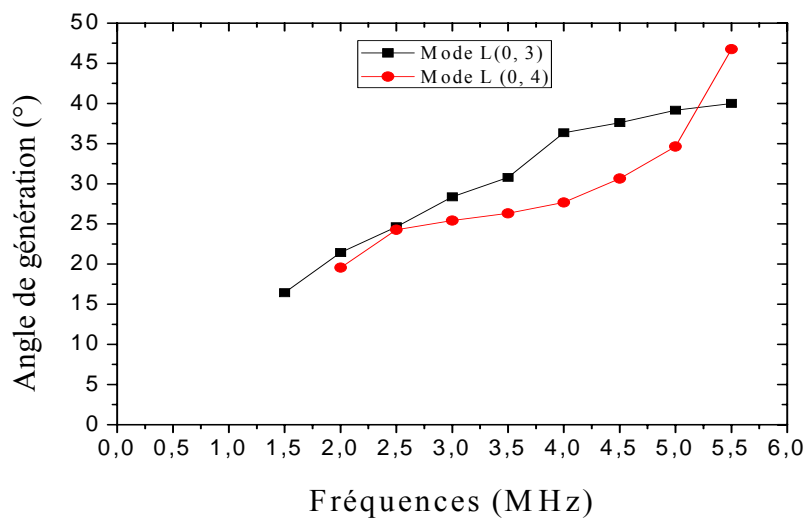


Figure III.7 : Angles de génération des modes L (0, 3) et L (0, 4) en fonction de la fréquence

La figure ci-dessus, montre qu'on ne peut pas générer les modes de compression L (0, 3) et L (0, 4) à basse fréquences, car la fréquence de coupure pour le premier mode est de 1, 5 MHz ($\theta = 16,6^\circ$) et pour le deuxième mode elle est de 1,94 MHz ($\theta = 19,5^\circ$).

III.5 Conclusion

Malgré les difficultés pour usiner des pièces demandant une grande précision, nous avons réussi à réaliser un système de génération et de détection des ondes guidées à angles variables. Ce dispositif nous permettra de positionner le transducteur à un angle choisi, pour générer les modes souhaités : des modes sensibles aux liquides et aux couches de dépôts de crasse en contact avec la paroi interne du tube.

Le prochain chapitre détaille les résultats obtenus avec le dispositif à angle variable élaboré.

Chapitre IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTEPRETATION

IV.1 Introduction

Le but de cette série d'expériences est la caractérisation des fluides, de différentes viscosités, et la détection des dépôts de crasse, en contact avec la surface interne d'une structure tubulaire utilisée généralement dans l'industrie alimentaire.

L'étude théorique précédente, nous permet de choisir les conditions nécessaires pour la génération des modes désirés, en choisissant la fréquence et l'angle d'incidence. Cette étude nous a permis, en outre, de connaître le comportement des ondes guidées, dans une structure cylindrique creuse, quand elles interagissent avec des liquides et des dépôts alimentaires.

Pratiquement, il n'est pas évident de générer un mode unique. En effet, d'après les courbes de dispersion, il existe des modes très proches les uns des autres. Par exemple, aux fréquences de 2.5 MHz et de 5.4 MHz, il est difficile de dissocier, expérimentalement (les angles étant très proches, $22^\circ < \theta < 23,7^\circ$), les modes L (0, 3) et L (0, 4) (Figure III.7).

Les ondes guidées ultrasonores seront utilisées dans deux configurations : mode-écho et émission-réception. Les ondes seront générées et se propageront le long du guide. Lors de l'interaction avec les dépôts de crasse, une partie de l'énergie de l'onde guidée sera dissipée dans ce dernier. Le signal reçu, après contact avec l'encrassement, portera des informations sur la nature visqueuse du dépôt.

IV.2 Procédés expérimentaux

IV.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental se compose de guide d'onde en acier inoxydable, de type 316 L (voir Annexe) à l'air libre (comme dans le cas des usines de produits alimentaires), de deux sabots identiques en plexiglas (milieu intermédiaire), pour tenir les transducteurs de telle manière à leurs permettre de tourner pour générer les ondes avec une incidence oblique : modes guidées [1]. Les deux sondes sont utilisées simultanément dans le cas du contrôle par contact, émetteur-récepteur séparés : l'une envoie l'onde l'autre la reçoit.

Un générateur d'impulsion électrique, de type SOFRANEL de série PM5715, fournit des impulsions électriques de période, de durée et d'amplitude ajustables. L'impulsion électrique générée est émise du connecteur E (Emetteur) vers la sonde émettrice. Par effet piézoélectrique inverse, l'impulsion électrique sera convertie en onde mécanique. Cette onde traverse le guide pour être détectée par la sonde réceptrice et par l'effet piézoélectrique direct, le signal est converti en une impulsion électrique pour être détecté à son tour par le récepteur R (Recepteur) pour le transmettre au générateur ayant des fonctions de filtrage et d'amplification intégré. Un Oscilloscope numérique de type TEKTRONIX série 2215A, permet la visualisation et la mesure de l'amplitude du signal et offre la possibilité d'enregistrer les résultats sous forme de fichier, en vue d'un traitement ultérieur des données sur un ordinateur.

Les ondes sont générées et détectées par des transducteurs ultrasonores à immersion, de marque SOFRANEL (panametrics v305) d'ouverture circulaire, vibrant en mode piston, dont le disque actif piézoélectrique de types PZT [17], a un diamètre de 22.5 mm avec une fréquence centrale de 2,25 MHz, étendue sur une gamme de 1,24 MHz à 2,91MHz.

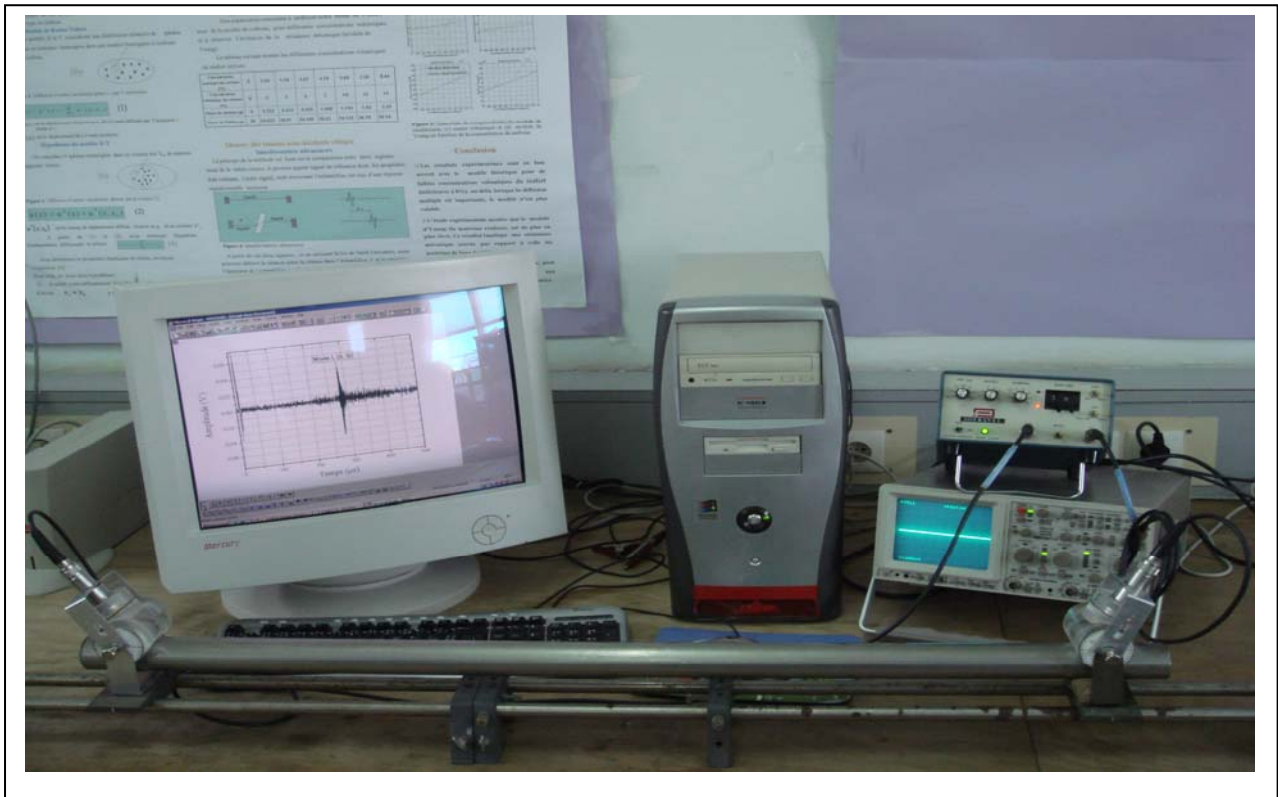
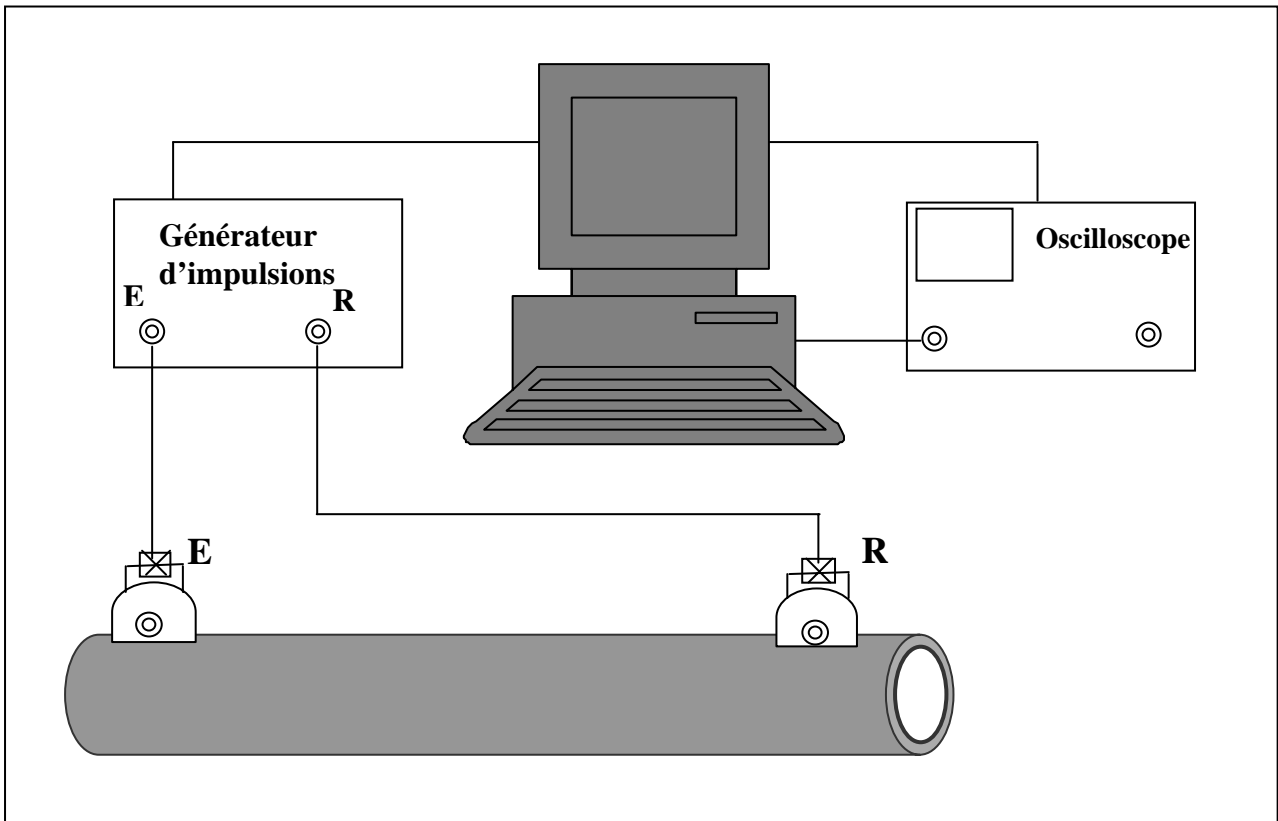


Figure IV.1 : Schéma et photo représentatifs du dispositif expérimental

IV.2.2 Caractérisation des transducteurs

Nous avons utilisé, pour nos expériences, deux transducteurs identiques, un en émetteur et un en récepteur.

Les changements d'amplitudes du signal source, peuvent être utilisés pour mesurer l'atténuation du milieu. La variation relative entre le signal source et le signal ayant traversé le milieu de mesure est souvent mesurée en décibels. Les valeurs décibels sont des valeurs logarithmiques du rapport des amplitudes des deux signaux. Le calcul se fait en utilisant la formule suivante :

$$a_{dB} = 20 \log \left[\frac{A_1}{A_2} \right] \quad (\text{IV.1})$$

Les transducteurs de fréquence centrale 2,25 MHz possèdent une bande passante de 1.67 MHz (1,24 MHz à 2,91MHz), à - 6 dB.

Le sabot, en plexiglas (deux pièces successives), utilisé pour faciliter la rotation du transducteur, atténue fortement l'amplitude de signal source. Dans ce qui suit, nous caractérisons les transducteurs chaussés de plexiglas. Pour confirmer notre analyse sur l'atténuation et la réflexion des ondes par ce matériau, nous avons refait la même expérience pour deux autres palpeurs de fréquences centrales 1 MHz et 0,5 MHz.

IV.2.2.1 Caractérisation du palpeur de fréquence centrale 2, 25 MHz

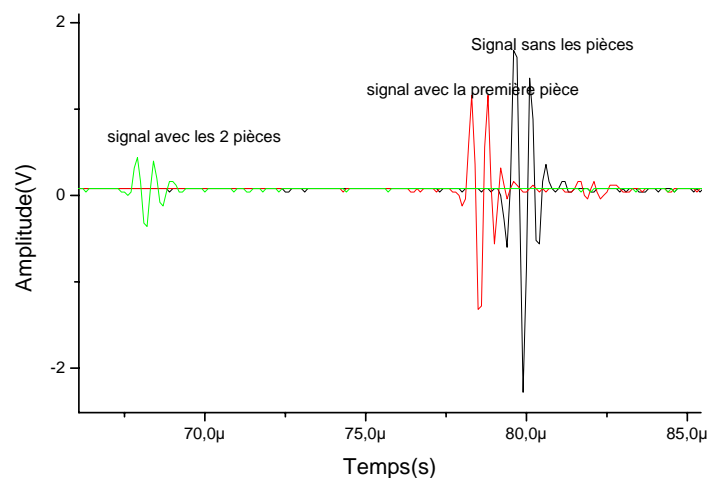


Figure IV.2-a : Signaux temporels générés par la sonde de fréquence centrale 2,25 MHz au contact des deux pièces en plexiglas.

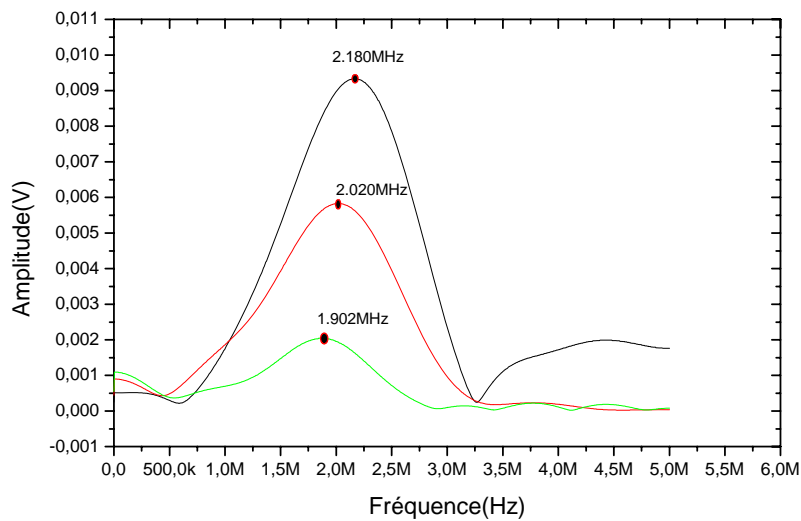


Figure IV.2-b : Transformée de Fourier rapide des signaux temporels générés par la sonde de fréquence centrale 2,25 MHz.

Les ondes guidées qui se propagent sur le tube sont générées par des transducteurs de fréquence centrale de 2,25 MHz.

Nous avons représentés, sur la figure IV.2.b, les transformées de Fourier des signaux temporels des trois cas : le transducteur nu (courbe noire), avec la première pièce (courbe rouge) et avec les deux pièces (courbe verte). On remarque qu'il y a un décalage en fréquence et une forte atténuation en amplitude : de -4 dB ($0,0035$ V) en passant du transducteur libre au transducteur chaussé du premier support en plexiglas, de -9 dB ($0,004$ V) en passant du transducteur chaussé du premier support transducteur au transducteur chaussé des deux supports et enfin, de -13 dB ($0,0075$ V) en passant du transducteur libre au transducteur chaussé des deux supports.

La diminution en fréquence est due à l'absorption des hautes fréquences par le plexiglas qui joue le rôle d'un filtre haut. On constate que la première pièce a absorbé légèrement les petites longueurs d'onde (épaisseur du matériau 5 mm). Par contre, en mettant la deuxième pièce, l'absorption devient importante par rapport à la première pièce (épaisseur de 45 mm ; pièce 1 + pièce 2).

Calcul du coefficient de qualité Q

Avant de calculer les coefficients de qualité, nous devons calculer d'abord les bandes passantes à -3 dB Δf pour chaque signal.

Pour le premier signal (noir) : $\Delta f_1 = 2,918 - 1,243 = 1,675$ MHz

Pour le deuxième signal (rouge) : $\Delta f_2 = 2,783 - 1,027 = 1,756$ MHz

Pour le troisième signal (vert) : $\Delta f_3 = 2,621 - 0,810 = 1,811$ MHz

Le coefficient de qualité se calcule de la façon suivante :

$$Q = \frac{f}{\Delta f} \quad (\text{IV.2})$$

Les coefficients de qualité pour les trois signaux sont :

$$Q_1 = \frac{f_1}{\Delta f_1} = \frac{2,180}{1,675} = 1.301$$

$$Q_2 = \frac{f_2}{\Delta f_2} = \frac{2,023}{1,756} = 1.207$$

$$Q_3 = \frac{f_3}{\Delta f_3} = \frac{1,870}{1,811} = 1.032$$

On constate que plus la couche de plexiglas est grande (en superposant les deux pièces) plus les courbes s'étalent, la bande passante devient importante ce qui explique la diminution du coefficient de qualité donc l'augmentation des pertes en énergie.

IV.2.2.2 Caractérisation du palpeur de fréquence centrale 1 MHz

Pour confirmer notre raisonnement fait pour le transducteur de 2,25 MHz, nous avons refait la même expérience pour la sonde de 1 MHz avec le même dispositif expérimental et dans les mêmes conditions. Les résultats sont présentés sur la figure suivante :

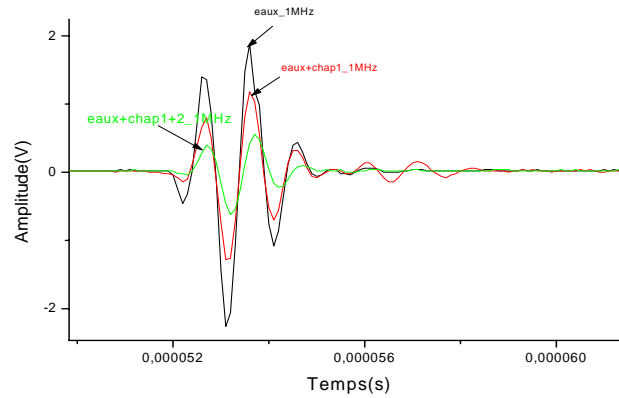


Figure IV.3-a : Signaux temporels générés par la sonde de fréquence centrale 1 MHz en présence des deux pièces en plexiglas.

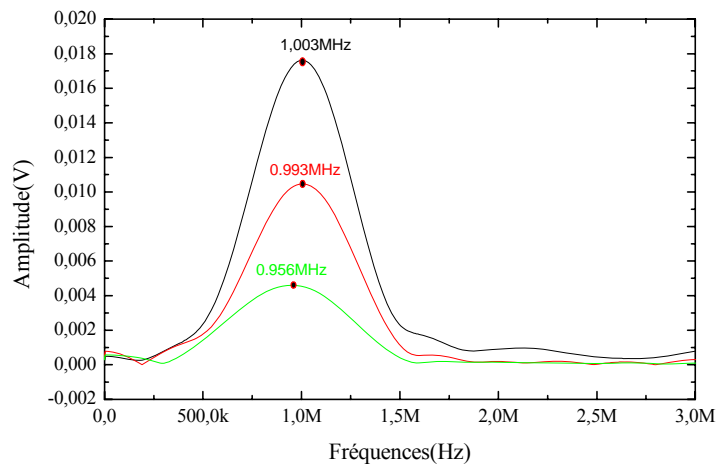


Figure IV.3-b : Transformée de Fourier rapide des signaux temporels générés par la sonde de fréquence centrale 1 MHz.

Nous constatons que les courbes sont plus étroites avec des amplitudes plus importantes. Ce qui confirme le rôle de filtre de hautes fréquences joué par la matière intermédiaire (le plexiglas).

IV.2.2.3 Caractérisation du palpeur de fréquence centrale 0,5 MHz

La caractérisation de la sonde de 0,5 MHz, dans les mêmes conditions, appuie l'hypothèse de l'absorption des hautes fréquences par la matière intermédiaire. Les résultats sont les suivants :

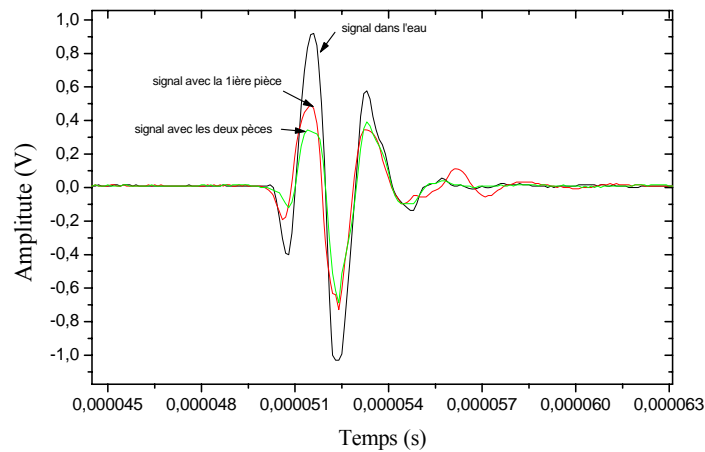


Figure IV.4-a : Signaux temporels générés par la sonde de fréquence centrale 0,5 MHz en présence des deux pièces en plexiglas.

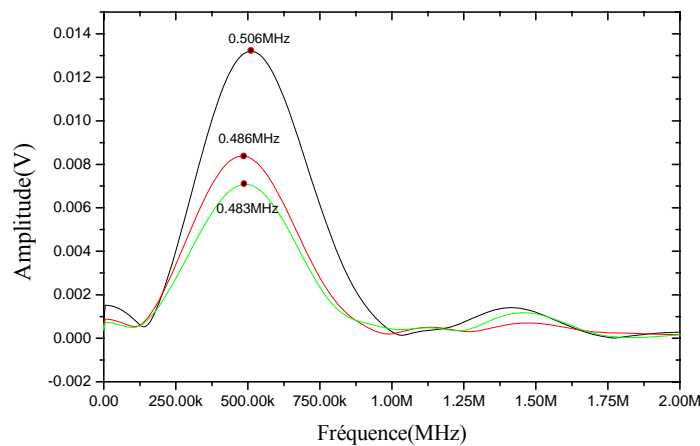


Figure IV.4-b : FFT des signaux temporels générés par la sonde de fréquence centrale 0,5 MHz.

Mêmes remarques que pour les premières courbes : nous constatons que les courbes de la FFT du signal temporel de la sonde de 0,5 MHz est étroite avec une amplitude plus importante. Ce qui confirme l'absorption des hautes fréquences par la matière intermédiaire (le plexiglas).

IV.3 Résultats expérimentaux et interprétation

Notre travail consiste à détecter et à caractériser des milieux, de différentes viscosités, en contact avec la paroi interne du tube, en acier inoxydable de diamètre externe 40 mm et

d'épaisseur 1.6 mm, en utilisant la méthode des ondes guidées. Dans une première étape, nous générerons expérimentalement les modes choisis dans un tube propre (non encrassé). Par la suite, le tube sera rempli d'un liquide de plus en plus visqueux.

Tableau IV.1 comparaison entre valeurs expérimentales et valeurs théoriques

Modes	L (0, 3)	L (0, 4)
Fréquences	2,25 MHz	2,25 Mhz
Angles théoriques (°)	24,9°	22.6
Angles expérimentaux (°)	23,7°	22°
Vitesses de Phases théorique (m/s)	6812	7225
Vitesses de phase expérimentale (m/s)	6970	7235
Vitesses de groupe théorique (m/s)	3896	4316
Vitesses de groupe expérimentale (m/s)	3937	4189

IV.3.1 Génération du mode L (0, 3)

D'après les courbes de dispersion, pour générer le mode L (0, 3) avec une sonde de fréquence de résonance 2,25 MHz (2.18), nous devons orienter le transducteur sous un angle d'incidence théorique de $\theta = 24,9^\circ$. L'angle étant calculé en utilisant la formule $\cos\theta = \frac{V_{pl}}{V_\varphi}$

pour une vitesse expérimentale dans le plexiglas $V_{pl} = 2688$ m/s et $V_\varphi = 6812$ m/s.

V_{pl} est la vitesse expérimentale des ondes longitudinales dans le plexiglas.

V_φ est la vitesse de phase du mode dans le tube.

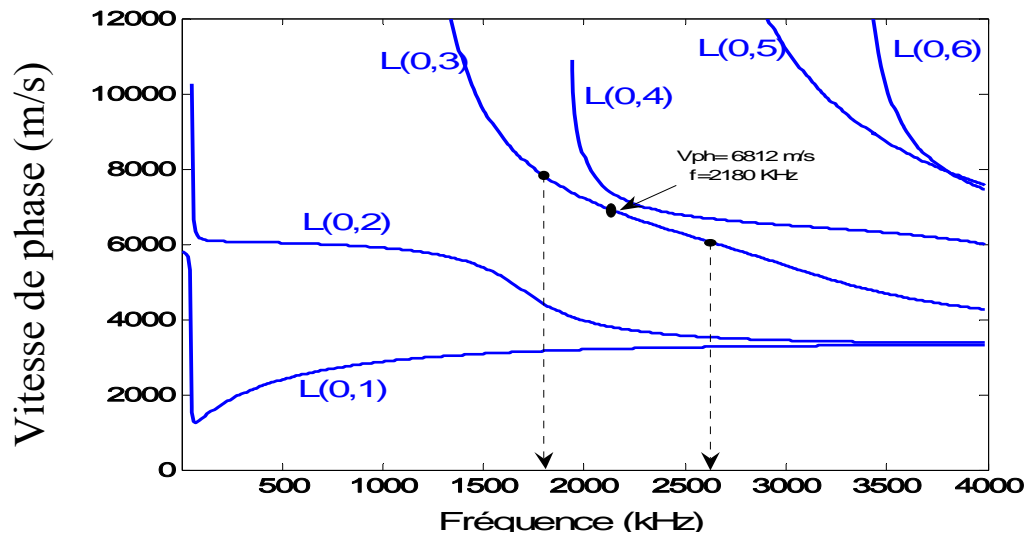


Figure IV.5 : Point choisi pour générer le mode L (0, 3)

IV.3.1.1 Génération du mode L (0,3) dans un tube vide et propre (non encrassé)

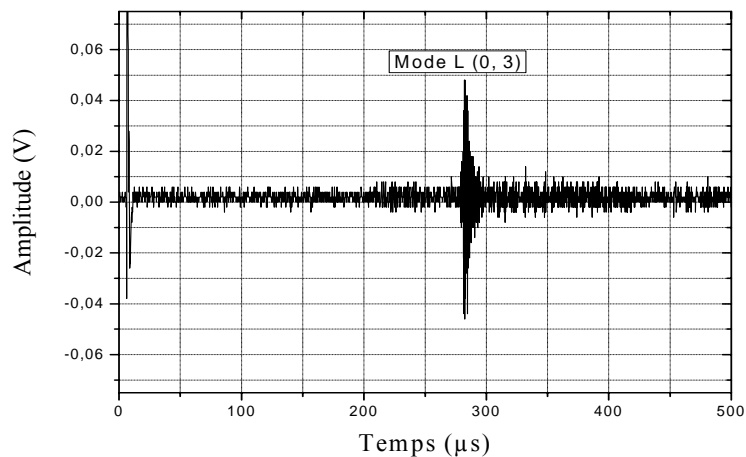


Figure IV. 6 : Mode de compression L (0, 3) pour un tube vide

La vitesse de groupe mesurée du mode généré est : $V_g = \frac{94,5 \cdot 10^{-2}}{240 \cdot 10^{-6}} = 3936,75 \text{ m/s}$

L'étude de la courbe de dispersion, du mode L (0,3), nous permet, en comparant les vitesses théorique et expérimentale (voir le tableau IV.1), d'identifier le mode généré. Ceci confirme que c'est bien le mode L (0, 3) que nous excitions.

III.3.1.2 Sensibilité du mode L(0, 3) pour un tube plein d'eau

La figure IV. 6 montre le mode de compression L (0, 3) généré sous un angle de $23,5^\circ$ avec une vitesse de groupe expérimentale de 3895,8 m/s dans un tube propre et vide (sans encrassement ni eau). Sur la figure IV. 7, on constate la disparition du mode quand le tube est rempli d'eau.

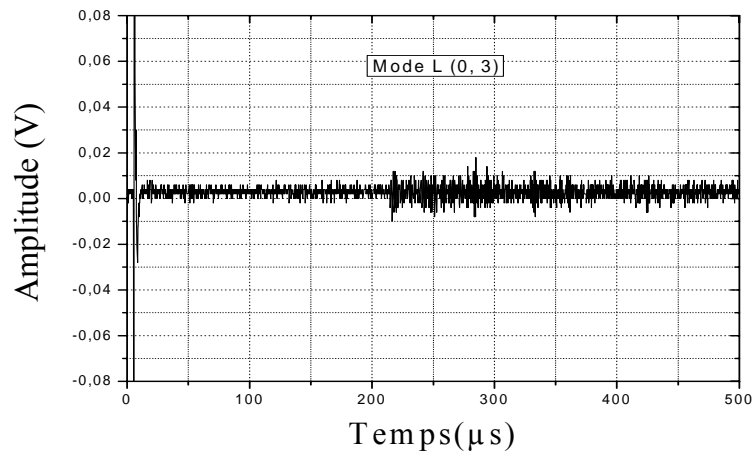


Figure IV.7 : Mode de compression L (0, 3) sur un tube plein d'eau

L'atténuation partielle, à laquelle nous nous y attendions, est due au fait que le déplacement de ce mode, à cette fréquence, est à dominante transversale. Une grande partie de l'énergie transportée par ce mode se transmet dans l'eau. Le signal qui subsiste, est du au déplacement longitudinal qui lui, ne se transmet pas à l'eau.

III.3.2 Génération du mode L (0, 4)

Pour la génération du mode L (0, 4) avec une fréquence de 2,25 MHz (2.18), nous devons orienter le transducteur sous un angle de $\theta = 22^\circ$. Vitesse de phase $V_\phi = 7225$ m/s.

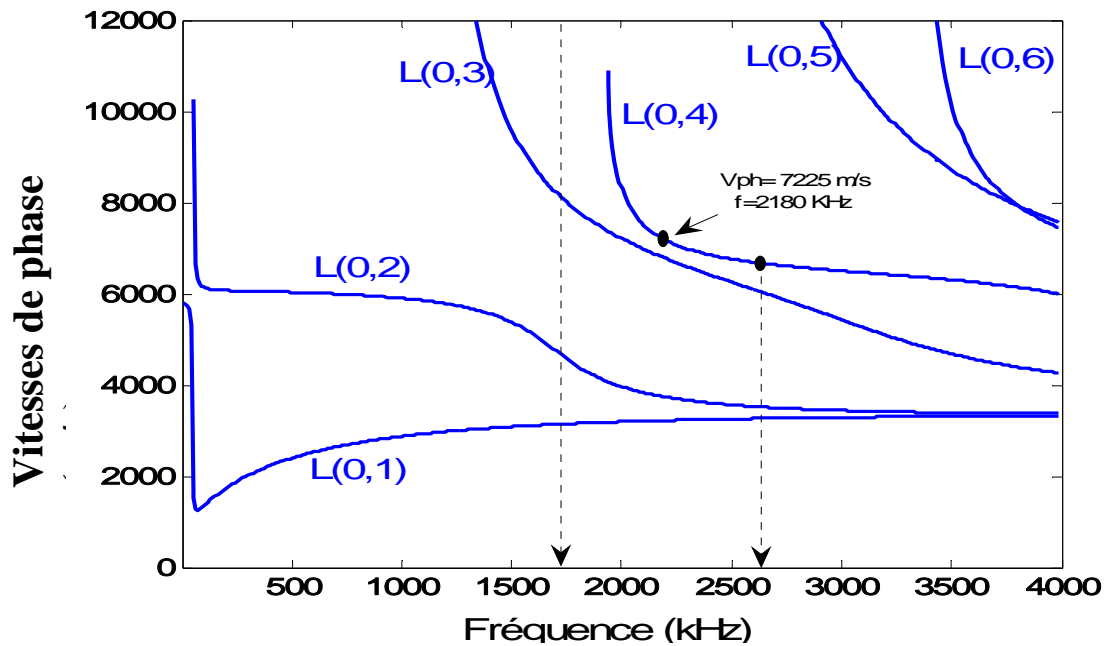


Figure IV. 8 : Point choisi pour générer le mode L (0, 4)

Tableau IV.2 Viscosités des milieux étudiés

	air	eau	lait	huile de table
Viscosité dynamique (mPa/s)	0,0175	1,15	2,2	20,86
Vitesse longitudinale (m/s)	331	1480	1503	1465

IV.3.2.1 Génération du mode L (0, 4) dans un tube vide et propre (non encrassé)

Dans cette partie expérimentale, nous générons le mode de compression L (0, 4) et, pour différents milieux visqueux, nous mesurons l'amplitude transmise au transducteur récepteur. Dans cette série d'expériences, les transducteurs émetteur et récepteur sont séparés d'une distance d'environ 1 m. L'onde transmise sous l'angle choisi préalablement, pour générer le mode L(0,4), parcourt le tube rempli de liquide et est détectée par le transducteur récepteur. Lorsque la viscosité augmente, le signal perd de son amplitude.

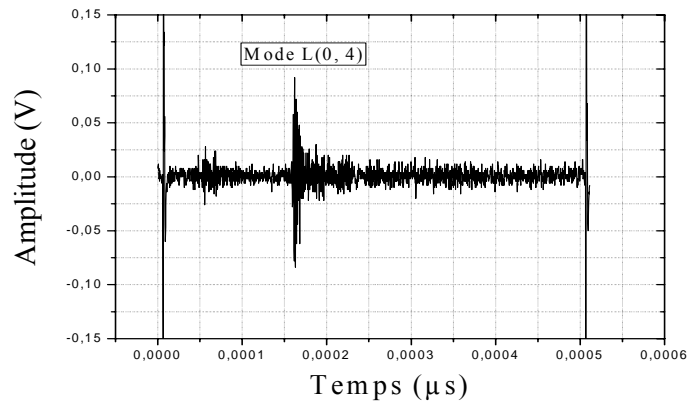


Figure IV.9 : Mode de compression L (0, 4) sur un tube rempli d'air.

Calcul de la vitesse du mode

$$\text{La vitesse du mode généré est : } V_g = \frac{94,5 \cdot 10^{-2}}{226 \cdot 10^{-6}} = 4189 \text{ m/s}$$

D'après la courbe de dispersion de la vitesse de groupe (voir Figure I.7.b), on identifie le mode généré comme mode L (0, 4).

IV.3.2.2 Sensibilité du mode L (0, 4) à l'eau (dans le tube)

Pour étudier la sensibilité du mode de compression L (0, 4) en fonction de la viscosité, on remplit le tube avec différents liquides : du moins visqueux au plus visqueux. L'atténuation légère, à laquelle nous nous y attendions, est due au fait que le déplacement de ce mode, à cette fréquence, est à dominante longitudinale. Une grande partie de l'énergie transportée par ce mode arrive sur le transducteur récepteur. Nous observons, en outre, l'apparition, par conversion de mode, d'un mode de compression de vitesse 4161 m/s, qui est L (0, 3), cela étant dû au fait que la composante longitudinale du mode L (0, 4) a diminué fortement (diffusion dans le fluide visqueux) et qu'il ne subsiste que la composante transversale caractéristique du mode L (0, 3).

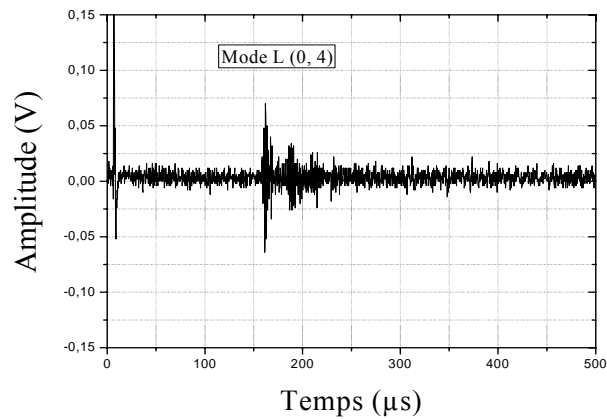


Figure IV.10 : Mode de compression L (0, 4) sur un tube plein d'eau

Sur cette figure, nous pouvons observer, à la suite du mode L (0, 4), le mode L (0, 3) dû à la conversion de mode, résultat obtenu également par T. R. Hay and J. L. Rose [13].

En remplissant le tube avec de l'eau, on remarque que l'amplitude a diminué de **25 %** par rapport à l'amplitude que l'on obtient pour un tube rempli d'air (Figure IV.9).

Sur la figure ci-dessus, on constate que le tube excité est peu sensible à l'eau. La diminution en amplitude confirme qu'il y a une légère diffusion de l'énergie dans l'eau se trouvant dans le tube.

IV.3.2.3 Sensibilité du mode L (0, 4) au lait

La diminution continue pour un fluide plus visqueux que l'eau. Dans ce cas, l'amplitude du signal a diminuée de **33 %**.

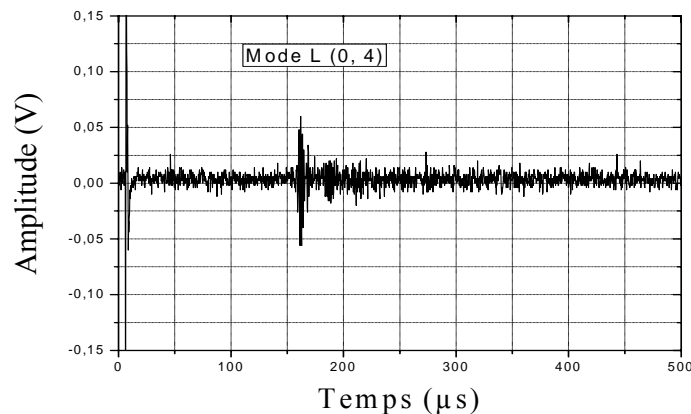


Figure IV.11 : Mode de compression L (0, 4) pour un tube plein de lait

IV.3.2.4 Sensibilité du mode L (0, 4) à l'huile

L'huile ayant un coefficient de viscosité élevé, par rapport à celui de l'eau, la diminution de l'amplitude du signal, cette fois-ci, est plus importante : elle est de **42 %**.

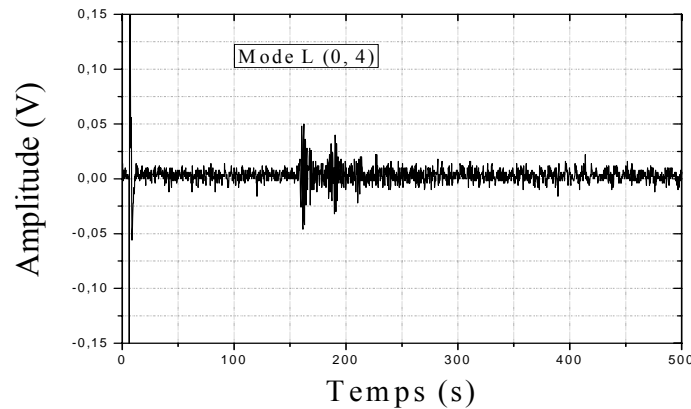


Figure IV.12 : Mode de compression L (0, 4) sur un tube plein d'huile.

Le mode de conversion L (0, 3) a une amplitude de plus en plus importante : vu que la viscosité augmente, la composante longitudinale diminue.

IV.4 Relation entre viscosité et atténuation pour le mode L (0, 4)

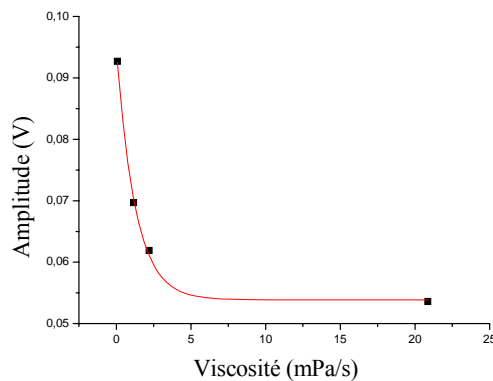


Figure IV.17 : Atténuation en fonction de la viscosité

Les ondes ultrasonores guidées s'atténuent en fonction de la viscosité du milieu fluide qui se trouve (coule) dans le tube.

IV. 5 Inspection des tubes encrassés

Sachant que dans l'usine de lait « COLAITAL », il nous a été reporté que le nettoyage de la tuyauterie se faisait régulièrement une fois tous les jours et parfois deux fois par jour si

la qualité du lait n'est pas celle souhaitée. Ce nettoyage onéreux, se fait parfois inutilement si la qualité du produit est altérée par un facteur étranger à l'encrassement. Ceci nous pousse à essayer de trouver un moyen de contrôle non destructif, pour pallier à cet inconvénient. Dans ce qui suit, une série d'expériences a été réalisée pour tester l'efficacité du mode choisi, L (0,4), dans la détection de dépôts alimentaires.

IV.5.1 Mode L (0, 4) sur un tube sain, non encrassé et vide

En utilisant la méthode « mode écho » : le transducteur émetteur joue également le rôle de transducteur récepteur, on génère, sur un tube non encrassé le mode de compression L (0, 4), sur une distance de 116 cm (aller-retour). Le mode L (0, 4) obtenu se propage à la vitesse de 3314 m/s.

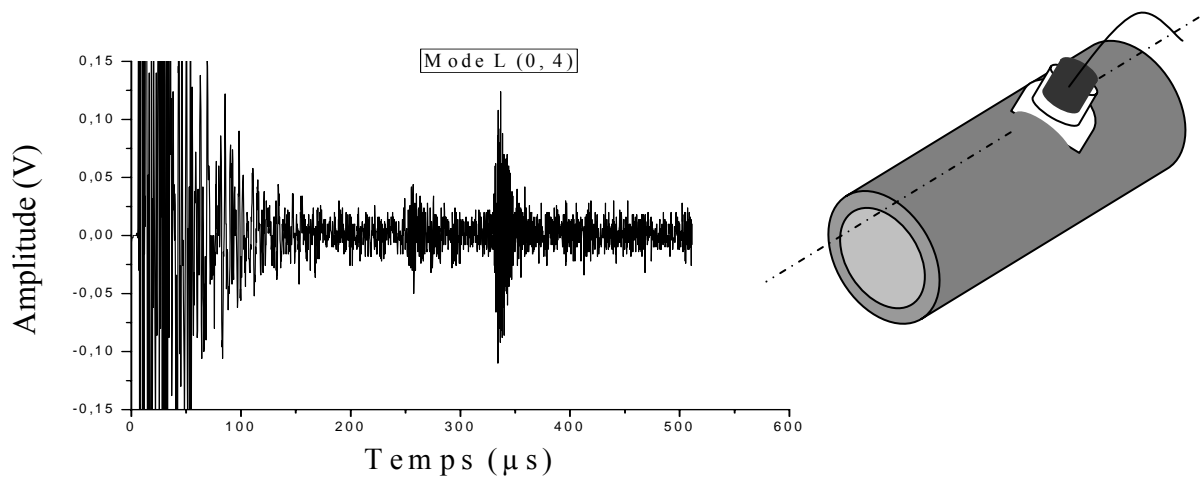


Figure IV.13 : Génération, par la méthode « mode écho », du mode de compression L (0, 4) sur un tube non encrassé

IV.5.2 Mode L (0, 4) sur un tube avec dépôt de gel sur la surface interne

A/ Nous avons mis, sur une surface réduite, une substance sous forme de gel (semi solide) sur la face interne supérieure du tube (à 12 heures), sur la génératrice sur laquelle repose le transducteur.

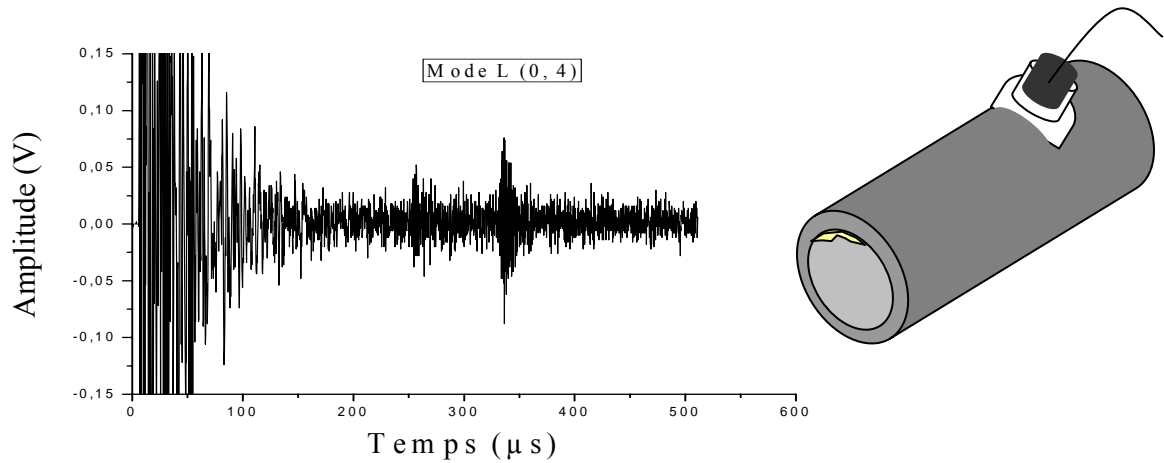


Figure IV.14 : Génération, par la méthode écho-mode du mode de compression L (0, 4) sur un tube encrassé

On constate une diminution de l'amplitude de **46 %** par rapport au signal obtenu sur un tube non encrassé, ce qui met en évidence la présence d'un corps étranger : le dépôt de gel.

B/ Après une rotation, du tube, en maintenant le transducteur fixe, dans le sens des aiguilles d'une montre, de 90° , nous refaisons la même expérience et nous remarquons que l'amplitude du signal a diminué de **43 %**

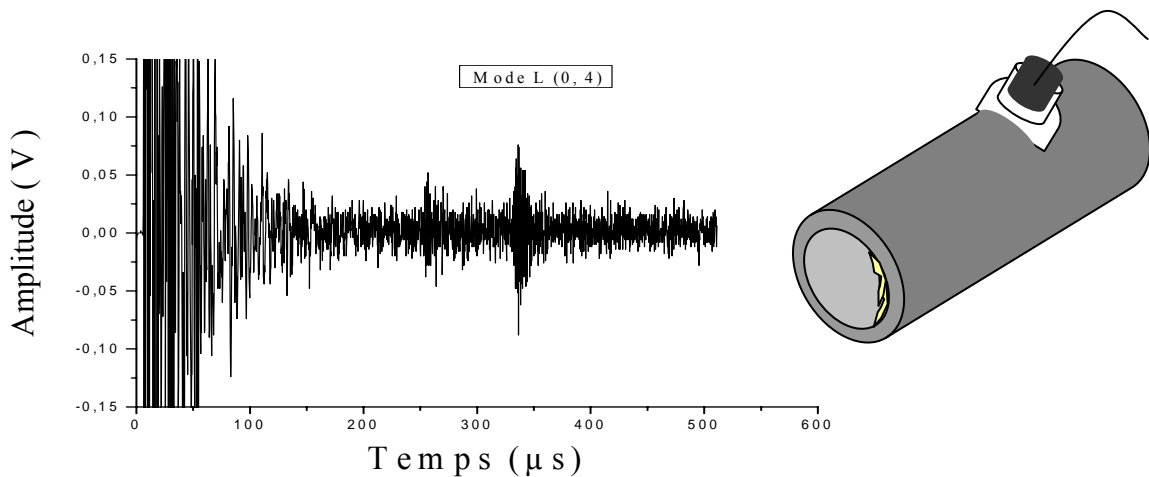


Figure IV.15 : Génération, par la méthode écho-mode du mode de compression L (0, 4) sur un tube encrassé avec un dépôt de gel sur la surface interne latérale

Cette différence légère étant due au fait que la vibration acoustique est peu « gênée » par le gel.

C/ Après une rotation de 180° , nous refaisons la même expérience et nous constatons que l'amplitude du signal a diminué de **22 %** seulement : le mode est peu sensible au dépôt sur la surface inférieure du tube.

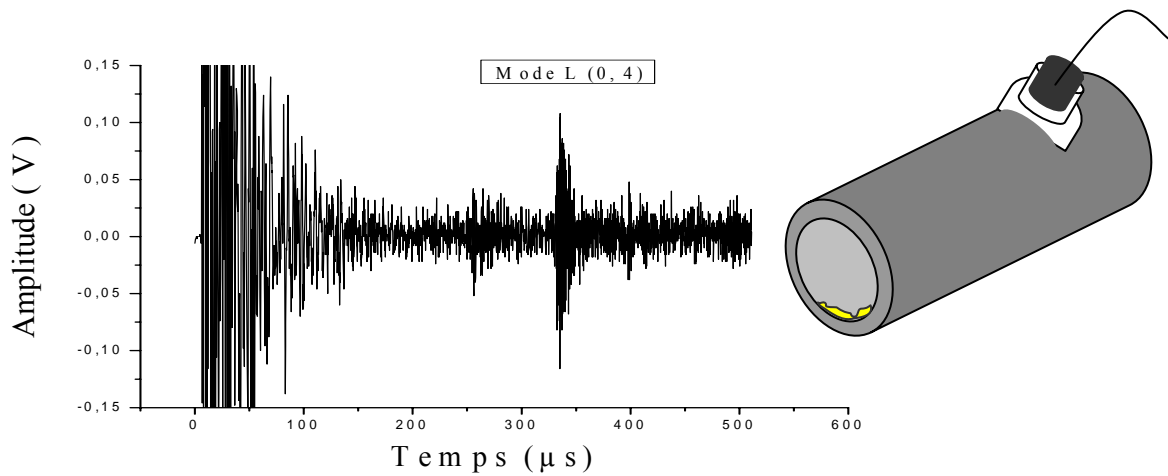


Figure IV.16 : Génération, par la méthode mode-écho du mode de compression L (0, 4) sur un tube encrassé avec un dépôts de gel sur la surface interne inférieure

IV.5.3 Mode L (0, 4) sur un tube avec dépôt solide

Lors de cette expérience, après durcissement du gel collé sur la surface interne on observe le signal transmis.

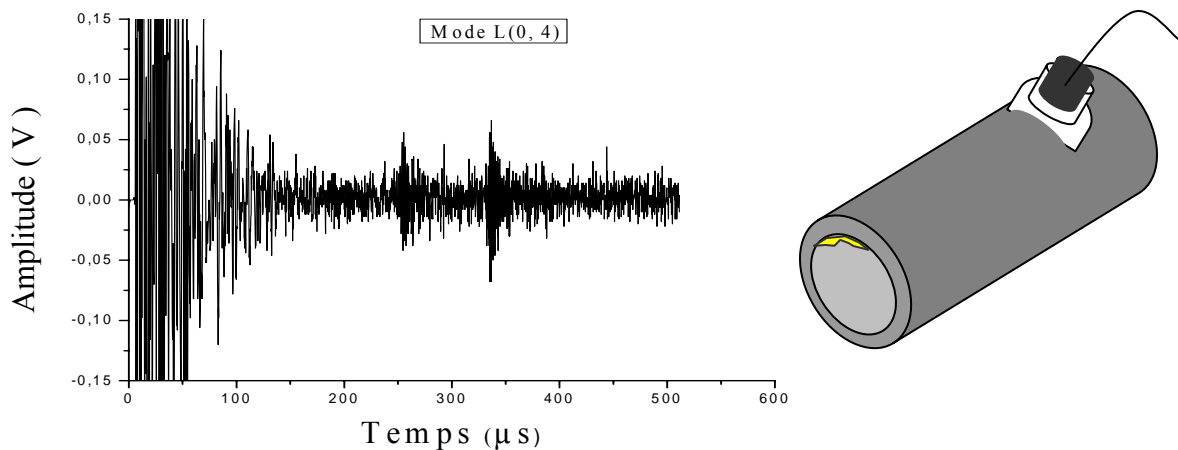


Figure IV.17 : Génération, par la méthode mode-écho du mode de compression L (0, 4) sur un tube encrassé avec un dépôts solide sur la face supérieure

L'amplitude du signal a diminué de **52 %**. La diminution est importante comparativement à l'amplitude du signal détecté lorsque nous avons mis du gel fluide, ceci étant due à l'adhésion de la matière sur la surface interne du tube.

B/ Après une rotation, dans le sens des aiguilles d'une montre, de 90° , nous refaisons la même expérience et nous remarquons que l'amplitude du signal a diminué de **47 %**.

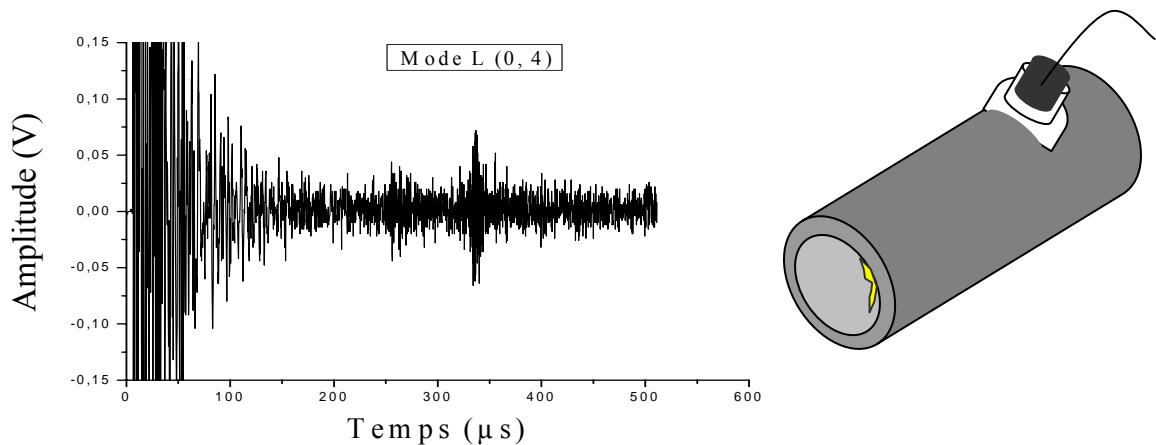


Figure IV.18 : Génération, par la méthode mode écho du mode de compression L (0, 4) sur un tube encrassé avec un dépôt solide

C/ Après une rotation, de 180° , nous refaisons la même expérience et nous remarquons que la diminution de l'amplitude du signal est de **44 %** seulement : le mode est peu sensible au dépôt sur la surface inférieure du tube.

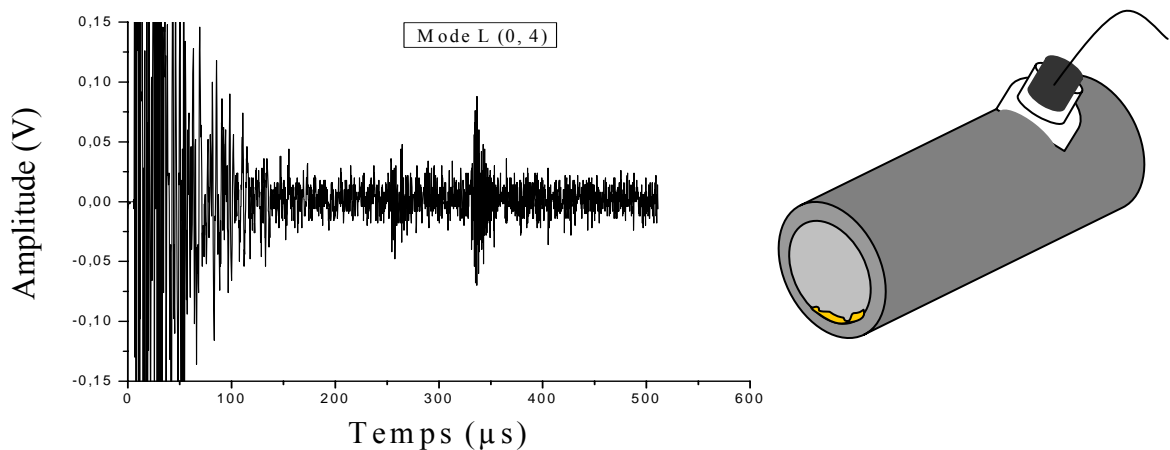


Figure IV.19 : Génération, par la méthode mode écho du mode de compression L (0, 4) sur un tube encrassé sur la face interne

On constate que le mode de compression devient moins sensible aux dépôts d'encrassement quand celui-ci est loin circonférentiellement de la zone du tube excitée.

IV.6 Conclusion

La caractérisation des fluides et la détection des dépôts dans une structure tubulaire, utilisés dans l'industrie alimentaire, en utilisant la méthode des ondes guidées sont vérifiées. Les modes de compression axisymétriques $L(0, 3)$ et $L(0, 4)$ démontre une excellente sensibilité à la surface interne du tube. Le mode $L(0, 4)$ peut établir la différence entre les liquides et les couches selon la viscosité. Mais le mode $L(0, 3)$ est un mode du tout ou rien, c'est-à-dire qu'il montre si l'eau est là ou non.

Une étude de l'atténuation pour différents fluides en contact avec la surface interne du tube nous a conduit à conclure que l'atténuation du mode de compression $L(0, 4)$ dépend de la viscosité du liquide. A partir de la diminution de l'amplitude du signal détecté, on peut caractériser la nature du liquide dans les tubes alimentaires.

Conclusion générale

L'utilisation des tubes dans le domaine industriel est abondante. Donc, il est primordial de trouver des moyens qui nous permettent de les contrôler sans perturber ou démonter les installations. Les tubes utilisés généralement pour transporter les liquides ou les produits alimentaires sont exposés au problème d'encrassement sous forme de couches sur la paroi interne. L'existence de ces couches qui peuvent être visqueuses, semi solides ou solides, gêne le fonctionnement de la structure : ces encrassements, peuvent perturber la vitesse d'écoulement du liquide. Chaque type de mode d'ondes guidées à ses caractéristiques particulières telles que les capacités de pénétration, la sensibilité, la gamme d'inspection, etc. Pour différentes applications, par exemple, pour examiner la surface interne d'un tube en contact avec des milieux de viscosités variées, différents modes et méthodes de génération peuvent être choisis. En raison de leur coût, relativement, peu élevé, les applications des ondes guidées sont de plus en plus importantes, cette technologie demeure l'une des techniques les plus appliquées et les plus intéressantes dans le domaine du contrôle non destructif (CND).

Il nous a donc été demandé d'étudier la faisabilité de détecter et de caractériser ces dépôts alimentaires, en utilisant la technique des ondes guidées et de concevoir et de réaliser un dispositif à angle variable pour supporter et orienter les transducteurs.

Dans un premier temps, nous avons tracé les déplacements mécaniques en fonction de la fréquence et les courbes de dispersion, c'est-à-dire les vitesses de phase et les vitesses de groupe en fonction de la fréquence. Ceci pour mettre en évidence les modes sensibles aux liquides et aux dépôts qui nous intéressent. Les modes de compression L (0, 3) et L (0, 4) sont les meilleurs candidats. Ces modes sont choisis sur la base de leurs déplacements mécaniques.

Pour bien mener nos expériences, sur l'inspection interne d'un tube encrassé en utilisant les ondes guidées, en utilisant la méthode par contact, nous avons conçu et réalisé un dispositif expérimental à angle variable nous permettant de générer et de détecter les signaux réfléchis par d'éventuels défauts.

Dans la première expérience, ces deux modes sont générés et détectés avec des transducteurs de fréquences centrales 2,25 MHz. Les deux sondes sont utilisées

simultanément dans le cas du contrôle par contact, émetteur-récepteur séparés : l'une envoie l'onde l'autre la reçoit. Par contre, dans la deuxième expérience, nous avons utilisé la méthode « mode écho » où le transducteur émetteur joue également le rôle de récepteur.

La détection des couches d'encrassement dans les tubes transportant les produits alimentaires, en utilisant la technique des ondes guidées, est vérifiée. Les modes de compression axisymétriques $L(0, 3)$ et $L(0, 4)$ démontrent une grande sensibilité à la surface interne du tube. Le mode $L(0, 4)$ peut établir la différence entre les liquides et les couches selon la viscosité. Cette particularité est due à la dominance de la composante du déplacement axiale.

Une étude de l'atténuation pour différents milieux dans le tube nous a conduit à conclure que l'atténuation du mode de compression $L(0, 4)$ dépend de la viscosité du produit en contact avec la surface interne de la structure. À partir de la diminution de l'amplitude du signal détecté, on peut caractériser la nature du liquide (eau, lait, huile) en circulation dans les tubes de l'industrie alimentaire.

Cette étude sera poursuivie, dans le but d'utiliser des modes de compression peu ou pas dispersifs c'est-à-dire générer ces ondes guidées à hautes fréquences. Il serait intéressant, de faire l'imagerie des dépôts et d'appréhender le problème de l'interaction ondes-défauts par la modélisation et la simulation numérique.

ANNEXE

Les aciers inoxydables austénitiques comportent du chrome alphasène et des éléments gammagènes. Le domaine est concentré autour de l'ovale gris clair. Ils servent à fabriquer des cuvelages et récipients pour l'industrie alimentaire, des garnissages d'appareils électroménagers.

L'**austénite** est une solution solide de **carbone** dans l'allotrope γ du fer, qui est stable entre 911°C et 1392°C. Cet allotrope a une structure cristallographique cubique à faces centrées, notation Strukturbericht, qui permet une grande solubilité du carbone (jusque 2,1 % massique à 1147°C). Le fer γ est paramagnétique (on entend par là qu'elle quitte le domaine de ferromagnétisme du fer à basse température - $T < T_c = 723^\circ\text{C}$ - et rentre dans le domaine paramagnétique). Le nom d'austénite vient de William Chandler Roberts-Austen (1843-1902).

Certains éléments (manganèse, nickel, azote par exemple) augmentent la plage de stabilité de l'austénite ; ils sont dits « gammagènes ». Avec un dosage suffisant, ils permettent, grâce à une trempe, d'obtenir de l'austénite à température ambiante à l'état métastable. C'est le cas des aciers dits austénitiques. La grande majorité des aciers inoxydables est austénitique, car ils combinent de bonnes résistances à la corrosion avec des propriétés mécaniques plus élevées que l'acier ferritique.

D'autres éléments (silicium, molybdène ou chrome par exemple) tendent à déstabiliser l'austénite. On appelle ces éléments « alphasènes ».

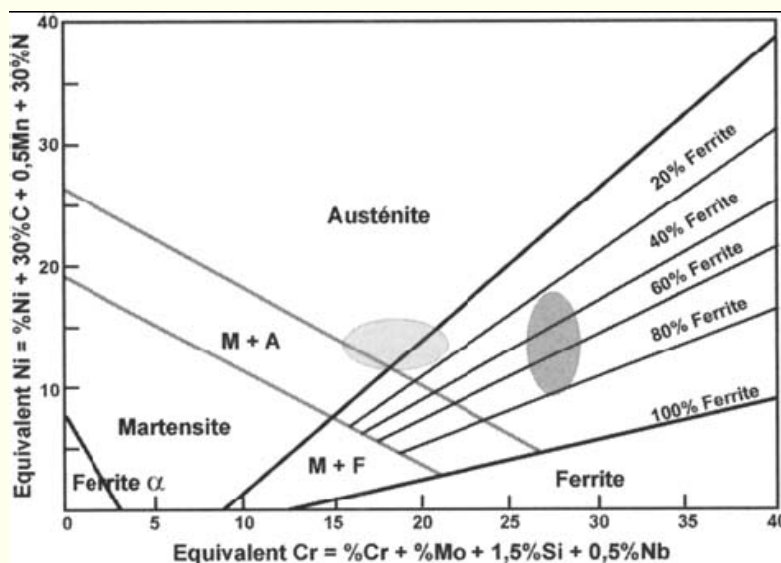


Figure 1 : Diagramme de Schaeffler

Les courbes noires définissent des domaines de phases ; les courbes grises limitent respectivement la zone où les points MS et MF sont au dessus de la température ambiante (transformation totale) et la zone où seul le point MS est au dessus de la température ambiante (transformation partielle entre les deux)

Acier inoxydable austénitique 316 L

Tableau : Composition chimique des aciers inoxydables austénitiques de type 316 L en % de masse [16].

Eléments existants	C	Mn	Si	S	P	Ni
La masse en %	0,022	1,69	0,31	0,002	0,023	11,90
Eléments existants	Mo	Cu	B	Co	As	Cr
La masse en %	2,25	0,11	0,009	0,19	0,004	17,45



Figure 2 : Un tube en acier inoxydable de diamètre externe 40 mm et d'épaisseur de 1,6mm servant de guide d'ondes.

Bibliographie

- [1] J. L. ROSE, “A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential”. *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol, 124, 2002.
- [2] D.N ALLEYNE, B. PAVLKOVIC, M.J.S. LOWE, P. CAWLEY, “ Rapid Long rang Inspection of Chemical Plant Pipework Using Guided Wave ”. 15th World Conference on Non Destructive Testing.15-21, 2000.
- [3] Y. CHO, J.L. ROSE, “ An elastodynamic hybrid boundary element study for elastic guided wave interactions with a surface breaking defect ”. *International journal of solid and structures* 37, p. 4103-4124, 1998.
- [4] J.L. ROSE, S.P. PELTS, M.J. QUARRY, “A comb transducer model for guided wave NDT ”. *Ultrasonic* 36, p.163-169,1998.
- [5] H. J. SHIN and J.L. ROSE, “Guided Wave Tuning Principles for Defect Detection in Tubing”. *Journal of Non-Destructive Evaluation*, Vol. 17, No. 1, 1997.
- [6] A. PILARSKI and J. L. ROSE, “Utility of subsurface longitudinal waves in composite material characterization”. *Ultrasonics*, Vol. 27,1989,.
- [7] H.J. SHIN and J.L. ROSE, “Guided Wave by Axisymmitric and Non-axisymmetric Surface Loading on Hollow Cylinders”. *Ultrasonics*, vol. 37, 355-363, 1999.
- [8] D. KALLECHE, “Génération et détection d’ondes ultrasonores sans contact par voie électromagnétique”. *Thèse de Magistere,U.S.T.H.B, Alger*, 1986.
- [9] B. N. PAVLAKOVIC, “Leaky Guided Ultrasonic Waves in NDT”. *Thèse de Doctorat, university of London*, 1998.
- [10] T. F. LEUTENEGGER, “Detection of defects in cylindrical structures using a times reverse numerical simulation method”. *These de Doctorat, Swiss Federal Institut Of Technology, Zurich*, 2002.
- [11] E.DIEULESAINT et D. ROYER, “Ondes élastiques dans les solides”, *Masson et C^{ie}, Paris*, 407p., 1974.

- [12] P. N. MARTY, “Modelling of ultrasonic guided wave field generated by piezoelectric transducers”, These de Doctorat, University of London, 316 p, 2002.
- [13] K. R. LOHR et Joseph L. ROSE “Ultrasonic guided wave end acoustic impact methods for pipe fouling detection”, Journal of Food Engineering 56 p.315-324, 2003.
- [14] J. DUAL, M. HAGELI, M. R. PFAFFINGER, J. VOLLMANN. “Experimental aspects of quantitative non destructive evaluation using guided waves”, Ultrasonic 34 p. 291-295, 1996.
- [15] T. R. HAY, Joseph L. ROSE “Fouling detection in the food industry using ultrasonic guided waves”, Food control 14 p. 481-488, The Pennsylvania State University, PA 16802, 2003.
- [16] L. Paille, M. GERLAND, J. P. VILLAIN, K. F. BADAWI, H. N. PRESLES et B. BOUCHET, “Propriétés Mécaniques de Surface d’un Acier Inoxydable traité par Explosifs”, Journal de Physique 4, p. 305-319,1994.
- [17] E. DEFAY, “Elaboration et caractérisation de couche minces piézoélectriques de Pb(Zr, Ti)O₃ sur Silicium pour application aux microsystèmes”, Thèse de Doctorat, Institut National des sciences appliquées de Lyon,199 p, 1999.
- [18] M. J. S. LOWE, D. N. ALLEYNE, P. CAWLEY, “Defect detection in the pipes using guided waves”, Ultrasonic 36, London, N° p. 147-154, 1998.
- [19] A. DEMMA, P. CAWLEY, M. J. S. LOWE, A. G. ROOSENBRAND, B. PAVLAKOVIC, “The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements”, NDT International 37, N° p. 167-180, 2004.
- [20] D. N. ALLEYNE, P. CAWLEY “the effect of discontinuities on the long range propagation of the Lamb waves in the pipes”, ProQuest Science journals, Vol 210, N° p.217-226, 1996.
- [21] T. HAYASHI, W. J. SONG, J. L. ROSE, “guided waves dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail exemple”, Ultrasonic 41, The Pennsylvania State University, PA 16802, N° p.175-183, 2003.

- [22] D. C. GAZIS “Three-Dimensional Investigation of the propagation of waves in Hollow Circular Cylinder. I. Analytical Fondation”, J.Acoust.Soc.Ame, Vol. 31, Number 5, N° p. 568-578, 1959.
- [23] J. BARSHINGER, J. L. ROSE, M. J. AVIOLI, Jr, “ Guided Wave Resonance Tuning for Pipe Inspection”, Journal of pressure Vessel technology, Vol. 124, N° p. 303-310, 2002.
- [24] K. F. HERZFELD, “The origin of the Absorption Of Ultrasonic Waves in Liquid”, JASA, Vol. 13, N° p.33-35, 1941.
- [25] D. GUO, “Pipe inspection by cylindrically guided waves”, These de Doctorat, University of Arizona, 101 p., 2001.
- [26] “PCDISP: A scientific software package for generating dispersion curves”, written in Matlab, available at <http://www.iai.csic.es/users/fseco/pcdisp.htm>.
- [27] A. H. MEITZLER, “Mode coupling occurring in the propagation of the elastic pulses in wires”, J. Acoust. Soc. Am, vol. 32, Number 5, 1961.
- [28] J. LI, “longitudinal flexural mode utility in quantitative wave evaluation”, these de Doctorat, the Pennsylvania State University, 2001.
- [29] D. ROYER et E.DIEULESAINT, “Ondes élastiques dans les solides : propagation libre et guidée”, Tome 1, Masson, Paris, 328 p, 1996.
- [30] CAST, “contrôle non destructif par les ultrasons”, Lyon, 1000 p, 1978.
- [31] E.DIEULESAINT et D. ROYER, “Ondes élastiques dans les solides : propagation libre et guidée”, Tome 2, Masson et C^{ie}., Paris, 446p., 1999.
- [32] P. WILCOX, M. LOWE, P. CAWLEY “the effect of dispersion on long range inspection using ultrasonic guided waves”, NDT&E International 34, N° p.1-9, 2001.
- [33] Y. M. CHEONG, D. H. LEE, H. K. JUNG, “Ultrasonic guided wave parameters for detection of axial cracks in feeder pipes of PHWR nuclear power plants”, Ultrasonic 42, N°. p. 883-888, 2004.

- [34] J. LI, J. L. ROSE, “Natural beam focusing of non-axisymmetric guided waves in large-diameter pipes”, *Ultrasonics* 44, the Pennsylvania State University, N°p.35 – 45, 2006.
- [35] A. RAIS, “guided wave technique to detect defects in pipes using wavelet analysis”, these de Doctorat, the university of Arizona, U.S.A, 254p., 2005.
- [36] J. L. ROSE, J.J DITRI, K. RAJANA, F. CARR, “ A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tubing”, *NDT&E international*, volume 27, N° 6, N°.p. 307- 310, 1994.
- [37] J. D. ACHENBACH, “Wave Propagation in Elastic Solid”, Volume 16, American Elsevier Publishing Company, INC-New York, 425p., 1973.
- [38] M. BRUNEAU, C. POTEL, “Matériaux et acoustique1 : Propagation des ondes acoustiques”, Tome 1, Lavoisier, Paris, 337p., 2006.
- [39] J. L. ROSE, A. DEMMA, P. CAWLEY, M. LOWE, “Ultrasonic Guided Waves in Structural Health Monitoring”, *Key Engineering Materials Vols. 270-273* pp. 14-21, 2004.
- [40] A. DEMMA, P. CAWLEY, and M. LOWE, A. G. ROOSENBRAND, “The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes”, *Acoustical Society of America*, Vol. 114, N°. 2, 2003.
- [41] B. LU, “On-line structure integrity monitoring and defect diagnosis of steam generator using analysis of guided acoustic wave”, these de Doctorat, university of Tennessee, Knoxville, 2005.
- [42] J. PERDIJON, “ Le contrôle non destructif par ultrasons”, Hermes, Paris, 178p, 1993.