

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 : Physique des Matériaux

Par :

M^{elle} ALILOUCHE Assia

Sujet :

Détection et localisation, de défauts circulaires et de joints soudés, sur des tubes d'acier, par ondes guidées ultrasonores

Soutenu publiquement le : 16 / 05 / 2007, Devant le Jury composé de :

Mr. M. BENDAOUD	Professeur	USTHB	Président
Mr. F. BOUBENIDER	Professeur	USTHB	Directeur de thèse
Mr. D. BRADAI	Professeur	USTHB	Examineur
Mr. Z. FELLAH	Docteur	CNRS (France)	Examineur
Mr. A. DAHEL	Chargé de recherche	USTHB	Examineur

Résumé

Les domaines d'application du contrôle non destructif par les ultrasons sont variés, parmi ceux-ci, le contrôle des tubes qui servent au transport de liquides (l'eau, gaz, pétrole).

Le contrôle non destructif par ondes guidées ultrasonores est un nouveau domaine de recherche dans le monde des scientifiques et industriels, ces ondes ont la capacité de se propager sur de longues distances, à partir d'une seule position du transducteur, permettant l'inspection rapide des sections inaccessibles des structures.

Notre travail consiste à étudier, sur le plan théorique, les différents modes susceptibles de se propager sur une structure cylindrique creuse, pour pouvoir choisir le mode à générer et sur le plan expérimental, utiliser nos résultats théoriques, pour générer le mode choisi, d'abord, sur une structure tubulaire saine, puis sur autre contenant des défauts, tel qu'un joint soudé, ou des cratères (défauts circulaires), afin de pouvoir les détecter et les localiser.

Dédicaces

Je dédie cette thèse à :

A ceux que je porte dans mon cœur pour l'éternité :

A la personne la plus merveilleuse, ma Mère qui m'a tout donnée et qui m'a soutenue et protégée de son amour et sa patience.

A mon Père qui a cru en moi et en ma réussite.

A mes frères et particulièrement Ali.

A mes sœurs et surtout Fatima.

A toute ma famille proche et loin.

A tout mes ami(e)s qui m'ont entourée et aimée toutes ces années plus précisément Djazia, Djamila et Amel.

A tous ceux que j'aime et à tous ceux que je n'ai pas pu citer.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe *Acoustique* au *laboratoire de Physique des Matériaux* à l'Université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene à la faculté de physique.

Monsieur **Fouad BOUBENIDER**, Professeur à l'U.S.T.H.B, m'a accueilli dans son équipe, je tiens à le remercier vivement pour avoir su me communiquer une partie de son expérience en matière de recherche scientifique avec toujours bonne humeur. Il m'a fait partager sa rigueur scientifique et son goût de la perfection, il m'a toujours encouragé à aller plus loin. Je le remercie surtout pour sa patience durant ces deux années qui m'ont permis de progresser scientifiquement. J'ai eu grand plaisir à travailler sous sa direction.

Mes sincères remerciements à monsieur **M. BENDAOU**, Professeur et Doyen de la faculté de physique à l'U.S.T.H.B, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de soutenance de cette thèse. Qu'il trouve en ces mots toute ma gratitude et mon profond respect.

Je remercie très chaleureusement monsieur **D. BRADAI**, Professeur à la faculté de physique à l'U.S.T.H.B, non seulement pour sa participation au jury de cette thèse mais aussi pour son esprit pratique, son soutien et ses encouragements.

Je ne saurais remercier suffisamment monsieur **Z. FELLAH**, Docteur, Chargé de recherche au CNRS à Marseille, pour les moyens qu'il a mis à ma disposition notamment, en me fournissant un palpeur de 0.5 MHz, utilisé dans mes expériences et sans lequel ce travail n'aurait jamais pu être mené à bien. Je le remercie également pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury de cette thèse ainsi que pour l'intérêt qu'il a toujours porté à ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à monsieur **A. DAHEL**, Chargé de recherche à la faculté de physique à l'U.S.T.H.B, pour avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse et pour son aide précieuse.

Je tiens à remercier, chaleureusement, les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail :

Mr A. AKRTECHE, Chef de service et **Mr A. AZEMDROUB**, Ingénieur chargé d'études au centre de recherche et de développement de l'électricité et du gaz (Oued Fayet, Alger) qui m'ont fait l'honneur de me recevoir dans leur département de métallurgie. Ils m'ont permis de voir et de toucher de près, les problèmes dont souffrent les centrales thermiques de production d'électricité et en particulier, l'éclatement des tubes de chaudières. Je les remercie de m'avoir permis d'accéder au domaine de la métallurgie en m'aidant à faire l'étude micrographique du joint soudé. Je remercie particulièrement Mr A. AZEMDROUB pour son aide et pour m'avoir fait partager ses connaissances dans ce domaine.

Je tiens aussi à remercier monsieur **H. DJELOUAH**, Professeur à l'U.S.T.H.B, pour son aide et ses encouragements.

Je voudrais remercier **F. HADJ-LARBI** et **EL-FIAD Djazia**, pour m'avoir consacré quelques heures de leur précieux temps ainsi que mademoiselle **ALLILI Baya** du laboratoire « Transformation de phases, Microstructure et Texture ». Je remercie très sincèrement monsieur **A. BENNAMANE** et monsieur **A. REZZOUG**, membres de l'équipe "Acoustique" pour leurs encouragements.

Pour finir, je tiens à remercier ma mère pour m'avoir toujours soutenue dans les moments les plus difficiles durant mes études.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
--------------------	---

Chapitre I

Propagation des ondes guidées dans des structures tubulaires -Etude théorique-

I.1 Qu'est ce qu'une onde guidée ?	6
I.2 Guide d'ondes et ondes guidées	8
I.3 Avantages liés aux ondes guidées	9
I.4 Inconvénients liés aux ondes guidées	10
I.5 Concept d'inspection par les ondes guidées	11
I.6 Analyse tridimensionnelle des ondes guidées	12
I.7 Familles de modes d'onde guidée	23

Chapitre II

Courbes de dispersion

II.1 Courbes de dispersion des vitesses de phase et des vitesses de groupe	28
II.1.1 Modes axisymétrique	29
II.1.2 Modes non axisymétriques	32
II.2 Caractéristiques des ondes guidées	33
II.3 Distribution du déplacement de matière (structure de l'onde)	34
II.4 Choix du mode à générer	37

Chapitre III

Techniques de génération des ondes guidées

III.1	Génération d'ondes ultrasonores par effet piézoélectrique	39
III.1.1	L'effet Piézoélectrique	39
III.1.2	Transducteurs piézoélectrique.....	40
III.1.3	Faisceau ultrasonore	40
III.1.4	Techniques de contrôle ultrasonore	41
III.1.5	Technique de l'écho par réflexion	42
III.2	Représentation des données ultrasonores	43
III.3	Génération d'ondes guidées	44
III.3.1	Méthode d'angle d'incidence variable (méthode du coin)	44
III.3.2	Méthode de capteur à peigne « ring transducers »	46

Chapitre IV

Résultats Expérimentaux

IV.1	Choix du mode à générer	49
IV.2	Dispositif expérimentale	53
IV.3	Identification du matériau des tubes	55
IV.4	Précautions à prendre	56

Partie A

Génération du mode $L(0,2)$ sur un tube sain

IV.A.1	Génération du mode $L(0,2)$	58
IV.A.2	Génération du mode $L(0,2)$ sur un tube sain à $f = 1$ MHz	59
IV.A.3	Génération du mode $L(0,2)$ sur un tube sain à $f = 0.5$ MHz	67
IV.A.4	Atténuation du mode $L(0,2)$	70

Partie B

Détection et localisation de défauts circulaires de différents diamètres

IV.B.1	Détection de défauts de différents diamètres par réflexion du mode L(0,2)	74
IV.B.2	Détection de défauts de dimensions inférieurs à la longueur d'onde	77
IV.B.3	Localisation du défaut	79

Partie C

Détection et localisation d'un joint soudé

IV.C.1	Détection d'un joint soudé par réflexion du mode L(0,2)	83
IV.C.2	Localisation d'un joint soudé.....	85

CONCLUSION	89
-------------------------	-----------

BIBLIOGRAPHIE	90
----------------------------	-----------

ANNEXES :

ANNEXE 1	94
-----------------------	-----------

ANNEXE 2	96
-----------------------	-----------

Introduction

Le gaz, le pétrole, l'eau et certains produits pétrochimiques dangereux, qui peuvent être toxiques ou radioactifs, sont fournis aux utilisateurs à travers un vaste réseau qui se compose de milliers de **tubes** de toutes formes et dimensions. En conséquence, la sûreté et l'intégrité du circuit d'alimentation de ces produits sont d'importance primordiale [1]. Des fuites ou des explosions soudaines de ces tubes peuvent causer des accidents dramatiques et des dégâts environnementaux [2].

Des études faites sur ces accidents ont montré que ces structures vieillissent et présentent des **défauts** qui engendrent un mécanisme de dégradation. Plusieurs défauts peuvent se produire dans ou sur ces tubes. Quelques types de défauts sont une menace sérieuse sur l'intégrité des tubes : la corrosion de la paroi du tube est un problème principal pouvant se produire à tout moment dans la vie de ces structures, en occupant une large gamme d'espace. Les fissures, les défauts de fabrication, les défauts de soudures ainsi que d'autres types de défauts constituent également de gros problèmes à résoudre pour l'industrie. De ce fait, la sûreté et l'intégrité de ces structures ne peuvent être respectées qu'en détectant et en localisant tous les défauts [3].

Des techniques d'inspection pouvant détecter, localiser et classer par taille et type ces défauts sont indispensables. Ces techniques, nous permettent d'estimer la durée de vie qui reste à la structure, de réparer ou de faire un changement radical de celle-ci. Cette détection commence dès la fabrication du tube et se termine quand ce dernier ne peut plus être mis en service [3-4].

La détection et la caractérisation de l'ampleur des dégradations peuvent être établies par des contrôles destructifs et non destructifs :

En général, le contrôle destructif des tubes est un contrôle hydrostatique qui se fait avant que le tube ne soit mis en service. Le principe de ce contrôle est d'envoyer un fluide dans le tube avec une forte pression (10% plus grande que la pression que doit supporter le tube). Si le tube explose à un endroit particulier, ceci signifie qu'il y a un défaut à cet endroit

et que le tube nécessite donc une réparation onéreuse. Cette méthode ne fournit aucune information au sujet des imperfections restantes qui pourraient se développer en service et il est évident que l'on ne peut pas détruire le tube sous prétexte de le contrôler [5].

Le contrôle non destructif est donc privilégié, dans le monde des scientifiques et des industriels, comme outil de contrôle ainsi que, comme garantie de la qualité des différentes pièces mécaniques. En outre, l'avancement et le développement de nouvelles techniques de l'essai non destructif, dans les décennies passées, ont été un avantage pour le consommateur, dans le contrôle de qualité des produits, ainsi que dans le domaine de la sûreté publique (cas de l'inspection des centrales nucléaires, du contrôle aérien et dans l'industrie en général) [4].

Le contrôle non destructif utilise différentes techniques : la radiographie, le courant de Foucault, les rayons X, le flux magnétique, le système visuel optique et les ultrasons. Parmi toutes ces techniques, le contrôle non destructif (C.N.D.) par ondes ultrasonores suscite beaucoup d'attention pour ses avantages tels que le coût (relativement bas), la facilité de l'opération et la sensibilité élevée aux défauts [6].

La majorité des méthodes non destructives, pour inspecter des tubes ou d'autres structures, y compris la méthode utilisant les ultrasons, sont des techniques d'inspection locale, qui se font point par point. La détection conventionnelle des défauts par ultrasons se fait en générant des ondes de volumes (ondes longitudinales ou ondes transversales) dont la fréquence utilisée dans ce domaine d'application varie de 1 MHz à plusieurs Mégahertz. Ces ondes de grandes fréquences, sont amorties rapidement, la méthode ne peut donc être appliquée que pour inspecter le secteur au-dessous ou à côté du capteur où le faisceau ultrasonore traverse seulement une petite partie du volume de la pièce. En conséquence, la sonde ultrasonore doit être déplacée sur la surface entière de l'objet à examiner, c'est une tâche pénible, lente et qui coûte cher, surtout pour les industries pétrolières où les tubes font plusieurs kilomètres de longueur. Il arrive souvent qu'il faille inspecter des structures se trouvant dans des situations parfois inaccessibles et dont la sûreté exige une inspection rigoureuse qui doit se faire point par point. Dans ce cas, un contrôleur même expérimenté peut manquer des secteurs, c'est pour cette raison qu'il fallait trouver une nouvelle technique d'inspection rapide et fiable pour détecter les défauts. Cette technique existe, c'est le contrôle non destructif utilisant un autre type d'ondes ultrasonores : **les ondes guidées** [3-4, 7].

Les ondes guidées ultrasonores sont considérées comme un nouveau domaine de recherche dans le monde du contrôle non destructif. Elles ont la capacité de se propager sur de très longues distances, à partir d'une seule position du transducteur, permettant l'inspection rapide des sections inaccessibles des structures tubulaires ou dans des situations limitées d'accès où la majeure partie de la surface du tube est couverte ou cachée par d'autres structures adjacentes ou enfouies sous terre. En outre, les ondes guidées présentent une multitude de modes (que l'on définira ultérieurement). Ces modes ont une grande sensibilité aux défauts qui peuvent exister sur ces tubes, il suffit de choisir correctement le mode des ondes guidées qu'il faut générer et qui peut se propager à travers le tube. Les tubes sont un guide efficace pour ces ondes, celles-ci sont donc un excellent moyen, rapide et rentable pour l'inspection de ces structures [3-4].

Le contrôle par les ondes guidées est employé dans différents domaines : industrie pétrochimique, aéronautique, centrales nucléaires, chaudières, contrôle des rails et contrôle des réservoirs à hydrogène [8].

Dans l'industrie alimentaire, les ondes guidées sont utilisées dans la détection des impuretés qui s'accumulent sur la surface interne des parois des tubes, utilisés dans le transport des produits laitiers par exemple, ou toute autre nourriture. Cette impureté est sous forme d'une fine couche solide ou visqueuse (lait corrompu) ou sous forme d'une corrosion, qui diminue le débit d'écoulement du produit liquide alimentaire à travers le tube et provoque sa pollution, donc diminue sa sûreté [7,9].

Les ondes guidées sont également utilisées dans le domaine médical, par exemple pour surveiller l'ostéoporose (démminéralisation du squelette causée par la raréfaction de la trame protéique de l'os) chez les individus âgés ou chez les femmes ménopausées.

Notre travail consiste à étudier, sur le plan théorique, les différents modes susceptibles de se propager sur une structure cylindrique creuse, pour pouvoir choisir le mode à générer et sur le plan expérimental, utiliser nos résultats théoriques, pour générer le mode choisi, d'abord, sur une structure tubulaire saine, puis sur autre contenant des défauts, tel qu'un joint soudé, ou des cratères (défauts circulaires), afin de pouvoir les détecter et les localiser.

Ce mémoire résume l'essentiel du travail réalisé :

Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique détaillée des ondes guidées susceptibles de se propager sur un guide cylindrique creux (définitions, avantages et inconvénients de ces ondes ainsi que les équations régissant leur comportement).

Dans le deuxième chapitre, en utilisant les résultats du premier chapitre, nous traçons les courbes de dispersion qui nous permettent de mettre en évidence les différentes familles de modes pouvant exister dans un tube, afin de choisir un mode particulier à générer.

Le troisième chapitre sera consacré aux différentes techniques permettant de générer les ultrasons en général et les ondes guidées en particulier.

Le quatrième chapitre sera consacré aux résultats expérimentaux: détection et localisation de défauts (cratères, joint soudé).

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion.

Chapitre I

Propagation des ondes guidées dans des structures tubulaires -Etude théorique-

Le concept d'utilisation des ondes guidées cylindriques pour le contrôle non destructif date de plusieurs années. Ces ondes ont la capacité de se propager sur de très longues distances, à partir d'une seule position du transducteur. Le caractère multimodal des ondes guidées les rend sensibles aux différents types de défauts. Cependant, le comportement de ces ondes est complexe comparé aux ondes de volume actuellement utilisées dans le contrôle non destructif. Pour une meilleure compréhension de cette technique, les caractéristiques de propagation et le comportement de ces ondes guidées doivent être étudiés.

I.1 Qu'est ce qu'une onde guidée ?

Il est bien connu qu'il y a deux types d'ondes ultrasonores dans un milieu isotrope : les ondes longitudinales et les ondes transversales. Ces ondes qui se propagent dans les milieux élastiques infinis sont appelées *ondes de volume*. Chaque onde a sa propre vitesse de propagation qui est déterminée par les propriétés du matériau, telles que les constantes élastiques et la densité. Cette vitesse est indépendante de la fréquence, par conséquent, une onde qui voyage à travers le milieu maintiendra sa forme : il n'y a pas d'effet dispersif [2, 10].

Ondes longitudinales : appelées aussi *ondes de compression* ou *ondes primaires (P)*, la direction de vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde. Le passage de ce type d'ondes engendre une variation de volume occupé par un nombre donné de particules, le matériau subit un cycle de dilatation et de compression. Les ondes longitudinales se propagent dans tous les milieux solides, liquides et gazeux. Elles sont très utilisées dans le contrôle non destructif [3,11].

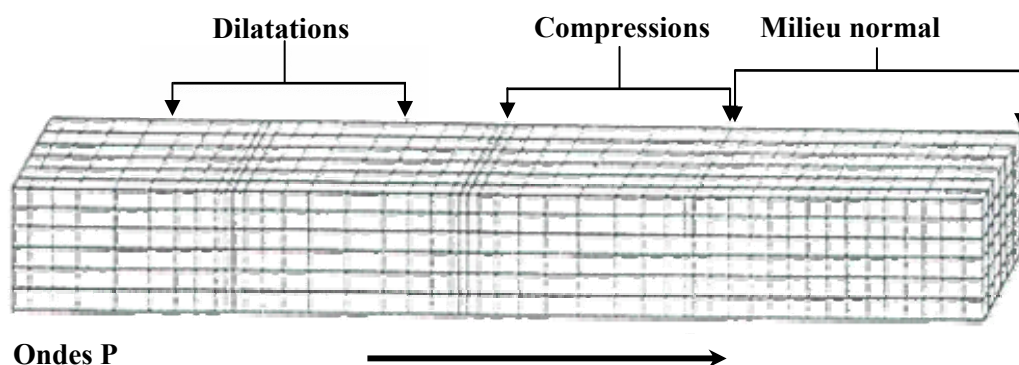


Figure I-1 : Déformation engendrée lors de la propagation des ondes longitudinales [12].

Ondes transversales : appelées aussi *ondes de cisaillement* ou *ondes secondaires* (S), dans ce cas, la direction de vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Le passage de ce type d'ondes engendre un glissement des plans occupés par un nombre donné de particules. Ce passage ne donne lieu à aucune variation de volume. Les ondes transversales ne se propagent que dans les solides ou dans les liquides très visqueux [3,11].

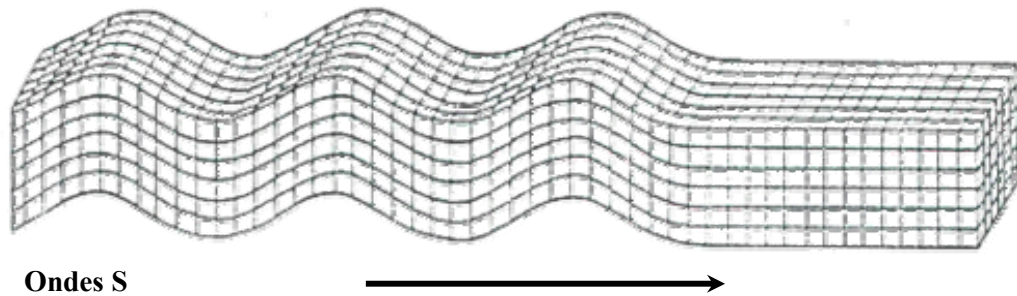


Figure I-2 : Déformation engendrée lors de la propagation des ondes transversales [12]

Pratiquement, si les dimensions du milieu sont beaucoup plus grandes que la longueur d'onde, nous pouvons considérer les ondes longitudinales et transversales comme ondes de volume. Cependant, si n'importe quelle dimension du milieu est comparable à la longueur d'onde ou plus petite que celle-ci, ces ondes (P et S) sont toujours présentes, mais l'interaction de ces dernières avec les frontières doit être prise en considération. En effet, la superposition des ondes longitudinales et transversales, causées par les multiples réflexions dues aux frontières, et l'interférence de ces ondes forment un paquet d'ondes guidées par la structure. Donc, le milieu de propagation sera considéré comme un guide d'ondes et l'onde dans le guide est appelée *onde guidée*, elle se propage avec une vitesse qui dépend de la fréquence aussi bien que des propriétés du milieu [2,10].

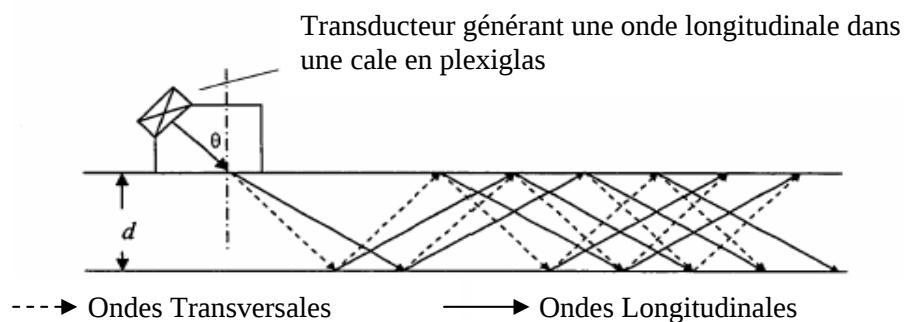


Figure I-3 : Ondes guidées [8].

Ces ondes guidées pénètrent l'épaisseur entière et se propagent parallèlement aux surfaces, ce qui permet d'inspecter de grandes distances à partir d'une seule position du transducteur. Ces ondes satisfont aux conditions aux frontières du guide d'ondes, telles que les contraintes nulles, lorsque celui-ci est dans le vide, par exemple [3, 6].

I.2 Guide d'ondes et ondes guidées

Le guide d'ondes est une structure avec des frontières qui permettent aux ondes élastiques de se propager d'un point à un autre. Ces guides sont : des plaques, des tiges, des cylindres creux, des rails, des coques cylindriques et sphériques, des structures multicouches et n'importe quelle structure ayant une épaisseur de l'ordre de quelques longueurs d'onde [5].

La classification des ondes guidées est basée sur la géométrie de la structure et le mode de vibration de la matière par rapport à la direction de propagation de l'onde. Si le guide d'onde est une plaque et son épaisseur égale ou plus petite que la longueur d'onde, l'onde est appelée *onde de Lamb*. Si l'épaisseur est beaucoup plus grande que la longueur d'onde, l'énergie de l'onde se focalisera le long de la frontière de la surface et l'onde est appelée *onde de surface* ou encore *onde de Rayleigh* [6]. Dans des structures de géométrie cylindrique, on parle d'ondes guidées cylindriques qui se propagent aussi bien dans la direction axiale que circonférentielle [7]. Il existe d'autres types d'ondes guidées : *ondes de Love*, *ondes de Stonley*, *ondes de Scholte*.

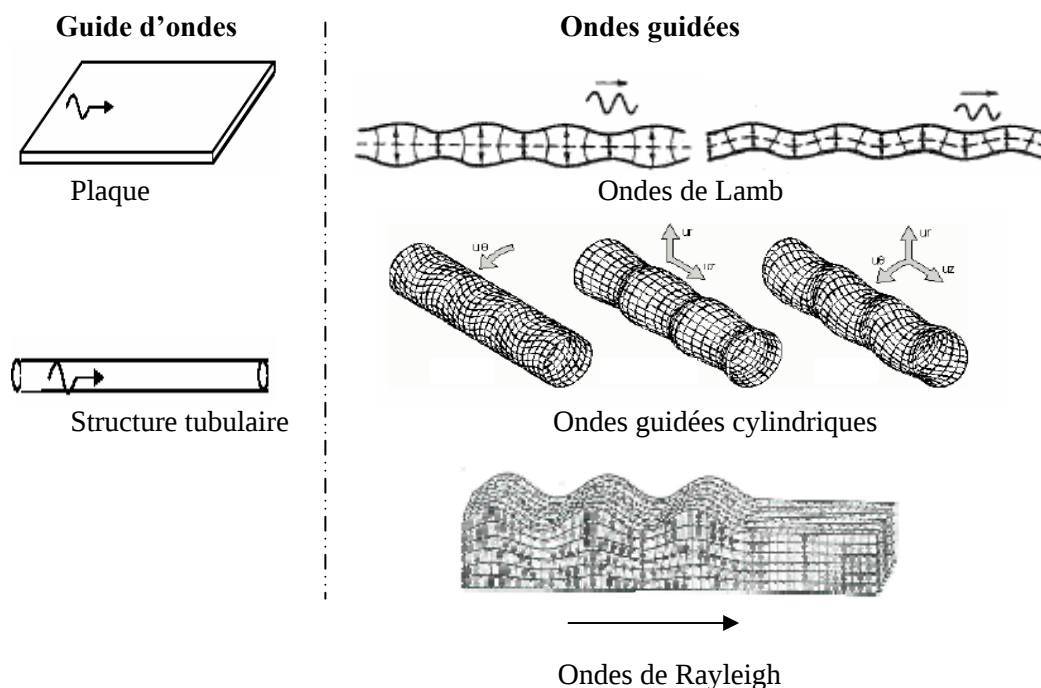


Figure I-4 : Types d'ondes guidées [5,12-14].

I.3 Avantages liés aux ondes guidées

Comparées aux ondes de volume, les ondes guidées ont des avantages dans l'inspection des structures et la caractérisation des matériaux. Ces avantages sont regroupés comme suit [5-6, 8,14-19] :

- la propagation des ondes guidées est essentiellement unidimensionnelle, leur énergie est donc concentrée dans une direction et l'amplitude du signal s'atténue lentement avec la distance de propagation. Ce qui fait que ces ondes peuvent se propager sur des distances considérablement plus longues que celles des ondes de volume tridimensionnelles. En effet les ondes guidées peuvent se propager au delà de 100 m et examiner un tube entier (bien conditionné) en quelques secondes, n'ayant besoin que d'un accès à un petit secteur de l'objet, comme l'extrémité du tube ou un autre endroit sur celui-ci, pour placer le dispositif de contrôle. Cette inspection se fait donc ligne par ligne, contrairement aux ondes de volume qui se font point par point, le signal reçu sur l'appareil de mesure contient des informations sur l'intégrité de la ligne entre les capteurs d'émission et de transmission.

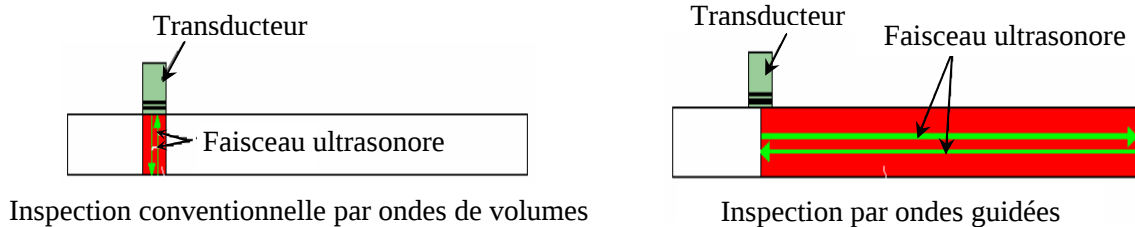


Figure I-5 : Comparaison entre ondes de volume et ondes guidées [20]

- Le faible coût vu la simplicité du contrôle et la vitesse d'inspection : 1/20 du coût qu'exige la méthode standard par ultrasons en incidence normale ou les autres techniques de C.N.D.
- La capacité d'inspecter des structures dans des situations inaccessibles : immergées dans l'eau, enterrées (particulièrement aux niveaux des passages routiers), couvertes par une matière viscoélastique et des structures multicouches avec une excellente sensibilité.

- Si le mode et la fréquence sont bien choisis, la sensibilité aux défauts obtenue sera plus grande que celle obtenue dans l'inspection ultrasonique en faisceau normal standard ou pour d'autres techniques de C.N.D.
- Elles sont utilisées pour les matériaux ferromagnétiques et non ferromagnétiques.
- Aucun besoin d'insertion de dispositifs compliqués et chers de rotation, puisque la sonde n'a pas besoin d'être déplacée pendant l'inspection.
- L'ordre de grandeur de la longueur d'onde guidée est plus important que celui utilisé dans le contrôle non destructif traditionnel, elle fait plusieurs fois l'épaisseur de la structure. Malgré la grande longueur d'onde, de petits défauts peuvent être détectés.
- les ondes guidées sont multimodaux et ont un comportement dispersif. Cela permet de diversifier le choix des fréquences selon lesquelles les ondes guidées peuvent être générées.

En particulier, les ondes guidées sont utilisées pour les structures tubulaires de faible épaisseur où l'utilisation des ondes de volume ne permet pas de distinguer entre les échos dus aux défauts et ceux dus à la réflexion sur les surfaces des parois (échos de fond). Cette distinction par ondes de volume ne peut se faire qu'avec les hautes fréquences. Ces dernières ne sont pas pratiques dans le contrôle non destructif à cause de leur forte atténuation.

I.4 Inconvénients liés aux ondes guidées

Contrairement aux ondes de volumes, les ondes guidées sont généralement compliquées, par l'existence d'un nombre multiple de modes à une fréquence constante avec différentes caractéristiques de propagation d'où la difficulté de générer un mode unique, pur. Ces modes sont également dispersifs. Quelques paramètres physiques comme la vitesse et d'autres variables acoustiques dépendent de la fréquence. L'effet de la dispersion fait que la forme du paquet d'onde change avec la distance le long du chemin de propagation, et si la dispersion est forte, l'amplitude maximale dans l'enveloppe du signal diminue rapidement avec la distance. Par ailleurs, les ondes guidées sont caractérisées par le phénomène de conversion de mode, lors des réflexions de ces modes par un défaut ou par un changement d'impédance. Tous ces inconvénients mènent à un signal compliqué, bruité, contenant en

général plus qu'un mode. Ceci rend l'interprétation difficile et l'étude de ces ondes devient compliquée et délicate. Les ondes guidées ne sont efficaces que si un seul mode est généré dans une région non dispersive [17,19, 21-23].

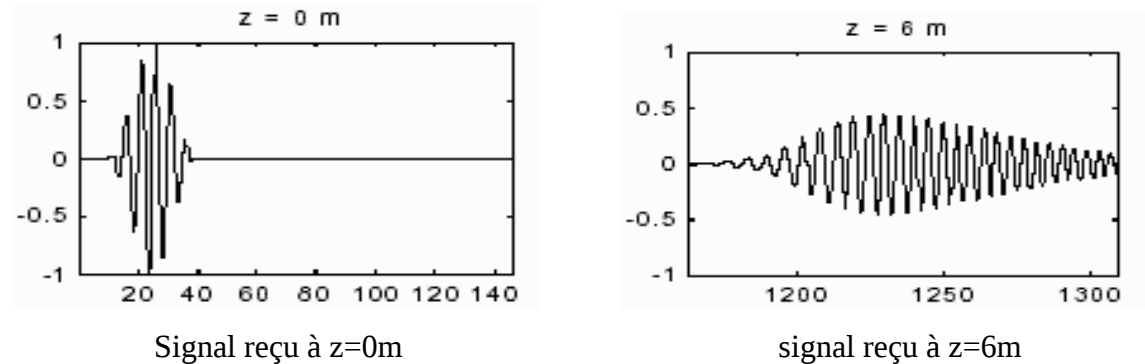


Figure I-6 : Distorsion du paquet d'onde lors de la propagation d'ondes guidées [13].

I.5 Concept d'inspection par les ondes guidées

Le concept de l'inspection par les ondes guidées ultrasonores est d'utiliser une structure comme guide d'ondes pour transporter de l'énergie à travers celle-ci. Si un défaut se trouve sur le chemin de propagation de l'énergie, une partie de cette énergie est réfléchiée sous forme d'ondes guidées. Cette énergie réfléchiée peut être reçue et interprétée comme la réaction à un défaut [4].

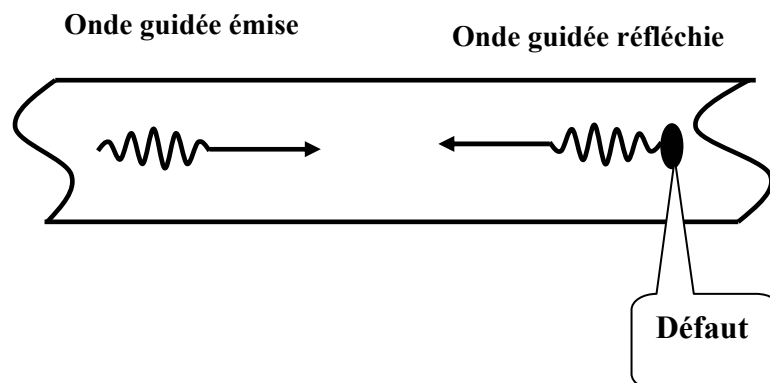


Figure I-7 : Concept d'inspection par onde guidée.

Les ondes ultrasonores incidentes sont réfléchies pour tout changement d'impédance. L'impédance acoustique Z caractérise la qualité du matériau à transmettre des ondes ultrasonores [24]. Elle est exprimée par la section (S), la densité volumique du matériau (ρ) et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores (V) dans ce matériau [25].

$$Z = S \cdot \rho \cdot V$$

Pour le même matériau, le changement d'impédance dépendra seulement de la section. Par conséquent, l'onde se réfléchit à chaque variation de section dans le matériau. Il est donc compréhensible que la présence d'un défaut dans la paroi du tube ou sur la surface de ce dernier qui réduit (cas d'un trou) ou augmente (surépaisseur dans le cas d'un joint soudé) l'épaisseur de la paroi, soit rapidement détectée par l'onde.

Le coefficient de réflexion R , dans le cas où l'onde est considérée normale à la section considérée, s'écrit :

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Z_1 : impédance acoustique du milieu incident

Z_2 : impédance acoustique du milieu transmis

Si l'épaisseur de la paroi diminue, le coefficient de réflexion de l'onde guidée prend une valeur positive, dans le cas contraire, ce coefficient prend une valeur négative.

I.6 Analyse tridimensionnelle des ondes guidées

Equation de dispersion

Les équations décrivant la propagation des ondes guidées dans des structures de symétrie cylindrique, à savoir tiges et tubes, ont été traitées pour la première fois par *Pochhammer* et *Chree* [26-27]. Historiquement, *Pochhammer* et indépendamment, *Chree*, ont proposé cette théorie au 19^{ième} siècle, mais les solutions numériques n'ont pas été mise en application jusqu'à l'arrivée des ordinateurs. La solution générale pour un cylindre creux a été traitée pour la première fois par *Gazis* en 1959 [28-29].

L'étude théorique des ondes guidées a été traitée par plusieurs auteurs [2, 3, 5, 10, 15, 30].

Soit un tube représenté sur la figure (I-6), de rayon interne (a) et externe (b). Le tube est considéré comme un milieu élastique, isotrope, linéaire, homogène, de longueur infinie devant la longueur d'onde afin d'ignorer les conditions aux limites sur les deux bords extrêmes du tube, et de ne prendre en considération que celles de l'épaisseur.

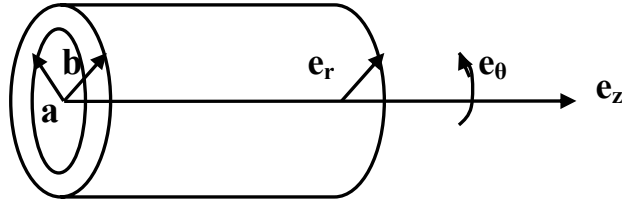


Figure I-6 : Tube de rayon interne (a) et externe (b).

En utilisant la loi de *Hooke* et la théorie linéaire de l'élasticité, l'équation du mouvement dite *équation de NAVIER* pour un corps homogène, isotrope, linéaire, élastique, en système tridimensionnel est donnée par :

$$\mu \vec{\nabla}^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \vec{\nabla} \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t^2} \right) \quad (\text{I-1})$$

Tels que :

λ, μ : Constantes de Lamé (λ est aussi appelé *module de rigidité*).

ρ : Densité volumique.

$\vec{u}$: Vecteur déplacement de matière tridimensionnel dépendant du temps et des trois coordonnées d'espace.

En utilisant la décomposition de *Helmholtz*, le vecteur déplacement peut être écrit en termes du gradient d'un potentiel scalaire (Φ) et du rotationnel d'un potentiel vecteur ($\vec{H}$):

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \cdot \Phi + \vec{\nabla} \wedge \vec{H} \quad (\text{I-2})$$

Φ : Potentiel scalaire du déplacement ;

$\vec{H}$: Potentiel vectoriel du déplacement.

Par substitution de l'équation (I-2) dans (I-1), L'équation du mouvement devient :

$$\vec{\nabla} \left[(\lambda + 2\mu) \vec{\nabla}^2 \Phi - \rho \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right) \right] + \vec{\nabla} \Lambda \left[\mu \vec{\nabla}^2 \vec{H} - \rho \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t^2} \right) \right] = 0 \quad (\text{I-3})$$

On en déduit ainsi deux équations de propagation d'ondes :

$$\begin{aligned} \boxed{\begin{aligned} v_L^2 \vec{\nabla}^2 \Phi &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \\ v_T^2 \vec{\nabla}^2 \vec{H} &= \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \end{aligned}} \quad (\text{I-4}) \quad \text{Avec} \quad \boxed{\begin{aligned} v_L^2 &= \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \\ v_T^2 &= \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{aligned}} \quad (\text{I-5}) \end{aligned}$$

v_L et v_T étant respectivement la vitesse longitudinale et la vitesse transversale dans un milieu infini. Les solutions de ces deux équations (I-4) en coordonnées cylindriques sont choisies sous la forme :

$$\begin{aligned} \Phi &= f(r) \cos(n\theta) \cos(\omega t + kz) \\ H_r &= g_r(r) \sin(n\theta) \sin(\omega t + kz) \\ H_\theta &= g_\theta(r) \cos(n\theta) \sin(\omega t + kz) \\ H_z &= g_3(r) \sin(n\theta) \cos(\omega t + kz) \end{aligned} \quad (\text{I-6})$$

$f(r)$, $g_r(r)$, $g_\theta(r)$, $g_3(r)$: sont des fonctions de Bessel .

n : ordre circonférentiel, $n=0, 1, 2, 3, \dots$

k : vecteur d'onde dans la direction axiale ;

ω : la pulsation ;

$\sin(n\theta)$ et $\cos(n\theta)$: décrivent la propagation des ondes dans la direction circonférentielle ;

$\sin(\omega t + kz)$ et $\cos(\omega t + kz)$: décrivent la propagation des ondes dans la direction axiale (OZ) du tube.

les solutions supposées dans l'équation (I-6) ne sont valables que si les variables (r, θ , z, t) sont séparées. Dans le cas contraire, ces solutions deviennent inadmissibles. La substitution de cette solution supposée (I-6) dans l'équation (I-4) donne :

$$\begin{aligned}
 & \left(\vec{\nabla}^2 + \frac{\omega^2}{v_L^2} \right) \Phi = 0 \\
 & \left(\vec{\nabla}^2 + \frac{\omega^2}{v_T^2} \right) H_z = 0 \\
 & \left(\vec{\nabla}^2 - \frac{1}{r^2} + \frac{\omega^2}{v_T^2} \right) H_r - \left(\frac{2}{r^2} \right) \left(\frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} \right) = 0 \\
 & \left(\vec{\nabla}^2 - \frac{1}{r^2} + \frac{\omega^2}{v_T^2} \right) H_\theta - \left(\frac{2}{r^2} \right) \left(\frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right) = 0
 \end{aligned} \tag{I-7}$$

En remplaçant les expressions de ϕ, H_r, H_θ, H_z dans (I-7) on trouve :

$$\begin{aligned}
 & \frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dr} + \left(\frac{n^2}{r^2} - \left(\frac{\omega^2}{v_L^2} - k^2 \right) \right) f = 0 \\
 & \frac{d^2 g_3}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg_3}{dr} + \left(\frac{n^2}{r^2} - \left(\frac{\omega^2}{v_T^2} - k^2 \right) \right) g_3 = 0 \\
 & \frac{d^2 g_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg_r}{dr} + \left(-n^2 g_r + 2ng_\theta - g_r \right) - k^2 g_r + \frac{\omega^2}{v_T^2} g_r = 0 \\
 & \frac{d^2 g_\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg_\theta}{dr} + \left(-n^2 g_\theta + 2ng_r - g_\theta \right) - k^2 g_\theta + \frac{\omega^2}{v_T^2} g_\theta = 0
 \end{aligned} \tag{I-8}$$

Posons :

$$\alpha^2 = \frac{\omega^2}{v_L^2} - k^2 \quad \text{et} \quad \beta^2 = \frac{\omega^2}{v_T^2} - k^2 \tag{I-9}$$

Les équations (I-8) s'écrivent donc :

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{d^2}{d(\alpha r)^2} + \frac{1}{(\alpha r)} \frac{d}{d(\alpha r)} - \left(\frac{n^2}{(\alpha r)^2} - 1 \right) \right] f = 0 \\
 & \left[\frac{d^2}{d(\beta r)^2} + \frac{1}{(\beta r)} \frac{d}{d(\beta r)} - \left(\frac{n^2}{(\beta r)^2} - 1 \right) \right] g_3 = 0 \\
 & \frac{d^2}{d(\beta r)^2} + \frac{1}{(\beta r)} \frac{d}{d(\beta r)} - \left(\frac{(n-1)^2}{(\beta r)^2} - 1 \right) (g_r + g_\theta) = 0 \\
 & \frac{d^2}{d(\beta r)^2} + \frac{1}{(\beta r)} \frac{d}{d(\beta r)} - \left(\frac{(n+1)^2}{(\beta r)^2} - 1 \right) (g_r - g_\theta) = 0
 \end{aligned} \tag{I-10}$$

Les solutions de ces équations dépendent des fonctions de Bessel.

Pour choisir une forme arbitraire des fonctions $f(r)$, $g_r(r)$, $g_\theta(r)$ et $g_3(r)$, on pose :

$$g_r = -g_\theta = g_1 \tag{I-11}$$

Ainsi, nous obtenons trois fonctions potentielles indépendantes : $f(r)$, $g_3(r)$ et $g_1(r)$ qui satisfont les équations différentielles.

Choix des fonctions de Bessel

Selon la valeur de la vitesse de phase, donc de l'argument des fonctions de Bessel, nous aurons des solutions fonction des fonctions de Bessel de première espèce J_n , de deuxième espèce Y_n ou des fonctions de Bessel modifiées de première et de seconde espèce I_n et K_n .

Selon la valeur des vitesses de phase, posons :

Z_n : fonction de Bessel J_n ou I_n

W_n : fonction de Bessel Y_n ou K_n

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

Tableau I-1 : Choix des fonctions de Bessel

La solution générale des équations (I-10) en coordonnées cylindriques sera donc :

$$\begin{aligned}
 f &= A Z_n(\alpha_1 r) + B W_n(\alpha_1 r) \\
 g_3 &= A_3 Z_n(\beta_1 r) + B_3 W_n(\beta_1 r) \\
 2g_1 &= g_r - g_\theta = 2A_1 Z_{n+1}(\beta_1 r) + 2B_1 W_{n+1}(\beta_1 r) \\
 2g_1 &= g_r + g_\theta = 2A_2 Z_{n-1}(\beta_1 r) + 2B_2 W_{n-1}(\beta_1 r)
 \end{aligned}
 \tag{I-12}$$

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

Champ de déplacement

u_r , u_θ , u_z sont les composantes du déplacement de matière dans les directions radiale, circonférentielle et axiale respectivement.

$$\begin{aligned}
 u_r &= \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial z} \\
 u_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \\
 u_z &= \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r H_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta}
 \end{aligned}
 \tag{I-13}$$

En termes de fonctions potentielles :

$$\begin{aligned} u_r &= \left[\frac{df}{dr} + \left(\frac{n}{r} \right) g_3 + k g_1 \right] \cos(n\theta) \cos(\omega t + kz) \\ u_\theta &= \left[-\left(\frac{n}{r} \right) f + k g_1 - \frac{dg_3}{dr} \right] \sin(n\theta) \cos(\omega t + kz) \\ u_z &= \left[-k f - \frac{dg_1}{dr} - (n+1) \frac{g_1}{r} \right] \cos(n\theta) \sin(\omega t + kz) \end{aligned} \quad (I-14)$$

Champ des contraintes

Nous pouvons également obtenir les expressions des contraintes en employant la relation bien connue de déplacement-déformation et de contrainte-déformation de la théorie d'élasticité linéaire. La relation déplacement-contrainte est :

$$\begin{aligned} s_{rr} &= \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ s_{rz} &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right] \\ s_{r\theta} &= \frac{1}{2} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \right] \end{aligned} \quad (I-15)$$

La relation entre le tenseur de déplacement et le tenseur des contraintes est donnée par :

$$\begin{aligned} T_{rr} &= \lambda \Delta + 2 \mu S_{rr} \\ T_{rz} &= 2 \mu S_{rz} \\ T_{r\theta} &= 2 \mu S_{r\theta} \end{aligned} \quad (I-16)$$

Avec

$$\Delta = \nabla^2 \phi = -(\alpha^2 + k^2) f \cos n\theta \cos(\omega t + kz) \quad (I-17)$$

En termes de fonctions potentielles :

$$\begin{aligned}
T_{rr} &= \left\{ -\lambda(\alpha^2 + k^2)f + 2\mu \left[\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{n}{r} \left(\frac{dg_3}{dr} - \frac{g_3}{r} \right) + k \frac{dg_1}{dr} \right] \right\} \cos(n\theta) \cos(\omega t + kz) \\
T_{r\theta} &= \mu \left\{ -\frac{2n}{r} \left(\frac{df}{dr} - \frac{f}{r} \right) - k \left(\frac{n+1}{r} g_1 - \frac{dg_1}{dr} \right) - \left(2 \frac{d^2 g_3}{dr^2} + \beta^2 g_3 \right) \right\} \sin(n\theta) \cos(\omega t + kz) \\
T_{rz} &= \mu \left\{ -2k \frac{df}{dr} - \frac{n}{r} \frac{dg_1}{dr} + \left[-\frac{n(n+1)}{r^2} + (\beta^2 - k^2) \right] g_1 - \frac{nk}{r} g_3 \right\} \cos(n\theta) \sin(\omega t + kz)
\end{aligned} \tag{I-18}$$

Contrairement aux ondes de volume, les ondes guidées agissent sur les frontières du matériau dans lequel elles voyagent et existent grâce à ces frontières [5]. Donc, en appliquant les conditions aux limites (le tube étant supposé dans le vide, les surfaces internes et externes sont alors libres de tous contraintes) pour $r = a$ et $r = b$, nous obtenons :

$$T_{rr} = 0, T_{r\theta} = 0, T_{rz} = 0 \tag{I-19}$$

Les équations (I-19) nous permettent alors d'obtenir un système d'équations homogènes linéaires 6x6 représenté par :

$$\begin{pmatrix} C_{11} & \cdots & C_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{61} & \cdots & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ \vdots \end{pmatrix} = 0$$

$$C_{ij} \quad X = 0 \quad (i, j=1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

C_{ij} est une matrice 6x6, X est le vecteur de composantes $\{A, B, A_1, B_1, A_3, B_3\}$. Pour que ce système admette une solution non triviale, le déterminant C_{ij} doit être nul. D'où l'équation de dispersion suivante :

$$\text{Det} [C_{ij}] = 0 \quad (i, j=1, 2, 3, 4, 5, 6) \tag{I-20}$$

Les éléments de la matrice C_{ij} s'écrivent comme une combinaison de fonctions de Bessel de première et de seconde espèce et de fonctions de Bessel modifiées (voir Annexe I).

Cas d'un tube immergé dans l'eau

Lorsque le tube est dans l'air, l'atténuation, ne dépendant que du matériau, est faible car la perte d'énergie dans l'air est faible. Cependant, puisque la plupart des tubes sont enterrés, couverts ou immergés, la propagation des ondes guidées, lorsque le guide est dans ces conditions, doit être étudiée en tenant compte du milieu environnant [31].

La précédente étude analytique suppose que le cylindre est dans le vide, ce qui n'est pas le cas expérimentalement, puisque le tube peut être immergé dans l'eau. Dans le cas d'une structure immergée dans l'eau, l'interaction entre la surface du tube et l'eau doit être prise en considération, les contraintes à l'interface liquide solide ne sont pas nulles et l'énergie de l'onde est perdue, par diffusion, dans l'eau [5,16,30].

Physiquement, les contraintes radiales à l'interface (solide-eau) sont égales à la pression (p) exercée par le fluide $T_{rr} = -p$. Sachant que seules les ondes longitudinales peuvent se propager dans l'eau, les contraintes restantes $T_{r\theta}$ et T_{rz} sont nulles. Par ailleurs, la continuité des déplacements permet de dire que les déplacements des particules dans les deux milieux solide et liquide à l'interface sont égaux [32].

Les conditions aux limites (I-19) pour un tube immergé dans l'eau s'écrivent maintenant de cette façon :

$$\begin{array}{|l}
 T_{rr}(r=a^{\text{solide}}) = -p \\
 T_{r\theta}(r=a^{\text{solide}}) = 0 \\
 T_{rz}(r=a^{\text{solide}}) = 0 \\
 u_r(r=a^{\text{solide}}) = u_{re}(r=a^{\text{eau}})
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{|l}
 T_{rr}(r=b^{\text{solide}}) = -p \\
 T_{r\theta}(r=b^{\text{solide}}) = 0 \\
 T_{rz}(r=b^{\text{solide}}) = 0 \\
 u_r(r=b^{\text{solide}}) = u_{re}(r=b^{\text{eau}})
 \end{array}
 \quad (I-21)$$

(a) et (b) sont respectivement les rayons interne et externe du tube.

Le vecteur déplacement de matière dans le tube a été donné précédemment, soit le vecteur déplacement dans l'eau :

$$\boxed{\vec{u}_e = \vec{\nabla} \Phi_e} \quad (I-22)$$

$\vec{u}_e$: Vecteur déplacement de matière dans l'eau.

Φ_e : Potentiel scalaire de déplacement

L'équation du mouvement s'écrit donc :

$$\boxed{v_{Le}^2 \vec{\nabla}^2 \Phi_e = \frac{\partial^2 \Phi_e}{\partial t^2}} \quad (I-23)$$

v_{Le} : Vitesse longitudinale de l'onde dans l'eau.

La solution proposée de cette équation en coordonnées cylindriques est donnée par :

$$\boxed{\Phi_e = f_e(r) \cos(n\theta) \cos(\omega t + kz)} \quad (I-24)$$

En remplaçant l'expression de Φ_e dans (I-23) on trouve :

$$\boxed{\frac{d^2 f_e}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df_e}{dr} - \left(\frac{n^2}{r^2} - \left(\frac{\omega^2}{v_{Le}^2} - k^2 \right) \right) f_e = 0} \quad (I-25)$$

Cette équation admet une solution (en fonction des fonctions de Bessel) donnée par :

$$\boxed{f_e = A_e Z_n(\alpha_e r) + B_e W_n(\alpha_e r)} \quad (I-26)$$

Tel que :

$$\boxed{\alpha_e^2 = \frac{\omega^2}{v_{Le}^2} - k^2} \quad (I-27)$$

u_{re} , u_{ze} sont respectivement les composantes du vecteur déplacement de matière $\vec{u}_e$ dans les directions radiale et axiale.

$$\begin{aligned} u_{re} &= \frac{\partial \Phi_e}{\partial r} = \frac{df_e}{dr} \cos(n\theta) \cos(\omega t + kz) \\ u_{ze} &= \frac{\partial \Phi_e}{\partial z} = k f_e \cos(n\theta) \cos(\omega t + kz) \end{aligned} \quad (I-28)$$

Nous pouvons également obtenir les expressions des contraintes :

$$T_{re} = -\lambda_e (\alpha_e^2 + k^2) f_e \cos(n\theta) \cos(\omega t + kz) \quad (I-29)$$

Par substitution (I-14), (I-18), (I-28), (I-29) dans l'équation (I-21), les conditions aux limites dans le cas d'un tube immergé s'écrivent donc comme suit :

$$\begin{aligned} & -\lambda(\alpha^2 + k^2)f + 2\mu \left[\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{n}{r} \left(\frac{dg_3}{dr} - \frac{g_3}{r} \right) + k \frac{dg_1}{dr} \right] = -\lambda_e (\alpha_e^2 + k^2) f_e \\ & -\frac{2n}{r} \left(\frac{df}{dr} - \frac{f}{r} \right) - k \left(\frac{n+1}{r} g_1 - \frac{dg_1}{dr} \right) - \left(2 \frac{d^2 g_3}{dr^2} + \beta^2 g_3 \right) = 0 \\ & -2k \frac{df}{dr} - \frac{n}{r} \frac{dg_1}{dr} + \left[-\frac{n(n+1)}{r^2} + (\beta^2 - k^2) \right] g_1 - \frac{nk}{r} g_3 = 0 \\ & \frac{df}{dr} + \left(\frac{n}{r} \right) g_3 + k g_1 = \frac{df_e}{dr} \end{aligned} \quad (I-30)$$

Nous obtenons un système d'équations homogènes linéaires 8x8 représenté par :

$$C_{ij} X = 0 \quad (i,j=1,2,3,4,5,6,7,8)$$

C_{ij} est une matrice 8x8, X est le vecteur $\{A, B, A_1, B_1, A_3, B_3, A_e, B_e\}$ des constantes inconnues. Pour que ce système admette une solution non triviale, le déterminant C_{ij} doit être nul. D'où l'équation de dispersion suivante :

$$\text{Det} [C_{ij}] = 0 \quad (i, j=1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (I-31)$$

Afin de considérer la diffusion de l'énergie du tube vers l'eau, une partie imaginaire est introduite dans l'expression du nombre d'onde $k = k_{re} + ik_{imag}$, la partie imaginaire correspond à cette perte d'énergie dans l'eau, l'équation du mouvement peut s'écrire sous forme exponentielle comportant le terme $e^{i(kz - \omega t)} = e^{-zk_{imag}} e^{i(zk_{re} - \omega t)}$. Ce terme comporte l'effet de l'atténuation dû à la présence de l'eau aux frontières (surfaces interne et externe). Par conséquent l'équation (I-20) admet des solutions complexes [30].

Lorsque le tube est entouré d'un fluide ou lorsqu'il contient un liquide et lorsque la vitesse de phase du mode guidé est supérieure à la vitesse de l'onde longitudinale dans le fluide, il y a diffusion de l'énergie dans ce dernier sous forme d'ondes longitudinales. Cette perte d'énergie dépend de la viscosité du fluide entourant le tube. Par contre, lorsque le tube est entouré d'un matériau solide, la diffusion de l'énergie se fait par des ondes longitudinales et transversales. Ceci cause une grande atténuation, spécialement lorsque l'impédance acoustique du tube et du matériau adjacent est similaire [31].

Au voisinage de la fréquence de coupure, l'effet de l'eau sur les modes longitudinaux (un des types d'ondes guidées) est minimal. Par contre, aux hautes fréquences, l'eau influe d'une façon significative sur la propagation de ces modes, ce qui mène à une grande atténuation [32]. En effet, aux hautes fréquences, les modes tendent vers les ondes de Rayleigh. Ces derniers sont des ondes de surfaces, elles sont donc très sensibles à l'environnement, et par conséquent aux conditions extérieures (eau). Cette atténuation peut être minimisée si le tube a une grande densité.

I.7 Familles de modes d'ondes guidées

On peut distinguer quatre familles de modes, une se propageant dans la direction circonférentielle et les trois autres se propagent le long de l'axe du tube. Dans chaque famille, il y a un nombre infini de modes différents.

Modes circonférentiels

Les modes circonférentiels sont un type d'ondes se propageant dans la direction circonférentielle. Ainsi, ce mode ne se propage pas dans la direction axiale. Ce type de mode n'est pas très utile pour le contrôle des structures à moins que le défaut ne soit situé sur la même position axiale que la sonde. Le mouvement manuel ou automatique de la sonde est

exigé dans la direction axiale puisque seul le secteur circonférentiel entouré par la sonde peut être inspecté. Ces ondes se subdivisent en deux groupes. Le premier groupe est caractérisé par un déplacement radial et angulaire tandis que le deuxième se caractérise par une composante dans la direction axiale seulement [7, 30].

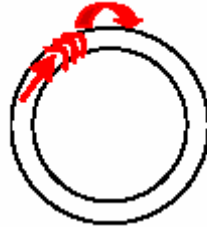


Figure I-9 : Propagation d'un mode circonférentiel [30].

Il y a trois autres familles qui se propagent dans la direction axiale : les modes longitudinaux $L(n,m)$, les modes de torsion $T(n,m)$ et les modes de flexion $F(n,m)$.

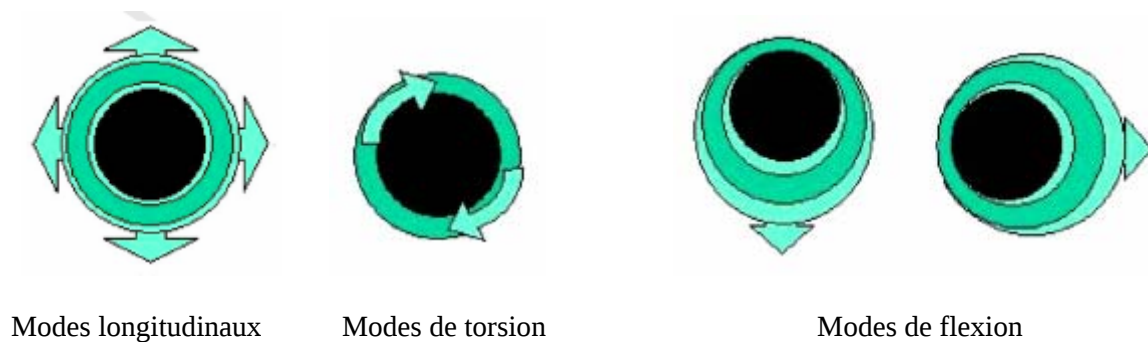


Figure I-10 : Familles de modes d'onde guidée [33]

Notation

D'après la notation de Silk et Bainton : les lettres L, T, F correspondent respectivement aux modes longitudinaux, modes de torsion, modes de flexion [17, 34].

L'indice n

Deux termes sont introduits pour décrire le déplacement de l'onde dans la direction circonférentielle : $\sin(n\theta)$ et $\cos(n\theta)$. n est donc un nombre entier dit *ordre circonférentiel* ou *ordre harmonique* de la variation circonférentielle θ . Il détermine la façon dont les vecteurs déplacement et contrainte varient selon la coordonnée angulaire θ dans la section

transversale (circonférentielle) du cylindre [16, 31]. n désigne également le nombre de longueurs d'ondes autour de la circonférence [17].

Les modes longitudinaux et de torsion sont des modes axiaux symétriques $u_\theta = 0$. Les champs (déplacement, contraintes, etc...) produits dans le cylindre par tout mode de ces deux familles sont indépendants de la coordonnée angulaire θ ($\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$), le nombre de longueurs d'ondes autour de la circonférence est nul ($n = 0$ dans ce cas).

Les modes de flexions sont des modes qui ont une variation harmonique du déplacement et des contraintes autour de la circonférence ($\frac{\partial}{\partial \theta} \neq 0$), $n \neq 0$ dans cet autre cas [16, 34].

$n = 1$: signifie que le mode a une longueur d'onde autour de la circonférence. $n = 2$: signifie que le mode a deux longueurs d'ondes autour de la circonférence et ainsi de suite [34].

L'indice m

Cet indice est un nombre entier, employé pour différencier ou nommer les modes d'une même famille, qui croît avec la vitesse de phase [28]. Exemple :

- $L(0,2)$ est le deuxième mode de la famille des modes longitudinaux.
- $F(3,1)$ est le premier mode de la famille des modes de flexion ayant 3 longueurs d'ondes autour de la circonférence $n = 3$.

Modes axisymétriques longitudinaux $L(0,m)$: le vecteur déplacement a deux composantes seulement : radiale et axiale. Le déplacement de matière dans la direction axiale est symétrique par rapport à l'axe du tube.

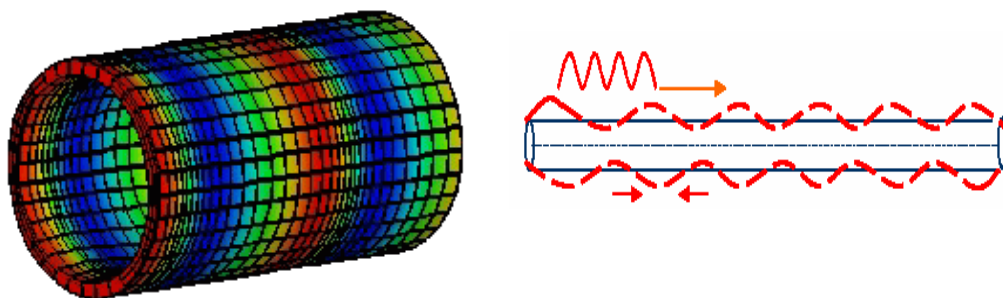


Figure I-11 : Propagation d'un mode axisymétrique longitudinal [30, 35].

Modes axisymétriques de torsion $T(0,m)$: le vecteur déplacement a une seule composante angulaire.

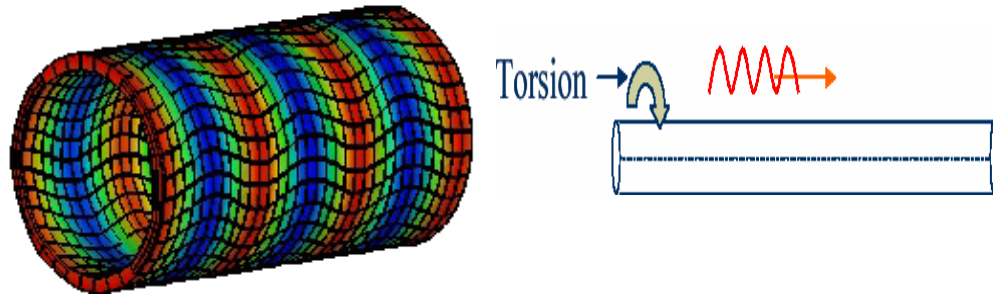


Figure I-12 : Propagation d'un mode axisymétrique de torsion [30, 35].

Mode non axisymétrique de flexion $F(n,m)$: $n=1, 2, 3, \dots$, le vecteur déplacement a trois composantes. Ce sont des modes antisymétriques dont les déplacements axiaux de matière sont antisymétriques par rapport à l'axe central du tube.

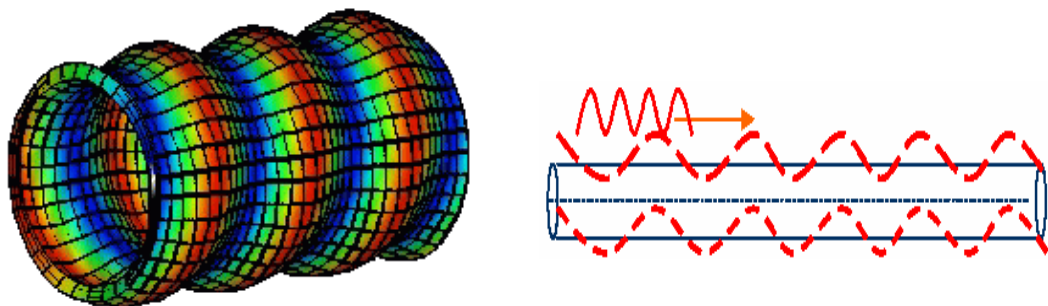


Figure I-13 : Propagation d'un mode non axisymétrique de flexion [30, 35]

Pour visualiser le comportement dispersif de la structure et prévoir le mode à générer à une fréquence particulière, il nous faut à présent tracer les courbes de dispersion donnant les vitesses de phase et de groupe en fonction de la fréquence.

Chapitre II

Courbes de dispersion

Les courbes de dispersion sont un moyen efficace pour visualiser le comportement dispersif de la structure et prévoir le mode à générer à une fréquence particulière. Ces courbes donnent l'évolution de la vitesse de phase et de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence. Elles sont obtenues en résolvant l'équation de dispersion (I-20). Cette résolution ne peut se faire que numériquement.

II.1 Courbes de dispersion des vitesses de phase et des vitesses de groupe

Vitesse de phase

Elle correspond à la vitesse de propagation des fronts d'ondes de fréquence donnée à l'intérieur d'un paquet d'ondes [36]. Elle est donnée par :

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega\lambda}{2\pi} \quad (\text{II-1})$$

Tel que :

ω : est la pulsation de l'onde émise ;

k : est le nombre d'onde.

Les courbes de dispersion des vitesses de phase représentent toutes les vitesses de phase possibles pour une fréquence donnée de tous les modes d'ondes guidés qui peuvent exister. Ces courbes donnent l'information essentielle pour déterminer les procédures expérimentales pour exciter et recevoir un mode désiré, par exemple, l'angle pour lequel un mode bien particulier est généré à une fréquence donnée est relié à la vitesse de phase par la loi de Snell-Descartes [2,10] :

$$\sin \theta = \frac{v_L}{v_{ph}} \quad (\text{II-2})$$

v_L : Vitesse longitudinale dans le matériau couplant ;

θ : Angle d'incidence de l'onde longitudinale dans le matériau couplant ;

v_{ph} : Vitesse de phase du mode à générer.

Vitesse de groupe

La vitesse de groupe est la vitesse à laquelle se propage, le long de tube, un paquet d'ondes de pulsation centrale ω . Elle correspond également à la vitesse de propagation de l'énergie transportée par l'onde le long du tube. Elle peut être calculée facilement à partir de la vitesse de phase. Elle est donnée par la relation (II-3) [2, 10] :

$$\boxed{v_{gr} = \frac{d\omega}{dk}} \longrightarrow \boxed{v_{gr} = \frac{d\omega}{d\left(\frac{\omega}{v_{ph}}\right)}} \longrightarrow \boxed{v_{gr} = \frac{v_{ph}^2}{v_{ph} - \omega \frac{dv_{ph}}{d\omega}}} \quad (\text{II-3})$$

Si les courbes de dispersion des vitesses de phase nous permettent d'obtenir les informations nécessaires pour la génération du mode choisi, les courbes des vitesses de groupe nous permettent d'identifier les modes générés et de localiser le défaut en calculant la distance de propagation [2, 10] :

$$\boxed{2D = v_{gr} \cdot t} \quad (\text{II-4})$$

D étant la distance entre le défaut et l'émetteur-récepteur, t représente le temps de transit de l'onde parcourant la distance $2D$.

II.1.1 Modes axisymétriques

Dans le cas où $n = 0$, le mode est axialement symétrique. Dans l'équation (I-6), les composantes (H_r, H_z) sont nulles, tandis que la composante restante H_θ et la fonction scalaire Φ sont fonction de r et de z seulement. Le déterminant (I-20) se subdivise en deux sous-déterminants : $\text{Det}(C_{ij}) = \text{Det}(C_1) \cdot \text{Det}(C_2) = 0$ [2, 10].

$$\text{Tel que : } C_1 = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{14} & C_{15} \\ C_{31} & C_{32} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{44} & C_{45} \\ C_{16} & C_{62} & C_{64} & C_{65} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad C_2 = \begin{pmatrix} C_{23} & C_{26} \\ C_{53} & C_{56} \end{pmatrix}$$

Résoudre $\text{Det}(C_1) = 0$ permet de tracer les courbes de dispersion des modes longitudinaux. Ces modes ont un vecteur déplacement de matière polarisé dans le plan (r, z) , de sorte qu'il n'y ait aucune composante circonférentielle de déplacement ($u_\theta = 0$) [2, 10]. La figure (II-1) représente les courbes de dispersion des vitesses de phase et des vitesses de groupe pour les modes longitudinaux. Ces courbes ont été tracées à l'aide du logiciel "PCDISP" [28].

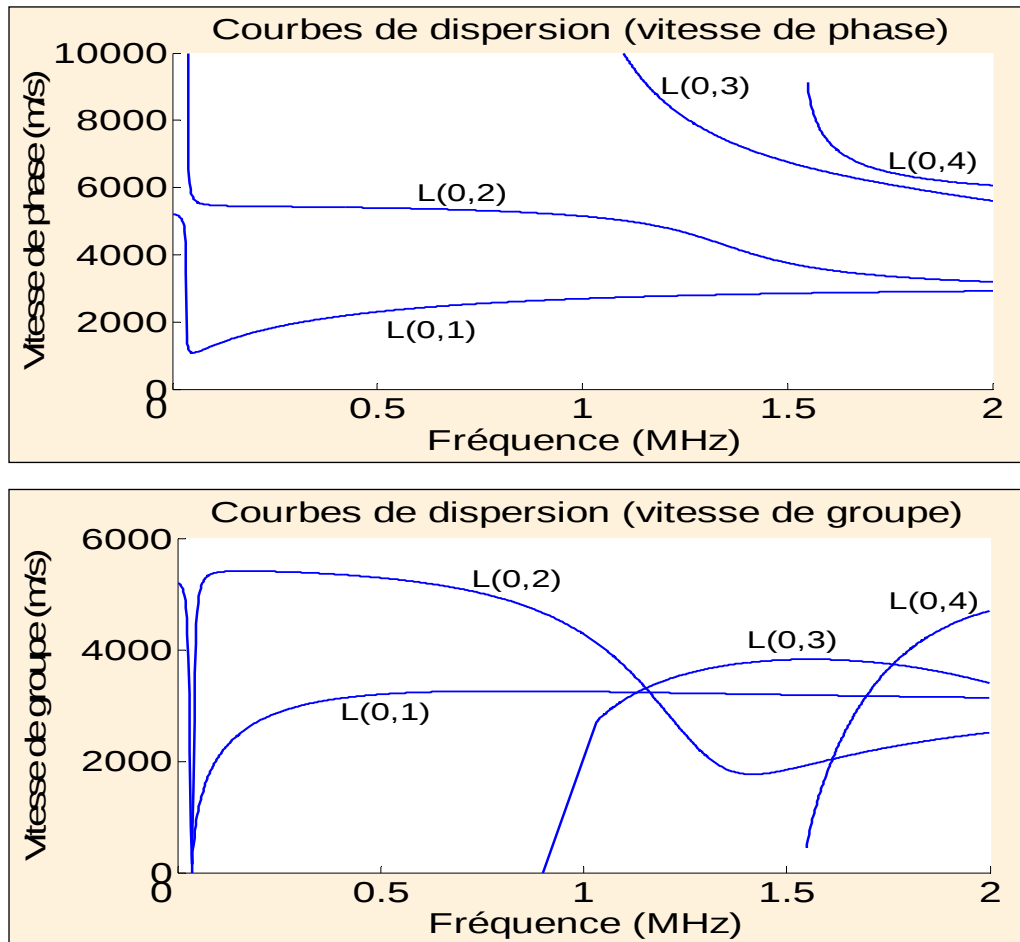


Figure II-1 : Courbes de dispersion des modes longitudinaux dans une structure tubulaire de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8 mm [28].

Résoudre $\text{Det}(C_2) = 0$ permet de tracer les courbes de dispersion des modes de torsion. Ces modes n'ont qu'une composante circonférentielle de déplacement (u_θ) [2,10].

La figure (II-2) représente les courbes de dispersion des vitesses de phase et des vitesses de groupe pour les modes de torsion.

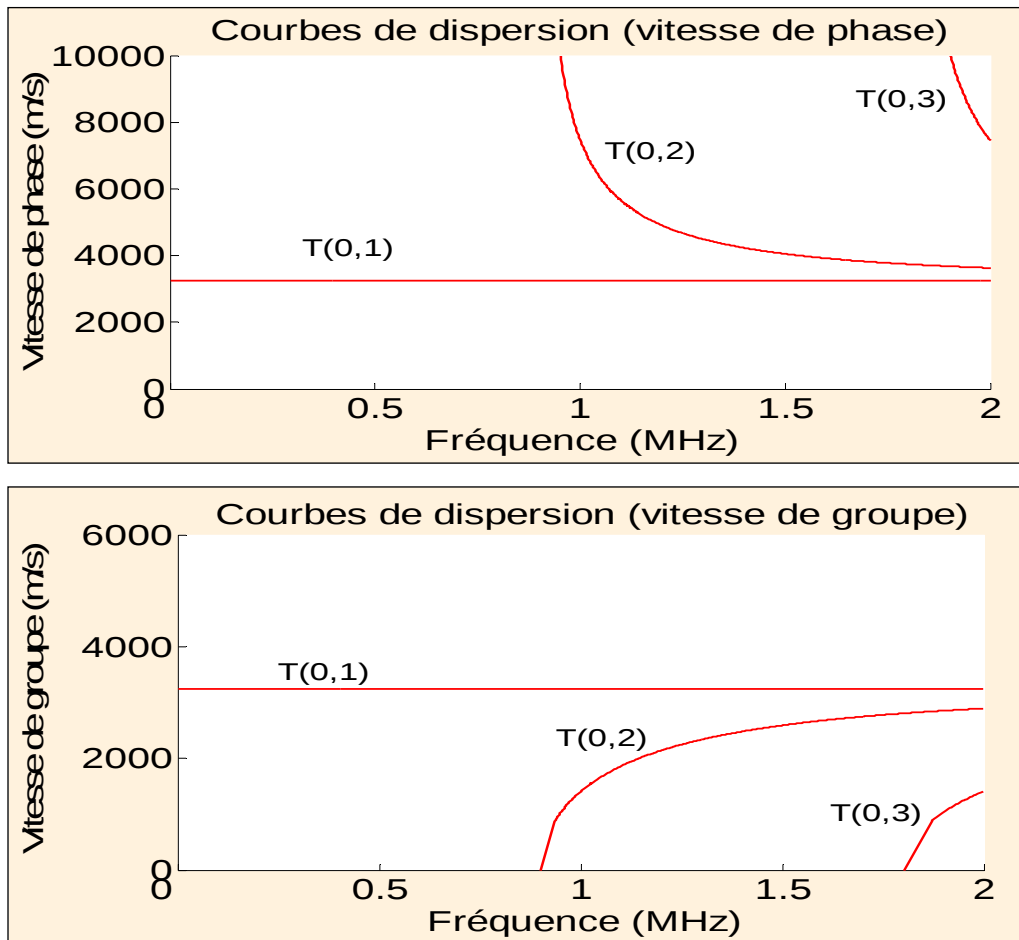


Figure II-2 : Courbes de dispersion des modes de torsion dans une structure tubulaire de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8 mm [28].

Comparés aux modes longitudinaux axisymétriques, les modes de torsion sont moins nombreux puisque il n'y a pas de couplage entre les déplacements (une seule composante u_θ). Ces modes varient rapidement avec la fréquence mis à part le mode T(0,1). Ce dernier n'est pas dispersif [2,15]. Employer les ondes guidées longitudinales avec un déplacement radial minimal et un déplacement axial significatif à la surface est comparable à employé des modes de torsion [7].

Les modes axisymétriques sont générés exclusivement quand la source d'excitation est symétrique ou si elle couvre la circonférence entière du tube. Ces modes ont une distribution d'énergie symétrique autour de la circonférence. Ils sont favorables dans la détection de défauts, puisque la position circonférentielle d'un défaut n'a aucune influence sur l'énergie [2].

II.1.2 Modes non axisymétriques

Le vecteur déplacement des modes de flexion est tridimensionnel. Il est polarisé dans le plan (r, θ, z) . Dans ce cas, l'équation (I-20) doit être résolue d'une façon générale pour tout $(n \neq 0)$. La figure (II-3) représente les courbes de dispersion des vitesses de phase et des vitesses de groupe pour les modes non axisymétriques de flexion ($n = 1, 2, 3, \dots$). Plusieurs d'entre elles sont presque superposées. Elles ne sont séparées que par un léger décalage de vitesse de phase. Dans la pratique, il est très difficile de ne générer qu'un seul mode de flexion à la fois. Cette petite différence entre les valeurs des vitesses de phase crée un système d'interférences complexe entre les modes de flexion générés au même instant [2, 10]. Les modes non axisymétriques peuvent être générés par une source d'excitation qui couvre seulement une partie de la circonférence. Ils se produisent également quand un mode axisymétrique est réfléchi par un défaut non axisymétrique (conversion de mode). En raison de leur complexité, ces modes de flexion sont habituellement évités dans les applications (les trois composantes de déplacement existent) [2, 6, 10, 15].

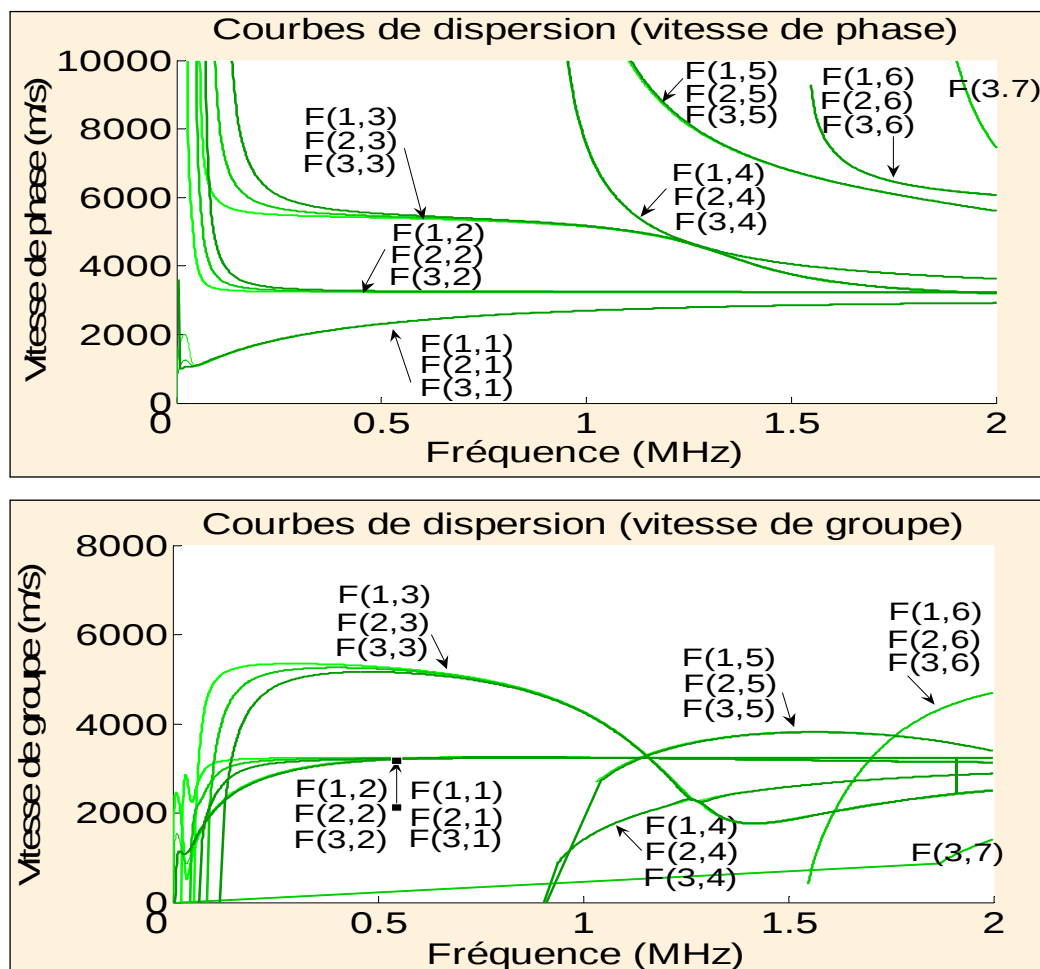


Figure II-3 : Courbes de dispersion des modes de flexion dans une structure tubulaire de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8 mm [28]

La figure (II-4) regroupe les trois modes : longitudinaux, de torsion et de flexion :

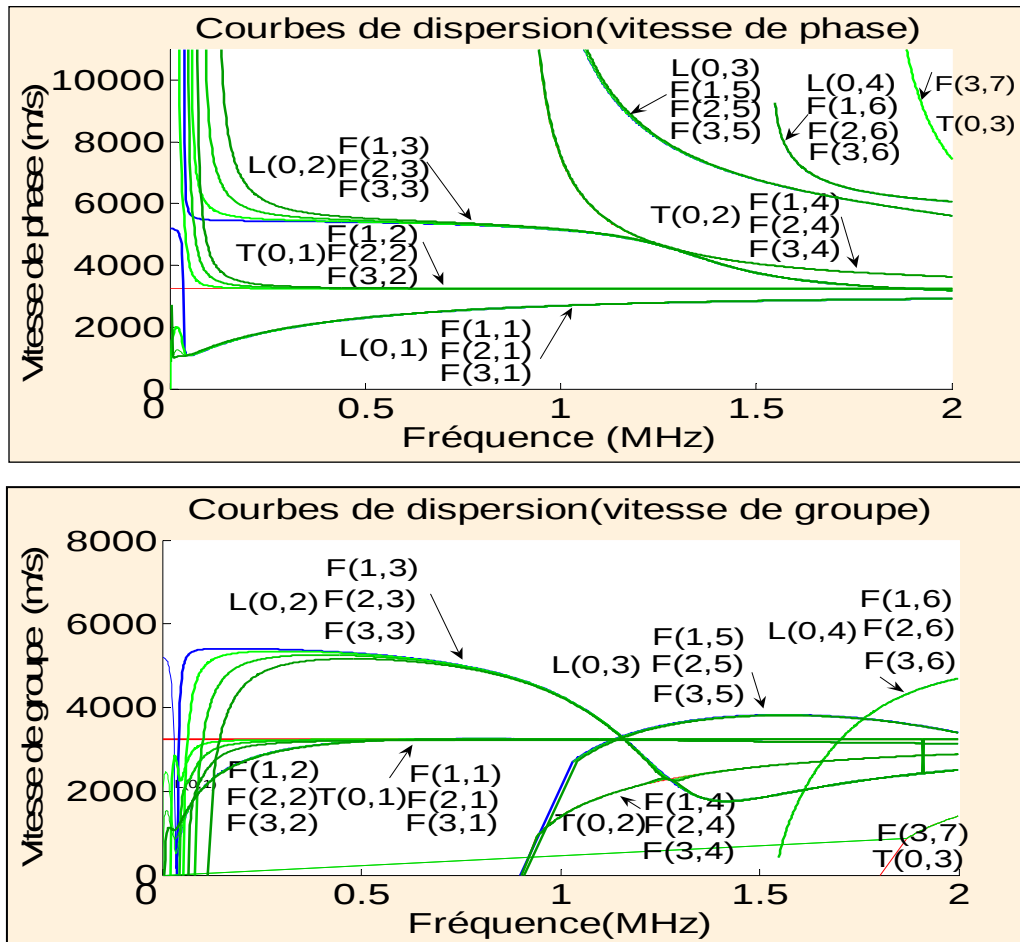


Figure II-4 : Courbes de dispersion de tous les modes : longitudinaux, torsion, flexion dans une structure tubulaire de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8 mm [28].

II.2 Caractéristiques des ondes guidées

Les caractéristiques des ondes guidées sont très importantes pour le choix du mode et dans le contrôle de ce dernier dans les applications pratiques de contrôle non destructif. Ces caractéristiques sont obtenues à partir des courbes de dispersion des vitesses de phase et des vitesses de groupe.

- les ondes guidées sont souvent dispersives : les vitesses de phase et les vitesses de groupe dépendent de la fréquence.

- à basses fréquences, il existe deux modes axisymétriques de propagation seulement, $L(0,1)$ et $L(0,2)$ ainsi qu'un nombre infini de modes non axisymétriques comme $F(n,1)$, $F(n,2)$ et $F(n,3)$ où $n = 1, 2, 3 \dots$. Lorsque la fréquence augmente, des modes d'ordre plus élevés apparaissent. Chacun de ces modes possède une fréquence de coupure. Au-dessous de la fréquence de coupure, l'onde ne se propage pas dans le guide et toute l'énergie est réfléchi. Les courbes de dispersion (II-4) montrent que pour la fréquence de coupure $v_{ph} \rightarrow \infty$ et $v_{gr} = 0$; les courbes ont une allure exponentielle décroissante. A très haute fréquence, la longueur d'onde devient très petite devant l'épaisseur de la paroi du tube, tous les modes tendent vers l'onde de Rayleigh (onde de surface) [2, 6, 19].
- excepté dans la gamme des fréquences les plus basses, pour chaque mode axisymétrique longitudinal ou de torsion ($n=0$), on trouve toujours une infinité de modes non axisymétriques de flexion $F(n,m)$ associés à ces deux modes. Les modes $F(n,1)$ associés à $L(0,1)$, les modes $F(n,2)$ associés à $T(0,1)$ et les modes $F(n,3)$ associés à $L(0,2)$ et ainsi de suite [2, 15]. Ce qui emmène certains auteurs à répartir les modes non axisymétriques de flexion en deux catégories : modes longitudinaux de flexion (modes longitudinaux associés aux modes de flexion) et modes de torsion de flexion (modes de torsion associés aux modes de flexion) [15].

II.3 Distribution du déplacement de matière (structure de l'onde)

Dans un paquet d'ondes guidées, plusieurs modes peuvent se propager à travers l'épaisseur de la paroi de tube. Chaque point (combinaison de mode et de fréquence) a un modèle unique de déplacement de matière à travers l'épaisseur de la structure. La structure de l'onde (déplacement de matière) est déterminée en résolvant l'équation (I-14). Elle joue un rôle très important dans la propagation de l'onde guidée et son interaction avec les défauts. Quelques modes ont de grandes amplitudes de mouvement de matière près de la surface tandis que d'autres, ont un mouvement plus intense près du milieu de l'épaisseur. La structure de l'onde nous renseigne donc sur l'utilité d'un mode pour inspecter un type de défaut particulier, par exemple :

si le tube est entouré d'un liquide non visqueux, à l'intérieur ou à l'extérieur, un mode de torsion ou un mode ayant un déplacement axial ou circonférentiel fort et un déplacement radial faible, se propagera sans perdre d'énergie dans le liquide. Par contre, un mode avec une

composante radiale forte (Figure (II-5)) diffusera dans le liquide et s'atténuera rapidement ceci étant dû au fait que les liquides non visqueux ne propagent pas les ondes de cisaillement [2, 15].

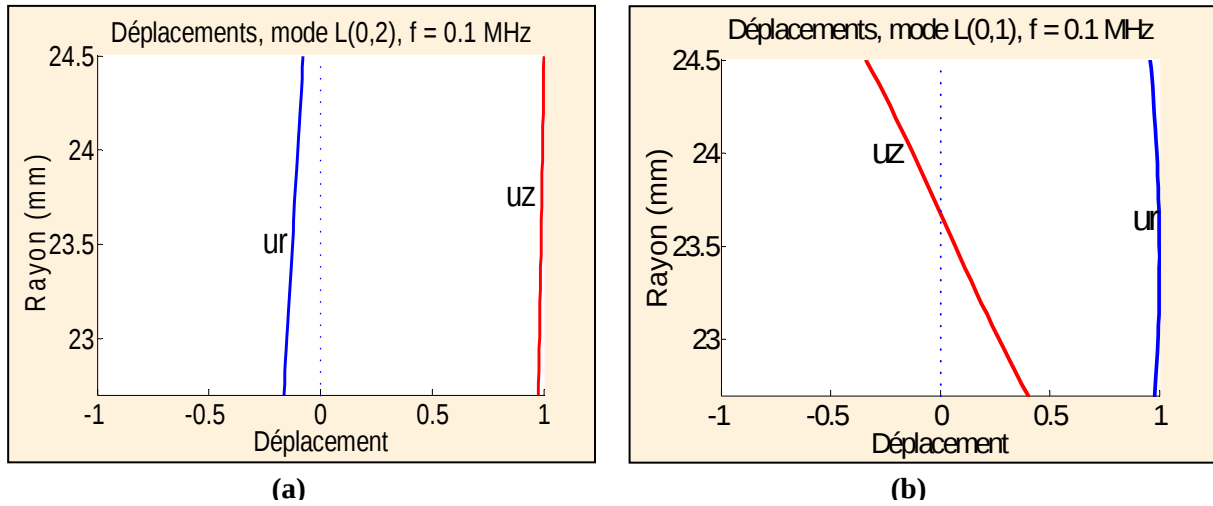
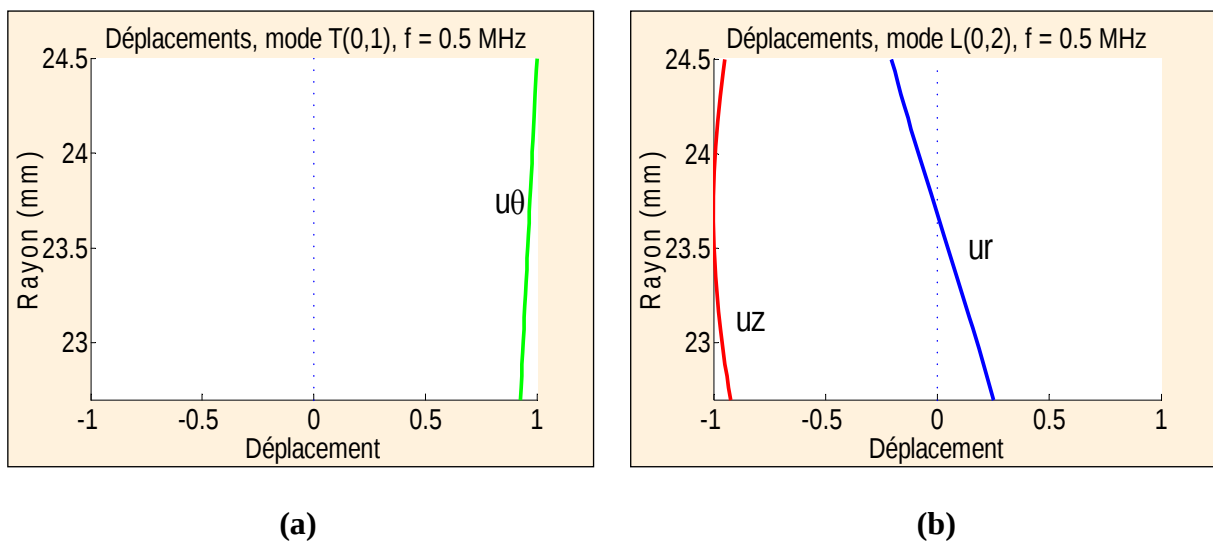
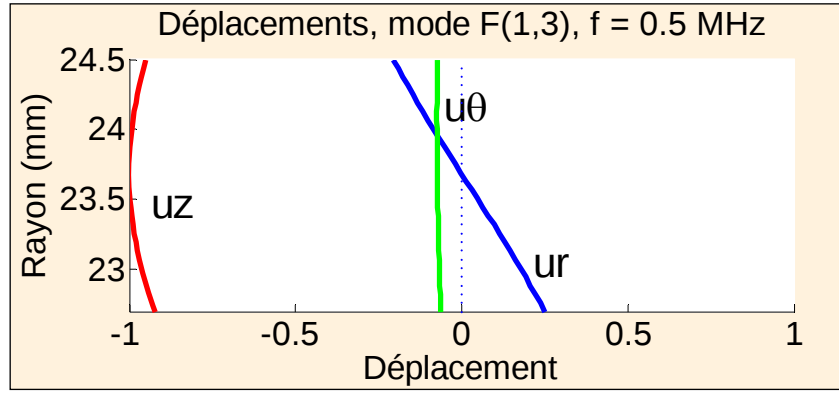


Figure II-5 : Distribution du champ de déplacement à travers l'épaisseur : a) Mode L(0,2) de faible composante radiale u_r ; b) Mode L(0,1) de forte composante radiale (tube de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8 mm)[28].

La structure d'onde varie pour chaque mode, selon le type, l'ordre et la fréquence [2]. Les figures (II-6) montrent les structures d'ondes (déplacements) des trois catégories de modes T(0,1), L(0,2), F(1,3) pour la même fréquence $f = 0.5$ MHz.



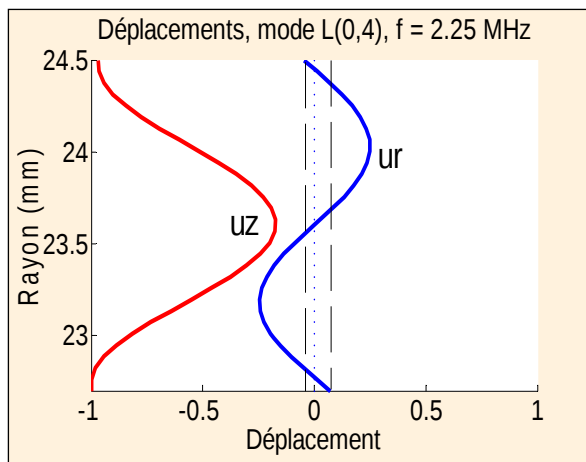


(c)

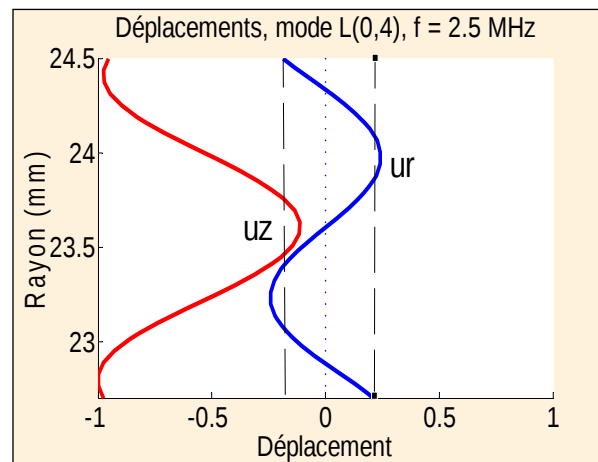
Figure II-6 : Distribution du champ de déplacement à travers l'épaisseur pour différents modes : a) T(0,1); b) L(0,2) ; c) F(1,3) pour $f = 0.5$ MHz. (tube de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8 mm)[28].

Nous remarquons que pour $f = 0.5$ MHz, le mode de flexion F(1,3) a un déplacement, à travers l'épaisseur, presque identique à celui de L(0,2) : la composante u_θ est relativement très faible, ce qui induit un mouvement de matière semblable à celui du mode L(0,2). Ce constat explique que ces deux modes se propagent à la même vitesse (figure (II-4)).

Pour un mode donné, le profil de déplacement varie aussi selon la fréquence. Par conséquent, il est avantageux pour l'expérimentateur de faire un bon choix de fréquence pour déterminer le point modal optimal pour une meilleure interaction entre le champ de déplacement et le défaut [2,7]. Les figures (II-7) montrent les structures d'ondes (déplacements) d'un seul mode L(0,4), pour deux fréquences : 2.25 MHz, 2.5 MHz.



(a)



(b)

Figure II-7 : Distribution du champ de déplacement à travers l'épaisseur pour le mode L(0,2) à deux fréquences : a) 2.25 MHz; b) 2.5 MHz(tube de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8 mm)[28].

Le maximum d'énergie (composante axiale u_z) est distribué sur les frontières du tube, ce mode est très sensible aux défauts de surface, mais non sensible à l'environnement externe du tube, puisque sa composante radiale est faible. Cependant, il suffit que la fréquence change de 0.25MHz, pour que la composante radiale augmente. Donc, il est très important de générer ce mode avec un transducteur à bande passante étroite. (Le transducteur est défini dans le troisième chapitre).

II.4 Choix du mode à générer

Le choix du mode, qui nous intéresse, doit obéir à quelques critères importants [2, 16,23] :

- il faut éviter les modes à hautes fréquences (ondes de surface),
- il faut éviter les zones où les modes sont dispersifs (le signal se déforme en se propageant),
- il faut choisir le mode le plus sensible aux défauts à localiser,
- il faut que le mode soit peu sensible aux conditions extérieures,
- le mode choisi doit être excité comme mode isolé, dominant, pour simplifier l'interprétation des signaux réfléchis. Si, plus d'un mode est excité, des réflexions multiples se produisent lors de l'interaction avec un défaut, en raison des différentes vitesses de groupe,
- d'un point de vue de détection du défaut, il est souhaitable d'éliminer la variation angulaire des champs ultrasonores (déplacement et contraintes) de sorte que la section transversale du cylindre soit inspectée avec une distribution d'énergie qui sera indépendante de la position circonférentielle du défaut. Ceci peut être réalisé en employant la famille des modes axiaux symétriques.

En général, deux facteurs principaux affectent le choix d'un mode : sa sensibilité aux défauts et sa capacité de voyager sur de grandes distances sans perdre trop d'énergie.

L'étude théorique, en particulier les courbes de dispersions nous permettent donc de faire le bon choix pour le mode à générer. Une fois le mode choisi, il faut trouver le moyen de le générer.

Chapitre III

Techniques de génération des ondes guidées

En général, les ondes ultrasonores et en particulier les ondes guidées, peuvent être générées par le biais de plusieurs méthodes : électromagnétique, électroacoustique, magnétostrictive, laser, piézoélectrique. Cette dernière, que nous allons utiliser dans nos expériences, est largement répandue.

III.1 Génération d'ondes ultrasonores par effet piézoélectrique

III.1.1 L'effet Piézoélectrique

L'effet piézoélectrique observé sur le quartz et le sel de Rochelle fut découvert en 1880 par Pierre Curie et son frère Jacques qui lui donnèrent le nom de *piézoélectricité*. La piézoélectricité est l'apparition de charges électriques à la surface de certains matériaux soumis à une déformation et inversement, lorsqu'une tension électrique est exercée sur cette substance, une déformation a lieu. Ainsi, la déformation d'un cristal génère des vibrations ultrasonores qui se propagent sous forme d'ondes dans la structure à contrôler, quand un couplant approprié est placé entre le cristal et ce dernier [3].

L'effet piézo-électrique peut être observé sur un grand nombre de substances :

les cristaux qui possèdent une piézoélectricité naturelle sont le Quartz (SiO_2), le Niobate de Lithium (LiNbO_3), le Tantalate de Lithium (LiTaO_3). Cependant, ces cristaux sont fragiles et coûteux. La piézoélectricité est observée aussi sur les céramiques tels que le Titanate de Baryum (BaTiO_3), les Zircono-Titanate de Plomb (PZT) et les polymères comme le PolyVynilDifluorure (PVDF), Polyfluore de Vinilydène (PVF_2) ainsi que sur d'autres types de matériaux piézoélectriques : la Tourmaline (Constituée principalement de Silice et d'Aluminium), le sel de Rochelle, le Sulfate de Lithium, le Phosphate d'Ammonium déshydrogéné et d'autres récemment développés comme les polymères-céramiques et les composites[3, 5, 37].

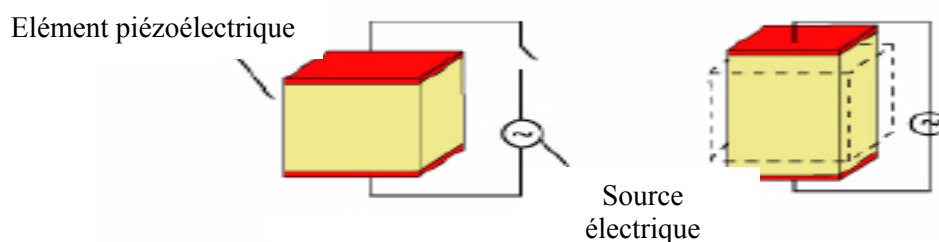


Figure III-1 : Illustration du phénomène de la piézoélectricité [5].

III.1.2 Traducteurs piézoélectriques

Les cristaux piézo-électriques sont utilisés dans la fabrication de dispositifs tels que les traducteurs ultrasonores, dispositifs permettant d'émettre et (ou) de recevoir des ultrasons. Le traducteur est principalement constitué par l'élément piézoélectrique, qu'on appelle aussi *l'oscillateur* ou le *transducteur*. Pour que ce dernier devienne un traducteur, il faut métalliser les faces du transducteur afin de le brancher électriquement, couler un amortisseur contre la face arrière pour amortir plus ou moins les vibrations et finalement, enfermer le tout dans un boîtier pour faciliter le maniement, disposer d'une prise électrique et protéger éventuellement la face avant [38].



Figure III-2 : Un traducteur (appelé aussi *palpeur*, *capteur*, *transducteur*, *sonde*) [39].

III.1.3 Faisceau ultrasonore

Le champ acoustique d'un traducteur plan (supposé vibrer comme un piston à une fréquence donnée et émettant dans un milieu homogène, isotrope et non dispersif) peut être décomposé en deux zones à partir de l'émetteur [24,40] :

- La zone proche du traducteur, appelée *champ proche* ou *zone de fresnel*. Elle est caractérisée par des irrégularités de l'amplitude de l'écho du réflecteur ponctuel acoustique, qui se traduisent, notamment sur l'axe, par une succession de maxima et de minima dans la direction de propagation. Le dernier maximum suivant l'axe de propagation détermine la limite du champ proche dont la largeur, symbolisée par l_0 , est déterminée par la relation :

$$l_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \quad \text{(III-1)}$$

Avec

D : Diamètre du transducteur ;

λ : Longueur d'onde.

- La zone située au delà de la zone proche, appelée *champ éloigné* ou *zone de Fraunhofer*, pour laquelle l'amplitude de l'écho du réflecteur ponctuel décroît de façon monotone vers la périphérie du faisceau et suivant l'axe, proportionnellement à la distance. Dans cette zone, le faisceau ultrasonore est plus homogène et se présente sous la forme d'un cône d'angle au sommet 2θ :

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{III-2})$$

La zone intermédiaire entre le champ proche et le champ lointain est imprécise.

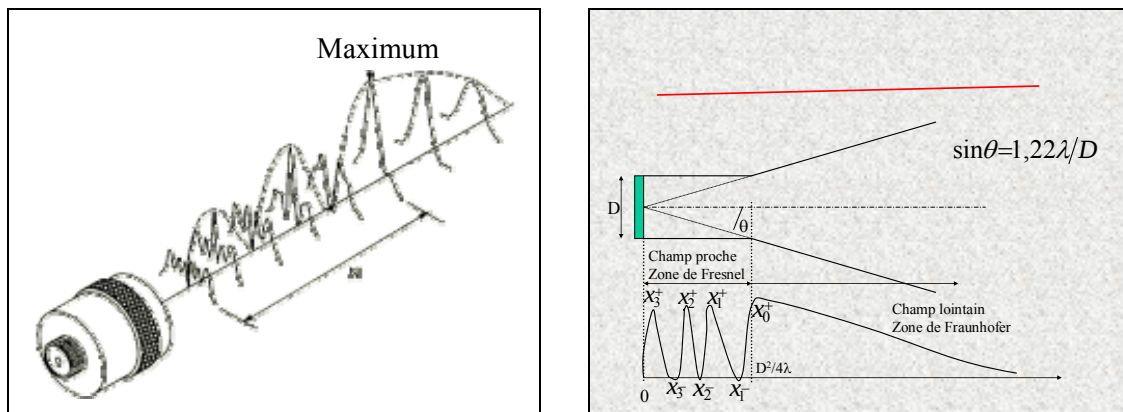


Figure III-3 : Géométrie du faisceau ultrasonore.

III.1.4 Techniques de contrôle ultrasonore

Méthode par transmission : C'est une technique ancienne et très peu employée (1930 Sokolov). Lorsqu'il s'agit de détecter des défauts dans un matériau en bande ou en plaque accessible des deux côtés, on peut toujours faire passer ce matériau entre un émetteur et un récepteur d'ultrasons. Si un défaut se trouve entre l'émetteur et le récepteur, l'onde ultrasonore est réfléchiée par cette discontinuité (défaut) et le récepteur reçoit une faible énergie acoustique. Par analogie avec les ondes lumineuses, on dit que l'on a l'ombre du défaut projetée sur la surface du récepteur. Cependant, cette méthode nécessite deux transducteurs et ne permet ni d'apprécier les variations d'épaisseur de la plaque à contrôler, ni de localiser les défauts en profondeur. De plus, il faut pouvoir accéder commodément aux deux faces de la pièce à tester, ce qui est difficile en pratique [40].

Méthode par réflexion ou par échos : Contrairement à la méthode par transmission, la méthode par réflexion ou par échos n'exige pas l'accès aux deux faces de la structure à contrôler. Dans cette méthode, on utilise soit deux transducteurs séparés, placés côte à côte : le premier transducteur émet les impulsions dans l'objet test, tandis que l'autre reçoit l'écho transmis, soit un seul transducteur fonctionnant en émetteur-récepteur. Ces techniques sont les plus répandues dans le contrôle non destructif par ultrasons [40].

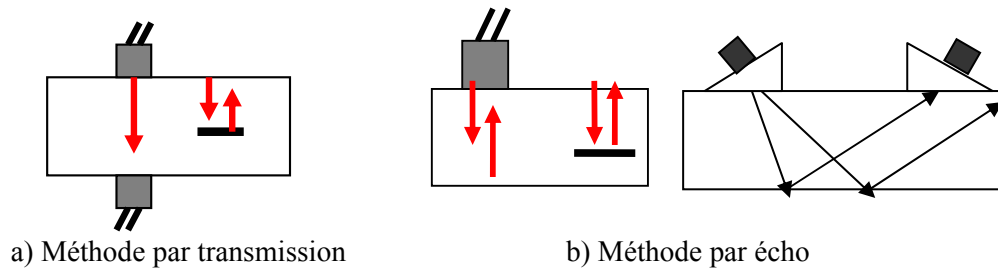


Figure III-4 : Techniques de contrôle par ultrasons.

III.1.5 Technique de l'écho par réflexion

Couplant : une situation parfaite pour générer les ondes ultrasonores est lorsque les impédances acoustiques du transducteur et du matériau de l'objet test sont identiques ; toute l'énergie ultrasonique sera transférée à partir du capteur au matériau. Dans le cas contraire, un autre milieu doit être employé entre la structure à tester et le transducteur pour réduire la différence d'impédance et par conséquent minimiser la perte d'énergie autant que possible. Ce milieu est appelé *couplant*. Deux moyens de couplage existent : contact ou immersion [3, 14].

Méthode par contact : l'émetteur est directement appliqué sur la pièce à contrôler. Le couplage se fait par un film fluide : pétrole, graisse, huile ou tout autre matériau visqueux placé entre le capteur et l'objet d'essai. Dans le cas des transducteurs émettant une onde transversale, on ne peut pas utiliser un liquide comme milieu de couplage (les ondes transversales ne se propagent pas dans les fluides). Pour cela, le transducteur est soit collé directement sur la pièce, soit on utilise le salicylate de phényle qui se colle facilement à l'émetteur. Le film couplant contribue aussi à diminuer l'usure du transducteur lors de son déplacement sur la pièce à tester [3, 40].

Méthode par immersion : Les couplants peuvent être un liquide, l'eau par exemple, dans un réservoir où l'objet d'essai et le transducteur sont immergés. Cette méthode présente plusieurs avantages : le couplage est constant entre la pièce et le transducteur. Elle est très facile à l'automatisation et permet d'examiner des surfaces rugueuses sans usure du transducteur. En mode de fonctionnement en immersion, la hauteur de couplant séparant le transducteur de la surface de l'objet à contrôler doit être suffisamment grande afin de distinguer, dans le domaine temporel, l'écho de surface de l'objet du signal électrique appliqué au transducteur. Cette technique n'est pas pratique lorsque les pièces sont lourdes et encombrantes [3,40].

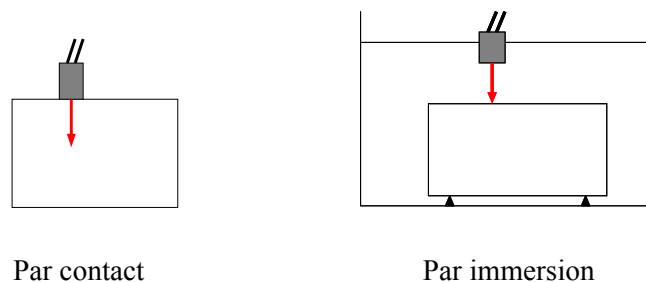


Figure III-5 : Techniques de contrôle par la méthode écho.

III.2 Représentation des données ultrasonores

Principe de contrôle par écho : L'émetteur émet une brève impulsion et on mesure le temps que l'écho (ou les échos) mette pour revenir au récepteur (ou à l'émetteur qui sera alors utilisé en récepteur). Les excitations ultrasonores se font sous forme de paquets d'onde (seul un paquet transporte une information). La vitesse qui caractérise le temps d'arrivée du paquet en un point après son émission en un autre point est la vitesse de groupe. C'est elle qui pilote véritablement toute l'expérience ultrasonore. Connaissant la vitesse de propagation dans le matériau à contrôler, on en déduit la position du défaut responsable de l'écho.

$$D = V \cdot \frac{t}{2}$$

(III-3)

D : position du défaut ;

V : vitesse de propagation de l'onde ;

t : temps de transit (aller-retour).

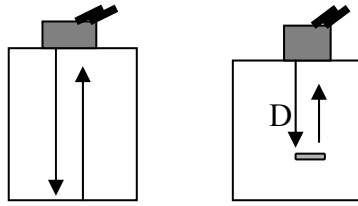


Figure III-6 : Principe de contrôle par la méthode écho.

La représentation des données ultrasonores est un point important pour visualiser et interpréter les informations collectées par un traducteur. Ce dernier fournit un signal temporel provenant d'une onde mécanique se propageant dans la pièce inspectée. La base d'un enregistrement de données ultrasonores est une représentation temps-tension. Les temps de transit doivent toujours être considérés à partir du point de départ du signal écho.

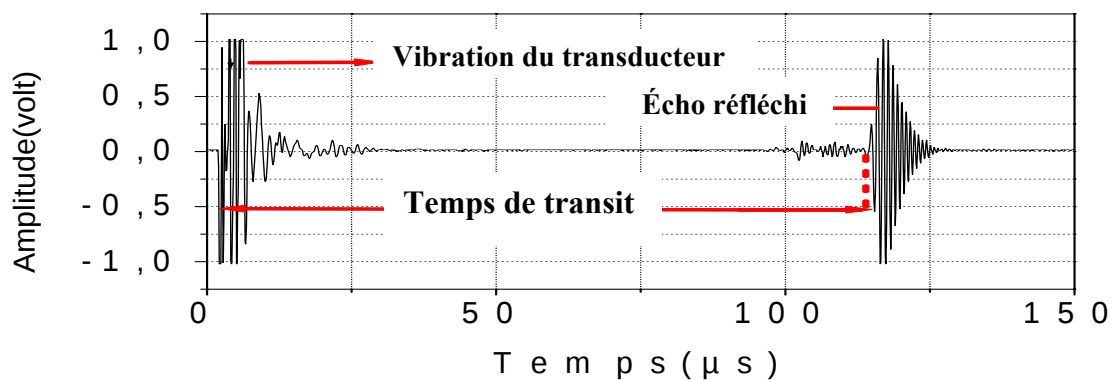


Figure III-7 : Représentation des données ultrasonores (Amplitude-Temps).

III.3 Génération d'ondes guidées

Il existe plusieurs méthodes pour générer des ondes guidées, les méthodes les plus courantes sont la méthode d'angle d'incidence variable et la méthode du capteur à peigne.

II.3.1 Méthode d'angle d'incidence variable (méthode du coin)

Les ondes guidées sont générées par un transducteur à angle variable ou par la méthode de conversion de mode. Cette méthode exige un coin ou un prisme de plexiglas pour l'inspection en contact ou un réservoir d'eau pour l'inspection par immersion. Dans le cas d'inspection par contact, le transducteur piézoélectrique produisant les ondes ultrasonores de volume, généralement des ondes longitudinales, est monté sur une cale de plexiglas (face

inclinée). Ces ondes sont couplées dans l'objet test à angle choisi. Si l'angle et la vitesse de phase de l'onde satisfont la **loi de Snell-Descartes**, des ondes guidées seront produites (phénomène de conversion de mode). Le même capteur peut être également utilisé comme récepteur [6].

$$\sin \theta = \frac{v_L}{v_{ph}} \quad \text{(III-4)}$$

v_L : Vitesse longitudinale dans le matériau couplant.

v_{ph} : Vitesse de phase du mode à générer.

θ : Angle d'incidence de l'onde longitudinale dans le matériau couplant

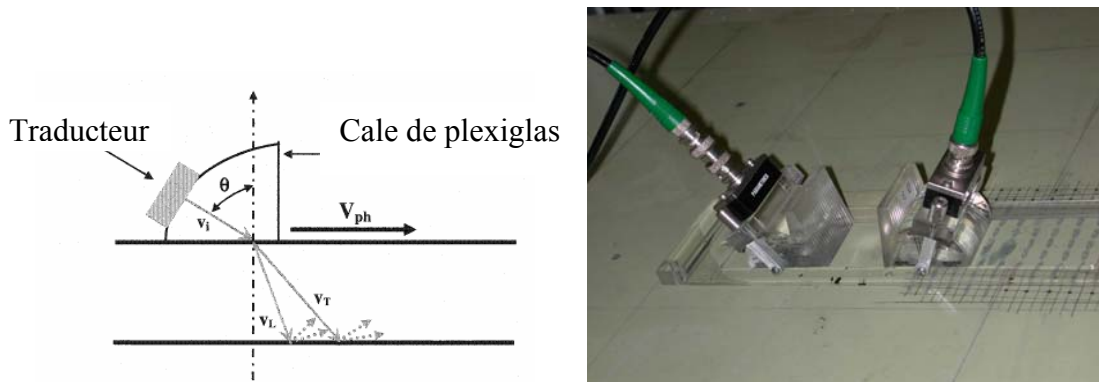


Figure III-8 : Génération d'ondes guidées par la méthode d'angle d'incidence variable [14].

Sachant que la vitesse des ondes longitudinales dans le couplant est fixe (1500 m/s pour l'eau et 2700 m/s pour le plexiglas). Si l'on fixe θ , la vitesse de phase sera constante. Cette dernière est représentée par une droite horizontale ($v_{ph} = \text{Cst}$) sur les courbes de dispersion des vitesses de phase (Figure III-11) [2,8]. Par conséquent, tous les modes rencontrant cette droite peuvent être générés. Un choix particulier de fréquence permet de générer le mode désiré. Cette méthode est très pratique, puisque la variation d'angle permet de générer n'importe quel mode à n'importe quelle vitesse de phase. Cependant, l'existence de plusieurs interfaces cause une perte d'énergie lors de la conversion de mode [7]. Par ailleurs, cette méthode n'est qu'une excitation partielle, puisque le faisceau ultrasonore ne couvre qu'un angle circonférentiel spécifique au lieu de 360 degrés tout autour du cylindre [6].

III.3.2 Méthode de capteur à peigne « ring transducers »

Des recherches récentes sont focalisées sur la génération et la réception des modes spécifiques à travers un collier sophistiqué de transducteurs.



Figure III- 9 : Capteur à peigne [19].

C'est une technique qui n'exige pas de couplant, les ondes sont excitées et reçues en utilisant un anneau composé d'un nombre suffisant de transducteurs piézoélectriques (multi traducteurs). Ces derniers sont linéaires, périodiques, identiques, parallèles et équidistants, distribués autour de la circonférence du tube ou du pipe [34]. Les transducteurs se comportent comme une suite de sources ultrasonores. Lorsque la tension, appliquée au premier transducteur, est sinusoïdale, les vibrations s'ajoutent de façon constructive seulement si la distance d séparant deux émetteurs adjacents, est égale à une longueur d'onde élastique. En effet, l'onde générée par le premier transducteur parcourt une distance $d = \lambda$ et arrive en phase sous le transducteur voisin au moment où ce dernier génère sa propre onde, l'excitation élastique due au deuxième transducteur s'ajoute à celle émise par le premier émetteur [2].

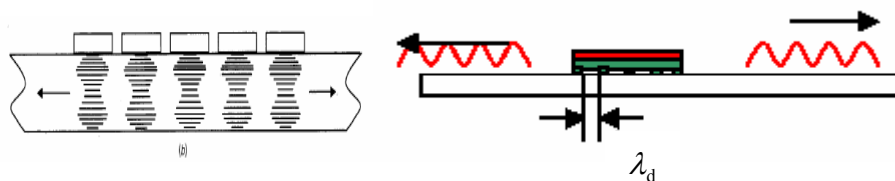


Figure III-10 : Génération des ondes guidées avec un transducteur à peigne [8,30].

L'espacement des transducteurs permet donc de connaître la longueur d'ondes λ . Cette dernière n'est que la pente d'une droite passant par l'origine d'équation ($V_{ph} = \lambda \cdot f$) sur les courbes de dispersion des vitesses de phase (Figure III-11). Les points d'intersection de cette droite avec les courbes de dispersion permettent de connaître tous les modes susceptibles d'être générés par le capteur [2, 8]. Le contrôle de quelques paramètres tels que, le nombre des transducteurs, la distance séparant ces derniers ainsi que le type des signaux d'excitation permet de ne générer qu'un seul mode axisymétrique [34].

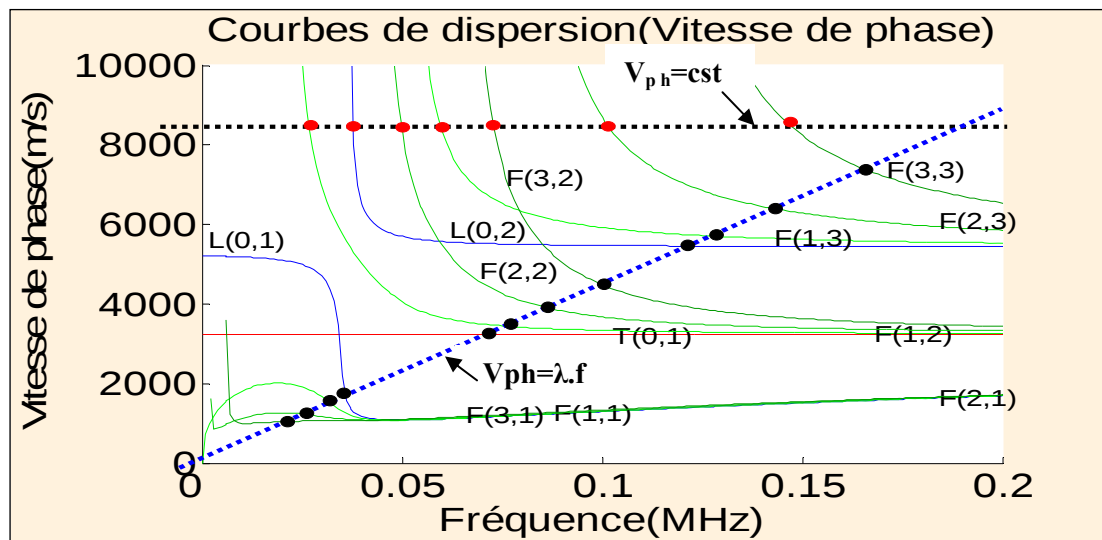


Figure III-11: Modes susceptibles d'être générés par : a) Méthode d'angle d'incidence variable (droite horizontale en pointillés, $V_{ph} = \text{Cst}$), b) Transducteur à peigne (droite oblique en pointillés, $V_{ph} = \lambda \cdot f$) [28]

L'avantage du capteur à peigne par rapport à la méthode d'angle d'incidence variable réside dans le fait que le peigne produit une distribution uniforme d'énergie autour du tube. Par conséquent, il peut repérer tous les défauts, puisqu'il envoie l'énergie tout autour de la structure et dans les deux directions en avant et en arrière du transducteur. Cependant, le capteur à peigne a besoin de l'accès à toutes les surfaces de la structure. Par ailleurs, à basses fréquences, la longueur d'onde est grande et si le tube est de petite dimension, il n'y aura pas assez d'espace pour placer les transducteurs. Donc, si une partie seulement de la structure est accessible, la méthode du faisceau d'angle doit être privilégiée [2, 6, 30].

Chapitre IV

Résultats Expérimentaux

Les chapitres précédents nous ont permis d'étudier le comportement des ondes guidées dans une structure tubulaire et d'exposer leurs avantages et leurs inconvénients. Les courbes de dispersion nous permettent de choisir le mode à générer ainsi que les différentes techniques permettant de générer ce mode. Dans ce chapitre, nous allons exploiter cette étude pour détecter et localiser des défauts circulaires et un joint soudé sur un tube d'acier.

IV.1 Choix du mode à générer

Pour choisir le mode à générer, nous allons nous baser sur trois points :

- Les courbes de dispersion des vitesses de phase et des vitesses de groupe ;
- Les moyens dont nous disposons pour mener nos expériences ;
- Le type de défauts à détecter.

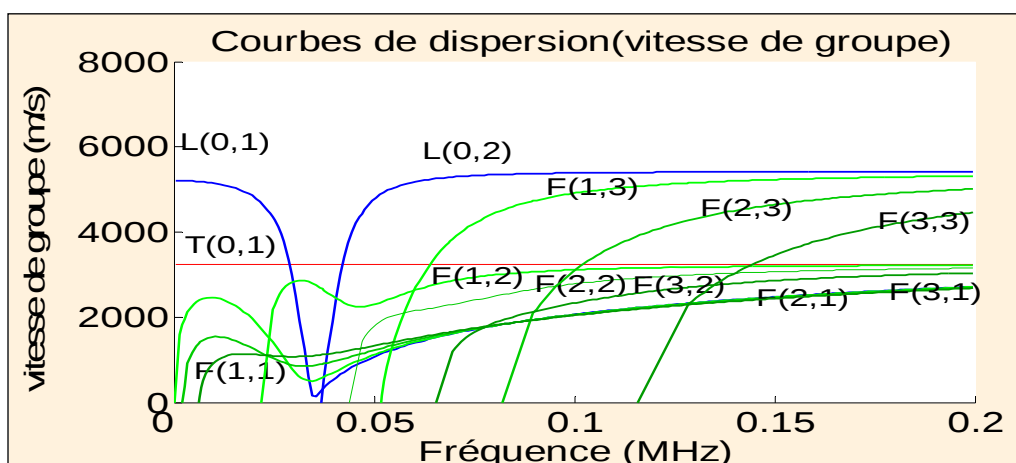
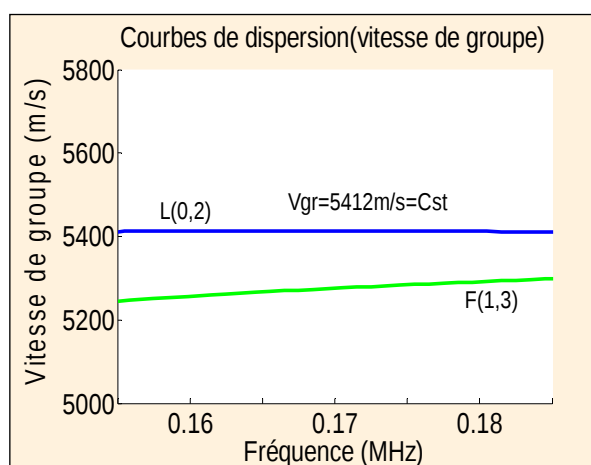
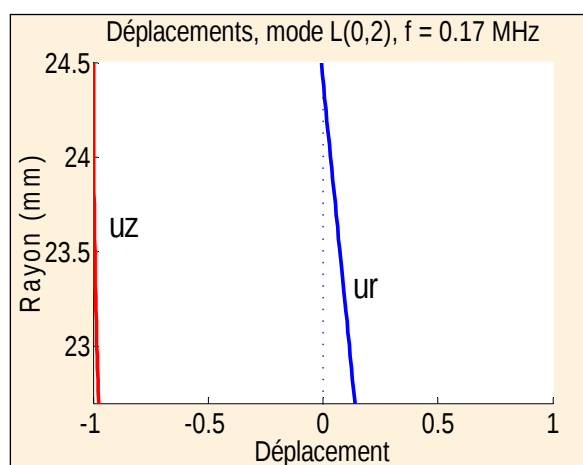


Figure IV-1 : Courbes de dispersion des vitesses de groupe pour les basses fréquences (tube de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8 mm) [28].



(a)



(b)

Figure IV-2 : (a) Région non dispersive (basses fréquences) du mode L (0,2), (b) Distribution du déplacement à travers l'épaisseur pour une fréquence de 0.17 MHz (Tube de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8mm) [28].

Les courbes de dispersion (II-4) montrent la présence de plusieurs modes dans la gamme de fréquence inférieure à 2MHz. Il est essentiel que seulement l'un d'entre eux soit excité. Les courbes (IV-1) et (IV-2) montrent que le mode L (0,2) pour la gamme de fréquence $0.16 \text{ MHz} < f < 0.18 \text{ MHz}$ serait le bon choix : isolé, non dispersif, le plus rapide. La rapidité de ce mode fait qu'il sera le premier à arriver au récepteur, c'est-à-dire qu'il sera facilement séparé des autres modes dans le cas où le défaut réfléchit plusieurs modes. Pour ces basses fréquences, le mode L (0,2) a un faible déplacement radial et un déplacement axial important. Ce qui fait que ce mode a une faible atténuation dans l'eau (l'eau étant utilisée dans nos expériences comme couplant).

Malheureusement, nous ne disposons pas de transducteurs opérant dans cette gamme de basses fréquences, nous ferons nos expériences avec des transducteurs de fréquences nominales 0.5 MHz et 1 MHz.

Pour ces deux fréquences (0.5MHz et 1MHz), la figure (IV-3) montre que le vecteur déplacement du mode L (0,2) est polarisé dans le plan (r, z). Les deux composantes (u_r , u_z) sont symétriques par rapport à la médiane de la paroi du tube dont la composante u_z est prédominante (maximale) à travers toute l'épaisseur. Par conséquent, le mode L (0,2) sera un mode de compression pour lequel la direction de vibration des particules est quasi parallèle à la direction de propagation de l'onde. Son énergie maximale est distribuée à travers la paroi du tube. Cela fait que ce mode se propagera sans perdre d'énergie dans l'eau (toute l'énergie est confinée dans la paroi) et sera sensible aux défauts profonds (cratère, soudure) qui altèrent la quasi totalité de la paroi (rupture d'impédance).

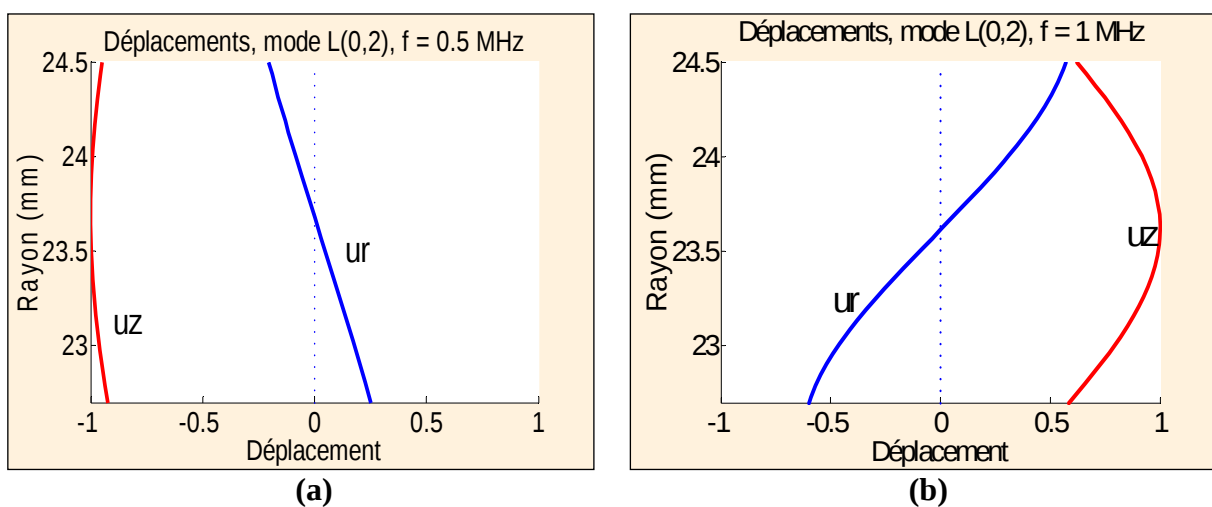


Figure IV-3 : Distribution du champ de déplacement à travers l'épaisseur pour le mode L(0,2) : a) 0.5 MHz; b) 1 MHz (tube de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8mm) [28].

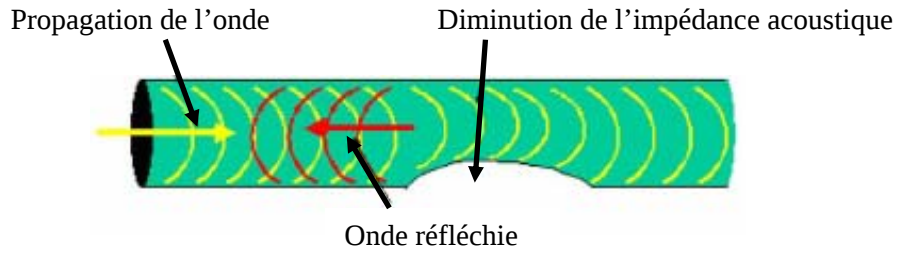


Figure IV-4 : Réflexion d'ondes lors d'une diminution de l'épaisseur.

Cependant, à ces deux fréquences, les courbes de dispersion des vitesses de phase et des vitesses de groupe (IV-5) montrent que le mode $L(0,2)$ est associé à trois modes de flexion $F(1,3)$, $F(2,3)$ et $F(3,3)$ dont les vitesses de phase et les vitesses de groupe sont très proches de la sienne. Ceci implique que l'angle sous lequel le mode sera émis est le même pour tous ces modes et que ce paquet d'ondes sera émis au même moment.

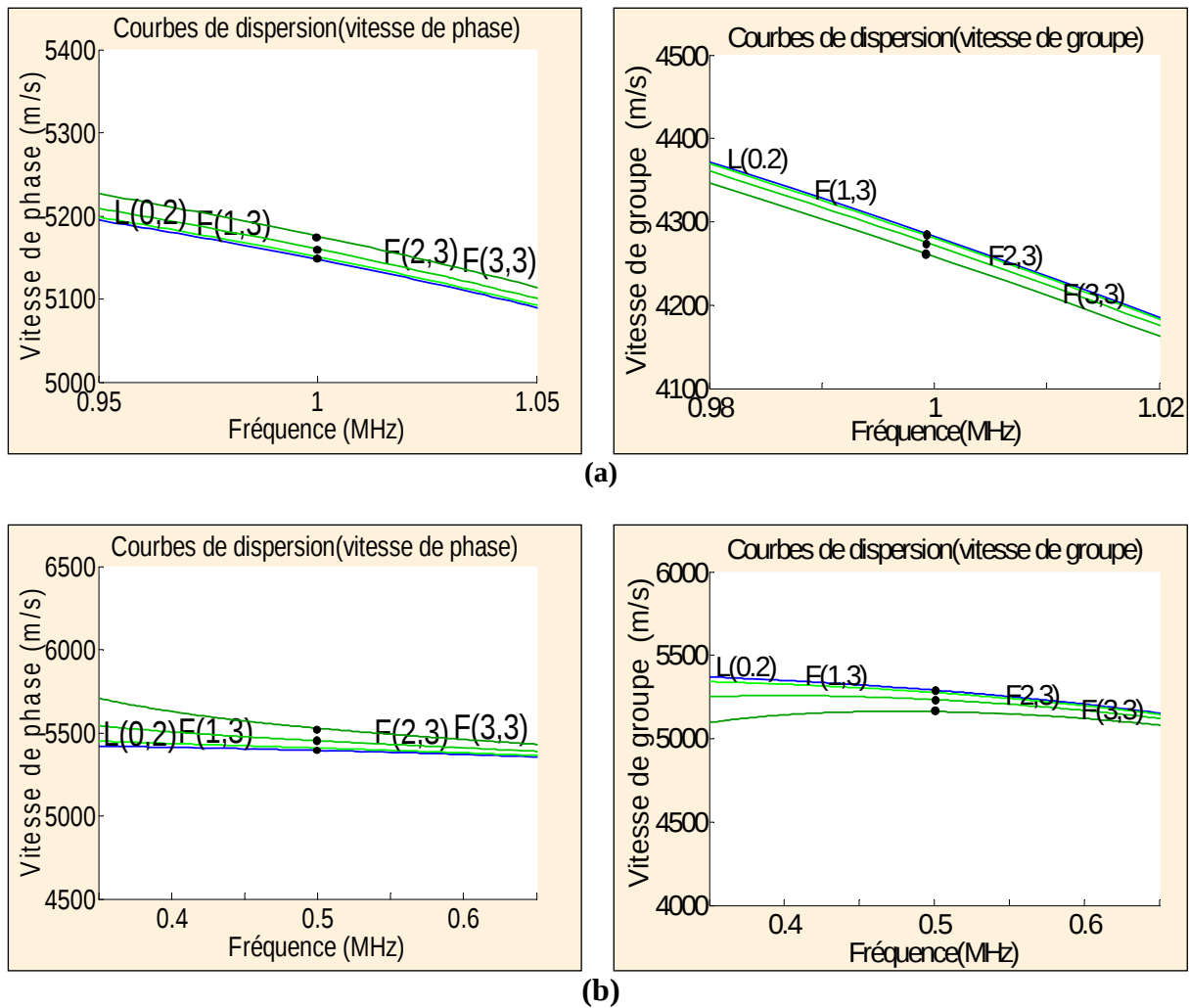


Figure IV-5 : Mode $L(0,2)$ associé à trois modes de flexion $F(1,3)$, $F(2,3)$ et $F(3,3)$, a) $f = 1$ MHz ; b) 0.5 MHz (tube de rayon externe 24.5 mm et d'épaisseur 1.8 mm) [28].

Modes	F (3,3)	F (2,3)	F (1,3)	L (0,2)
Vitesse de phase (m/s)	5176	5160	5151	5148
Vitesse de groupe (m/s)	4263	4277	4285	4278
Angle d'incidence (°)	16.65	16.70	16.73	16.74

Tableau IV-1 : Vitesses de phase, vitesses de groupe et angle d'incidence pour $f = 1$ MHz

Modes	F (3,3)	F (2,3)	F (1,3)	L (0,2)
Vitesse de phase (m/s)	5527	5452	5409	5394
Vitesse de groupe (m/s)	5162	5234	5276	5290
Angle d'incidence (°)	15.56	15.78	15.91	15.96

Tableau IV-2 : Vitesses de phase, vitesses de groupe et angle d'incidence pour $f = 0.5$ MHz

Dans le cas des tubes, la méthode d'angle d'incidence variable qu'on a utilisé est une méthode d'excitation partielle, ne couvrant qu'un angle circonférentiel limité, qui influe sur la distribution d'énergie. Si l'on utilise le plexiglas comme couplant, ce sont les modes non axisymétriques qui seront favorablement excités. Ces modes sont la superposition des modes de flexions associés aux modes longitudinaux générés simultanément. La légère différence entre les vitesses de phase des différents modes générés implique que le comportement du paquet d'ondes, composé de la superposition de ces modes, change avec la distance de propagation (effet dispersif) [6]. Cependant, lorsqu'on utilise la méthode d'angle d'incidence variable en mettant l'eau ou un liquide non visqueux comme couplant, ce sont les modes longitudinaux qui sont préférentiellement générés [16]. Donc le choix du couplage par eau (immersion) favorise l'excitation du mode L (0,2).

IV.2 Dispositif expérimental

Les résultats présentés dans ce chapitre ont été obtenus au Laboratoire de Physique des Matériaux, au sein de l'équipe Acoustique (Faculté de Physique, USTHB) : le dispositif expérimental est composé du matériel suivant :

- Un générateur de type SOFRANEL MODEL 5072 qui émet des impulsions électriques à partir du connecteur T/R du générateur au palpeur ultrasonore. Ce dernier, par effet piézoélectrique inverse, convertit l'impulsion électrique en impulsion mécanique. L'onde se propage dans le matériau, revient vers le palpeur, et par effet piézoélectrique direct, le signal est converti en une impulsion électrique qui sera transmise vers le générateur. Dans des conditions particulières, l'impulsion est caractérisée par son amplitude maximale (-360Volt) et un temps de montée inférieure à 10 ns.
- Un oscilloscope numérique de type HAMEG HM1507-3 permet la visualisation des signaux. L'oscilloscope est relié à l'ordinateur par une connexion RS32 qui permet la numérisation et le traitement des signaux obtenus.
- Une cuve à immersion, équipée d'un système qui permet de déplacer manuellement le palpeur dans les trois directions X, Y, Z. Ce système permet aussi d'orienter le palpeur selon l'angle désiré.



Figure IV-6 : Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est également composé de deux palpeurs à immersion :

Le premier palpeur utilisé est de marque SOFRANEL (V314) d'ouverture circulaire, vibrant en mode piston, dont le disque actif piézoélectrique a un diamètre de 22 mm, et dont la fréquence centrale vaut 1.03 MHz. La largeur de la bande passante à -3dB se situe entre 0.83 MHz et 1.25 MHz.

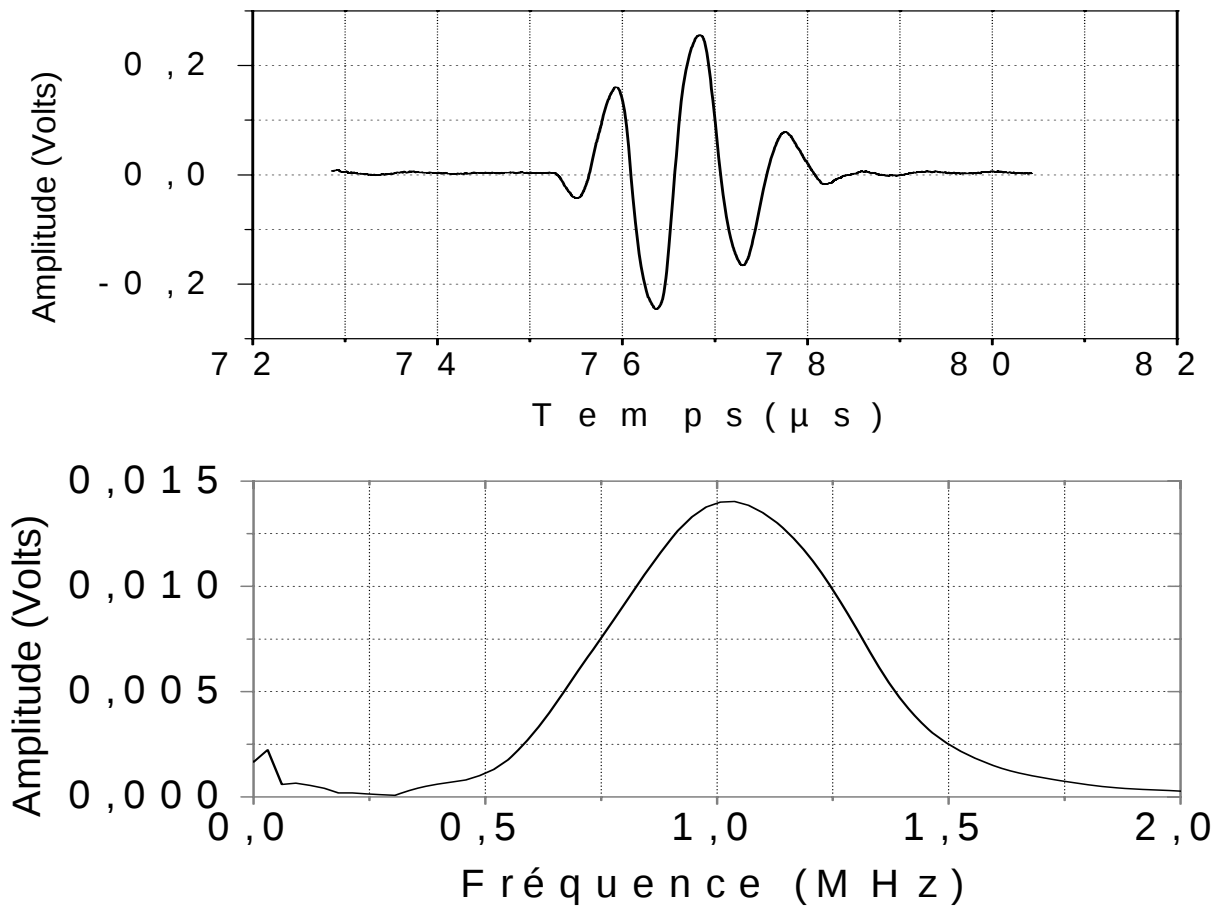


Figure IV-7 : Signal temporel émis par le transducteur de 1 MHz et son spectre de fréquence.

Le deuxième palpeur utilisé est de marque SOFRANEL (V301), d'ouverture circulaire, vibrant en mode piston, dont le disque actif piézoélectrique a un diamètre de 28 mm, et dont la fréquence centrale vaut 0.5 MHz. La largeur de la bande passante à -3dB se situe entre 0.4 MHz et 0.6 MHz.

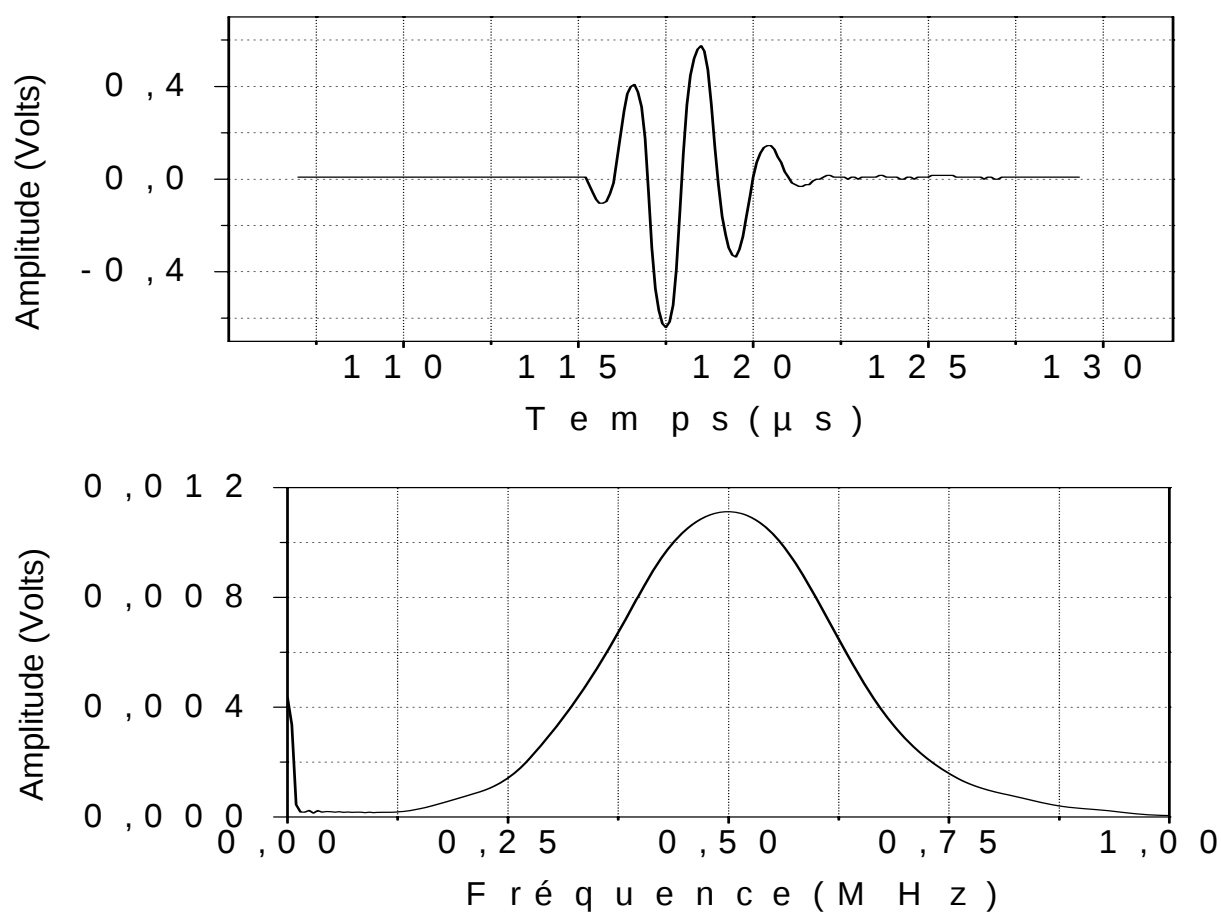


Figure IV-8 : Signal temporel émis par le transducteur de 0.5 MHz et son spectre de fréquence.

IV.3 Identification du matériau des tubes

Pour nos expériences, nous avons utilisé des tubes en acier de même dimensions, (diamètre externe $D = 49$ mm, épaisseur $e = 1.8$ mm).

La figure IV-9 est une microanalyse électronique obtenue par le microscope électronique à balayage (MEB) de marque JEOL au centre de recherche et développement (Sonelgaz). C'est une microanalyse qui permet d'identifier les éléments chimiques présents à la surface d'un échantillon grâce aux rayons X caractéristiques qu'il émet. Selon la figure, notre structure est composée des éléments suivants : carbone, manganèse, silicium, soufre et phosphore. La composition trouvée, en fait un acier ordinaire.

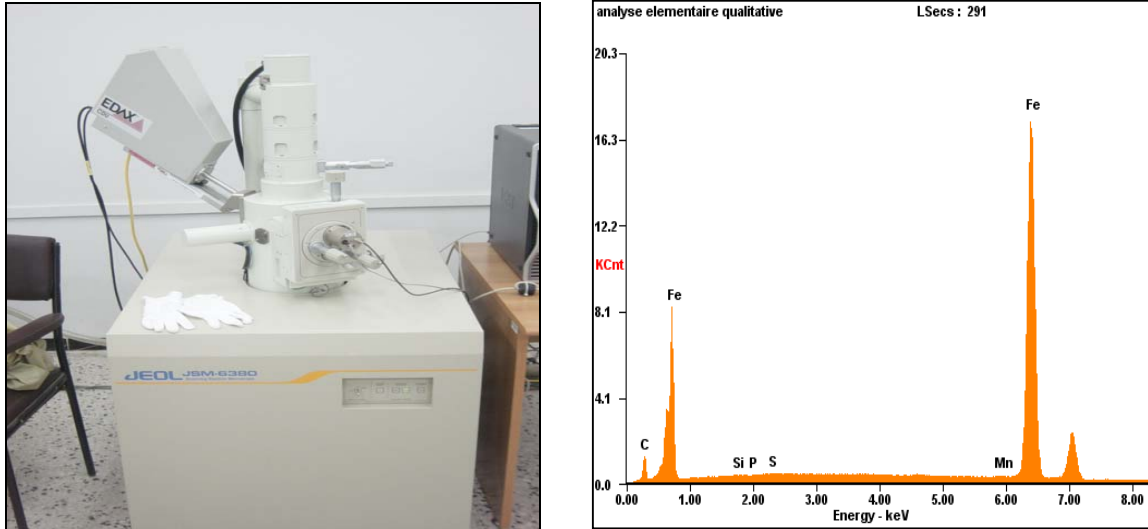


Figure IV-9 : Microanalyse du métal de base.

IV.4 Précautions à prendre

Pour avoir de bons résultats, quelques précautions doivent être prises en considération lors du contrôle par immersion [39] :

- Il faut veiller à la propreté de la structure à tester et de l'eau utilisée.
- Il faut s'assurer de l'absence de toute matière étrangère sur le tubes : défauts de surfaces, dépôt de bulles d'eau (gaz) sur la surface de la structures, peinture, et éviter au maximum l'oxydation de l'acier.

Tous ces paramètres peuvent modifier l'amplitude du signal et engendrer des échos parasites pouvant faire croire à la présence de défauts réels, ce qui risque de fausser les résultats obtenus.

Partie A

Génération du mode $L(0,2)$ sur un tube sain

IV.A.1 Génération du mode L(0,2)

Pour générer le mode L(0,2), à une fréquence donnée, nous avons utilisé la méthode d'angle d'incidence variable. Le palpeur doit avoir une incidence θ , réglée de façon que la vitesse des ondes longitudinales dans l'eau, qu'on utilisera dans nos expériences comme couplant, soit reliée à la vitesse de phase du mode L(0,2) dans le tube par la formule de Snell-

Descartes [39] : $\sin \theta = \frac{v_L}{v_{ph}}$

v_L : Vitesse des ondes longitudinales dans l'eau (1483m /s).

v_{ph} : Vitesse de phase de mode L(0,2)

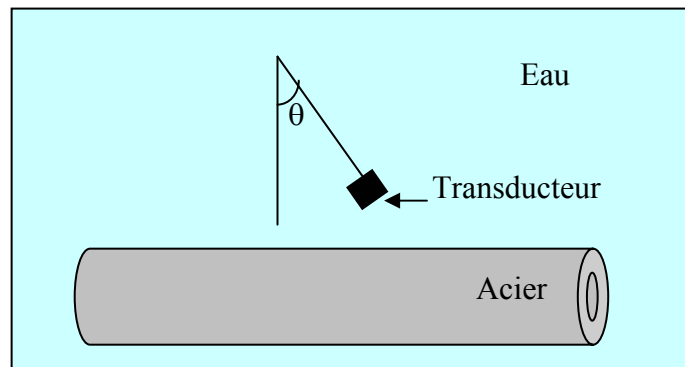


Figure IV-A-1 : Utilisation de la méthode de conversion de mode pour générer le mode L(0,2), l'eau est le couplant

La figure (IV-A-2) montre les courbes de dispersion des vitesses de phases pour les modes longitudinaux ainsi que les points de fonctionnement (fréquence, vitesse de phase) choisis pour générer le mode L(0,2).

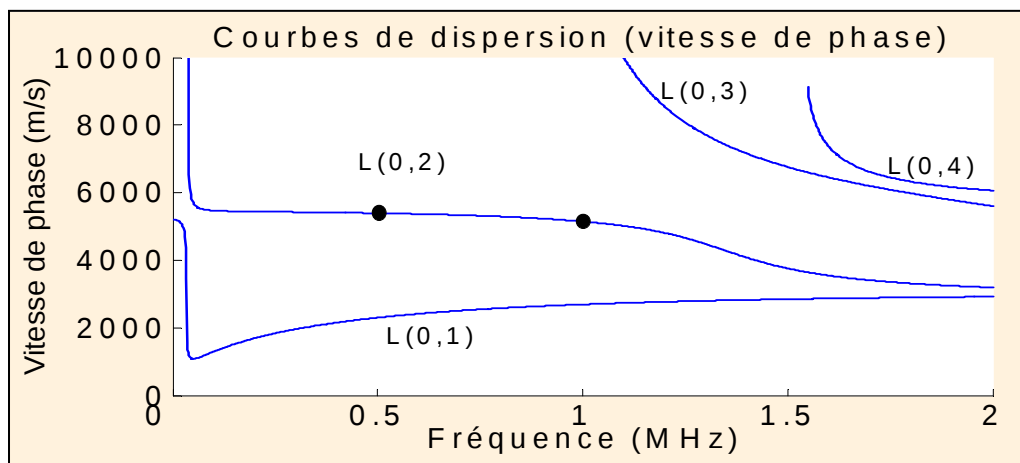


Figure IV-A-2 : Courbes de dispersion des modes longitudinaux ainsi que les points de fonctionnement choisis pour générer le mode L(0,2).

Fréquence (MHz)	Vitesse de phase (m/s)	Vitesse de groupe (m/s)	Angle théorique (°)	Angle expérimental (°)	Longueur d'onde (mm)
1	5148	4278	16.74	17	5.15
0.5	5394	5290	15.96	16	10.79

Tableau IV-A-1 : Points de fonctionnement (fréquence, vitesse de phase, vitesse de groupe, angle) choisis pour générer le mode L(0,2).

IV.A.2 Génération du mode L(0,2) sur un tube sain à $f = 1$ MHz

L'expérience décrite précédemment est réalisée sur un tube sans défaut (sain), la figure(IV-A-3) est le signal reçu par le transducteur de 1MHz et visualisé sur l'oscilloscope.

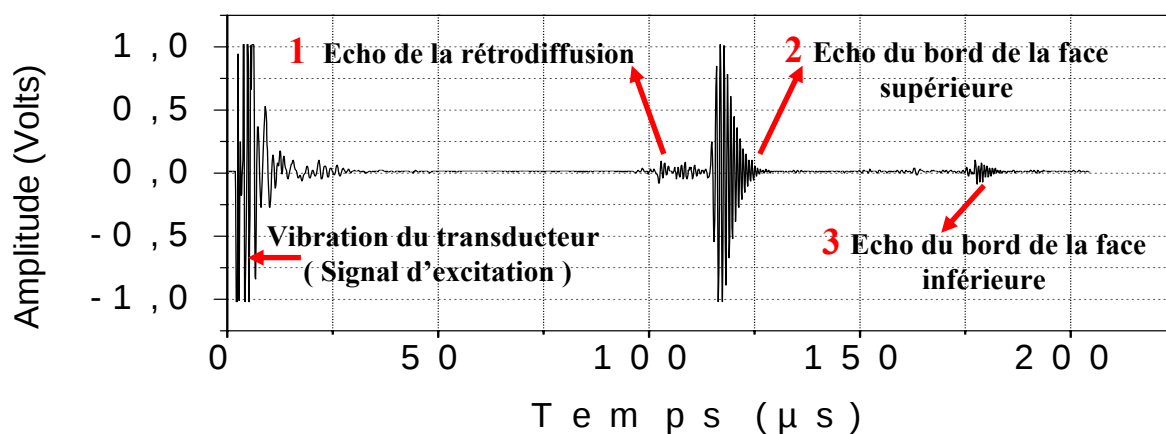


Figure IV-A-3 : Signal reçu par le transducteur de 1MHz

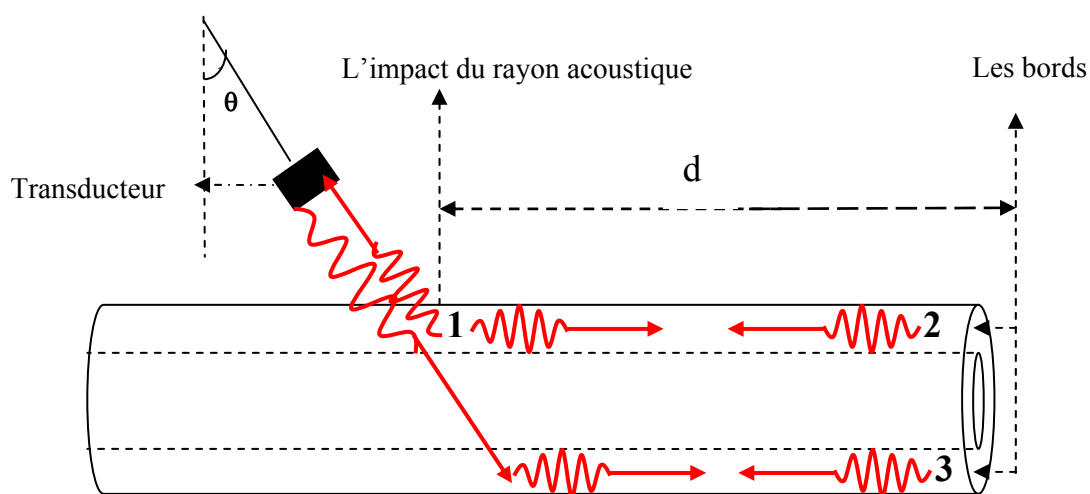


Figure IV-A-4 : Identification des échos réfléchis, d est la distance entre l'impact du rayon acoustique émis et le bord de la face supérieure, θ est l'angle d'inclinaison de transducteur permettant de générer le mode L(0,2).

Identification des échos

Avant d'identifier le mode généré, il faut identifier expérimentalement les échos obtenus. D'après la figure (IV-A-3), on remarque la présence de trois échos qui sont de gauche à droite après l'excitation :

Echo dû à la rétrodiffusion

L'onde incidente se propage dans l'eau, du palpeur vers le tube, le changement de milieu fait qu'une partie de l'énergie est réfléchi, l'autre partie est transmise dans le tube.

Expérimentalement, nous pouvons montrer que le premier écho est bien l'écho dû à la rétrodiffusion : connaissant le temps de transit entre l'excitation et le premier écho et connaissant la distance parcourue par l'onde dans l'eau, nous devons trouver une vitesse de propagation égale à celle de l'onde longitudinale dans l'eau : 1483 - 1500 m/s : ce qui est le cas puisque nous obtenons :

$$V = 1520 \pm 66 \text{ m/s.}$$

Echo dû au bord de la face supérieure du tube

Puisque le tube est sain, l'onde continue son chemin et, en arrivant aux bords sur les deux cotés, elle se réfléchit de nouveau, car elle rencontre un autre milieu qui est l'eau, mais c'est l'écho du bord le plus proche qui apparaît. Pratiquement, on peut vérifier que c'est l'écho du bord, puisque le tube est sain, plus on s'éloigne du bord, plus cet écho diminue en amplitude, jusqu'à disparaître (voir figure IV-A-6).

Echo dû au bord de la face inférieure du tube

Le troisième écho est celui réfléchi par le bord de la face inférieure du tube. On peut vérifier cela en introduisant un objet dans le tube, il apparaît un écho venant de cet objet, avant l'écho dû à la face inférieure du tube.

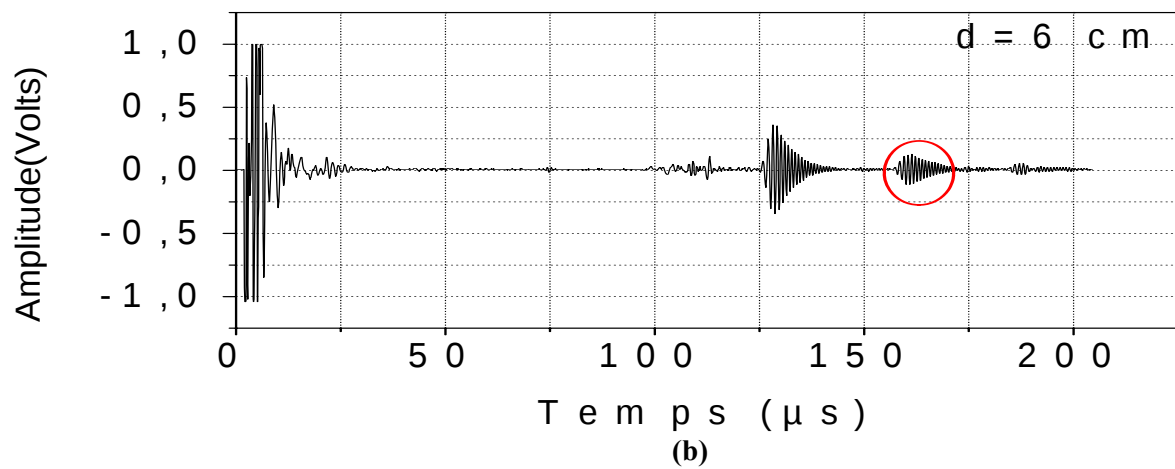
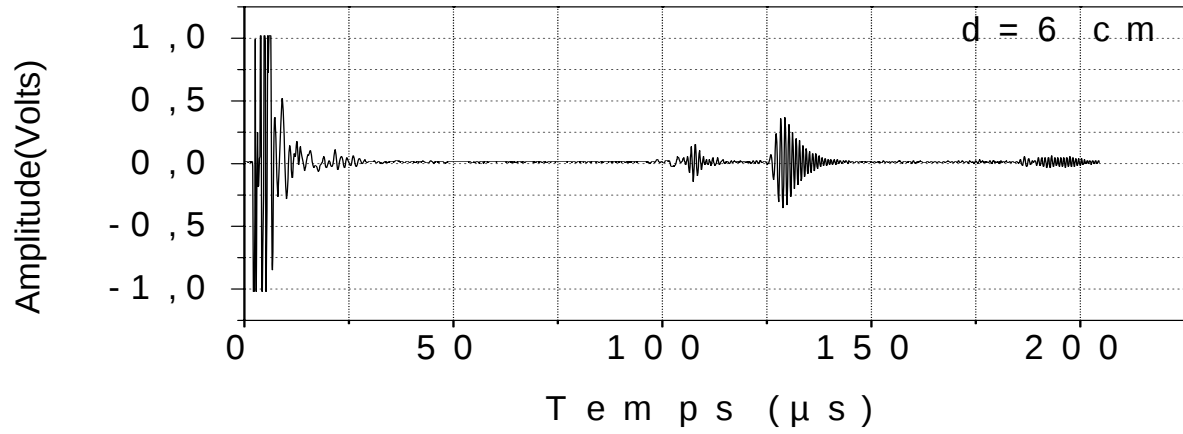
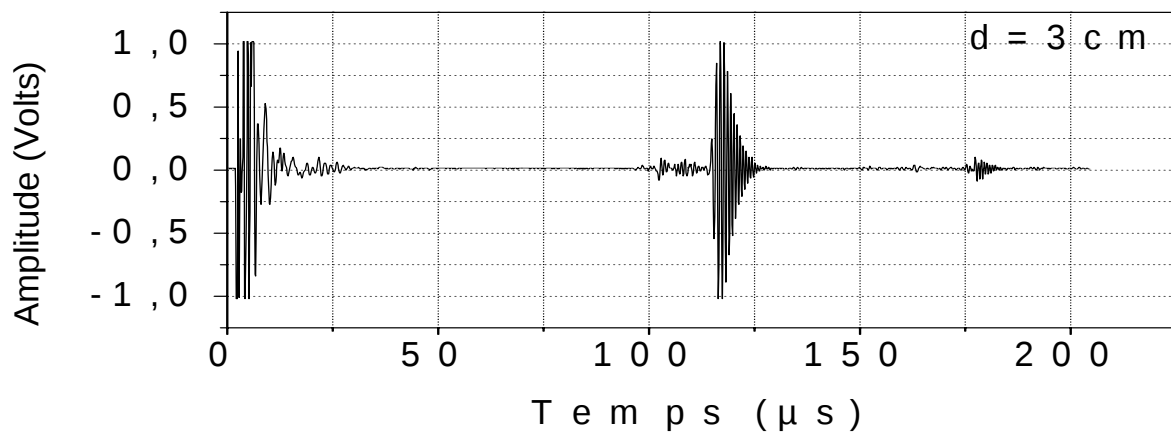
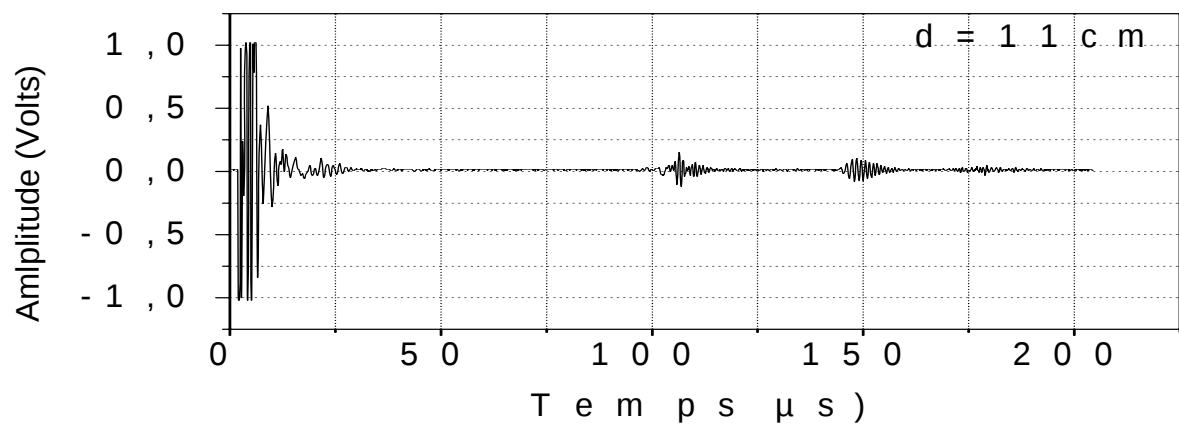
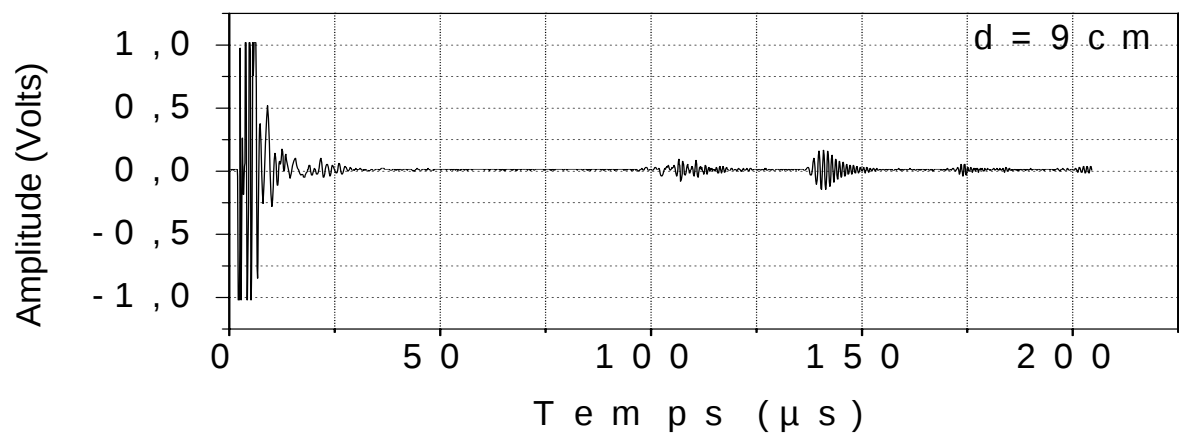
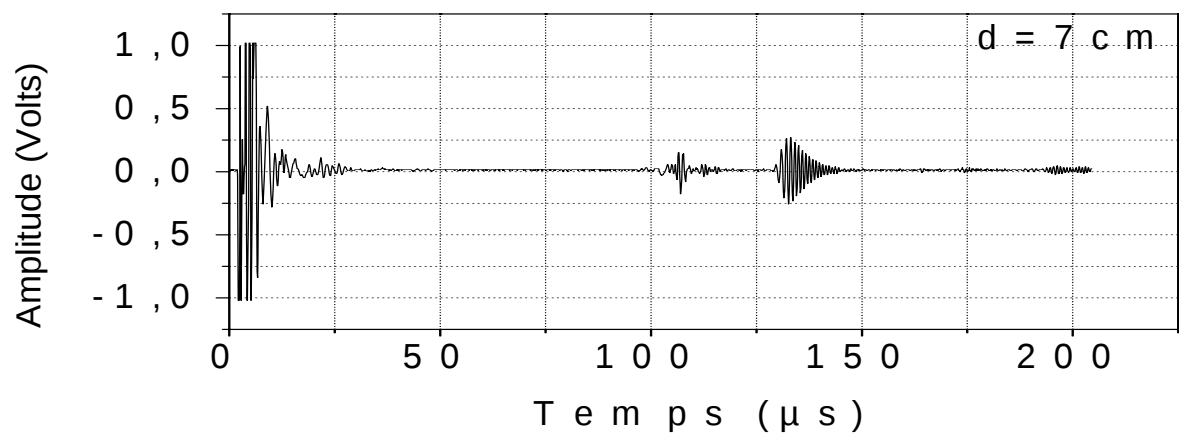
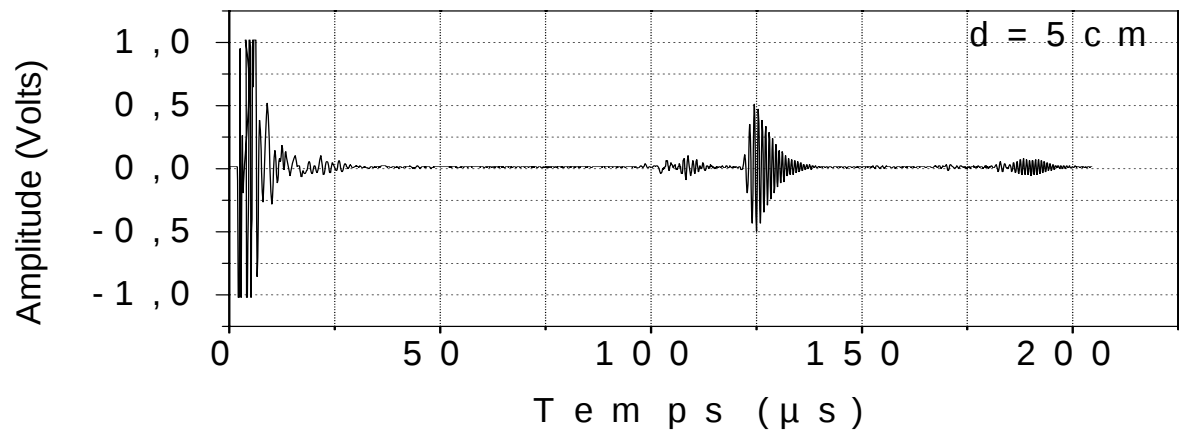


Figure IV-A-5 : Identification du troisième écho, (a) Signal avant insertion d'un objet dans le tube ; (b) Signal après insertion de l'objet dans le tube. Les signaux sont pris à une distance de 6 cm de bord.

Afin de mettre en évidence ou de confirmer la nature guidée de l'onde générée, nous avons pris plusieurs signaux à différentes distances des bords en déplaçant la sonde tout le long de la génératrice du tube. Les résultats obtenus sont :





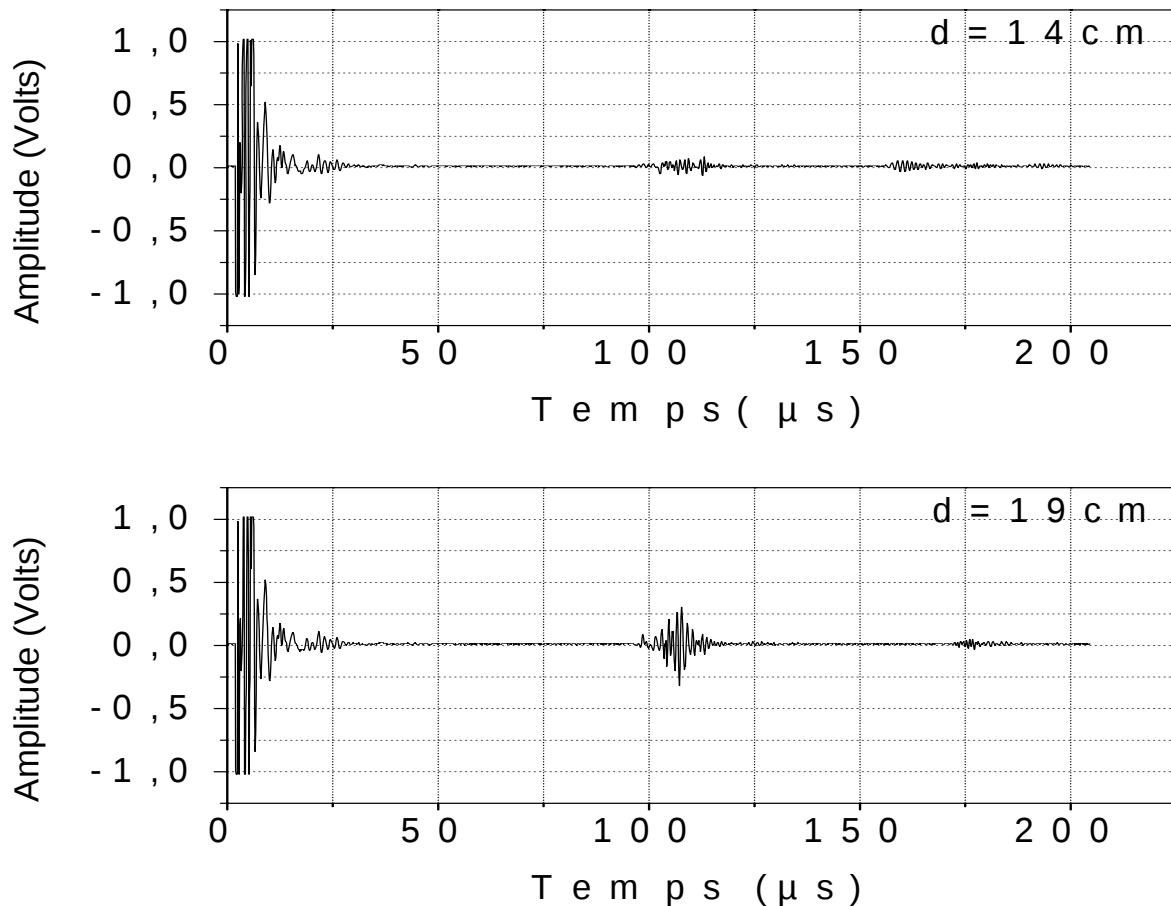


Figure IV-A-6 : Signaux dus à la réflexion, par le bord du tube, du mode généré, pour différentes distances ($f = 1\text{MHz}$).

La méthode d'angle d'incidence variable est quasi-unidirectionnelle, l'énergie envoyée dans la direction avant transducteur est d'amplitude sensiblement plus grande que celle envoyée dans la direction arrière au transducteur [2]. Nous n'avons donc reçu que les échos réfléchis par les discontinuités avant transducteur.

Identification du mode généré

Après avoir vérifié que le deuxième écho est celui du bord, identifions le mode généré. Connaissant la distance entre l'impact du palpeur et le bord et connaissant le temps de transit (lu sur l'oscilloscope) qui correspond à ce trajet, nous calculons la vitesse de propagation de l'onde (vitesse de groupe). Nous obtenons :

Distance (cm)	3	5	7	9	11	15	19
Vitesse (m/s)	3315	4081	4307	4534	4631	4695	5066
Incertitude (m/s)	339	262	191	154	130	95	82

Tableau IV-A-2. Vitesse de groupe expérimentale du mode généré, à différentes distances

Nous remarquons une différence entre les vitesses calculées le long du trajet de ce mode. Donc, ces résultats ne nous permettent donc pas de confirmer que c'est bien le mode $L(0,2)$ (qui a une vitesse de groupe de 4278 m/s) que nous générons. La question qui se pose est : A quoi est dû cette différence ? Pour répondre à cette question, nous devons approfondir nos remarques.

Si nous considérons la réflexion du mode généré par le bord, à trois positions différentes : $x = 3\text{cm}$, $x = 13\text{cm}$ et $x = 19\text{cm}$, nous remarquons que la forme du signal change avec la distance le long du chemin de propagation, c'est le phénomène de la *dispersion*.

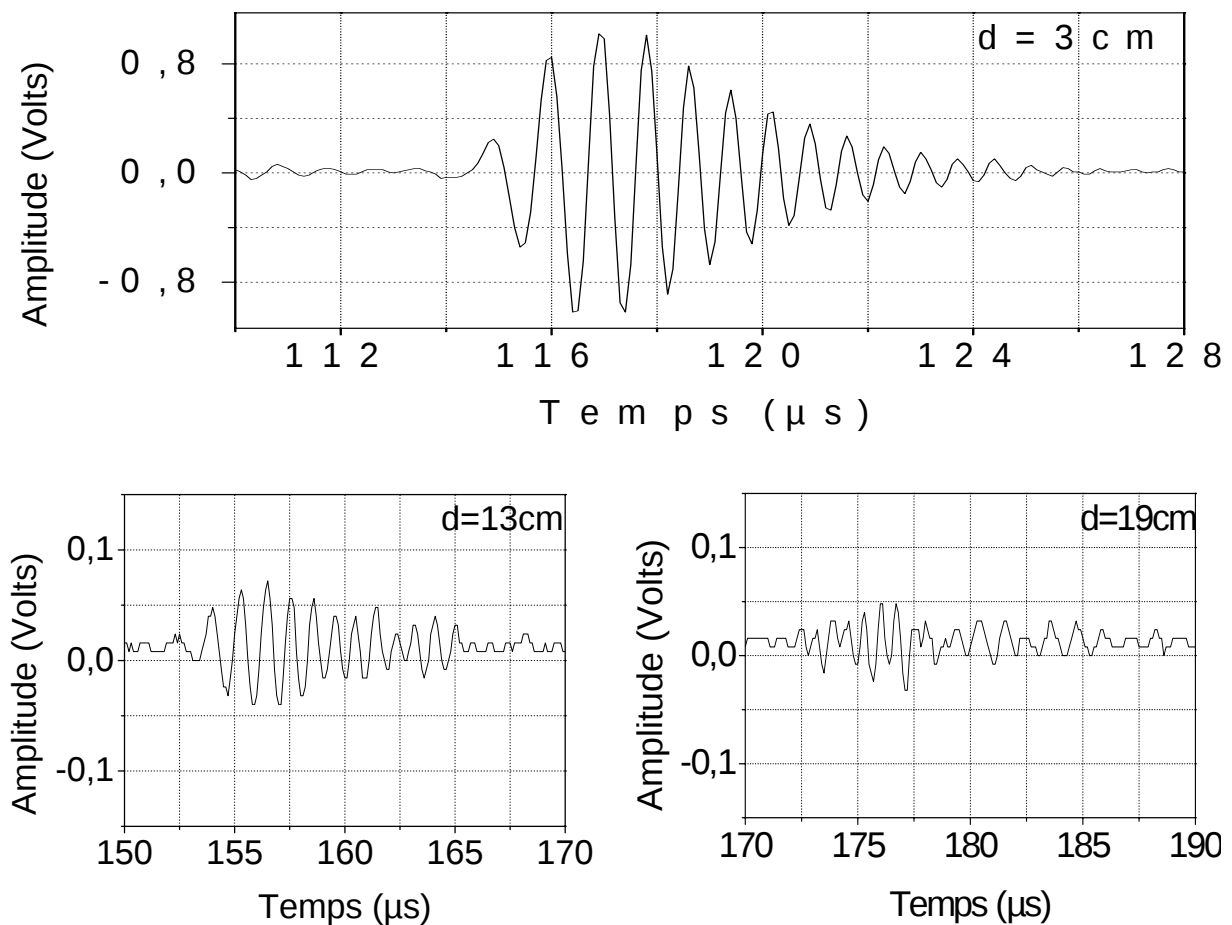


Figure IV-A-7 : Distorsion du paquet d'ondes le long du trajet

Le traitement des signaux dans le domaine fréquentiel (FFT) nous renseigne sur l'amplitude du signal en fonction de la fréquence. La figure IV-A-8 donne la réponse fréquentielle (FFT) du signal à différentes distances : la bande passante de la réponse fréquentielle de ces échos réfléchis par le bord englobe la fréquence du signal incident (1MHz). On peut dire que le mode reçu est celui qu'on a généré puisqu'il est reçu sur le même angle et la même fréquence. Cependant, ces transformées sont décalées les unes par rapport aux autres.

Si on calcule la fréquence à partir de l'écho réfléchi par le bord à 3cm, on trouvera :

$$T = 0,84s \longrightarrow f = 1,18 \text{ MHz}$$

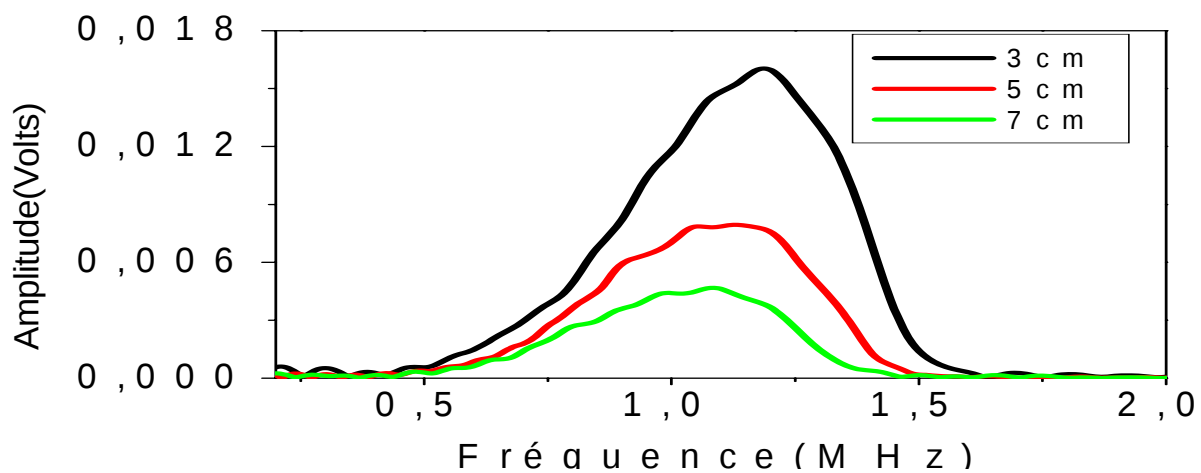
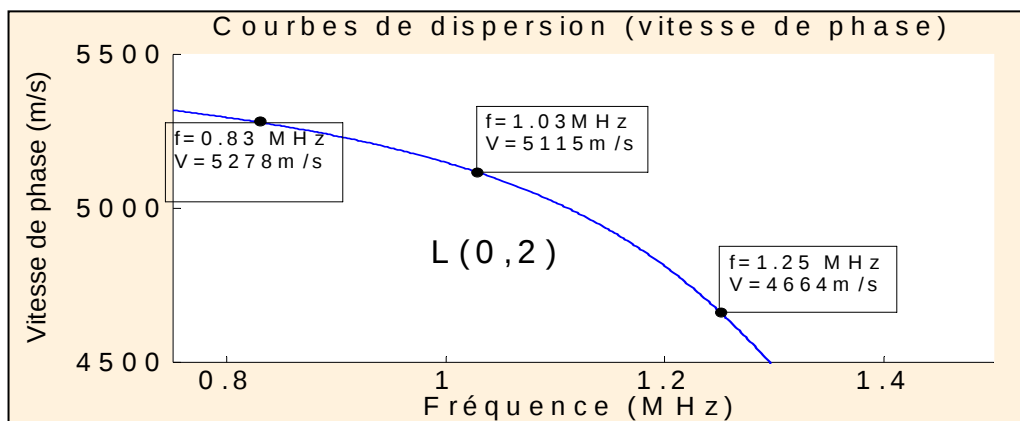


Figure IV-A-8 : Transformées de Fourier des signaux temporels, dues à la réflexion, par le bord, du mode généré ($f=1\text{MHz}$), pour différentes distances, $d=3,5,7\text{cm}$

Essai d'interprétation

Pour interpréter ces résultats, on se base sur deux points : bande passante du palpeur (caractéristique du palpeur) et courbes de dispersion (vitesses de phase et vitesses de groupe).



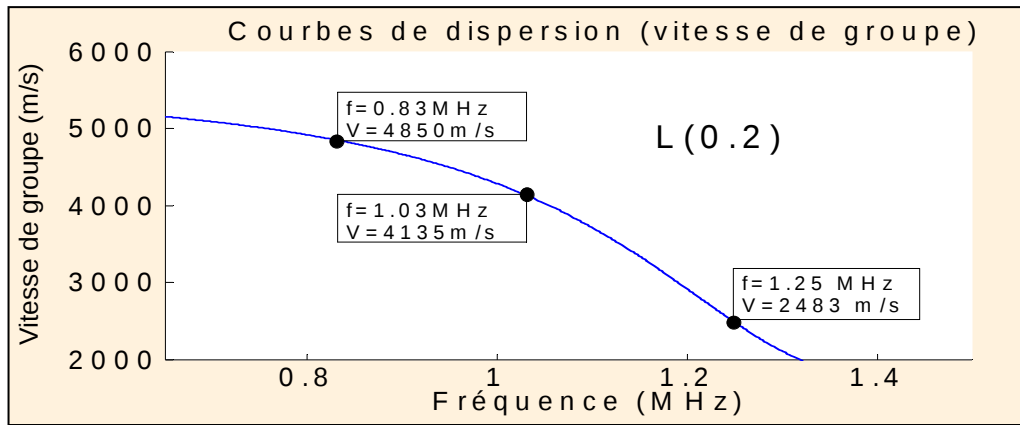


Figure IV-A-9 : Mode L(0,2) dans la gamme de fréquence [0.75-1.5] MHz, courbes des vitesses de phase et vitesses de groupe

Nous avons utilisé un générateur à impulsions qui ne fonctionne pas sur la seule fréquence centrale $f_0 = 1.03 \text{ MHz}$ du palpeur mais sur une bande de fréquences $f_2 - f_1 = (1.25 - 0.83) \text{ MHz}$, située de part et d'autre de la fréquence centrale f_0 . Chaque composante de cette gamme de fréquence générera une onde se propageant à sa propre vitesse de phase. Donc, nous avons excité un paquet d'ondes. Dans le cas d'ondes longitudinales ou transversales, cette particularité n'a aucune importance puisque leurs vitesses ne dépendent pas de la fréquence. Il en va tout autrement lorsqu'il s'agit d'ondes guidées où la vitesse dépend de la fréquence.

Si la bande de fréquence se trouvait dans une région non dispersive sur la courbe de vitesse de phase, toutes les composantes de ce paquet d'ondes se propageraient à la même vitesse (vitesse indépendante de la fréquence). Par conséquent, la vitesse de groupe serait constante et égale à la vitesse de phase. Il n'y aurait pas de phénomène de dispersion.

Cependant, le point de fonctionnement que nous avons choisi pour générer le mode L(0,2) est excité par une impulsion à large bande. Cette bande de fréquences se trouve dans une région dispersive sur la courbe de dispersion (mode dispersif). Les différentes composantes de ce paquet d'ondes voyageront avec des vitesses différentes : Les ondes de hautes fréquences se propagent à des vitesses inférieures à celles des ondes de basses fréquences et arrivent après celles-ci au récepteur. Ceci a pour effet d'élargir les échos réfléchis dans le temps, ainsi que la gaussienne de sa FFT. Pour une position fixe, le début et la fin de cet écho correspondent à des vitesses de groupe différentes. L'effet de la dispersion fait que la forme du paquet d'onde change avec la distance, le long du chemin de propagation. Si la dispersion est forte, l'amplitude maximale dans l'enveloppe du signal diminue

rapidement avec la distance (la distance maximale de propagation est de 20 cm) [13,18, 21-22].

Fréquence (MHz)	0.85	0.90	0.95	1	1.05	1.1	1.15
Vitesse de phase (m/s)	5266	5234	5195	5148	5090	5018	4927
Vitesse de groupe(m/s)	4800	4661	4493	4285	4027	3713	3339
Angle (°)	16.36	16.46	16.59	16.74	16.94	17.19	17.52

Tableau IV-A-3 : Mode L(0,2) excité avec une impulsion à large bande, les différentes composantes de ce paquet d'ondes voyageront avec des vitesses différentes (phénomène de dispersion)

IV.A.2 Génération du mode L(0,2) sur un tube sain à $f = 0.5$ MHz

Afin de confirmer l'interprétation précédente, nous avons généré le mode L(0,2) par l'intermédiaire d'un palpeur de fréquence plus basse ($f = 0.5$ MHz) dans une région non dispersive où $v_{ph} \approx v_{gr} \approx \text{Constante}$, sachant qu'un caractère non dispersif idéal est celui où la vitesse de phase et la vitesse de groupe sont tous les deux constantes et ont la même valeur.

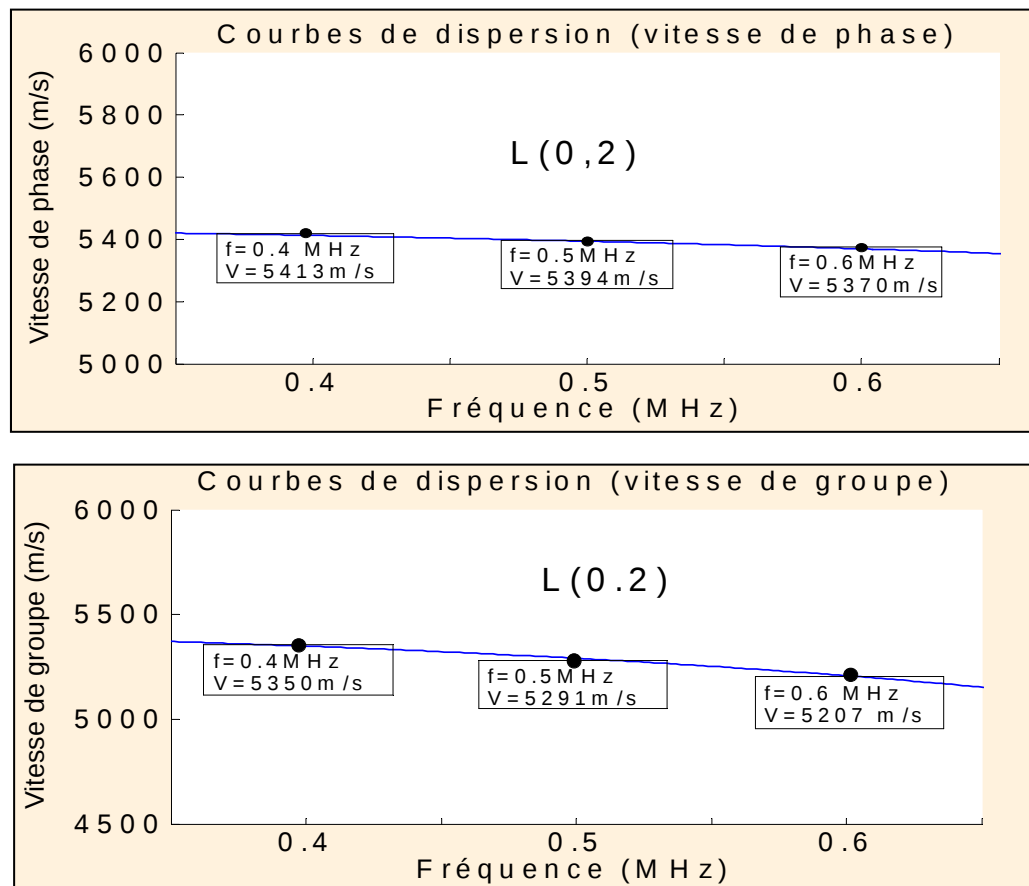
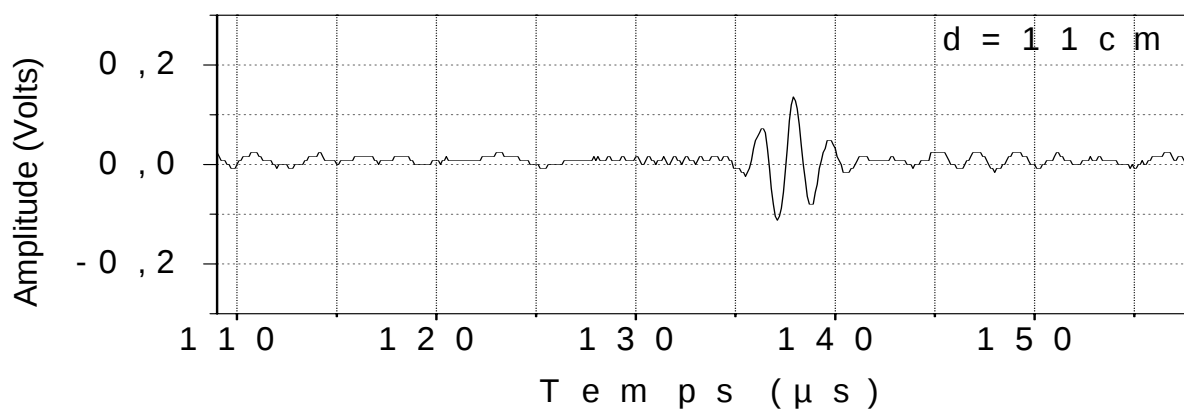
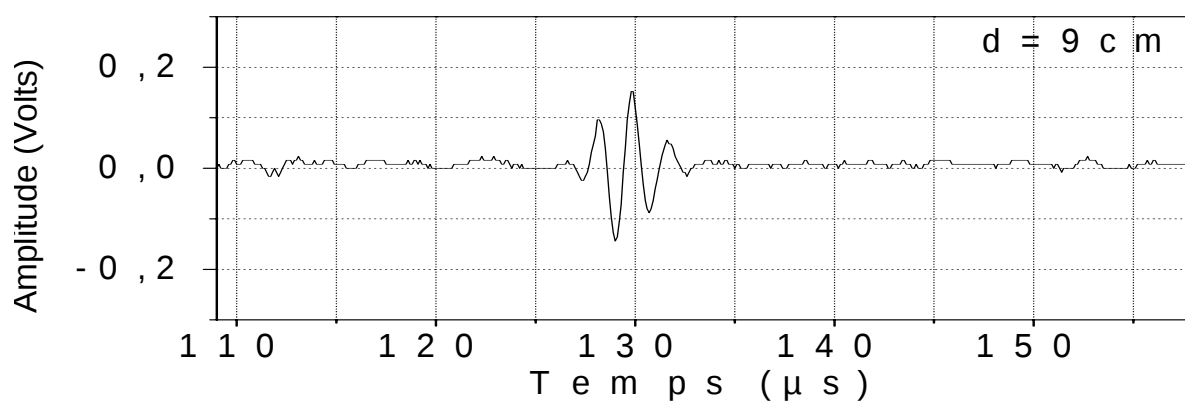
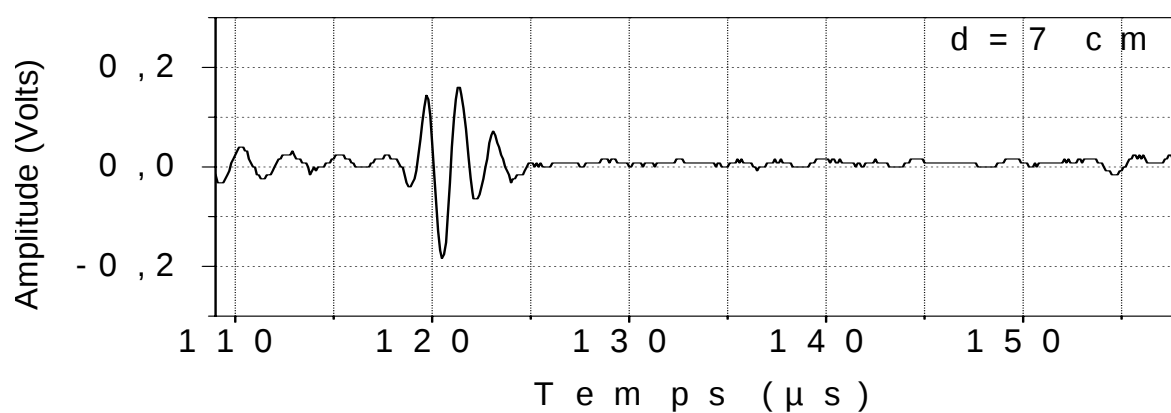
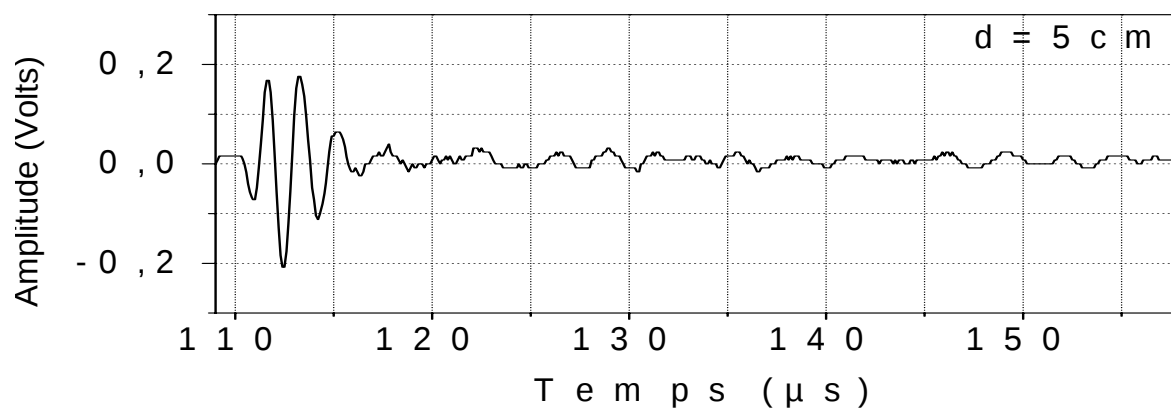


Figure IV-A-10 : Mode L(0,2) dans la gamme des fréquence [0.35-0.65] MHz, courbes des vitesses de phase et vitesses de groupe

Les signaux ci dessous montrent que l'écho dû à la réflexion du bord de la face supérieure est non déformé le long du trajet.



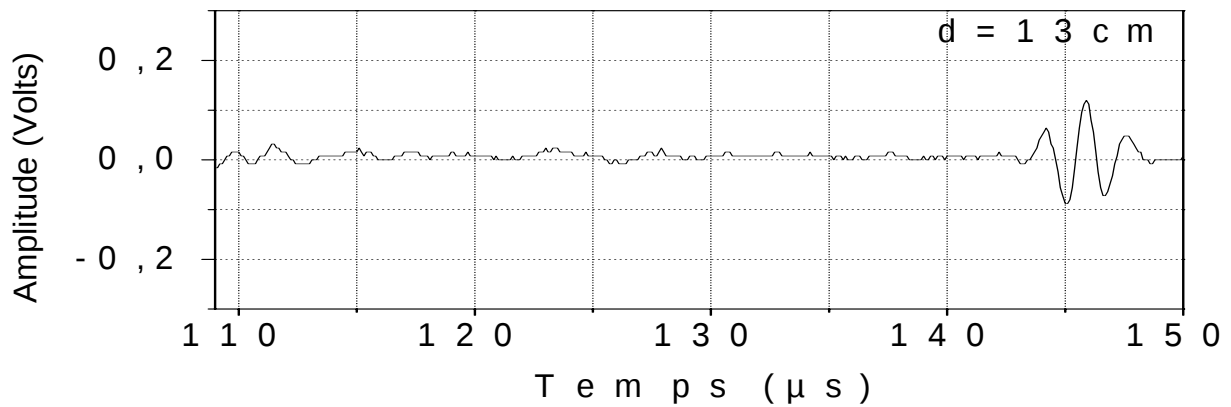


Figure IV-A-11 : Signaux dus à la réflexion du mode L(0,2) par le bord, pour différentes distances pour ($f = 0.5$ MHz).

La figure (IV-A-12) est la réponse fréquentielle (FFT) des échos obtenus lors de la réflexion, par le bord, du mode L(0,2) pour la fréquence de 0.5 MHz

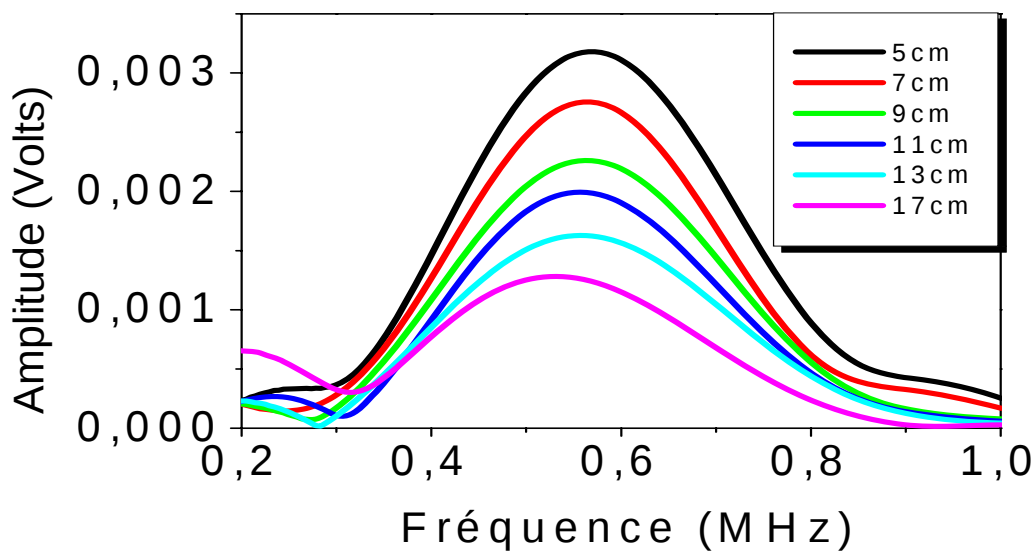


Figure IV-A-12 : Transformée de Fourier des signaux temporels, due à la réflexion, par le bord, du mode généré pour différentes distances ($f = 0.5$ MHz).

Le tableau ci-dessous donne la largeur de la bande passante à -3dB de ces réponses fréquentielles. Cette réponse est pratiquement constante ≈ 0.23 MHz, elle est très proche de celle du signal émis par le transducteur ≈ 0.20 MHz .

Distance (cm)	Fréquence centrale (MHz)	Largeur de la Bande passante(MHz)
5	0.57	0.24
7	0.56	0.23
9	0.57	0.24
11	0.56	0.23
13	0.55	0.23
17	0.53	0.23

Tableau IV-A-4 : largeur de la bande passante des réponses fréquentielles à -3dB
($f=0.5\text{MHz}$)

Nous avons remarqués, que ce mode se propage à une vitesse pratiquement constante, la différence entre les deux vitesses théoriques et expérimentale est due au erreurs commise sur la mesure des distances parcouru par le mode générer dans le tube et la lecture du temps de transit :

Distance (cm)	5	7	9	11	13	15	17
Vitesse (m/s)	4894	4946	4985	5049	5064	5068	5050
Incertitude (m/s)	302	214	170	141	124	103	92

Tableau IV-A-5 : Vitesse de groupe expérimentale à différentes distances pour $f = 0.5 \text{ MHz}$

En conclusion, nous pouvons dire que nous avons bien généré le mode $L(0,2)$. Ce mode est non dispersif à 0.5 MHz (vitesse constante et conservation de la forme du signal), une FFT sans pics, autre que celui de la fréquence nominale. Pour la fréquence de 1MHz , le mode généré $L(0,2)$ est trop dispersif.

I.V.4 Atténuation du mode $L(0,2)$

Une fois le mode est identifié, il est possible de mesurer son atténuation pour différentes distances :

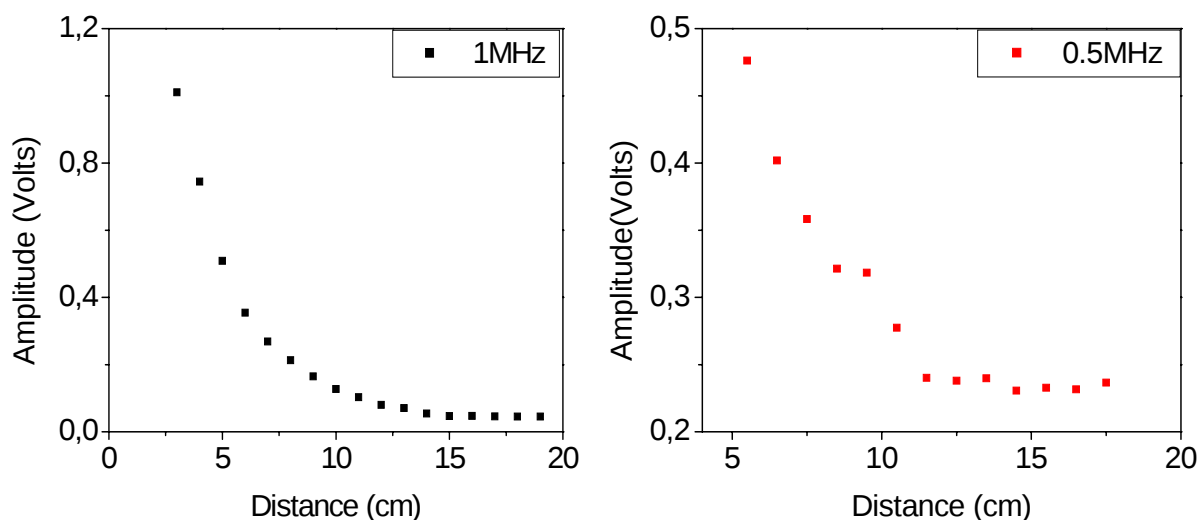


Figure IV-A-13 : Amplitudes du signal réfléchi, par le bord, en fonction de la distance

L'allure des courbes est exponentielle selon la loi de Lambert :

$$p = p_0 e^{-\alpha d}$$

P_0 : pression initiale

P : pression après un parcours d

d : distance parcourue par l'onde ultrasonore

Le coefficient d'atténuation est défini donc par :

$$\alpha(\text{dB/cm}) = (20 \log(P_0/p)) / d$$

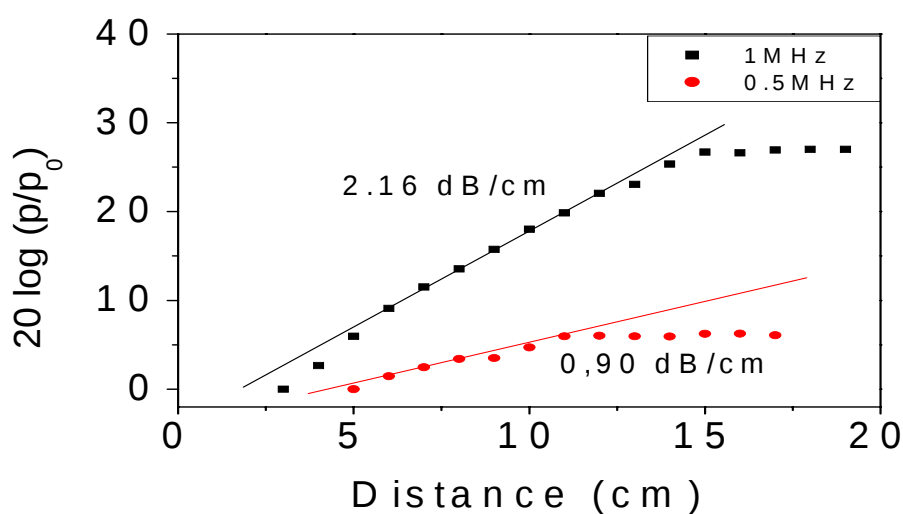


Figure IV-A-14: Coefficient d'atténuation du signal réfléchi, par le bord, en fonction de la distance

Nous remarquons que le coefficient d'atténuation du mode L(0,2), pour $f = 1\text{MHz}$ est plus grand que celui pour 0.5 MHz , ce qui nous permet de dire que l'atténuation de l'onde est toujours d'autant plus importante que la fréquence est élevée. Cette atténuation est due principalement aux :

- Phénomènes propres à la nature du matériaux : l'absorption et la diffusion et à la fréquence utilisée [24] .
- Phénomènes propres aux ondes guidées : la dispersion et la diffusion du mode dans l'eau.

Concernant ce deuxième point, le mode L(0,2) est dispersif pour ($f = 1\text{MHz}$) et est excité par une impulsion à large bande. Il suffit que la fréquence change de 0.25 MHz pour que la composante radiale augmente, la diffusion de l'énergie du tube vers l'eau augmentera alors.

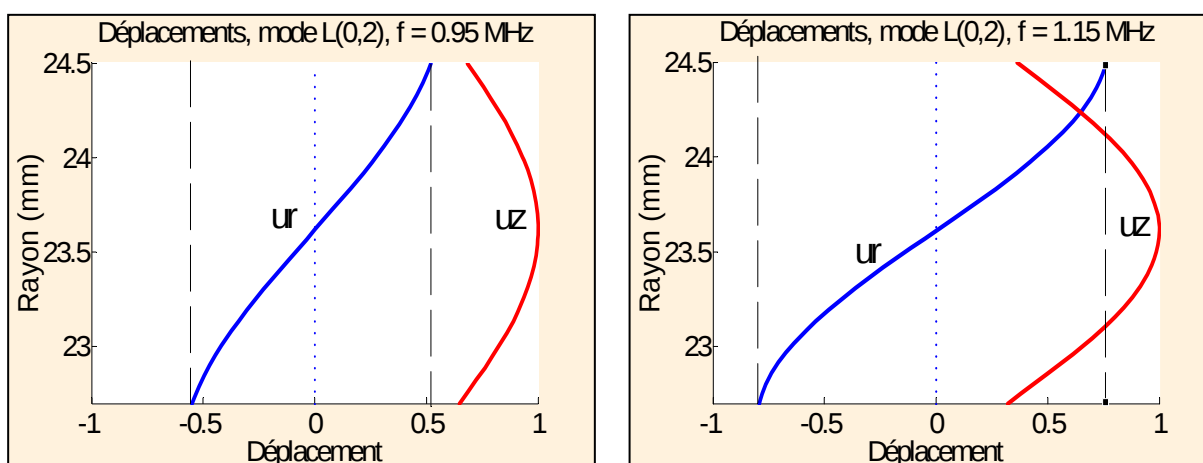
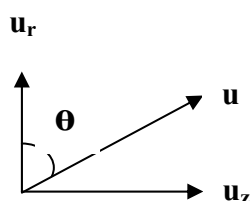


Figure IV-A-15 : Distribution du champ de déplacement à travers l'épaisseur pour le mode L(0,2) : a) 0.95 MHz ; b) 1.15 MHz [28]

La figure IV-3 montre que la composante radiale, à la surface externe du guide, du mode L(0,2) pour la fréquence de 0.5 MHz est plus faible que celle pour 1 MHz (tableau IV-A-6). Donc, ce mode à $f = 0.5\text{MHz}$ est beaucoup moins sensible aux conditions extérieures que pour la fréquence de 1 MHz .



	U_r	U_z	U	θ
1 MHz	0.57	0.62	0.84	47.46°
0.5 MHz	0.20	0.95	0.97	77.82°

Tableau IV-A-6 : Amplitudes normalisées des vecteurs déplacements à la surface externe du tube

Partie B

Détection et localisation de défauts circulaires de différents diamètres

Les défauts dans les pièces sont susceptibles de réfléchir les ultrasons ou d'empêcher leur cheminement à travers les pièces. Le contrôle par ultrasons est basé sur la recherche des réflexions sur des surfaces autres que les surfaces limites de la pièce (bords) et sur l'observation des anomalies qui perturbent la transmission des ultrasons. Comme pour les sons, la propagation des ondes ultrasonores est rectiligne. Les discontinuités brusques sur le trajet de l'onde ne sont pratiquement pas contournées. C'est cette propriété qui permet d'utiliser les ultrasons pour détecter et définir la position de certains obstacles dans les matériaux.

Pour espérer détecter un défaut, il faut prendre en compte :

Son orientation : Elle détermine la direction selon laquelle le faisceau émis est réfléchi. Un défaut perpendiculaire au faisceau émis interrompt plus largement celui-ci qu'un défaut incliné ou parallèle au faisceau.

Sa grandeur : Plus un défaut est important, plus il intercepte une grande section du faisceau émis et réfléchit l'énergie jusqu'à interrompre la transmission.

Sa nature : Plus l'impédance acoustique du défaut est différente de celle de la pièce, plus la réflexion est importante et plus la transmission est altérée.

IV.B.1 Détection de défauts de différents diamètres par réflexion du mode L(0,2)

Nous avons rappelé, dans le premier chapitre, que non seulement les ondes guidées peuvent se propager sur de longues distances, mais encore que ces ondes, qui se forment à quelques longueurs d'ondes, grâce aux conversions de modes aux interfaces, sont extrêmement sensibles à l'épaisseur de la structure et à la nature physico-chimique des interfaces qui les guident. Ainsi, tous les manques de matière affectant l'épaisseur de la structure et toutes altérations des surfaces se traduisent par une forte atténuation ou même par la disparition pure et simple de l'onde guidée.

La présence d'un défaut sera identifiée par tout changement de la réponse du système par rapport à une réponse de référence enregistrée avant l'endommagement de la structure. Pour une distance de 6 cm du bord (face supérieure) et par l'intermédiaire d'un transducteur de fréquence **1 MHz**. La figure IV-B-1 représente la propagation du mode L(0,2) avant l'endommagement de la structure (tube sain). La restriction du signal reçu sur un intervalle de

temps $[100-142]\mu s$ fait apparaître deux échos : l'écho de la rétrodiffusion et l'écho réfléchi par le bord de la face supérieure (figure IV-B-2).

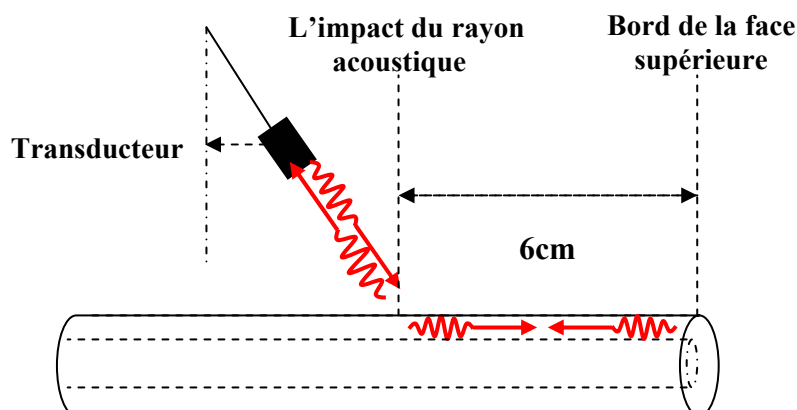


Figure IV-B-1 : Propagation du mode $L(0,2)$ avant l'endommagement du tube.

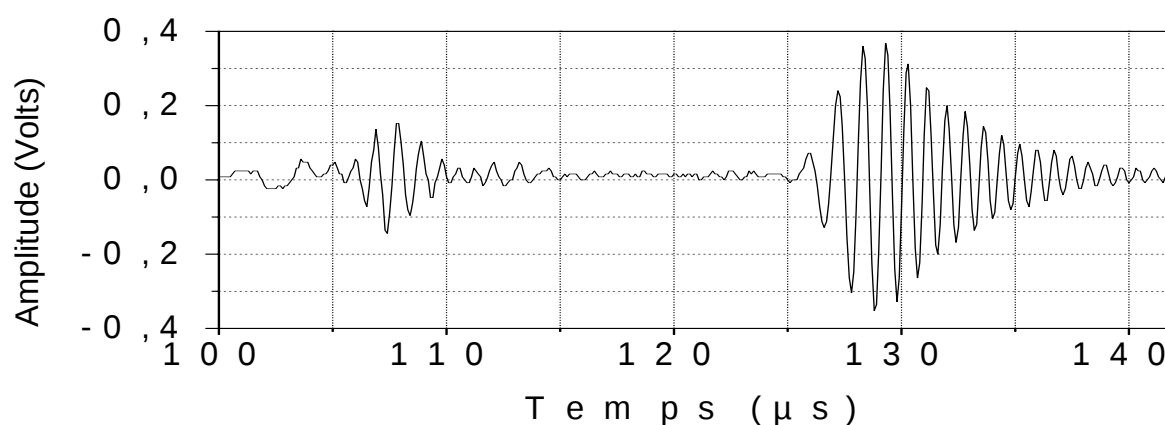


Figure IV-B-2 : Signal reçu par le transducteur de 1MHz avant l'endommagement du tube.

En gardant la même distance (6cm) entre l'impact du rayon acoustique et le bord de la face supérieure. Le tube sain étudié précédemment est maintenant muni de cratères, de diamètres 4 et 7mm, situés à une distance de 3 cm du ce bord.

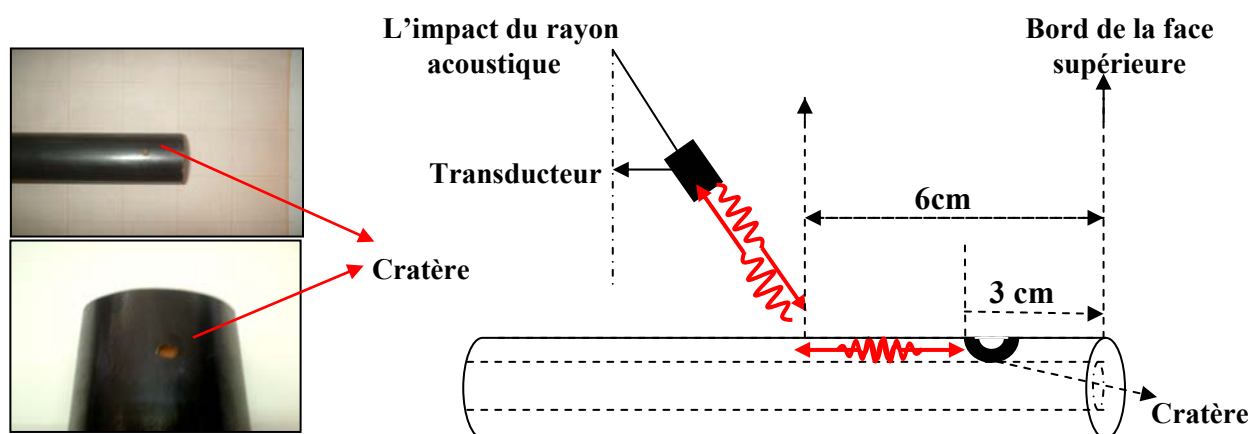
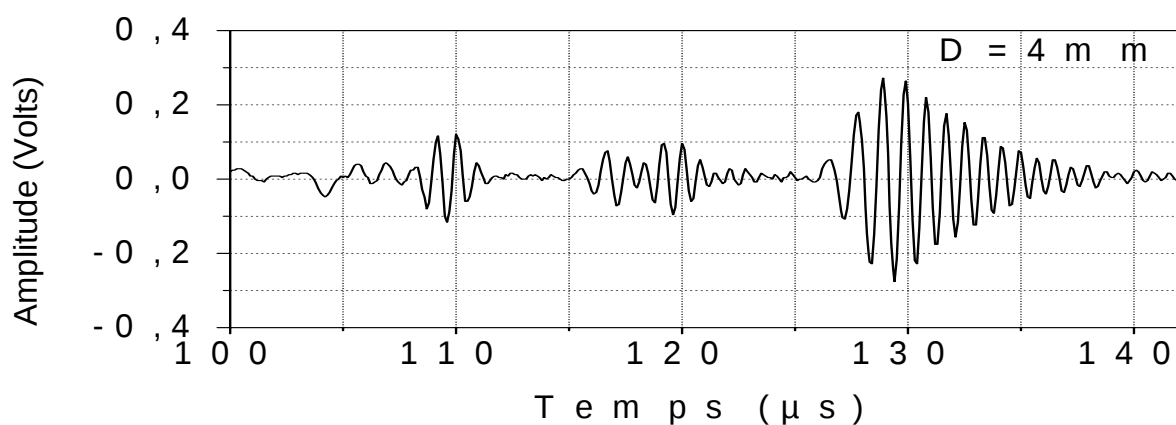
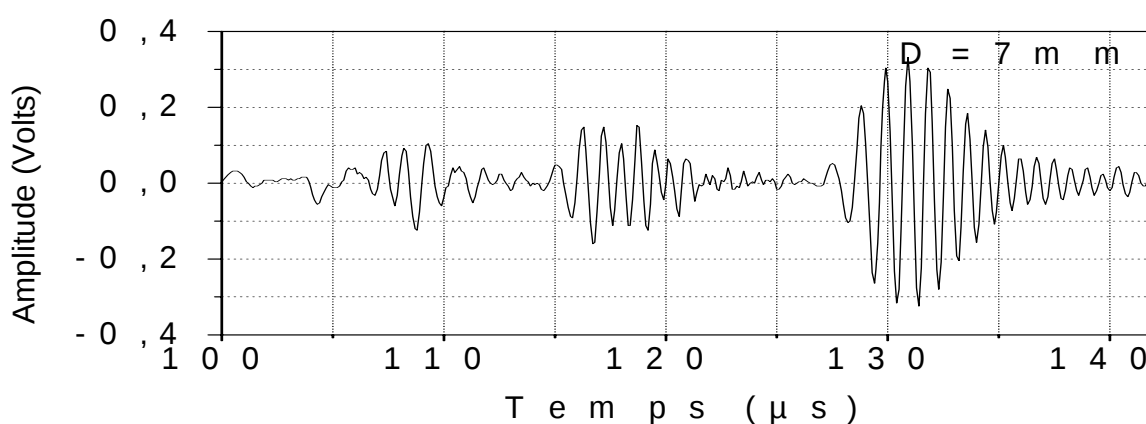


Figure IV-B-3 : Propagation du mode $L(0,2)$ après l'endommagement du tube.

L'écho qui apparaît entre l'écho de la rétrodiffusion et l'écho réfléchi par le bord de la face supérieure est celui du défaut (figure IV-B-4).



(a)



(b)

Figure IV-B-4 : Détection de défauts circulaires (cratères) par le mode L(0,2), ($f = 1\text{MHz}$).
a) défaut de 4 mm de diamètre, b) défaut de 7 mm de diamètre.

L'expérience précédente, par l'intermédiaire d'un transducteur de fréquence 0.5 MHz, donne les résultats suivants :

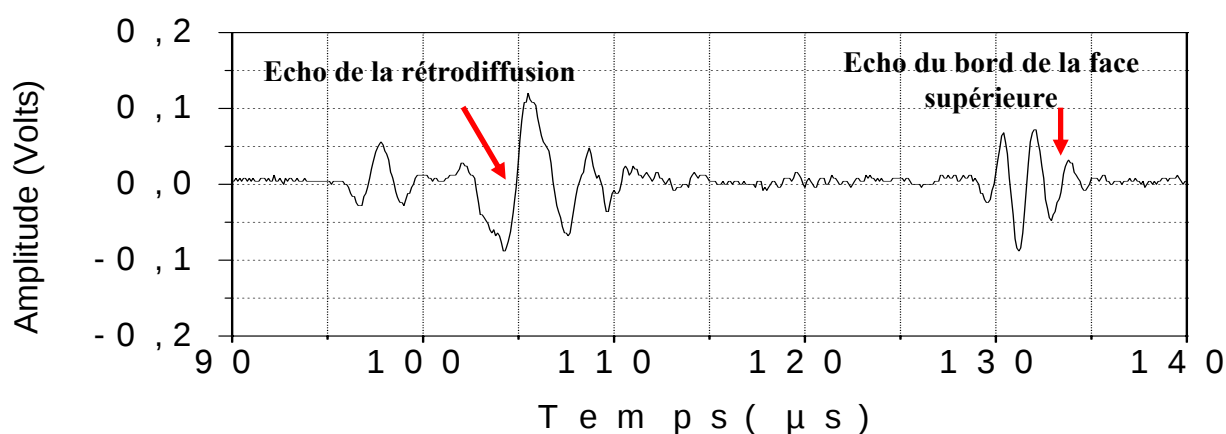


Figure IV-B-5 : Signal reçu par le transducteur de 0.5 MHz avant l'endommagement du tube.

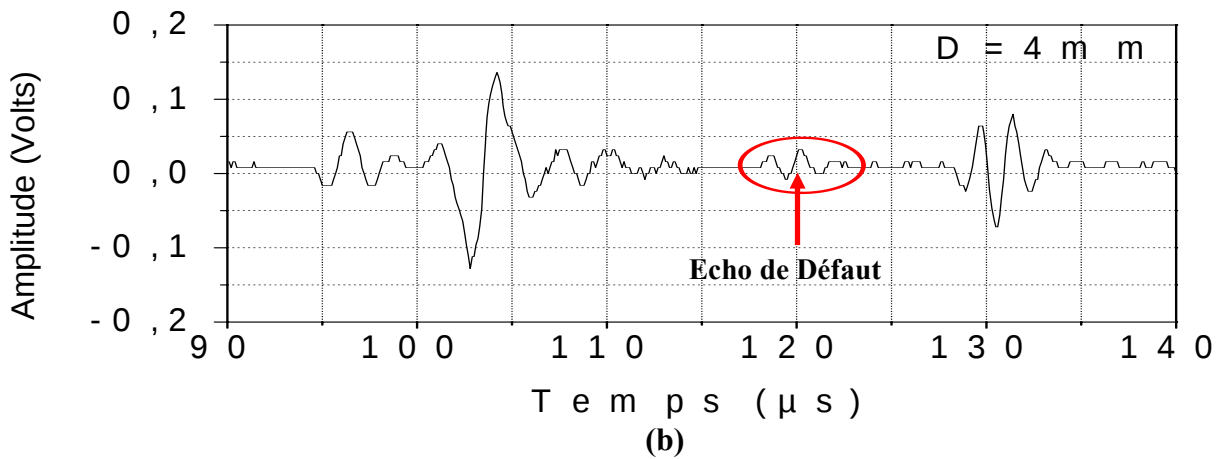
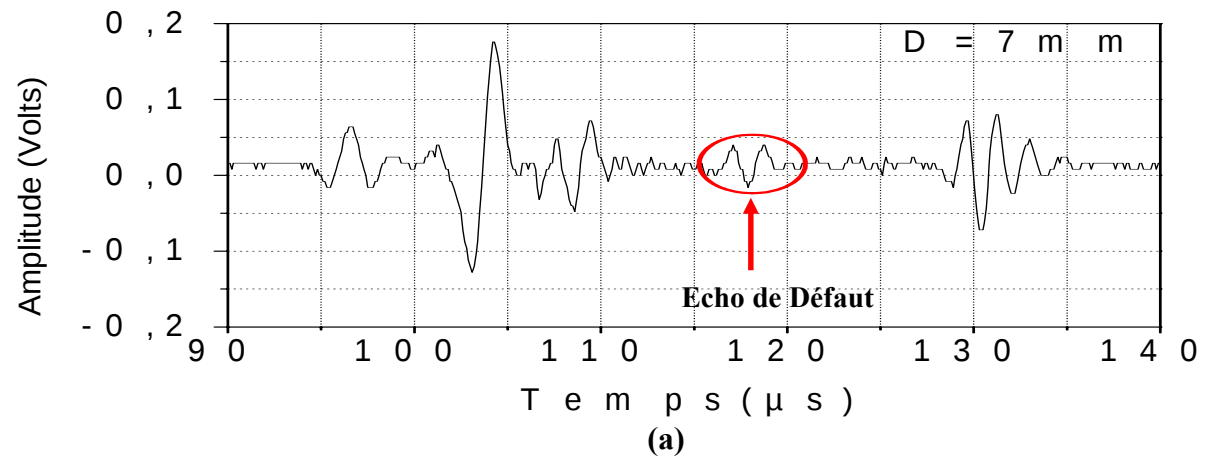


Figure IV-B-6 : Détection de défauts circulaires (cratères) par le mode L(0,2). Le défaut se trouve à une distance de 3 cm du bord (**f = 0.5MHz**)
a) défaut de 4 mm de diamètre, b) défaut de 7 mm de diamètre

Ces signaux nous permettent de constater que le mode L(0,2) a la capacité de détecter des défauts de diamètres inférieurs à la longueur d'onde ($4 \text{ mm} < \lambda = 5.14 \text{ mm}$, pour $f = 1 \text{ Mhz}$) et ($4 \text{ mm} < \lambda = 10.79 \text{ mm}$, pour $f = 0.5 \text{ MHz}$). Cependant, l'interaction des ondes ultrasonores avec les défauts est plus forte lorsque la longueur d'onde est petite, ceci signifie, lorsque la fréquence est élevée [41].

IV.B.2 Détection des défauts de dimensions inférieurs à la longueur d'onde

Les méthodes ultrasonores traditionnelles, qui emploient les ondes de volume sont bonnes pour détecter des défauts relativement grands (comparés aux longueurs d'ondes), mais elles ne sont pas très efficaces pour détecter les petits défauts. Les ondes guidées sont sensibles aux petits défauts de dimensions inférieures à la longueur d'onde [4].

Pour confirmer cet avantage, lié aux ondes guidées, nous avons fait, sur le tube, un cratère de diamètre 1 mm. Ce cratère se trouve à une distance $d = 20$ cm du bord. La figure (IV-B-7) montre l'apparition d'un écho, très atténué, de faible amplitude. Cet écho est dû à la réflexion de l'onde réfléchie sur le défaut de 1mm.

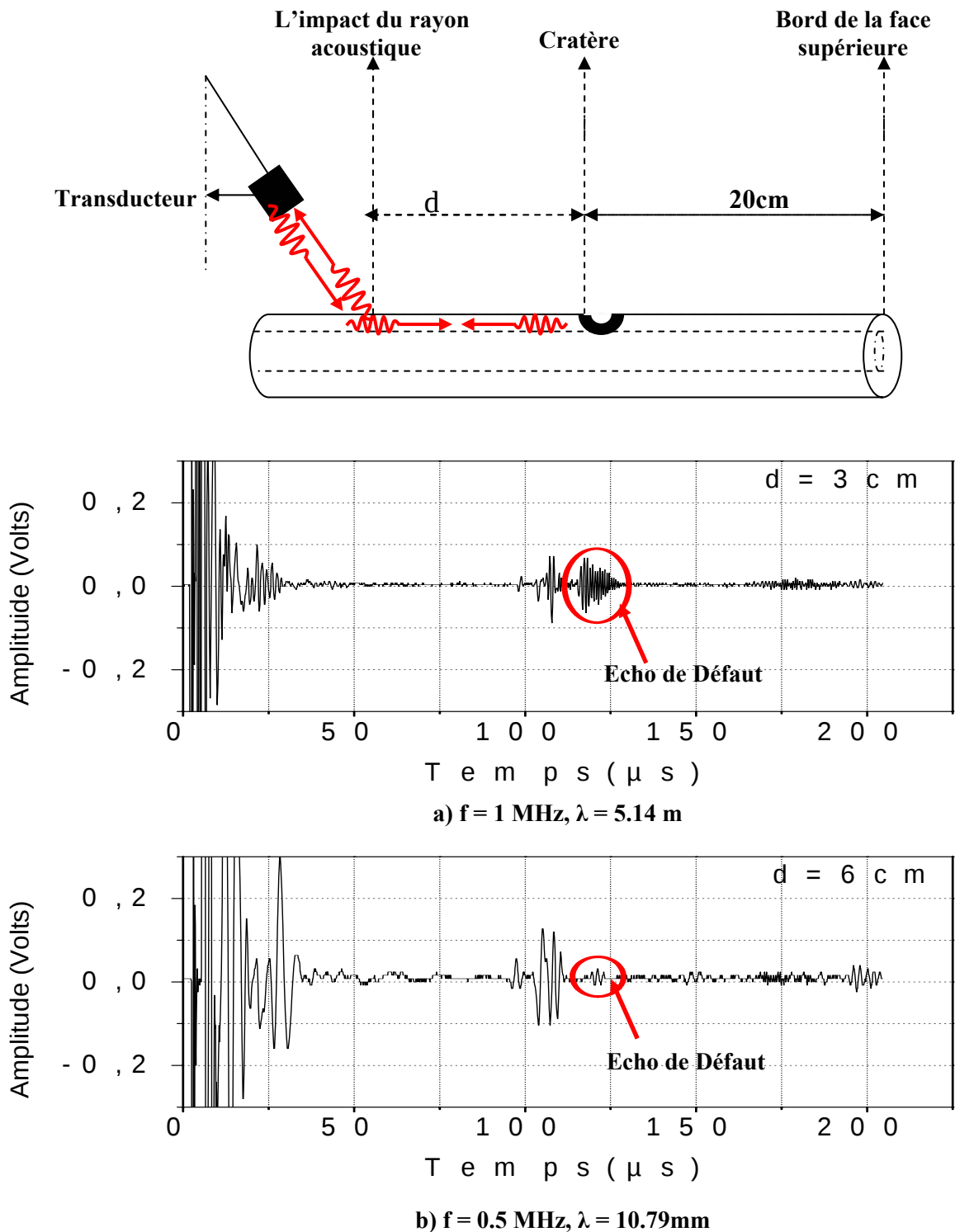


Figure IV-B-7 : Detection d'un défaut de diamètre 1mm, plus petit que la longueur d'onde. d est la distance entre l'impact du rayon acoustique émis et le cratère.

IV. B. 3 Localisation du défaut

Une fois le défaut détecté, sa localisation est très intéressante pour faire une éventuelle réparation. La localisation d'un défaut se fait toujours par rapport à une référence donnée.

Le tableau ci-dessous donne une comparaison entre la position réelle (défaut – rétro diffusion) et la position obtenue expérimentalement à partir des signaux reçus (notre référence ici est l'écho de rétrodiffusion). Le défaut choisi à localiser est celui de diamètre 4 mm. La position du défaut est déterminée par :

$$d = v_{gr} \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

Δt : Temps de transit.

v_{gr} : Vitesse de groupe du mode L (0,2) généré.

Comme nous l'avons constaté, le mode L(0,2) généré par l'intermédiaire d'un palpeur de fréquence 1 MHz est dispersif, sa vitesse de groupe change le long du trajet. La question qui se pose est : quelle vitesse doit-on prendre pour calculer la distance d ? Dans le cas des faibles distances, le phénomène de dispersion n'influe pas sur la localisation du défaut, car la différence qui existe entre les différentes vitesses n'est pas très grande. Dans ce cas, nous prendrons, pour vitesse, la moyenne des vitesses. Dans le cas contraire où d est grand, cette méthode n'est plus valable car cette vitesse moyenne peut introduire un grand écart entre la position réelle et expérimentale.

$$v_{gr} = 4375,65 \text{ m / s} \quad \text{Pour } f = 1\text{MHz}$$

Position, réelle, du défaut (cm)	Temps de transit (μ s)	Position, expérimentale, du défaut (cm)
3	7.58	3.32
5	11.98	5.24
7	16.04	7.02
9	20.52	8.98

Tableau IV-B- 1 : Localisation d'un défaut circulaire de diamètre 4mm, comparaison entre la position réelle et expérimentale ($f = 1\text{MHz}$). La référence est l'écho de rétrodiffusion.

$$v_{gr} = 5008.01 \text{ m/s}$$

Pour $f = 0.5 \text{ MHz}$

Position, réelle, du défaut (cm)	Temps de transit (μs)	Position, expérimentale, du défaut (cm)
6	11.89	5.93
8	15.02	7.52
10	19.37	9.70

Tableau IV-B- 2 : Localisation d'un défaut circulaire de diamètre 4mm, comparaison entre la position réelle et expérimentale ($f = 0.5 \text{ MHz}$). La référence est l'écho de rétrodiffusion

Si nous choisissons l'écho issu du bord comme référence, pour localiser le défaut, nous obtenons le tableau ci-dessous.

Fréquence (MHz)	Temps de transit (μs)	Position, expérimentale, du défaut (cm)	Position, réelle, du défaut (cm)
1	5.39	2.36	2.70
0.5	5.15	2.58	2.70

Tableau IV-B- 3 : Localisation d'un défaut circulaire de diamètre 4mm, comparaison entre la position réelle et expérimentale. La référence est l'écho issu du bord.

D'après les trois tableaux ci-dessus, les positions expérimentales et théoriques du défaut sont très proches.

Pour une fréquence de 1MHz, la figure IV-B-8 représente la variation de l'amplitude de l'écho, réfléchi par des cratères de différents diamètres, en fonction de la distance parcouru par ce mode L(0,2), entre l'impact du rayon acoustique et le défaut.

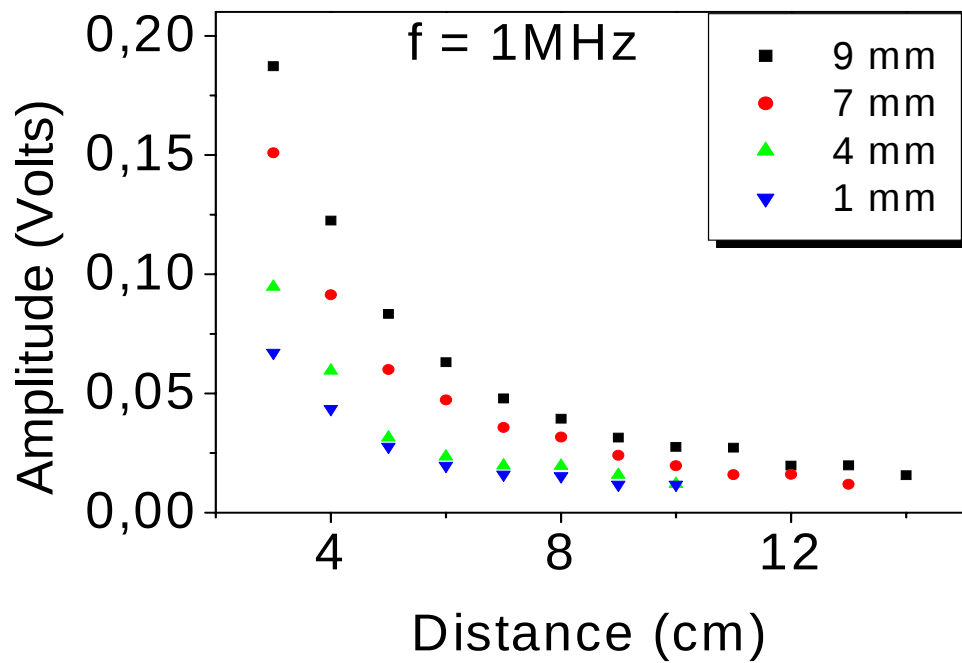


Figure IV-B-8 : Amplitudes du mode L (0,2), réfléchi, par différents défauts en fonction de la distance

Nous constatons, à partir de la figure précédente que: plus la distance de contrôle est grande, plus l'amplitude diminue, et ce, quel que soit la taille du défaut. En outre, plus le défaut est important plus l'amplitude réfléchie croît. Résultats auxquels nous nous attendions.

Partie C

Détection et localisation d'un joint soudé

Le soudage tient une grande place dans la construction des tuyauteries. C'est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs pièces constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité de la nature des matériaux à assembler [42].

IV.C.1 Détection d'un joint soudé par réflexion du mode L(0,2)

Pour une distance de 19 cm du bord (face supérieure) et par l'intermédiaire d'un transducteur de fréquence **1 MHz**. La figure IV-C-1 représente la propagation du mode L(0,2) avant l'endommagement de la structure (tube sain).

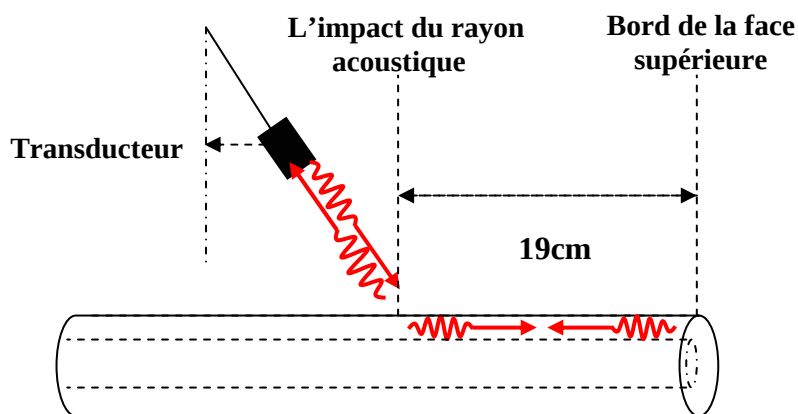


Figure IV-C-1 : Propagation du mode L(0,2) avant l'endommagement du tube

Le signal reçu fait apparaître deux échos : l'écho de la rétrodiffusion et l'écho réfléchi par le bord de la face supérieure. Ce dernier est d'amplitude très faible, quant à l'écho réfléchi par le bord de la face inférieure, il a complètement disparu.

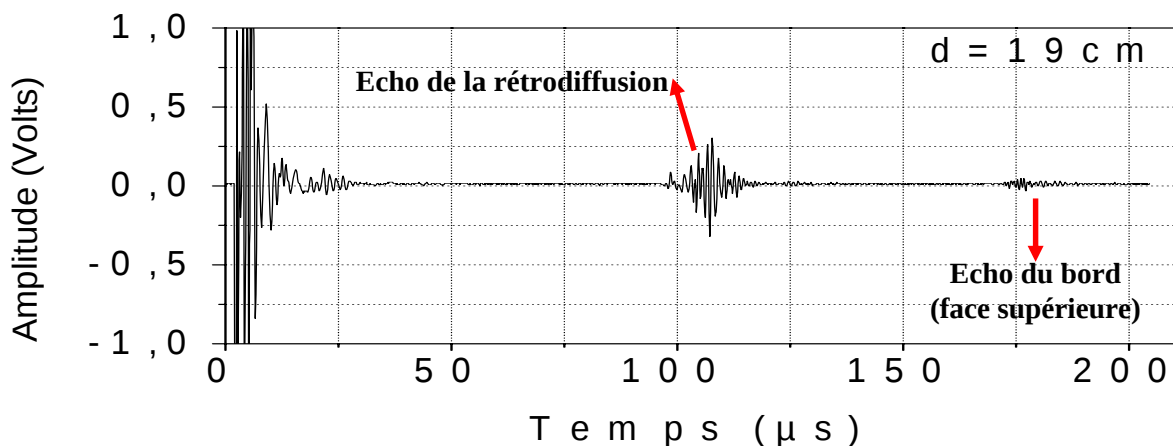


Figure IV-C-2 : Signal reçu par le transducteur de 1MHz avant le soudage du tube.

Le tube sain est soudé au milieu (20 cm) par un procédé dit TIG (*Tungstène Inerte Gaz*). Ce procédé a l'avantage de la réalisation de cordons lisses, ayant un bel aspect, de plus, il est conseillé pour le soudage des épaisseurs minces.

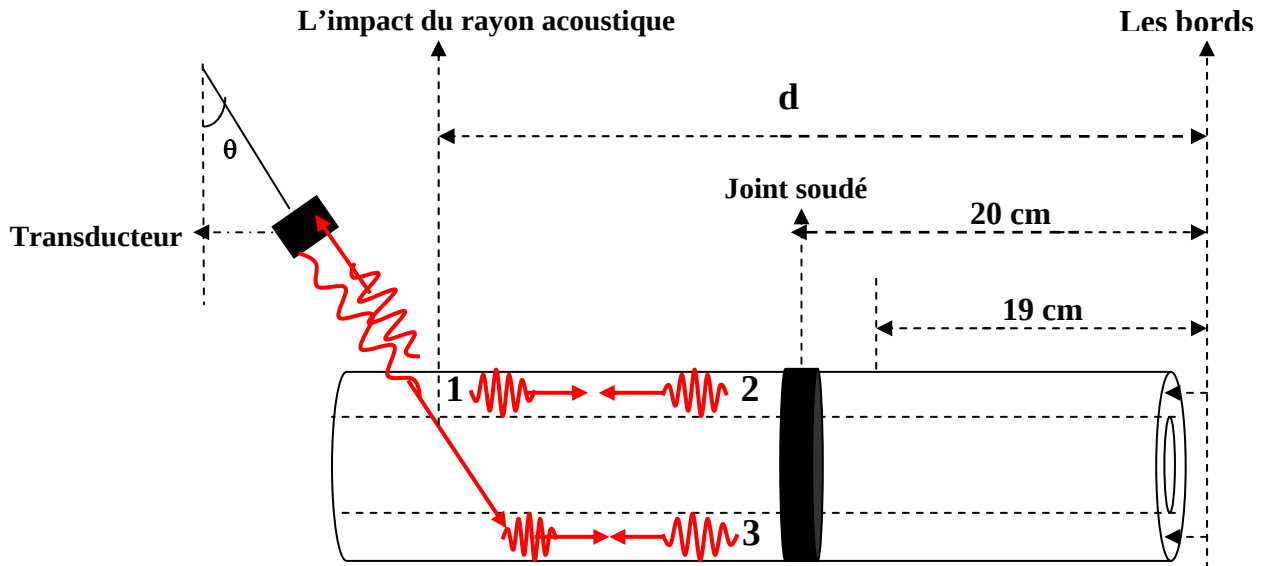


Figure IV-C-3 : Propagation du mode L(0,2) après l'endommagement du tube.

Pour une distance $d = 25$ cm du bord, la figure IV-C-4 montre l'apparition de nouveaux échos. Ces derniers sont réfléchis par le joint soudé. On voit apparaître trois échos : l'écho de la rétrodiffusion, l'écho réfléchi par le joint soudé (face supérieure), et l'écho réfléchi par le même joint (face inférieure). Les échos des bords n'apparaissent pas car ils sont complètement atténués à cette distance.

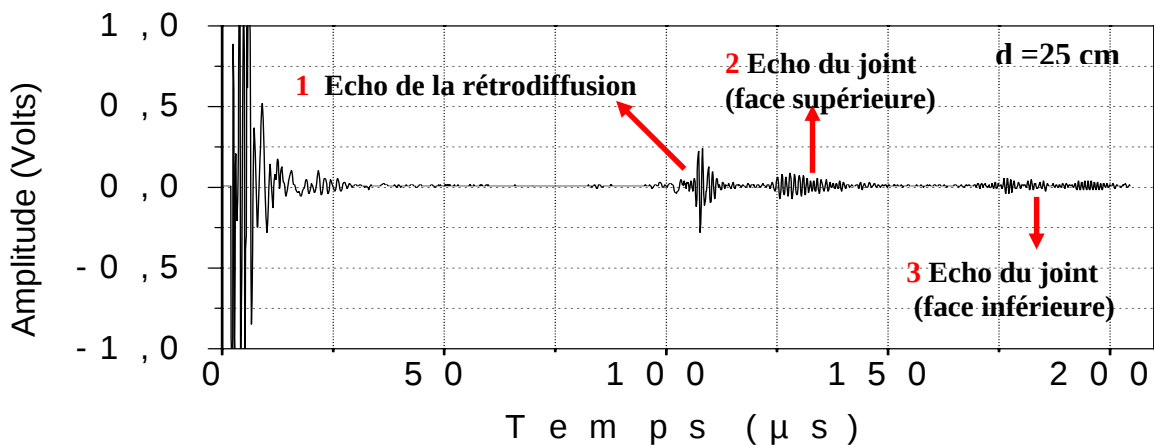


Figure IV-C-4 : Détection d'un joint soudé par le mode L(0,2), ($f = 1\text{MHz}$).

Le joint soudé est détecté également par l'intermédiaire d'un transducteur de fréquence 0.5 MHz :

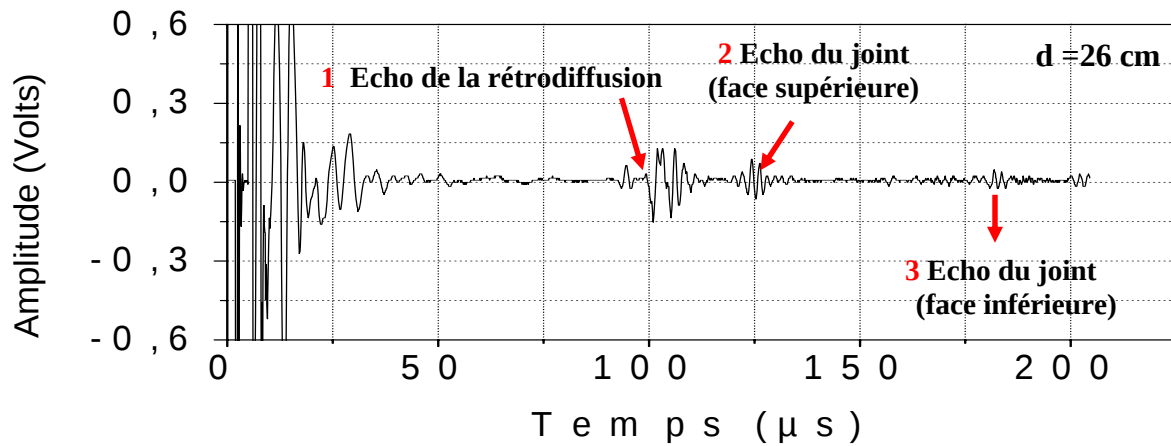


Figure IV-C-5 : Détection d'un joint soudé par le mode L(0,2), ($f = 0.5\text{MHz}$).

Ce résultat montre qu'effectivement, une onde ultrasonore et en particulier, une onde guidée, est sensible à tout changement d'impédance acoustique. En effet, un joint soudé présente une surépaisseur, donc un changement de section.



Figure IV-C-6 : Cordons de soudures [43].

IV.3.2 Localisation d'un joint soudé

En suivant les mêmes étapes utilisées pour localiser le défaut circulaire, on localise le joint soudé :

$$v_{gr} = 4375.65 \text{ m / s}$$

Pour $f = 1 \text{ MHz}$

Position, réelle, du défaut (cm)	Temps de transit (μs)	Position, expérimentale, du défaut (cm)
3.5	10.03	4.39
5.5	13.38	5.85
7.5	17.72	7.75
9.5	21.90	9.58
11.5	25.72	11.25

Tableau IV-C-1 : Localisation d'un joint soudé, comparaison entre la position réelle et expérimentale ($f = 1 \text{ MHz}$). La référence est l'écho de rétrodiffusion

$$v_{gr} = 5008.01 \text{ m/s}$$

Pour $f = 0.5 \text{ MHz}$

Position, réelle, du défaut (cm)	Temps de transit (μs)	Position, expérimentale, du défaut (cm)
4.5	10.48	5.25
6.5	13.40	6.72
8.5	17.04	8.53
10.5	21.26	10.64
12.5	25.31	12.67
14.5	27.94	13.99
16.5	32.08	16.07

Tableau IV-C-2 : Localisation d'un joint soudé, comparaison entre la position réelle et expérimentale ($f = 0.5 \text{ MHz}$). La référence est l'écho de rétrodiffusion

D'après les deux tableaux ci-dessus, les positions expérimentales et théoriques du joint soudé sont très proches.

La distance pour laquelle on peut détecter le joint soudé est supérieure à celle du cratère. Cela est dû au fait que la différence d'impédance entre le matériau du tube (acier) et le joint soudé (acier) est plus petite que celle existant entre le matériau du tube (acier) et le cratère (eau).

Si l'on compare les réponses fréquentielles (FFT) des échos obtenus lors de la réflexion du mode $L(0,2)$ par le bord et celles des échos réfléchis par le cratère de diamètre 4mm, et par le joint soudé, pour les deux fréquences : 1 MHz et 0.5 MHz, nous obtenons :

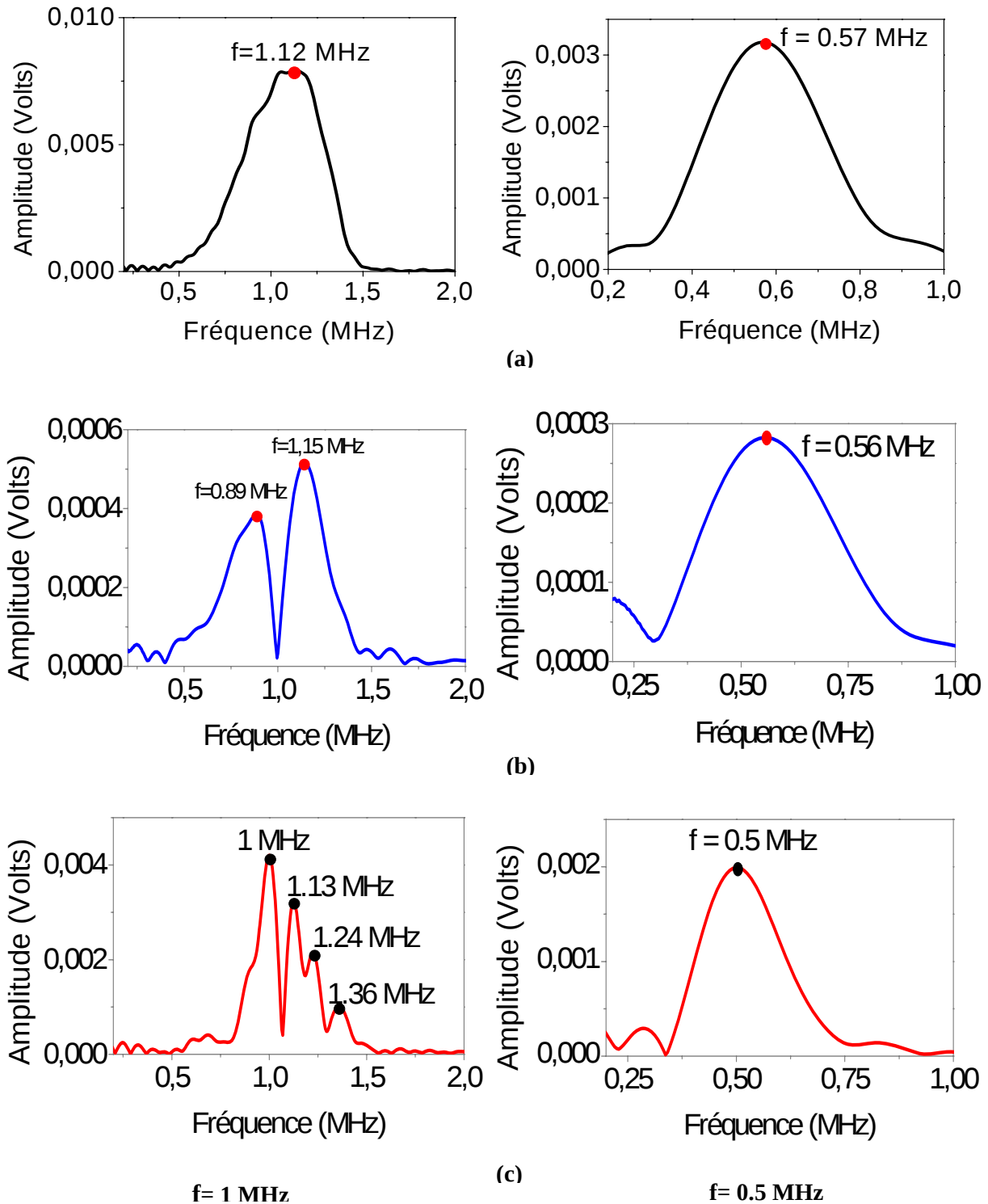


Figure IV-C-7 : Transformées de Fourier des signaux temporels, dus à la réflexion du mode généré par : a) le bord ; b) le défaut de 4mm de diamètre ; c) le joint soudé. La distance entre l'impact de rayon acoustique et les trois types de discontinuités est de 5 cm .

Pour $f = 0.5$ MHz, les trois réponses fréquentielles ont la forme d'une gaussienne avec un seul pic de fréquence égale à celle du mode $L(0,2)$ généré.

Pour $f = 1$ MHz, l'analyse fréquentielle de l'écho réfléchi par le cratère et celle de l'écho réfléchi par le joint soudé, montre la présence de plusieurs pics. Ces pics laissent à penser que les deux types de défauts induisent une conversion de mode : en effet, le mode symétrique $L(0,2)$, après réflexion sur ces défauts, revient accompagné d'autres modes, probablement des modes de flexion ($F(1,3)$, $F(2,3)$, $F(3,3)$). Ce phénomène de conversion de modes est observé pour $f = 1$ MHz et non pas pour $f = 0.5$ MHz car, la fréquence étant deux fois plus grande, la longueur d'onde devient deux fois plus petite (≈ 5 mm) et l'onde devient plus sensible au défaut et donc à sa non symétrie.

Conclusion

Le contrôle par ondes guidées est une nouvelle technique dans le monde du Contrôle Non Destructif. De ce fait, nous avons pour objectif d'utiliser ce type d'ondes pour détecter et localiser des défauts circulaires (cratères) et un joint soudé sur un tube d'acier.

Avant d'entreprendre le travail expérimental, il nous a fallu comprendre comment se comporte un tube lorsqu'il est soumis à une excitation, l'étude théorique nous a permis de mettre en évidence trois familles de modes susceptibles de se propager sur une telle structure : les modes de compression, de flexion et de torsion.

L'examen détaillé de ces différentes familles nous a permis de choisir un mode à générer : le mode L (0,2). Le mode L (0,2) a été généré par l'intermédiaire de deux transducteurs de fréquences 1 MHz et 0.5 MHz grâce à un générateur d'impulsion. Une série d'expériences a été réalisée, nous avons pu détecter et localiser deux types de défauts : des cratères et un joint soudé. La détection de défauts de faibles dimensions, devant la longueur d'onde, a été prouvée expérimentalement. Ce dernier point est un avantage très important lié aux ondes guidées.

Cependant, deux inconvénients : fréquence élevée et phénomène de dispersion ont fait que notre mode n'a pas pu se propager sur de longues distances (20cm dans un tube sain), ce problème ouvre de nouvelles perspectives de recherche:

Perspectives

Refaire les expériences en utilisant les basses fréquences et cela pour que le mode choisi puisse se propager sur de longues distances. Générer les ondes guidées par l'intermédiaire d'un transducteur à bande étroite en utilisant un générateur émettant des trains d'ondes, dans une région non dispersive. Simuler l'interaction de l'onde guidée avec les différents défauts et valider les prédictions numériques par des résultats expérimentaux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Raymond W. Tucker, Stephen W. Kercel, Venugopal K. Varma, “*Characterization of gas pipeline flaws using wavelet analysis*”, Proceedings of the Sixth International Conference on Quality control by Artificial Vision, Vol. 5132, pp 485-493 (2003).
- [2] Michael J. Quarry, “*A time delay comb transducer for guided wave mode tuning in piping*”, Ph. D. thesis, May 2000, the Pennsylvania State University.
- [3] Dongshan Guo, “*Pipe inspection by cylindrically guided waves*”, Ph. D. thesis, 2001, the University of Arizona .
- [4] James N. Barshinger, “*Guided wave propagation in pipes with viscoelastic coatings*”, Ph.D. thesis, August 2001, the Pennsylvania State University.
- [5] Rais Ahmed, “*Guided wave technique to detect defects in pipes using wavelet analysis*”, Ph.D. thesis, 2005, the University of Arizona.
- [6] Jian Li, “*Longitudinal flexural mode utility in quantitative guided Wave evaluation*”, Ph.D. thesis, August 2001, the Pennsylvania State University.
- [7] Thomas R. Hay, Joseph L. Rose, “*Fouling detection in the food industry using ultrasonic guided waves*”, Food Control, Vol.14, pp 481–488 (2003).
- [8] Joseph L.Rose, “*A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential*”, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.124, pp 273-282 (2002).
- [9] Kenneth R. Lohr, Joseph L. Rose, “*Ultrasonic guided wave and acoustic impact methods for pipe fouling detection*”, Journal of Food Engineering, Vol. 56, pp 315–324 (2003).
- [10] Hyeon Jae Shin, “*Non axisymmetric ultrasonic guided waves for tubing inspection*”, Ph.D thesis, 1997, the Pennsylvania State University.
- [11] Eugène Dieulesaint, Daniel Royer, “*Ondes élastiques dans les solides*”, Masson, Paris(1974).
- [12] Illustration issue du site Internet, “*Les ondes sismiques*”, Documents pédagogique, E.O.S.T Strasbourg, http://eost.u-strasbg.fr/fiche1/ondes_sismiques.fr.html.
- [13] Fernando Seco, José Miguel Martín, Antonio Jiménez, José Luis Pons, Leopoldo Calderón, Ramón Ceres, " *PCDISP: A Tool for the simulation of wave propagation in cylindrical waveguides*", Proceedings of the 9th International Congress on Sound and Vibration, (Orlando) Florida, july 2002.

- [14] Kevin Raymond Leonard, "*Ultrasonic guided wave tomography of pipes*", Ph. D. thesis, 2004, The College Of William and Mary in Virginia.
- [15] Zongqi Sun, "*Phased array focusing wave mechanics in tubular structures*", Ph. D. thesis, 1997, the Pennsylvania state university.
- [16] J. L. Rose, J. J. Ditri, A. Pilarski, K. Rajana and F. Carr, "*A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tubing*", NDT & E International, Vol. 27, pp 307-310 (1994).
- [17] D N Alleyne, P Cawley, "*the effect of discontinuities on the long range propagation of lamb waves in pipes*", ProQuest Science Journals, Vol. 210, pp 217-226 (1996).
- [18] D. N. Alleyne, B. Pavlakovic, M. J. S. Lowe, P. Cawley, "*Rapid Long range inspection of chemical plant pipework using guided waves*", Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 43, No. 2, pp 93-96 (2001).
- [19] W. Kohl Thomas, "*Ultrasonic guided waves in cylinders: Theory and experement*", Ph. D. thesis, 1993, University of Colorado (Boulder).
- [20] Peter Cawley, "*Structural Health Monitoring Using Guided Waves*", *Potential and Challenges*, 5th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, September 12-14, 2005.
- [21] Peter Cawley, David Alleyne, "*The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures*", Ultrasonics, Vol. 34, pp 287-290 (1996).
- [22] P. Wilcox, M. Lowe, P. Cawley, "*The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves*", NDT & E International, Vol. 34, pp 1-9 (2001).
- [23] Peter Cawley, David Alleyne, "*Practical Long Range Guided Wave Inspection - Managing Complexity*", Materials Evaluation, Vol. 9, No. 2, (2004).
- [24] A Lambert, Y. Pralus, J. Rivenez, "*Ultrasons- Propagation des ondes ultrasonores*", Niveau 2, Centre technique des industries mécaniques (1993).
- [25] Takashi Kuroishi, Nobuhiko Nishimura, Hirotoishi Matsumoto, Akira Shibashi, Fumitoshi Akata, Kiyotaka Aoki, "*Guided Wave Pipe Inspection and Monitoring System*", Technical Review, Vol. 42, No. 3, (2005).
- [26] Pochhammer, "*Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten Schwingungen in einem unbergrenzten isotropen Kreiscylinder*", Z. Math, Vol. 81, pp 324-336 (1874).

- [27] C. Chree, “ *On the Longitudinal Vibration of a Circular Bar*”, Q. J. Math, Vol. 21, pp 287-298 (1886).
- [28] Fernando Seco, “*PCDISP: A scientific software package for Generating Dispersion Curves*”, written in Matlab, available at <http://www.iai.csic.es/users/fseco/pcdisp.htm>.
- [29] Denos.C.Gaziz, “*Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders*”, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 31, pp 568-573 (1959).
- [30] Baofu Lu, “*On-line Structural Integrity Monitoring and Defect Diagnosis of Steam Generators Using Analysis of Guided Acoustic Waves*”, Ph. D. thesis, May 2005, The University of Tennessee, Knoxville.
- [31] C. Aristégui, M. J. S. Lowe, P. Cawley, “ *Guided waves in fluid-filled pipes surrounded by different fluids*”, Ultrasonics, Vol. 39, No. 5, pp 367-375 (2001).
- [32] Vinay Dayal, “*Longitudinal waves in homogeneous anisotropic cylindrical bars immersed in fluid* ”, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 93, No. 3, pp 1249-1255 (1993).
- [33] Li Yibo, Sun Liying, Song Zhidong, Zhang Yuankai, “ *Study on energy attenuation of ultrasonic guided waves going through girth welds*”, Ultrasonics, 2006.
- [34] M.J.S. Lowe, D.N. Alleyne, P. Cawley, “*Defect detection in pipes using guided waves*”, Ultrasonics, Vol. 36, No. 1-5, pp 147-154 (1998).
- [35] Takahiro Hayashi, “*Guided wave animation library*”, Nagoya Institute of Technology.
- [36] Emmanuel Le Clézio, “*Diffraction des ondes de Lamb par des fissures verticales*”, Thèse de Doctorat, 2001, Université Bordeaux I.
- [37] F. Patat, “*Phénomène de piézoélectricité*”, due/polys/basephysique/bp02.pdf.
- [38] Jean Perdijon, “*Le contrôle non destructif par ultrasons*”, Hermès, Paris (1993).
- [39] Illustration issue du site Internet, “*Transducer catalogue*”, P 17, <http://www.panametrics-ndt.com>.
- [40] M. Brissaud, “ *Les techniques ultrasonores*”, Cast : Contrôle non destructif par ultrasons, Niveau III.

[41] Michael Berke, “*Essai de matériaux non destructif avec des ultrasons - introduction aux principes de base*”, Vol. 5, No. 9, 2000.

[42] Guy Murry, “*Soudage et soudabilité métallurgique des métaux*”, Techniques de l’Ingénieur, traité matériaux métalliques, M 715-1.

[43] JAMES A. PENDER, “*Le soudage*”, Mac Graw Hill, (Montréal) 1977 .

Annexe 1

En coordonnées cylindriques :

$$\text{grad } f = \vec{\nabla} \cdot f = \left[\frac{\partial f}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta}, \frac{\partial f}{\partial z} \right]$$

$$\text{rot } V = \vec{\nabla} \wedge V = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} - \frac{\partial V_\theta}{\partial z}, \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial r}, \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r V_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right) \right]$$

$$\Delta f = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} f) = \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\Delta \vec{H} = \begin{pmatrix} \nabla^2 H_r - \frac{H_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} \\ \nabla^2 H_\theta - \frac{H_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \\ \nabla^2 H_z \end{pmatrix}$$

Les éléments C_{ij} de la matrice de l'équation (I-19) sont :

$$C_{11} = [2n(n-1) - (\beta^2 - k^2)a^2]Z_n(\alpha_1 a) + 2\lambda_1 \alpha_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$C_{12} = 2k\beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) - 2ka(n+1)Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$C_{13} = 2n(n-1)Z_n(\beta_1 a) - 2\lambda_2 n\beta_1 a Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$C_{14} = [2n(n-1) - (\beta^2 - k^2)a^2]W_n(\alpha_1 a) + 2\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$C_{15} = 2\lambda_2 k\beta_1 a^2 W_n(\beta_1 a) - 2(n+1)ka W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$C_{16} = 2n(n-1)W_n(\beta_1 a) - 2n\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$C_{21} = -2n(n-1)Z_n(\alpha_1 a) + 2\lambda_1 n\alpha_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$C_{22} = k\beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) - 2ka(n+1)Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$C_{23} = [-2n(n-1) + \beta^2 a^2]Z_n(\beta_1 a) - 2\lambda_2 \beta_1 a Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$C_{24} = -2n(n-1)W_n(\alpha_1 a) + 2n\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$C_{25} = \lambda_2 k\beta_1 a^2 W_n(\beta_1 a) - 2ka(n+1)W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$C_{26} = [-2n(n-1) + \beta^2 a^2]W_n(\beta_1 a) - 2\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$C_{31} = -2 n k a Z_n(\alpha_1 a) + 2 \lambda_1 k \alpha_1 a^2 Z_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$C_{32} = -n \beta_1 a Z_n(\beta_1 a) + (\beta^2 - k^2) a^2 Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$C_{33} = -n a k Z_n(\beta_1 a)$$

$$C_{34} = 2 n k a W_n(\alpha_1 a) - 2 k \alpha_1 a^2 W_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$C_{35} = -\lambda_2 n \beta_1 a W_n(\beta_1 a) + (\beta^2 - k^2) a^2 W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$C_{36} = -n a k W_n(\beta_1 a)$$

Les éléments restants de C_{41} jusqu'à C_{66} ont les mêmes expressions que celles de C_{11} jusqu'à C_{36} , sauf que le rayon (a) est remplacé par le rayon (b).

λ_1 et λ_2 sont des paramètres introduits pour faire la distinction entre les dérivées itératives des fonctions de Bessel.

$$Z_n'(\alpha_1 r) = \frac{n}{r} Z_n(\alpha_1 r) - \lambda_1 \alpha_1 Z_{n+1}(\alpha_1 r)$$

$$Z_n'(\beta_1 r) = \frac{n}{r} Z_n(\beta_1 r) - \lambda_2 \beta_1 Z_{n+1}(\beta_1 r)$$

$$W_n'(\alpha_1 r) = \frac{n}{r} W_n(\alpha_1 r) - \alpha_1 W_{n+1}(\alpha_1 r)$$

$$W_n'(\beta_1 r) = \frac{n}{r} W_n(\beta_1 r) - \beta_1 W_{n+1}(\beta_1 r)$$

$$Z_{n+1}'(\beta_1 r) = \beta_1 Z_n(\beta_1 r) - \frac{n+1}{r} Z_{n+1}(\beta_1 r)$$

$$W_{n+1}'(\beta_1 r) = \lambda_2 \beta_1 W_n(\beta_1 r) - \frac{n+1}{r} W_{n+1}(\beta_1 r)$$

$v_{ph} > v_L$	$v_L > v_{ph} > v_T$	$v_L > v_T > v_{ph}$
$\lambda_1 = 1$	$\lambda_1 = -1$	$\lambda_1 = -1$
$\lambda_2 = 1$	$\lambda_2 = 1$	$\lambda_2 = -1$

Annexe 2

Etude métallurgique d'un joint soudé

Dans la partie C, nous avons montré qu'effectivement, les ondes guidées étaient très sensibles à tout changement d'épaisseur causé par l'opération de soudage (surépaisseur). Les ondes guidées sont-elles sensibles aux transformations structurales (types de structures, tailles des grains, différentes zones du joint) ou sont-elles affectées seulement par le changement d'épaisseur ? La réponse à cette question ouvre un autre axe de recherche et par conséquent un autre sujet, mais cela ne nous a pas empêché de chercher à savoir ce qui se passe au niveau du joint soudé et quelles sont les transformations subies par le métal de base ?

La soudure se décompose en plusieurs zones :

- | | |
|---|----------------------------|
| 1) Le métal de base (MB) | 3) La zone fondue (ZF) |
| 2) La zone affectée thermiquement (ZAT) | 4) La zone de liaison (ZL) |

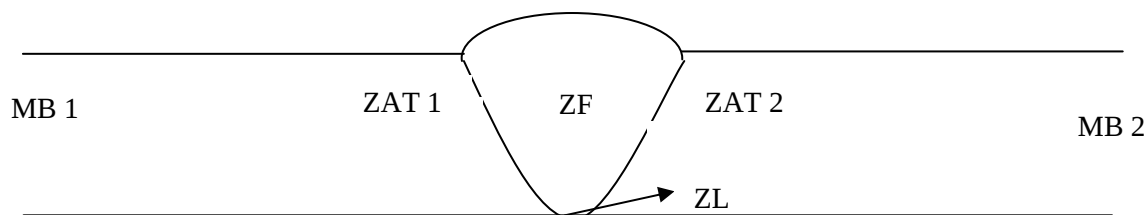


Figure 1 : Différentes zones d'un joint soudé.

Le joint soudé ainsi que les zones adjacentes, ont subi un polissage effectué avec une meule électrique et pneumatique. Pour ne pas détruire le tube, une réplique de ce joint soudé a été prise, une observation de ce joint soudé a ensuite été réalisée par microscopie optique.



Figure 2 : Prise d'une réplique au niveau d'un joint soudé.

L'observation la plus importante réalisée par le microscope optique est sur la taille des grains: la taille des grains augmente du métal de base vers le métal fondu, cette variation de la taille des grains est due au phénomène de *grossissement des grains* causé par les températures atteintes au cours du soudage. En effet, les grains ont grossi (ZAT) jusqu'à atteindre des dimensions importantes (zone fondu).

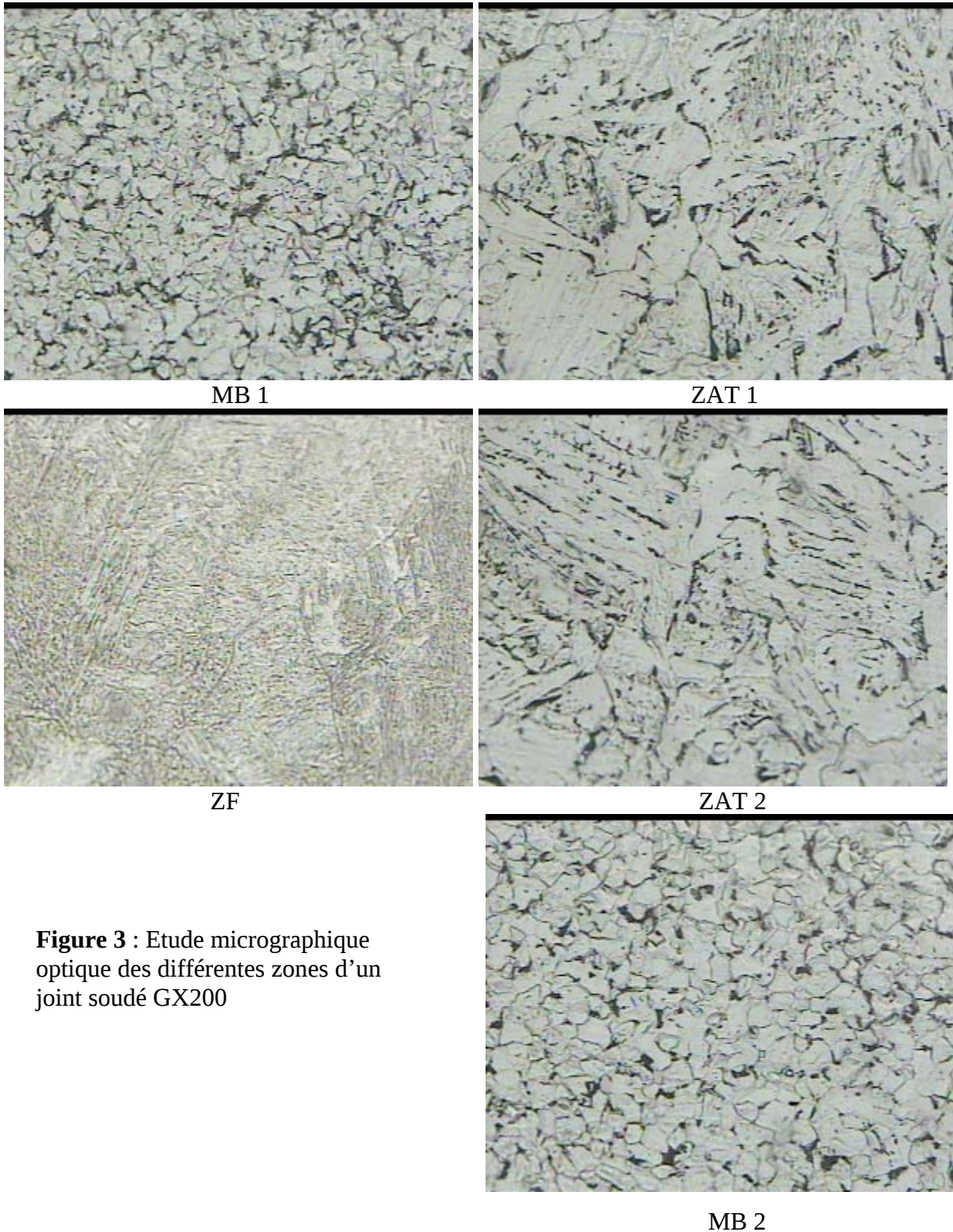


Figure 3 : Etude micrographique optique des différentes zones d'un joint soudé GX200

La figure 4 montre la frontière entre le métal de base et la zone affectée thermiquement d'un côté et celle de la zone affectée et le métal fondu de l'autre côté.



Interface MB-ZAT



Interface ZAT- ZF

Figure 4 : Etude micrographique optique des interfaces d'un joint soudé GX50