

Étude de la Propagation des Ondes Guidées Basse Fréquence  
au Travers de Joints de Recouvrement Soudés dans le Cadre  
d'Inspection de Réservoirs Industriels

par

Aubin CHABOTY

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE  
LA MAITRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE  
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 4 NOVEMBRE 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Aubin Chaboty, 2020



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Pierre Bélanger directeur de Mémoire  
Département de Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ricardo Zednik, président du jury  
Département de Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mohammad Jahazi, membre du jury  
Département de Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Dupont-Marillia, examinateur externe  
Nucléom Inc.

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 21 OCTOBRE 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de recherche le Professeur Pierre Bélanger pour ses conseils, son support et pour la confiance qu'il m'a accordée en me confiant ce projet. Merci pour ces deux années de maîtrise qui ont été excellentes au sein de ce fabuleux laboratoire qu'est le PULÉTS.

Ce projet a été rendu possible grâce à notre partenaire industriel Nucléom. Un grand merci à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ce projet et notamment à Frédéric Dupont-Marilla qui m'a suivi tout au long de ma recherche, et qui a toujours répondu présent lorsque des expériences au sein de l'entreprise étaient nécessaires. Merci également pour ton soutien tout au long de ces deux années.

Un grand merci à tous les membres ou anciens membres du PULÉTS sans qui ce travail n'aurait pu se dérouler dans d'aussi chaleureuses et conviviales conditions. Merci à Baptiste Gauthier, Aurélien Thon, Nicolas Tremblay (12), Sévan Bouchy, Thibault Lattete, Damien Cuic-Aime, Geoffrey Veit, Arthur Chapon, Guillaume Boivin, Anthony Moulins et Victor Cerda-Carvajal pour l'aide et le soutien aussi bien technique que moral. J'ai passé d'incroyables moments avec vous.

Ces deux années n'auraient pas été aussi folles sans mes très chers amis Romain, Salomé, Thomas, Victor et Rémi. Je vous remercie pour tous ces weekends et soirées mémorables, ces moments de partage et de soutien tout au long de cette aventure.

Pour finir, je tiens à remercier ma famille qui m'a soutenu dans mon choix de partir au Canada, et malgré la distance qui a toujours réussi à être présente pour me soutenir dans les bons comme dans les mauvais moments.



# Étude de la Propagation des Ondes Guidées Basse Fréquence au Travers de Joints de Recouvrement Soudés dans le Cadre d'Inspection de Réservoirs Industriels

Aubin CHABOTY

## RÉSUMÉ

Les grands réservoirs de stockage sont très largement utilisés dans l'industrie pétrolière. L'épaisseur des planchers de ces réservoirs est cartographiée périodiquement lors d'interruption de service. La méthode d'inspection actuelle commence avec un scan du plancher par fuite de flux magnétique. L'épaisseur des points critiques identifiés à l'aide du criblage est ensuite contrôlée par ultrasons. Cette méthode d'inspection nécessite qu'un inspecteur scanne l'intégralité du plancher en se trouvant à l'intérieur de la cuve. Le réservoir de stockage doit donc être vidé et nettoyé avant de procéder à l'inspection. Il y a donc une forte demande pour examiner le fond du réservoir à partir du périmètre extérieur et d'identifier les cuves qui nécessitent une inspection ou une réparation plus poussée. Les ondes guidées ultrasonores basse fréquence sont aujourd'hui couramment utilisées pour cartographier de longues sections de pipelines. En dessous de la première fréquence de coupure des modes d'onde d'ordre élevé, les ondes guidées ont la capacité de se propager sur de longue distance avec une atténuation minimale. Cependant, il existe plusieurs sources d'atténuation dans les planchers de réservoirs : (1) le contact avec le fluide stocké dans la cuve, (2) le contact avec le sol sur lequel repose le plancher et (3) l'assemblage du plancher. En effet, les fonds de réservoir sont généralement constitués de plusieurs plaques d'acier soudées entre elles par chevauchement. Dans les plus grands réservoirs, une ligne de plaques peut compter jusqu'à 15 joints de recouvrement soudés. Il est donc primordial de minimiser la perte d'amplitude des ondes guidées à chaque joint. Dans ce mémoire, la perte d'amplitude induite par les joints de recouvrements soudés est étudiée pour le mode fondamental de cisaillement horizontal ( $SH_0$ ) et le mode fondamental d'onde de Lamb symétrique ( $S_0$ ). Le mode fondamental d'onde de Lamb antisymétrique ( $A_0$ ) a été rejeté en raison de sa forte atténuation en présence d'un fluide. La propagation des modes  $SH_0$  et  $S_0$  dans des plaques d'acier de 12.7 mm d'épaisseur soudées entre elles par un joint de recouvrement a été étudiée à l'aide de simulation par éléments finis et d'expériences. Il apparaît que le mode  $SH_0$  peut être jusqu'à 6 dB moins atténué que le mode  $S_0$ . Par conséquent, une sélection minutieuse du mode et de la fréquence peut permettre une propagation de l'onde sur une longue distance et donc un scan du plancher à l'aide d'ondes guidées ultrasonores.

**Mots clés :** Ondes Guidées, Modes Fondamentaux, Réservoirs de stockage Industriels, Joints de recouvrement soudés.





# **Study of the Propagation of Low Frequency Guided Waves through Welded Lap Joints in the Inspection of Industrial Tanks**

Aubin CHABOTY

## **ABSTRACT**

Large storage tanks are heavily used to hold liquid in the petrochemical industry. The thickness mapping of the storage tank floor is carried out periodically during out-of-service inspection. The current inspection method begins with a screening of the whole floor using magnetic flux leakage. The thickness of the hot spots identified during screening is then gauged using ultrasonic testing. The current method requires an inspector to scan the whole floor from inside the tank. The storage tank must therefore be empty and the floor needs to be cleaned ahead of the inspection. There is therefore a need to screen storage tank bottom from the annular chime and identify the tanks requiring further inspection or repair. Low frequency ultrasonic guided waves are nowadays routinely used to screen long sections of pipelines. Under the cutoff frequency of the first high order mode, ultrasonic guided waves have the ability to propagate over long distances with minimal attenuation. However, multiple sources of attenuation are present in tank bottoms: (1) contact with fluid inside the tank, (2) contact with soil outside the tank and (3) the floor assembly. Indeed, the floors of the storage tanks are typically constructed using many overlapping welded steel plates. In the largest storage tanks, a line across the diameter may go through up to 15 welded joints. Minimisation of the ultrasonic guided wave amplitude loss at each joint is therefore paramount. In this paper, the amplitude loss through welded lap joints is studied for the fundamental shear horizontal mode ( $SH_0$ ) and the fundamental symmetric Lamb wave mode ( $S_0$ ). The antisymmetric fundamental mode ( $A_0$ ) was rejected as a result of its high attenuation due to fluid loading. Using finite element simulations and experiments the propagation of  $SH_0$  and  $S_0$  was studied in 12.7 mm steel plates welded in a lap joint configuration. The  $SH_0$  mode can be up to 6 dB less attenuated than the  $S_0$  mode. Therefore, careful selection of the mode and frequency may result in long propagation distances and may enable screening of the floors using ultrasonic guided waves.

**Keywords:** Guided waves, Fundamental modes, Industrial storage tanks, Welded lap joints.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
1.1 Principes fondamentaux des ondes ultrasonores.....	3
1.1.1 Propagation des ondes ultrasonores conventionnelles.....	3
1.1.1.1 Formulation des équations de propagation .....	5
1.1.1.2 Atténuation des ondes .....	7
1.1.1.3 Réflexion aux interfaces .....	8
1.1.2 Propagation des ondes guidées .....	9
1.1.2.1 Les ondes de cisaillement horizontal (SH) .....	9
1.1.2.2 Les ondes de Lamb .....	14
1.2 Génération des ondes guidées ultrasonores .....	17
1.2.1 Les transducteurs piézoélectriques .....	17
1.2.2 Les transducteurs électromagnétiques-acoustiques .....	20
1.2.2.1 Les transducteurs magnétostrictifs.....	20
1.2.2.2 Les transducteurs à force de Lorentz .....	22
1.3 Application des ondes guidées dans l'industrie .....	22
1.3.1 Inspection des pipelines par ondes guidées .....	23
1.3.2 Inspection HOMC.....	24
1.4 Mécanismes de bris de cuves.....	24
1.4.1 Causes environnementales .....	24
1.4.2 Défauts de fabrication.....	25
1.5 Contrôle des joints de recouvrement.....	25
1.5.1 Inspection des joints de recouvrement adhésifs.....	25
1.5.2 Inspection des joints de recouvrement brasés.....	26
1.5.3 Inspection des joints soudés.....	26
1.5.4 Conclusion sur les inspections de joints .....	27
CHAPITRE 2 MODÈLE DE SIMULATION PAR ÉLÉMENTS FINIS.....	31
2.1 Paramètres de simulation .....	32
2.1.1 Type d'éléments utilisés .....	32
2.1.2 Incréments de temps .....	33
2.2 Simulations 3D.....	33
2.2.1 Modèle de simulation.....	34
2.2.1.1 Caractéristiques du modèle de simulation .....	34
2.2.1.2 Protocole de mesure.....	36
2.2.2 Résultats de simulation .....	38
2.2.2.1 Atténuation des modes en présence d'un liquide.....	38
2.2.2.2 Influence du joint en incidence normale.....	39
2.2.2.3 Influence du joint en incidence oblique.....	46
2.3 Conclusions des résultats obtenus par simulation.....	48

CHAPITRE 3	VALIDATION EXPÉRIMENTALE.....	49
3.1	Conception des transducteurs unidirectionnels.....	49
3.1.1	Sondes piézoélectriques.....	49
3.1.1.1	Céramique piézoélectrique utilisée.....	50
3.1.1.2	Réalisation des transducteurs piézoélectriques.....	52
3.1.2	Fabrication de la sonde magnétostrictive.....	56
3.2	Dispositif expérimental et expérimentations.....	59
3.2.1	Présentation du dispositif expérimental.....	60
3.2.2	Protocole expérimental.....	62
3.2.3	Résultats expérimentaux.....	64
3.3	Conclusion sur les résultats expérimentaux.....	70
	CONCLUSION.....	71
	RECOMMANDATIONS.....	73
	BIBLIOGRAPHIE.....	75

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Résumé des articles sur l'inspection des joints de recouvrement par ultrasons .....28
Tableau 2.1	Nombre d'éléments par longueur d'onde pour une plaque d'acier de 12.7 mm d'épaisseur, pour des fréquences allant de 50 kHz à 120 kHz. ...32
Tableau 2.2	Valeurs d'atténuation provoquée par l'eau et le pétrole pour les modes $A_0$ et $S_0$ .....39
Tableau 3.1	Dimensions des céramiques piézoélectriques pour la génération d'ondes guidées unidirectionnelles.....51
Tableau 3.2	Différences d'amplitude entre les différentes séries de mesure, moyenne et écart type pour chaque fréquence étudiée .....66



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Déformation liée à la propagation d'une onde dans un milieu homogène isotrope : (a) onde longitudinale (L), (b) onde de cisaillement verticale (SV), (c) onde de cisaillement horizontale (SH).....4
Figure 1.2	Interaction d'une onde à l'interface de deux milieux.....8
Figure 1.3	Propagation d'une onde guidée SH suivant la direction $x$ dans une plaque d'épaisseur $b$ .....10
Figure 1.4	Courbes de dispersion en vitesses de phase (a) et de groupe (b) des modes SH dans une plaque d'acier d'épaisseur 12.7 mm ( $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$ , $E = 210 \text{ GPa}$ , $\nu = 0.33$ ) en fonction de la fréquence .....13
Figure 1.5	Propagation d'une onde de Lamb avec la conversion de modes des ondes P (bleu) et SV (vert).....14
Figure 1.6	Courbes de dispersion en vitesses de phase (a) et de groupe (b) des modes d'ondes de Lamb dans une plaque d'acier d'épaisseur 12.7 mm ( $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$ , $E = 210 \text{ GPa}$ , $\nu = 0.33$ ) en fonction de la fréquence .....16
Figure 1.7	Types de déformations des céramiques piézoélectriques : (a) déformation dans l'épaisseur, (b) déformation dans la longueur, (c) cisaillement dans l'épaisseur.....18
Figure 1.8	Système de coordonnées pour une céramique piézoélectrique.....18
Figure 1.9	Schéma d'un transducteur piézoélectrique .....20
Figure 1.10	Schéma de principe d'un transducteur magnétostrictif .....21
Figure 1.11	Liaison de deux plaques par (a) joint soudé et (b) joint adhésif ou brasé..27
Figure 2.1	Schéma d'un plancher de réservoir industriel formé de plaques d'acier rectangulaires soudées .....34
Figure 2.2	Dimensions du modèle par éléments finis .....35
Figure 2.3	Signal d'excitation de 5cycles centré à 50 kHz avec fenêtre de Hann.....36

Figure 2.4	Disposition des points d'émission et de réception pour le modèle de simulation.....	37
Figure 2.5	Courbes d'atténuation des modes $A_0$ et $S_0$ dans de plaques d'acier submergées par (a) de l'eau et (b) du pétrole .....	38
Figure 2.6	Transformée de Fourier 2D des signaux obtenus par simulation. (a) FFT2D de $S_0$ en amont du joint et (b) en aval du joint, (c) FFT2D de $SH_0$ en amont du joint et (d) en aval du joint.....	40
Figure 2.7	Atténuation du joint mesurée par FFT2D réalisée sur la surface de la plaque pour les modes $S_0$ et $SH_0$ .....	41
Figure 2.8	Formes des signaux obtenus par simulation et leur transformée de Fourier associée. (a) Signaux du mode $S_0$ reçu en amont et en aval du joint à 90 kHz et (b) leur FFT associée. (c) Signaux du mode $SH_0$ reçu en amont et en aval du joint à 90 kHz et (d) leur FFT associée.....	42
Figure 2.9	Atténuation du joint mesurée par FFT en surface pour les modes $S_0$ et $SH_0$ .....	43
Figure 2.10	Forme du mode d'onde $S_0$ pour une plaque d'acier de 12.7 mm d'épaisseur. Obtenu avec DISPERSE (Pavlakovic et al., 1997) .....	44
Figure 2.11	Comparaison des résultats obtenus par FFT2D réalisées en surface et par FFT avec des points de mesure dans le plan médian pour (a) $S_0$ et (b) $SH_0$ .....	45
Figure 2.12	Disposition des points d'émission et de réception pour le modèle de simulation à incidences obliques .....	46
Figure 2.13	Comparaison des résultats obtenus par FFT des signaux reçus sur des points de mesures dans le plan médian pour différents angles d'incidence. (a) Résultats obtenus pour $S_0$ et (b) Résultats obtenus pour $SH_0$ .....	47
Figure 3.1	Géométrie de la céramique piézoélectrique PZT-5H.....	50
Figure 3.2	Schéma de coupe du matériau piézocéramique PZT-5H.....	52
Figure 3.3	Dimensions des boîtiers ABS et composants des transducteurs piézoélectriques. (a) Dimensions du boîtier $S_0$ centré à 100 kHz, (b) Dimensions du boîtier $SH_0$ centré à 90 kHz, (c) Vue éclatée du transducteur $S_0$ , (d) Vue éclatée du transducteur $SH_0$ .....	53
Figure 3.4	Photographie des transducteurs fabriqués. (a) Transducteur $SH_0$ vu de dessous, (b) Transducteur $S_0$ vu de face .....	54



Figure 3.5	Schéma de mesure des directivités et modèles de directivité des transducteurs (a) $S_0$ à 100 kHz et (b) $SH_0$ à 90 kHz.....	55
Figure 3.6	(a) Sélectivité en nombre d'onde de la sonde magnétostrictive, (b) Contenu fréquentiel pour une fréquence centrale de fonctionnement de 90 kHz, (c) Plage de fonctionnement du transducteur magnétostrictif dans le plan fréquence - vitesse de phase.....	59
Figure 3.7	Photographie du transducteur Magnétostrictif $SH_0$ centré à 90 kHz.....	58
Figure 3.8	Comparaison des modèles de directivité pour (a) le transducteur Magnétostrictif $SH_0$ 90 kHz et (b) le transducteur Piézoélectrique $SH_0$ 90 kHz .....	59
Figure 3.9	(a) Schéma du dispositif expérimental et (b) Photographie du dispositif..	61
Figure 3.10	Communications entre les différents dispositifs utilisés pour les mesures expérimentales .....	62
Figure 3.11	Schéma et photographie de la disposition des sondes sur le dispositif expérimental.....	63
Figure 3.12	Protocole de mesures suivi pour les expérimentations .....	64
Figure 3.12	Exemple de mesure de répétabilité pour un signal à 90 kHz.....	65
Figure 3.14	Comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus par simulation pour chaque mode et sonde utilisés : (a) sonde piézoélectrique $S_0$ , (b) sonde piézoélectrique $SH_0$ , (c) sonde magnétostrictive $SH_0$ .....	67
Figure 3.15	Comparaison des émissions du mode $SH_0$ à 90 kHz : (a) Sonde Piézoélectrique avant le joint, (b) Sonde Piézoélectrique après le joint, (c) Sonde Magnétostrictive avant le joint, (d) sonde magnétostrictive après le joint .....	69



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

ABS	Polymère d'Acrylonitrile Butadiène Styrène
API	Institut Américain du Pétrole (American Petroleum Institute)
CND	Contrôle Non Destructif
EMAT	Transducteur Électromagnétique Acoustique
FFT	Transformée de Fourier
FFT2D	Transformée de Fourier Spatiale
HOMC	Higher Order Modes Clusters
PZT	Céramique Titano Zirconate de Plomb
SH	Cisaillement Horizontal (Shear-horizontal)
SNR	Rapport signal sur bruit (Signal to Noise Ratio)
SV	Cisaillement Vertical (Shear-vertical)
1D	Une dimension
2D	Deux dimensions
3D	Trois Dimensions



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$E$	Module d'Young
$\nu$	Coefficient de Poisson
$\rho$	Masse volumique
$\lambda$	Premier coefficient de Lamé
$\mu$	Second coefficient de Lamé
$f$	Fréquence
$T$	Période
$k$	Nombre d'onde
$c_L$	Vitesse de l'onde longitudinale
$c_s$	Vitesse de l'onde de cisaillement
$c_{i,r}$	Vitesse de l'onde incidente ou réfléchie
$\omega$	Vitesse angulaire
$\phi$	Potentiel scalaire
$\Psi$	Potentiel vectoriel
$\Delta e$	Variation d'épaisseur de la céramique piézoélectrique
$\Delta L$	Variation de longueur de la céramique piézoélectrique
$\Delta \theta$	Variation angulaire de la céramique piézoélectrique
$\alpha$	Coefficient d'atténuation du matériau
$\theta_{i,r}$	Angle d'incidence ou angle réfléchi
$Z_0$	Impédance acoustique optimale de la plaque de couplage
$Z_c$	Impédance acoustique de la céramique
$Z_m$	Impédance acoustique du matériau

$f_M$	Force de magnétostriction
$\mu_0$	Perméabilité
H	Champ magnétique
M	Magnétisation
$\Delta l$	Longueur de la zone de recouvrement des joints soudés
$\alpha_{S_0}$	Atténuation de l'énergie du mode $S_0$ induite par un joint soudé
dx	Taille nominale des éléments finis
$\Delta t$	Incrément de temps des simulations
$\Delta t_{cr}$	Incrément de temps critique
m	metre
Pa	Pascal
s	Seconde
dB	Décibel
g	Gramme
Hz	Hertz

## INTRODUCTION

L'industrie pétrochimique utilise un nombre considérable de réservoir afin de stocker une importante quantité d'hydrocarbure. La corrosion présente dans les planchers de ces cuves représente un risque important pour l'environnement si des produits chimiques s'en échappent. Il est donc primordial de tester l'intégrité structurelle de ces planchers afin d'assurer un haut niveau de sécurité et si nécessaire de procéder à une maintenance sur les réservoirs. Il existe différentes méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) déjà utilisées par l'industrie pétrochimique comme la radiographie, l'émission acoustique, ou encore les ultrasons. Cependant, dans la plupart des cas, ces techniques nécessitent que le réservoir soit vidé de son contenu, nettoyé et rendu sécuritaire pour une intervention humaine. Toutes ces opérations entraînent des coûts financiers importants.

Au vu de ces contraintes, il est nécessaire d'utiliser une méthode de CND permettant une inspection du réservoir à partir de son périmètre extérieur. La technique d'inspection par ondes guidées ultrasonores est couramment utilisée dans le cas d'inspection sur de longues distances, jusqu'à près de 50 m (Lowe, Alleyne, & Cawley, 1998). Son efficacité fut démontrée notamment dans le contrôle des pipelines. Les ondes guidées sont principalement utilisées pour la détection de défauts comme des fissures ou des discontinuités dans les structures. La réflexion de l'onde sur l'irrégularité permet d'en déterminer la forme et la position. Dans le cas de la corrosion, la réflexion peut ne pas être suffisante (comme pour la corrosion lamellée par exemple) et l'onde transmise est analysée. La présence d'un tel défaut sera donc avérée par une atténuation plus importante de l'énergie de l'onde traversant le plancher du réservoir. Il peut ainsi être possible de quantifier la sévérité de la corrosion à travers la zone inspectée.

La corrosion n'est cependant pas le seul phénomène amenant à une atténuation de l'onde. D'autres mécanismes tels que la température, les contraintes appliquées sur la structure, ou encore les caractéristiques de construction comme les soudures peuvent avoir un impact sur la propagation des ondes guidées et donc leur plage d'inspection. Pour ce qui est des planchers

de réservoirs, l'atténuation des ondes provient principalement des soudures ainsi que du contenu des cuves.

## **OBJECTIFS**

Ce projet a pour objectif d'étudier l'interaction entre les différents modes d'ondes guidées ultrasonores et les soudures des planchers de réservoirs afin de sélectionner le mode et la fréquence de travail la plus appropriée pour le contrôle des cuves par leur périmètre extérieur sans occasionner d'interruption de service. En effet, ces soudures sont le caractère limitant pour la propagation des ondes au travers du réservoir puisque leur présence implique une variation dans la géométrie de la plaque, ce qui va réfléchir en partie l'onde ultrasonore et donc réduire sa distance de propagation. Pour répondre à cet objectif, une revue de la littérature concernant les ondes guidées et leurs utilisations sera présentée. Un modèle de simulation sera créé dans le but de simuler la propagation des ondes guidées au travers d'un joint. Les méthodes d'émission et de réception les plus adéquates seront choisies afin de répondre au mieux aux besoins de l'étude. Une validation expérimentale, comprenant la réalisation d'un dispositif expérimental ainsi que la fabrication de sondes ultrasonores spécifiques, sera menée afin de valider le modèle de simulation et les résultats obtenus.



# CHAPITRE 1

## REVUE DE LA LITTÉRATURE

### 1.1 Principes fondamentaux des ondes ultrasonores

Afin de pouvoir déterminer la présence de corrosion au sein d'une structure en utilisant des ondes guidées, il est dans un premier temps nécessaire de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu lors d'inspections ultrasonores.

Les ondes ultrasonores sont des ondes mécaniques se propageant dans un milieu à des fréquences supérieures à 20 kHz, c'est-à-dire au-delà de la fréquence limite audible par l'homme. Ces ondes sont étudiées depuis près d'un siècle et de nombreux livres détaillent précisément la théorie qui les soutient (Royer et Dieulesaint, 1996 ; Cheeke, 2012 ; Rose, 2014). Il existe différents types d'ondes ultrasonores. Les trois principales sont : les ondes de volume, les ondes de surface (connus sous le nom d'ondes de Rayleigh), et les ondes guidées.

#### 1.1.1 Propagation des ondes ultrasonores conventionnelles

Les ondes ultrasonores de volumes proviennent de la propagation d'une perturbation dans un milieu infini ou semi-infini. En étudiant le déplacement des particules de ce milieu lors de l'application d'une perturbation localisée, il est possible de distinguer deux modes de propagation. Si le déplacement des particules se fait dans le même sens que la direction de propagation, il s'agit alors d'ondes longitudinales (L). Avec un déplacement des particules perpendiculaire à la direction de propagation, il s'agit d'ondes de cisaillement qui se distinguent en deux sous-classes : les ondes de cisaillement verticales (SV) et les ondes de cisaillement horizontales (SH). Ces trois formes d'ondes sont détaillées sur la Figure 1.1.

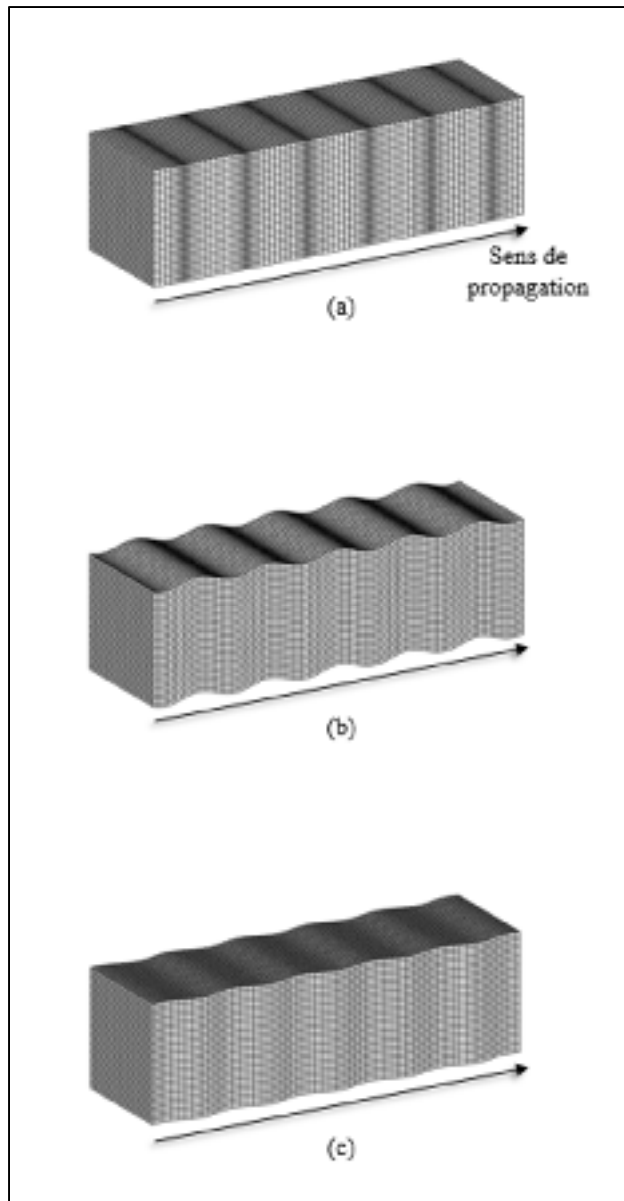


Figure 1.1 Déformation liée à la propagation d'une onde dans un milieu homogène isotrope : (a) onde longitudinale (L), (b) onde de cisaillement verticale (SV), (c) onde de cisaillement horizontale (SH)

### 1.1.1.1 Formulation des équations de propagation

L'équation d'onde a été pour la première fois formulée par d'Alembert au cours du 18e siècle dans le cas d'une propagation dans un espace à une dimension (1D) :

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

Où  $u$  représente le déplacement en fonction de la position  $x$  et du temps  $t$ , et  $c$  la vitesse de l'onde dans le milieu. La solution générale de cette équation peut s'écrire de la manière suivante :

$$u(x, t) = F\left(t - \frac{x}{c}\right) + G\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (1.2)$$

$F$  et  $G$  sont des fonctions arbitraires représentant respectivement la propagation de l'onde dans le sens des  $x$  positifs et la propagation dans le sens des  $x$  négatifs. Dans le cas d'une perturbation sinusoïdale, la solution sera de la forme :

$$u(x, t) = A \cos(\omega t - kx) \quad (1.3)$$

On distingue ainsi la vitesse angulaire  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  de période  $T$  et le nombre d'onde  $k = \frac{\omega}{T} = \frac{1}{\lambda_{wl}}$  avec  $\lambda_{wl}$  la longueur d'onde de la perturbation.  $A$  représente l'amplitude.

La formulation 3D de l'équation de propagation dans un milieu homogène isotrope est régie par l'équation de Navier :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (1.4)$$

Avec  $\rho$  la densité du milieu,  $\lambda$  et  $\mu$  les coefficients de Lamé qui peuvent être exprimés en fonction du module d'Young et du coefficient de Poisson du milieu :

$$\begin{cases} E = \mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \\ \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \end{cases} \quad (1.5)$$

En utilisant la décomposition de Helmholtz, il est possible d'exprimer  $\vec{u}$  comme la somme d'un potentiel scalaire  $\phi$  et d'un potentiel vecteur  $\vec{\Psi}$  :

$$\vec{u} = \vec{\nabla}\phi + \vec{\nabla} \times \vec{\Psi} = \vec{u}_L + \vec{u}_T \quad (1.6)$$

Le vecteur  $\vec{u}$  se décompose donc en un vecteur à divergence nulle  $\vec{u}_T$  et un vecteur irrotationnel  $\vec{u}_L$ . En combinant les équations (1.4) et (1.6), il est possible d'isoler la partie scalaire représentant le mouvement longitudinal (1.7) et la partie vectorielle du mouvement de cisaillement (1.8) :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - c_L^2 \nabla^2 \phi = 0 \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} - c_S^2 \nabla^2 \Psi = 0 \quad (1.8)$$

Il est ainsi possible d'exprimer la vitesse de l'onde longitudinale  $c_L$  et la vitesse de l'onde de cisaillement  $c_S$  :

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.9)$$

Il existe donc uniquement deux types d'ondes se propageant indépendamment dans un milieu infini ou semi-infini, homogène et isotrope : les ondes longitudinales (L) et les ondes de cisaillement (S). Comme dans le cas 1D, les réponses harmoniques des équations (1.7) et (1.8) prennent la forme :

$$\phi, \Psi = A e^{i(\omega t - k_{L,S}x)} \quad (1.10)$$

$$k_{L,S} = \frac{\omega}{c_{L,S}} \quad (1.11)$$

Avec  $A$  l'amplitude, et  $k_{L,S}$  le nombre d'onde longitudinal ou de cisaillement.

### 1.1.1.2 Atténuation des ondes

Lorsqu'une onde se propage dans un milieu, l'énergie qu'elle transporte décroît avec la distance parcourue. Ce phénomène se nomme l'atténuation. L'amplitude de l'onde s'exprime de la manière suivante :

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (1.12)$$

Où  $A_0$  représente l'amplitude initiale de l'onde,  $x$  la distance et  $\alpha$  le coefficient d'atténuation du milieu. Ce dernier varie en fonction de plusieurs phénomènes : la diffraction qui est une perte d'amplitude due au phénomène de diffraction; la diffusion qui elle est une perte due aux réflexions dans plusieurs directions en présence d'un obstacle et l'absorption qui est-elle liée aux pertes par effet Joule. Tous ces phénomènes sont dépendants du milieu considéré. Dans le cas d'une soudure, le phénomène prédominant est l'absorption du fait du changement de matériau, ce qui engendrera une atténuation plus importante de l'onde. À noter également que les propriétés d'excitations comme la fréquence influent elles aussi sur l'atténuation de l'onde. L'impact de tous ces phénomènes est très bien détaillé dans la littérature (Cheeke, 2012).

### 1.1.1.3 Réflexion aux interfaces

Lors de leur propagation, les ondes sont amenées à rencontrer des frontières entre différents milieux. Dépendamment du type de milieu et de l'angle d'incidence, une partie de l'onde est réfléchiée et une partie est réfractée. Ces interactions sont régies par la loi de Snell-Descartes.

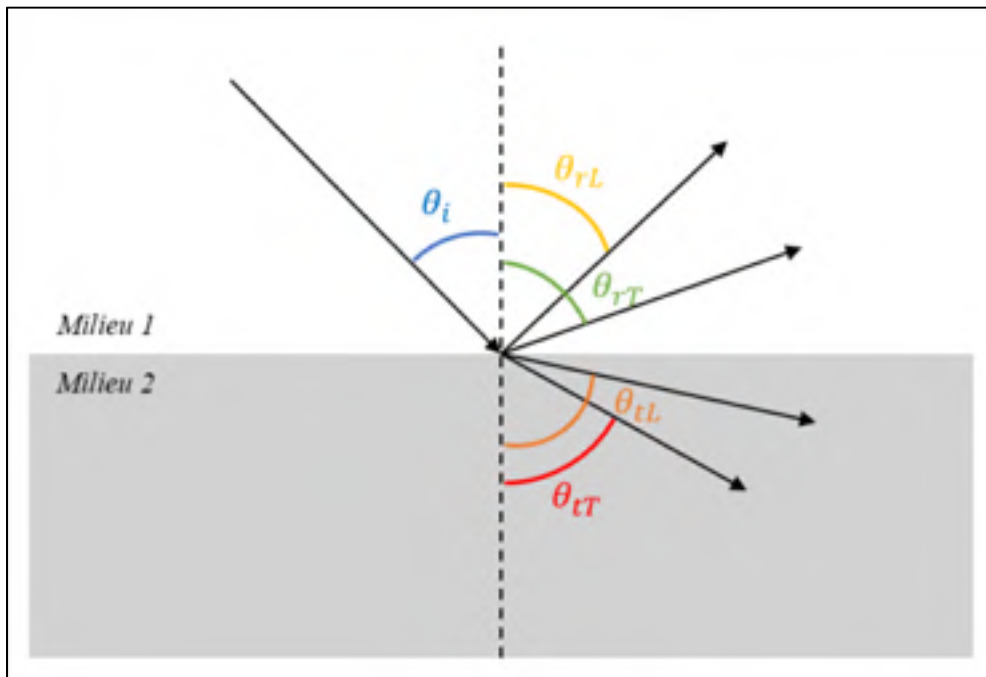


Figure 1.2 Interaction d'une onde à l'interface de deux milieux

Dans le cas d'une frontière entre deux solides, une onde à incidence oblique se divisera en une onde transversale et une onde longitudinale, qu'elles soient réfléchies ou transmises. La loi de Snell-Descartes donne :

$$\frac{\sin \theta_i}{c_i} = \frac{\sin \theta_{rL}}{c_{rL}} = \frac{\sin \theta_{rT}}{c_{rT}} \quad (1.13)$$

$$\frac{\sin \theta_i}{c_i} = \frac{\sin \theta_{tL}}{c_{tL}} = \frac{\sin \theta_{tT}}{c_{tT}} \quad (1.14)$$

Avec  $\theta_i, \theta_{rL}, \theta_{rT}, \theta_{tL}, \theta_{tT}$  les angles respectifs de l'onde incidente, longitudinale réfléchie, transversale réfléchie, longitudinale transmise et transversale transmise.  $c_i, c_{rL}, c_{rT}, c_{tL}$  et  $c_{tT}$  sont les vitesses respectives de ces ondes. Dans le cas d'une frontière solide-vide, aucune onde n'est transmise, il y a réflexion totale. En fonction des propriétés des milieux, l'énergie de l'onde incidente est répartie entre l'onde réfléchie et l'onde transmise. Les coefficients de réflexion (R) et de transmission (T) sont donc définis à partir de l'impédance acoustique des deux milieux. Dans le cas d'une incidence normale, ils s'expriment de la manière suivante :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad T = \sqrt{1 - R^2} \quad (1.15)$$

Avec  $Z_n = \rho_n \cdot c_n$  l'impédance acoustique des milieux.

## 1.1.2 Propagation des ondes guidées

Dans la réalité, il n'existe pas de structure solide infinie ou semi-infinie. Les ondes ultrasonores évoluent donc dans un milieu borné. Lorsque la géométrie dans laquelle évolue l'onde se rapproche d'une plaque mince, l'équation de propagation vue précédemment ne peut plus être appliquée dans sa forme actuelle. On observe l'apparition de modes d'ondes guidées ultrasonores. Deux modes peuvent ainsi se propager : les ondes de Lamb, et les ondes SH (Cheeke, 2012 ; Rose, 2014).

### 1.1.2.1 Les ondes de cisaillement horizontal (SH)

Les ondes de cisaillement horizontales proviennent de la réflexion des ondes de volumes SH se propageant selon la direction  $x$  sur les parois d'une plaque d'épaisseur  $b$  (Figure 1.3). Du fait que les modes d'ondes guidées SH aient une polarisation uniquement horizontale ( $z$ ) et qu'ils soient découplés des modes SV et L (qui se propagent dans le plan  $xy$ ), il n'y a pas de conversion de modes ce qui en fait le cas le plus simple des ondes guidées.

Il est possible d'obtenir simplement les équations de propagation des ondes guidées SH d'après les travaux de Cheeke (2012). Cette méthode consiste dans un premier temps à décomposer le nombre d'onde en une somme de trois nombres d'ondes dans le plan  $(x, y, z)$  :

$$k_S^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{c_S^2} \quad (1.16)$$

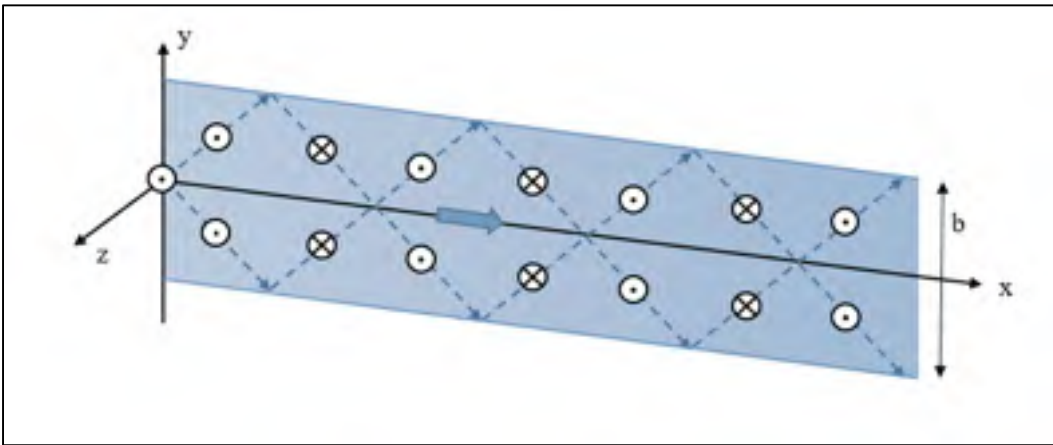


Figure 1.3 Propagation d'une onde guidée SH suivant la direction  $x$  dans une plaque d'épaisseur  $b$

Bien que la polarisation de l'onde SH soit selon l'axe  $z$ , aucune onde ne se propage dans cette direction, ainsi  $k_z$  est nul.  $k_y$  représente la fraction de l'onde qui se propage suivant l'épaisseur de la plaque. En utilisant les conditions aux frontières et la loi de Hooke, il est possible de démontrer que  $k_y$  doit être une valeur multiple de  $\frac{\pi}{b}$  (Rose, 2014) :

$$k_y = \frac{n\pi}{b}, \quad n \in \mathbb{N} \quad (1.17)$$

En injectant l'équation (1.16), on obtient le nombre d'onde du mode SH d'ordre  $n$  :

$$k_{SH,n}^2 = k_S^2 - k_y^2 = \left(\frac{\omega}{c_S}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 = \left(\frac{\omega}{c_{p,n}}\right)^2, \quad n \in \mathbb{N} \quad (1.18)$$



Avec  $c_{p,n}$  la vitesse de phase du mode SH d'ordre  $n$  à la fréquence angulaire  $\omega$ . Après quelques manipulations on obtient la formulation suivante :

$$c_{p,n} = \frac{c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \left(\frac{c_s}{\omega}\right)^2}} = \frac{c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{nc_s}{2fb}\right)^2}}, \quad n \in \mathbb{N} \quad (1.19)$$

Avec  $f$  la fréquence de l'onde. En plus de sa vitesse de phase, une onde guidée est caractérisée par sa vitesse de groupe qui correspond à la vitesse de propagation de l'énergie. Elle est donnée par la dérivée de la fréquence angulaire divisée par le nombre d'onde. D'après l'équation (1.18) on obtient :

$$c_{g,n} = \frac{\partial \omega}{\partial k} = c_s \sqrt{1 - \left(\frac{nc_s}{2fb}\right)^2}, \quad n \in \mathbb{N} \quad (1.20)$$

Grâce aux équations (1.19) et (1.20), il est possible de mettre en avant deux particularités des ondes guidées SH. Premièrement, le mode fondamental  $\text{SH}_0$  ( $n = 0$ ) possède des vitesses de phase et de groupe égales à la vitesse des ondes de volume de cisaillement. C'est-à-dire que ce mode d'ordre 0 est le seul mode SH non dispersif des ondes guidées. Dans le cas des modes d'ordre plus élevés, il est possible de mettre en avant un produit fréquence-épaisseur pour lequel la vitesse de phase tend vers l'infini et la vitesse de groupe tend vers 0 :

$$fb = \frac{nc_s}{2}, \quad n \in \mathbb{N}^* \quad (1.21)$$

Ces modes sont donc dispersifs, c'est-à-dire que leur vitesse de phase n'est pas égale à leur vitesse de groupe ce qui entraîne un étalement de l'énergie durant la propagation. Cela explique pourquoi le mode fondamental est privilégié lors des inspections ultrasonores sur de longues distances. De plus, en dessous de ce produit fréquence-épaisseur, les modes d'ordres élevés ne

peuvent plus se propager. On parle alors de produit de coupure. Il est donc possible, en fonction de l'utilisation souhaitée, de connaître les modes excités.

La figure 1.4 représente les courbes de dispersion en vitesses de phase et de groupe des modes SH dans une plaque d'acier de 12.7 mm d'épaisseur ( $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$ ,  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.33$ ) en fonction de la fréquence. Ces courbes ont été tracées à l'aide du logiciel DISPERSSE (Pavlakovic, Lowe, Alleyne & Cawley, 1997).

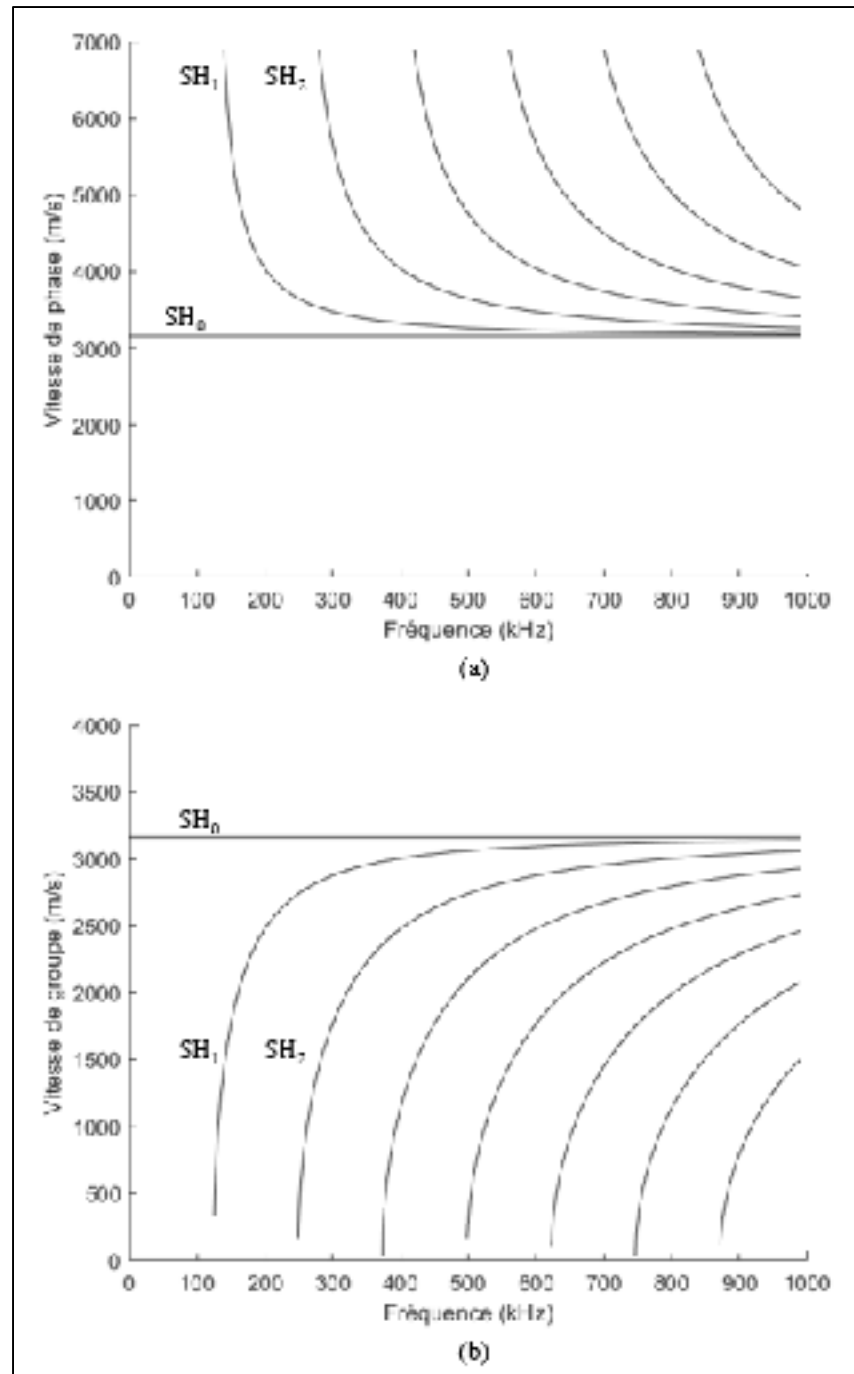


Figure 1.4 Courbes de dispersion en vitesses de phase (a) et de groupe (b) des modes SH dans une plaque d'acier d'épaisseur 12.7 mm ( $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$ ,  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.33$ ) en fonction de la fréquence

### 1.1.2.2 Les ondes de Lamb

Les ondes de Lamb représentent un cas plus complexe que les ondes de cisaillement horizontales, du fait de la propagation de deux types d'ondes : les ondes longitudinales (L) et les ondes de cisaillement vertical (SV). Ces deux ondes sont couplées ce qui rend l'équation de propagation plus difficile à obtenir due à la conversion des modes (Figure 1.5).

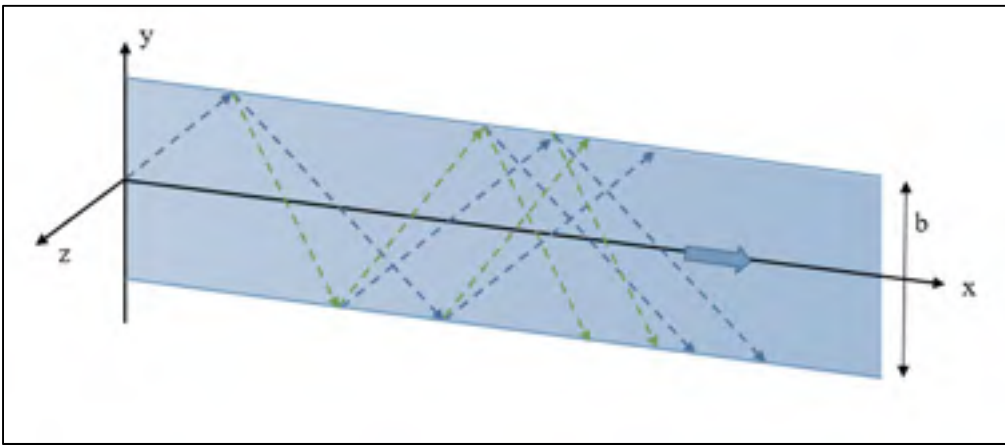


Figure 1.5 Propagation d'une onde de Lamb avec la conversion de modes des ondes P (bleu) et SV (vert)

Comme pour les ondes SH, on utilise la décomposition du nombre d'onde, mais cette fois-ci en considérant la composante longitudinale et la composante de cisaillement :

$$\begin{cases} k_S^2 = k_{S,x}^2 + k_{S,y}^2 + k_{S,z}^2 = \frac{\omega^2}{c_S^2} \\ k_L^2 = k_{L,x}^2 + k_{L,y}^2 + k_{L,z}^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} \end{cases} \quad (1.22)$$

Les ondes de Lamb ne se propagent pas selon la direction  $z$ , on a donc  $k_{S,z} = k_{L,z} = 0$ . De plus, que ce soit pour l'onde longitudinale ou l'onde de cisaillement verticale, la composante du nombre d'onde suivant l'axe  $x$  reste la même ainsi  $k_{S,x} = k_{L,x} = k_x$ .

$$\begin{cases} k_{S,y}^2 = \frac{\omega^2}{c_S^2} - k_x^2 \\ k_{L,y}^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k_x^2 \end{cases} \quad (1.23)$$

En utilisant le principe de conservation, on obtient les équations de Rayleigh-Lamb symétrique et antisymétrique :

$$\begin{cases} \frac{\tan\left(k_{S,y} \frac{b}{2}\right)}{\tan\left(k_{L,y} \frac{b}{2}\right)} = -\frac{4k_x^2 k_{L,y} k_{S,y}}{(k_{S,y}^2 - k_x^2)^2} \\ \frac{\tan\left(k_{S,y} \frac{b}{2}\right)}{\tan\left(k_{L,y} \frac{b}{2}\right)} = -\frac{(k_{S,y}^2 - k_x^2)^2}{4k_x^2 k_{L,y} k_{S,y}} \end{cases} \quad (1.24)$$

En injectant les équations (1.23) dans (1.24), on obtient les relations de dispersion des ondes de Lamb. Cependant, ces relations ne possèdent pas de solutions analytiques. Pour obtenir les courbes de dispersion des ondes de Lamb symétriques ( $S_n$ ) et antisymétriques ( $A_n$ ) il est donc nécessaire d'utiliser un solveur numérique tel que DISPERSE (Pavlakovic, Lowe, Alleyne, & Cawley, 1997).

La figure 1.6 représente les courbes de dispersion en vitesses de phase et de groupe des modes d'ondes de Lamb dans une plaque d'acier de 12.7 mm d'épaisseur ( $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$ ,  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.33$ ) en fonction de la fréquence.

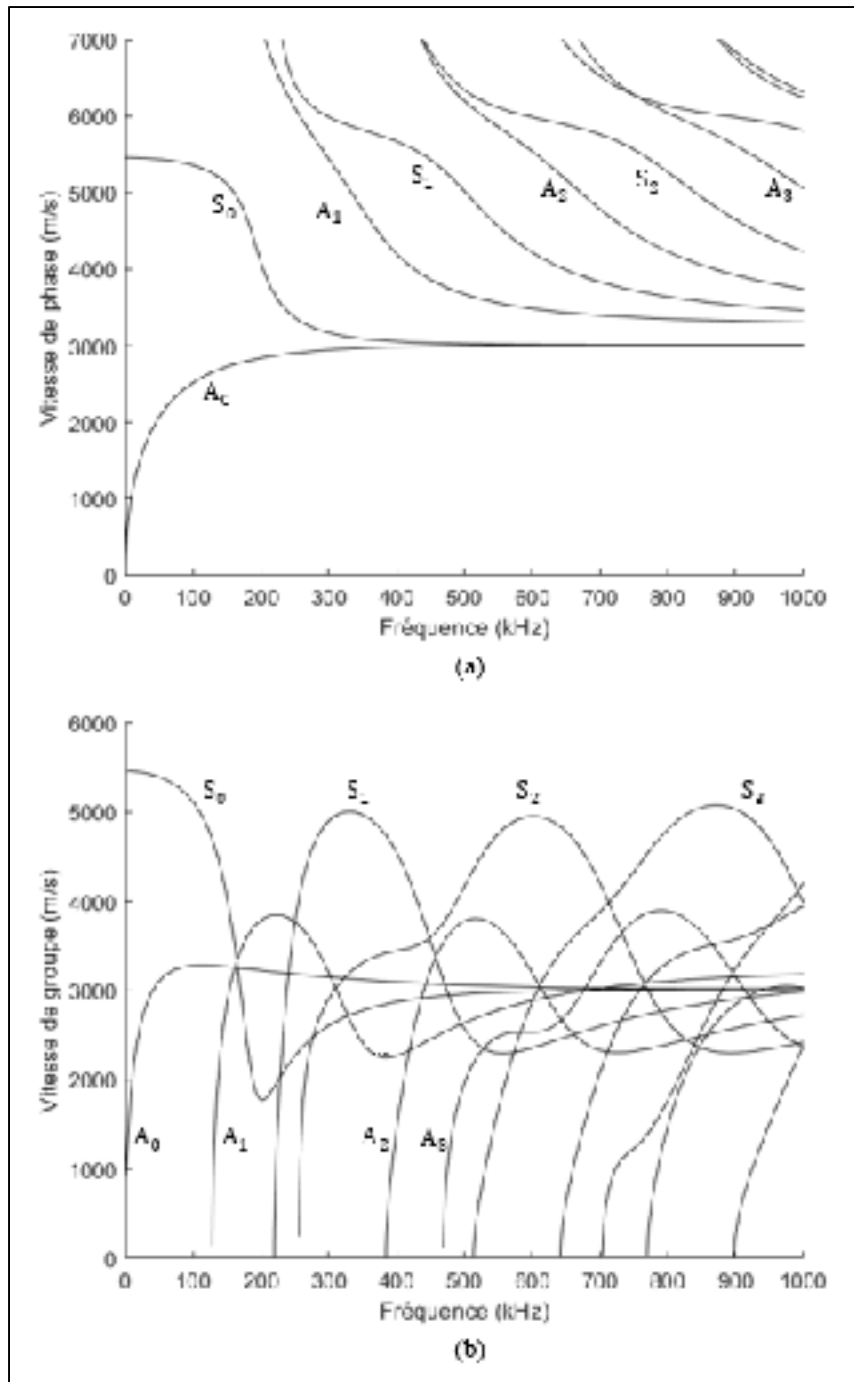


Figure 1.6 Courbes de dispersion en vitesses de phase (a) et de groupe (b) des modes d'ondes de Lamb dans une plaque d'acier d'épaisseur 12.7 mm ( $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$   $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.33$ ) en fonction de la fréquence

## 1.2 Génération des ondes guidées ultrasonores

Les ondes guidées peuvent être générées de différentes manières en fonction de leur utilisation. Les transducteurs sont la base de tout test ultrasonore et il en existe de toute taille, fréquence ou forme pour des applications toutes aussi variées. Il en existe différents types comme les transducteurs piézoélectriques, ou plus spécifiquement pour la génération des ondes SH les transducteurs électromagnétiques et magnétostrictifs. Ces deux technologies sont détaillées dans cette partie.

### 1.2.1 Les transducteurs piézoélectriques

Les transducteurs piézoélectriques sont les plus communément utilisés pour la génération des ondes ultrasonores. Le phénomène utilisé pour cette technologie est l'effet piézoélectrique. Ces transducteurs utilisent une céramique ou un cristal piézoélectrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Lorsqu'on y applique une différence de potentiel, une onde de la forme du signal électrique envoyé est générée, et lorsque l'écho revient au transducteur c'est une tension proportionnelle à l'onde qui en résulte qui peut être mesurée.

Les équations constitutives de la piézoélectricité sont données par les équations (1.25) et (1.26) (Feld, Labouré, Hoang, & Revol, 2008). Elles font le lien entre les tenseurs des contraintes mécaniques  $T$ , des déformations  $S$ , des champs électriques  $E$  et des déplacements électriques  $D$ . Ces tenseurs sont reliés entre eux par les souplesses  $s$ , les coefficients piézoélectriques  $d$  et les permittivités  $\varepsilon$  du matériau.

$$S = s^E \cdot T + d^t \cdot E \quad (1.25)$$

$$D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E \quad (1.26)$$

Cependant, tout transducteur piézoélectrique ne peut générer tout type d'onde. En fonction de la céramique choisie, la contrainte induite par la différence de potentiel peut se faire dans différentes directions (Buchanan, 1954) comme le montre la Figure 1.7 :

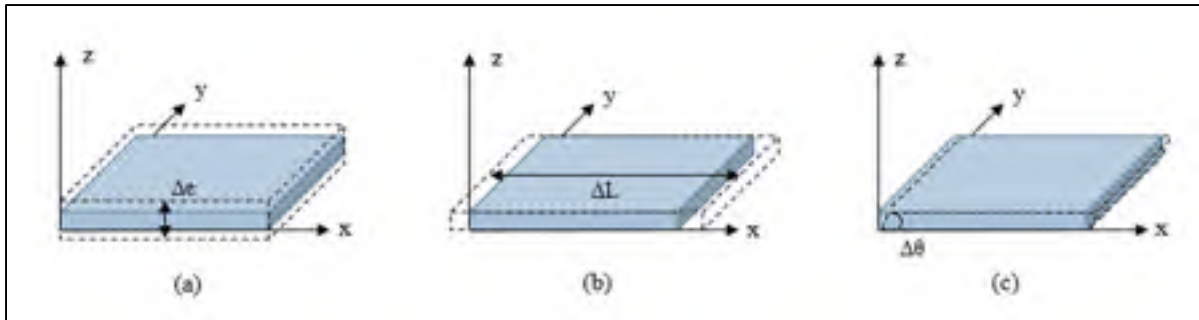


Figure 1.7 Types de déformations des céramiques piézoélectriques : (a) déformation dans l'épaisseur, (b) déformation dans la longueur, (c) cisaillement dans l'épaisseur

Les transducteurs longitudinaux utilisent une céramique dont la contrainte s'exerce selon l'axe  $z$  et voient leur fréquence centrale définie par l'épaisseur  $e$  de la céramique :

$$e = \frac{\lambda}{2} \quad (1.27)$$

Avec  $\lambda$  la longueur d'onde associée à la fréquence d'inspection.

Pour ce qui est des transducteurs en cisaillement, la géométrie de l'élément piézoélectrique de type (c) (Figure 1.7) est importante. Un ratio entre la largeur, la longueur de l'élément et la longueur d'onde doit être respecté afin de générer une onde S ou SH dans la direction voulue (Boivin, Viens, & Belanger, 2016).

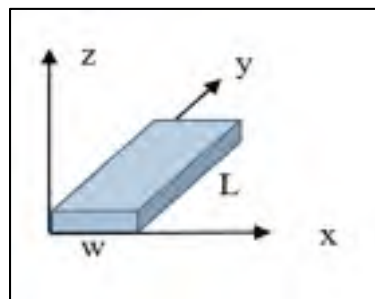


Figure 1.8 Système de coordonnées pour une céramique piézoélectrique



Ainsi, pour une fréquence donnée et conformément au système d'axe représenté Figure 1.8, les critères pour générer une onde S (respectivement SH) se propageant selon la direction  $x$  sont les suivants :

$$\begin{aligned} w &= n \frac{\lambda_S}{2} \text{ et } L = n \lambda_{SH} \text{ avec } \Delta\theta \text{ autour de } \vec{y}, \quad n \in \mathbb{N}^* \\ w &= n \frac{\lambda_{SH}}{2} \text{ et } L = n \lambda_S \text{ avec } \Delta\theta \text{ autour de } \vec{x}, \quad n \in \mathbb{N}^* \end{aligned} \quad (1.28)$$

En plus de l'élément piézoélectrique, le transducteur possède une face de protection appelée couche de couplage qui fait la liaison entre la céramique et la pièce à contrôler. Cette face possède une impédance acoustique et une épaisseur adéquate afin de maximiser l'énergie transmise à la pièce. Ainsi l'impédance acoustique optimale  $Z_0$  de cette couche de couplage est définie de la manière suivante (Zhu, 2008) :

$$Z_0 = \sqrt{Z_c \cdot Z_m} \quad (1.29)$$

Avec  $Z_c$  l'impédance de la céramique et  $Z_m$  l'impédance du matériau à contrôler.

Pour la génération d'ondes de volumes, l'épaisseur  $t$  de la couche de couplage est importante. Elle est définie par la formule suivante (Alvarez-Arenas, 2004) :

$$t = \frac{\lambda}{4} + n \frac{\lambda}{2}, \quad n \in \mathbb{N} \text{ impair} \quad (1.30)$$

Avec  $\lambda$  la longueur d'onde associée à la fréquence d'inspection. Cette épaisseur a pour but de faire interagir en phase successivement les quarts d'onde réfléchis par l'interface couche de couplage/matériau et l'interface PZT/couche de couplage avec l'onde du cycle suivant de manière constructive. L'énergie transmise est ainsi maximisée.

Pour terminer, la partie supérieure de la sonde est composée d'une couche absorbante à base d'époxy auquel est ajouté du tungstène afin d'augmenter sa densité et donc l'impédance acoustique de la couche (Archambault, 2010). Le schéma d'un transducteur est représenté à la Figure 1.9.

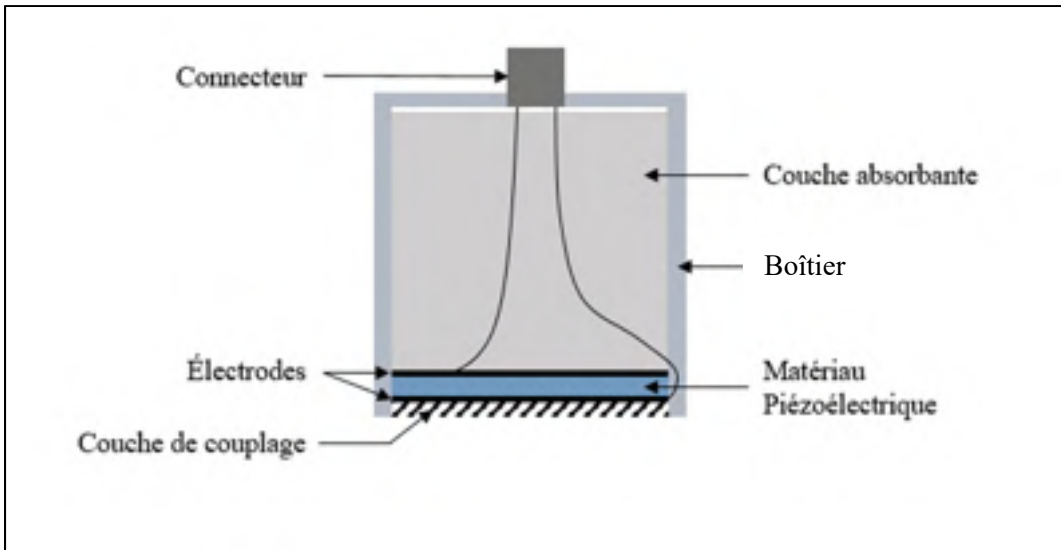


Figure 1.9 Schéma d'un transducteur piézoélectrique

## 1.2.2 Les transducteurs électromagnétiques-acoustiques

Les transducteurs électromagnétiques-acoustiques (EMAT) sont composés de bobines et d'aimants afin de générer des ondes ultrasonores au sein de pièces métalliques. Il en existe deux types : les transducteurs magnétostrictifs et les transducteurs à force de Lorentz.

### 1.2.2.1 Les transducteurs magnétostrictifs

Ces transducteurs utilisent la force magnétostrictive  $f_M$  afin de générer une onde ultrasonore SH dans un matériau ferromagnétique :

$$f_M = \mu_0 \nabla H \cdot M \quad (1.31)$$

Avec  $\mu_0$  la perméabilité du matériau ferromagnétique,  $H$  le champ magnétique et  $M$  la magnétisation. Ces transducteurs sont simplement construits à l'aide de deux aimants et d'une bobine. L'interaction entre le champ magnétique dynamique induit par la bobine dans la pièce et le champ magnétique statique créé par les aimants entraîne la création des forces magnétostrictives parallèles au champ statique. Ces forces entraînent un cisaillement du matériau ce qui génère des ondes SH dans la direction perpendiculaire à ce cisaillement. Le schéma de principe d'un transducteur magnétostrictif est représenté figure 1.10.

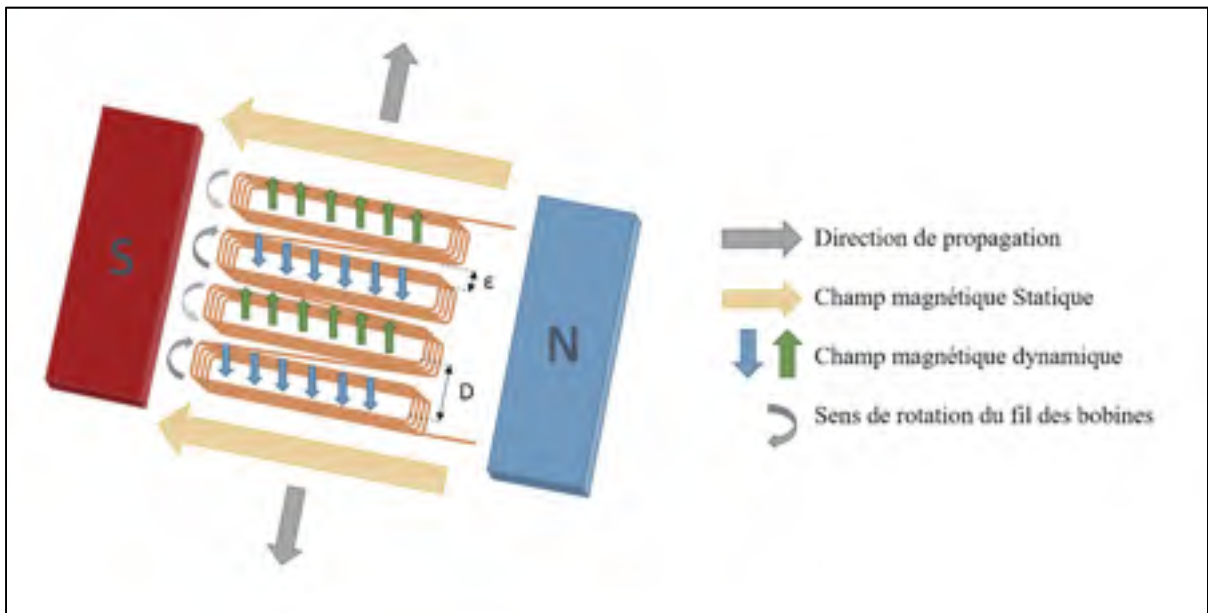


Figure 1.10 Schéma de principe d'un transducteur magnétostrictif

La géométrie du bobinage définit la fréquence centrale du fonctionnement du transducteur (Lee, Kim, & Cho, 2009). Elle est définie de la manière suivante :

$$D = \frac{\lambda}{2} \text{ et } \frac{\varepsilon}{D} \approx 0 \quad (1.32)$$

Avec  $\lambda$  la longueur d'onde associée à la fréquence d'inspection.

Lee *et al.* (2009) ont démontré qu'une valeur faible de  $D$ , et donc une fréquence plus élevée, augmente la directivité du transducteur. Néanmoins la plupart de l'énergie de l'onde générée est dirigée selon la normale au champ magnétique statique et ceux mêmes pour les basses fréquences. Grâce à cette configuration, il est possible de générer une onde de forte amplitude avec une alimentation adaptée. De plus, aucun couplant n'est nécessaire entre la pièce et le transducteur. Une distance minimale d'environ 1.5 mm entre le dispositif et la pièce à contrôler doit cependant être respectée afin de générer une amplitude suffisamment importante.

### **1.2.2.2 Les transducteurs à force de Lorentz**

Ces transducteurs sont eux aussi constitués d'aimants et de bobines. Ils utilisent les forces de Lorentz induites dans une pièce métallique afin de générer des ultrasons. La pièce en question doit être conductrice. La fréquence des ondes générées correspond à celle du signal envoyé dans la bobine. En fonction de la disposition des aimants et de la forme des bobines, il est possible de générer différents modes d'ultrasons, aussi bien longitudinaux que transversaux. Les EMATs ne nécessitent pas de couplant afin de générer les ondes, mais tout comme les transducteurs magnétostrictifs, une distance minimale entre la pièce et la sonde est à respecter. Une alimentation de forte puissance est nécessaire à leur fonctionnement, mais il a été démontré (Feng *et al.*, 2017 ; Thon & Bélanger, 2019) que cette technologie est capable de détecter une large gamme de défauts au sein d'une structure métallique.

## **1.3 Application des ondes guidées dans l'industrie**

L'utilisation des ondes guidées ultrasonores est très répandue dans l'industrie. Leur capacité à se propager le long de parois sur de longues distances les rend polyvalentes à un grand nombre d'applications. On les retrouve ainsi dans le cadre d'inspection non destructive des câbles de précontrainte (Laguerre & Treysede, 2011) que ce soit pour des ponts ou des centrales nucléaires. Elles sont également très utilisées pour l'inspection des pipelines de l'industrie pétrochimique, souvent atteintes par la corrosion engendrée par les contraintes environnementales. Ces pipelines sont principalement contrôlés via l'utilisation d'un collier de transducteurs placé autour du conduit (D. N. Alleyne, Pavlakovic, Lowe, & Cawley, 2004 ; Li,

2005). Les ondes guidées peuvent également être utilisées à haute fréquence pour le contrôle non destructif des pipelines également, mais aussi pour les contours des cuves pétrochimiques, sur une distance plus réduite. Cette méthode est appelée HOMC (Higher Order Modes Cluster) (J Chandrasekaran, Anto, Balasubramaniam, & Venkataraman, 2009).

Cette partie détaille succinctement l'utilisation des ondes guidées pour le contrôle des pipelines, ainsi que la méthode HOMC. Elles sont également utilisées dans l'industrie aéronautique afin de contrôler les joints de recouvrement, mais cette utilisation sera détaillée plus loin dans ce chapitre.

### **1.3.1 Inspection des pipelines par ondes guidées**

La plupart des pipelines utilisés dans l'industrie pétrochimique sont soumis aux aléas de l'environnement. Ils sont le plus souvent à l'air libre ou alors enterrés dans le sol ce qui entraîne l'apparition de corrosion. Dans le cas de conduites enterrées, le coût d'inspection peut s'avérer très élevé s'il est nécessaire de déterrer l'intégralité de la section à contrôler.

L'utilisation d'ondes guidées ultrasonores permet de pallier ce problème via l'utilisation d'un collier de transducteurs placé à un seul et même endroit pour l'émission et la réception du signal. Cette méthode est appelée pulse-écho. Les modes d'ondes guidées privilégiés sont les modes longitudinaux et les modes SH (mode de torsion pour les tuyaux) non dispersifs. Ces modes peuvent se propager jusqu'à 40m dans le cas d'une conduite en relativement bon état (D. N. Alleyne et al., 2004). Ils permettent ainsi une inspection sur une longue distance sans avoir besoin d'avoir accès à l'intégralité de la zone à contrôler. La présence de corrosion est avérée lorsque le signal incident réfléchi et les modes convertis réfléchis présentent une amplitude supérieure à un seuil donné. La méthode de génération des ondes guidées peut se faire par transducteurs piézo-électriques ou par EMATs.

L'inspection par ondes guidées ultrasonores de pipelines est déjà très répandue dans l'industrie, et beaucoup de systèmes de contrôle sont déjà commercialisés.

### **1.3.2 Inspection HOMC**

Le principe de fonctionnement des HOMC est d'utiliser des ondes guidées ayant un produit fréquence-épaisseur élevé (supérieur à 15 MHz.mm) afin de détecter des défauts tels que des fissures ou de la corrosion sur une courte distance en utilisant la méthode de pulse-écho (J Chandrasekaran et al., 2009). Les ondes guidées sont générées à l'aide d'un sabot ayant un angle spécifique pour que les modes excités soient non dispersifs à la fréquence voulue. Grâce à un dispositif mécanique, il est possible d'effectuer une inspection en ligne et d'obtenir une image de la zone contrôlée. Cette méthode est principalement utilisée pour les tests non destructifs du contour des cuves pétrochimiques (J Chandrasekaran et al., 2009), mais également pour l'inspection des pipelines sur de courtes distances (Jayaraman Chandrasekaran, Krishnamurthy, Balasubramaniam, Thompson, & Chimenti, 2010).

Bien que les ondes guidées soient utilisées pour détecter la corrosion ou des fissures dans différentes structures, il est nécessaire de comprendre pourquoi de tels défauts peuvent apparaître afin d'éviter ou de prévoir au mieux leur formation.

## **1.4 Mécanismes de bris de cuves**

Ce projet s'intéresse aux réservoirs de l'industrie pétrolière nord-américaine. Cela représente un nombre considérable de cuves remplies d'hydrocarbure et d'autres fluides. Les planchers de ces réservoirs sont principalement constitués d'acier directement en contact avec les différents produits. En cas de rupture de ces planchers, c'est potentiellement des milliers de litres d'hydrocarbure et d'autres liquides polluants qui peuvent être relâchés dans la nature et causer d'importants dégâts environnementaux. Cette section recense les principales causes des bris de cuves pétrochimiques dans l'industrie nord-américaine.

### **1.4.1 Causes environnementales**

La plupart des fuites de réservoir sont causées par le vieillissement, et donc principalement par la corrosion. Cette corrosion a lieu à la fois par l'intérieur de la cuve avec le fluide qui y est

stocké, mais également par l'extérieur avec le contact au sol. En fonction de la corrosivité du sol, elle peut être plus ou moins importante et engendrer un défaut localisé ou très étendu. Une fuite d'un réservoir peut également être provoquée par une variation thermique sur les surfaces internes et externes des cuves. Cette variation peut provoquer une dilatation qui va engendrer des contraintes internes au plancher pouvant amener à une rupture.

De plus, des événements hasardeux tels que des tremblements de terre, des inondations ou encore la foudre peuvent causer des détériorations pouvant être classées de mineures à catastrophiques (Krausmann, Renni, Campedel, & Cozzani, 2011).

#### **1.4.2 Défauts de fabrication**

Les réservoirs de stockage industriels sont intégralement réalisés par soudure entre les différentes plaques qui les composent. Un défaut dans ces soudures peut avoir un impact néfaste allant de la légère infiltration de liquide dans les joints pouvant causer de la corrosion jusqu'à la rupture de la structure en cas de sollicitations trop élevées.

### **1.5 Contrôle des joints de recouvrement**

Il existe plusieurs travaux traitant de la propagation des ondes guidées ultrasonores au travers de joint de recouvrement entre deux structures notamment à propos des joints brasés ou des joints adhésifs. Cependant, très peu de travaux traitent du cas des joints soudés. La section suivante résume les différentes avancées réalisées.

#### **1.5.1 Inspection des joints de recouvrement adhésifs**

La littérature regroupe plusieurs articles traitant de l'inspection de joints adhésifs par ultrasons. Différents types de défauts sont ainsi étudiés comme les défauts géométriques, les défauts d'adhésion ainsi que les défauts de cohésion. Les interactions avec les différents modes d'ondes guidées sont également étudiées. Le mode  $A_0$  a été traité afin d'étudier la cohésion d'un joint de recouvrement adhésif avec époxy (Lanza di Scalea, Rizzo, & Marzani, 2004).

Les modes  $SH_0$  et  $SH_1$  ont été étudiés afin de quantifier le module de cisaillement adhésif et la raideur de cisaillement interfacial séparément (Castaings, 2014). D'autres travaux ont également été effectués afin de déterminer le mode de Lamb le plus adéquat à l'inspection de joints adhésifs (Santos & Faia, 2009).

Ces articles démontrent une influence concrète du joint sur l'énergie transmise à travers lui. Cependant aucun des modes étudiés ne semble se détacher des autres pour l'inspection de ce type de joints.

### **1.5.2 Inspection des joints de recouvrement brasés**

Dans le cas de joints brasés, les études menées se concentrent sur l'inspection de la zone de brasage et des différentes phases de la microstructure. Ainsi il a été démontré que l'utilisation d'onde  $SH_0$  est plus pertinente pour l'étude de ce type de joint (Comot, Bocher, & Belanger, 2017). Il a été mis en évidence une conversion des modes A et S lors de l'interaction avec le joint de recouvrement. Les paramètres géométriques ont également été étudiés. Ainsi la longueur de la zone de liaison entre les deux plaques a une influence minime sur l'énergie transmise.

Comme pour les joints de recouvrement adhésifs, cet article nous montre le lien entre l'atténuation d'énergie d'une onde guidée et la présence d'un joint. Il a également mis en évidence la pertinence de l'utilisation des modes SH pour ce type de joints.

### **1.5.3 Inspection des joints soudés**

Contrairement aux joints de recouvrement brasés et adhésifs, la zone de liaison entre les deux plaques ne correspond pas à la longueur totale de recouvrement. Comme le montre la figure 1.11, la zone de liaison ne correspond qu'à la largeur du joint de soudure :



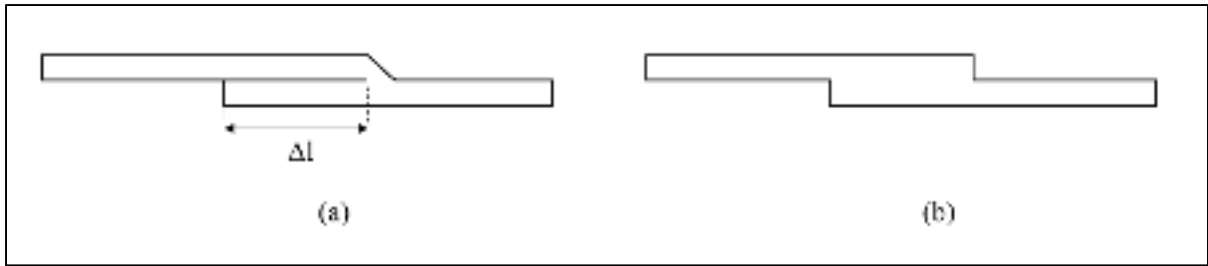


Figure 1.11 Liaison de deux plaques par (a) joint soudé et (b) joint adhésif ou brasé

Très peu d'études ont été menées dans le cas de joints de recouvrement soudés. Il a néanmoins été démontré que la longueur de la zone de recouvrement peut influencer l'atténuation provoquée par le joint (Jankauskas & Mazeika, 2016). Dans le cas du mode d'onde guidée  $S_0$ , l'atténuation de l'énergie  $\alpha_{S_0}$  est minimale pour une fréquence  $f$  donnée si la zone de recouvrement  $\Delta l$  correspond à un multiple pair du quart de longueur d'onde du mode  $S_0$ . Inversement, l'atténuation sera maximale dans le cas d'un multiple impair du quart de longueur d'onde.

$$\alpha_{S_0}(f, \Delta l) = \min\left(n \frac{\lambda}{4}\right), \quad n = 2, 4, 6, \dots \quad (1.33)$$

$$\alpha_{S_0}(f, \Delta l) = \max\left(n \frac{\lambda}{4}\right), \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

Ces minimas et maximas s'expliquent par l'interférence de l'onde incidente traversant le joint de soudure avec l'onde réfléchiée par l'extrémité de la zone de regroupement. En fonction de la longueur de cette zone et de  $\lambda$ , l'interférence peut être constructive ou destructive.

#### 1.5.4 Conclusion sur les inspections de joints

La littérature nous montre qu'un certain nombre d'articles ont traité des cas de joints de recouvrement. Il en ressort que différents modes sont utilisés, pour différentes utilisations. Le tableau suivant (1.1) résume les travaux décrits précédemment.

Tableau 1.1 Résumé des articles sur l'inspection des joints de recouvrement par ultrasons

<b>Articles</b>	Lanza di Scalea <i>et al.</i> (2004)	Castaigns (2014)	Comot <i>et al.</i> (2016)	Jankauskas, Mazeika (2016)
<b>Type de joint</b>	Adhésif	Adhésif	Brasé	Soudé
<b>Caractéristiques étudiées</b>	Défaut de cohésion	Défauts de cohésion et adhésion	Propriété de la phase eutectique du joint	Atténuation du joint, longueur de recouvrement
<b>Ondes utilisées</b>	A et S	SH	A, S et SH	A et S
<b>Modes utilisés</b>	$A_0$	$SH_0$ et $SH_1$	$SH_0$ , $SH_1$ , $SH_2$ et $SH_3$	$S_0$
<b>Génération des ondes</b>	Laser	EMAT	Transducteur piézoélectrique	Transducteur piézoélectrique
<b>Réception des ondes</b>	Transducteur couplé à l'air	EMAT	Laser	Laser

Il apparaît dans les études les plus récentes que les modes d'ondes guidées S et SH semblent être à privilégier pour l'inspection des joints de recouvrement. De plus, bien que les joints adhésifs et brasés soient différents du type de joint étudié dans ce mémoire à savoir des joints soudés, il en résulte que le protocole de mesure reste le même dans chacun des cas. L'émetteur est placé en amont du joint de recouvrement. Une première zone de réception de l'onde est placée en avant du joint et une seconde après. L'atténuation d'énergie de l'onde entre les deux points de mesures permet de déterminer l'influence des caractéristiques du joint.

L'étude de Jankauskas et Mazeika (2016) se rapproche le plus de celle de ce mémoire avec l'interaction d'un joint soudé avec des ondes guidées ultrasonores. Néanmoins, les planchers de réservoirs sont assemblés selon les normes API (American Petroleum Institute). La zone de recouvrement du joint est donc normée et ne peut donc pas être ajustée au besoin afin de contrôler les planchers.

L'étude bibliographique de l'inspection des joints de recouvrement nous démontre qu'il est nécessaire de poursuivre le travail déjà effectué en ce qui concerne les joints soudés, ce type de joint ayant été que peu étudié jusqu'à maintenant. De plus, la littérature traite de l'inspection des joints de recouvrement par ondes guidées et non pas de l'atténuation qu'ils impliquent. Il serait notamment nécessaire d'identifier le mode d'onde guidée le moins atténué par la présence d'un joint de recouvrement soudé, puisque l'étude réalisée par Jankauskas et Mazeija (2016) ne traite que du mode  $S_0$ . De plus, les articles détaillés précédemment nous donnent des pistes concernant la méthodologie à utiliser pour mener cette étude.



## CHAPITRE 2

### MODÈLE DE SIMULATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

La revue de la littérature nous permet maintenant d'avoir les connaissances nécessaires à l'étude de l'influence des joints de recouvrement soudés sur les différents modes d'ondes guidées ultrasonores. Ce chapitre présente la méthode d'évaluation ainsi que les résultats obtenus au travers de simulations par éléments finis 3D. Le modèle se veut le plus proche de la réalité. La géométrie du joint de recouvrement considéré est de 90 cm de large par 30 cm de recouvrement comme le conseille l'API, constitué de plaque d'acier de 12.7 mm d'épaisseur (1/2 pouce). L'influence du joint sur les modes  $S_0$  et  $SH_0$  entre 50 kHz et 120 kHz sera étudiée du fait de leur déplacement dans le plan de la plaque, car ils sont très peu atténués par un fluide se trouvant dans le réservoir. Au-delà de 120 kHz, les modes d'ordre élevé ( $S_1$  et  $SH_1$ , ...) seraient excités ce qui n'est pas voulu dans cette étude du fait de leur caractère fortement dispersif.

Le modèle est construit à partir du logiciel Abaqus® et les simulations sont réalisées via Pogo FEA (Huthwaite, 2014). L'interface graphique d'Abaqus® permet une construction rapide du modèle par éléments finis 3D ainsi qu'un maillage adapté à la géométrie considérée. Pogo FEA utilise des unités de processeurs graphiques (GPUs) afin de résoudre les équations de propagation des ondes. L'utilisation de GPUs permet un calcul plus rapide des simulations en comparaison avec les unités centrales de traitement (CPUs) utilisées par Abaqus®. Cela permet d'effectuer des simulations à partir de modèles de taille importante, notamment comme celui utilisé dans cette étude. L'architecture de Pogo FEA (Huthwaite & Zarogoulidis, 2017) permet une sélection rapide des nœuds d'excitation et de réception afin de réaliser tout type de mesures. Les simulations sont réalisées dans le domaine temporel afin de correspondre à la mise en œuvre expérimentale.

## 2.1 Paramètres de simulation

Afin de résoudre les équations de propagation, il est important de respecter certains critères concernant la taille des éléments finis, l'incrément de temps ou encore le temps total de simulations pour obtenir des résultats les plus précis et exacts possibles.

### 2.1.1 Type d'éléments utilisés

Les propriétés des éléments utilisés vont définir le niveau d'exactitude des résultats. Il est important de trouver un compromis adéquat permettant la précision des simulations tout en ayant un temps de calcul réduit. Les éléments finis utilisés dans le modèle sont des éléments cubiques référencés C3D8R. Ce type d'éléments est très répandu pour la simulation de propagation d'ondes, car il permet une bonne précision et une bonne rapidité de calcul.

Tableau 2.1 Nombre d'éléments par longueur d'onde pour une plaque d'acier de 12.7 mm d'épaisseur, pour des fréquences allant de 50 kHz à 120 kHz.

Fréquences (kHz)	Mode $A_0$		Mode $S_0$		Mode $SH_0$	
	$\lambda_{A_0}$ (mm)	$\lambda/dx$	$\lambda_{S_0}$ (mm)	$\lambda/dx$	$\lambda_{SH_0}$ (mm)	$\lambda/dx$
<b>50</b>	41.2	31	108.6	83	63.2	48
<b>60</b>	36.4	28	90.2	69	52.7	40
<b>70</b>	32.5	25	77.1	59	45.1	34
<b>80</b>	29.5	22	67.2	51	39.5	30
<b>90</b>	27.0	20	59.4	45	35.1	27
<b>100</b>	24.9	19	53.1	40	31.6	24
<b>110</b>	23.1	17	48.0	36	28.7	22
<b>120</b>	21.5	16	43.4	33	26.3	20

Le type d'élément choisi permet de discrétiser le modèle et donc de créer le modèle par éléments finis. La taille des éléments est donc importante. Une taille d'éléments réduite permettra une meilleure discrétisation du modèle, mais augmentera considérablement le temps

de calcul. Une taille trop importante au contraire réduira le temps de résolution, mais ne permettra pas d'avoir une précision nécessaire au modèle ce qui augmentera les erreurs de propagation. Dans le cas des ondes guidées, il a été démontré (Drozdz, 2006) qu'un nombre minimal de 10 à 15 éléments par longueur d'onde doit être respecté afin de garder un niveau d'erreur minimal.

Dans cette étude, la taille nominale des éléments ( $dx$ ) sera fixée à 1.3 mm afin de respecter le critère de 15 éléments par longueur d'onde pour une plaque d'acier de 12.7 mm d'épaisseur, et pour une plage de fréquence allant de 50 kHz à 120 kHz comme le montre le tableau 2.1 ci-dessus.

### 2.1.2 Incréments de temps

Après avoir discrétisé le modèle en éléments finis, il est nécessaire de discrétiser le temps de calcul. L'incrément de temps  $\Delta t$  doit donc être suffisamment petit pour éviter que l'onde ne traverse plus d'un élément fini au cours de cet intervalle (Cook, Malkus, Plesha & Witt 2007). Pour combler ce critère, il a défini un incrément de temps critique  $\Delta t_{cr}$  tel que :

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = 0.8 \frac{dx}{c_{p,max}} \quad (2.1)$$

Avec  $c_{p,max}$  la plus importante vitesse de phase des modes se propageant dans la plaque. Dans notre cas, cela correspond à la vitesse de phase du mode  $S_0$  qui est de 5430 m/s à une fréquence de 50 kHz. L'incrément de temps sera donc fixé à  $\Delta t = 1.10^{-8}$  s.

## 2.2 Simulations 3D

Du fait des modes d'ondes étudiés ( $S_0$  et  $SH_0$ ), un modèle 2D ne serait pas suffisant pour simuler l'interaction du joint de recouvrement avec les différents modes. Un modèle 3D est donc nécessaire pour mener cette étude.

### 2.2.1 Modèle de simulation

Les réservoirs industriels utilisés dans l'industrie pétrochimique sont des réservoirs cylindriques mesurant entre 20 m et 40 m de diamètre. Leur plancher est constitué de plusieurs plaques rectangulaires soudées entre elles par colonne comme le montre la Figure 2.1.

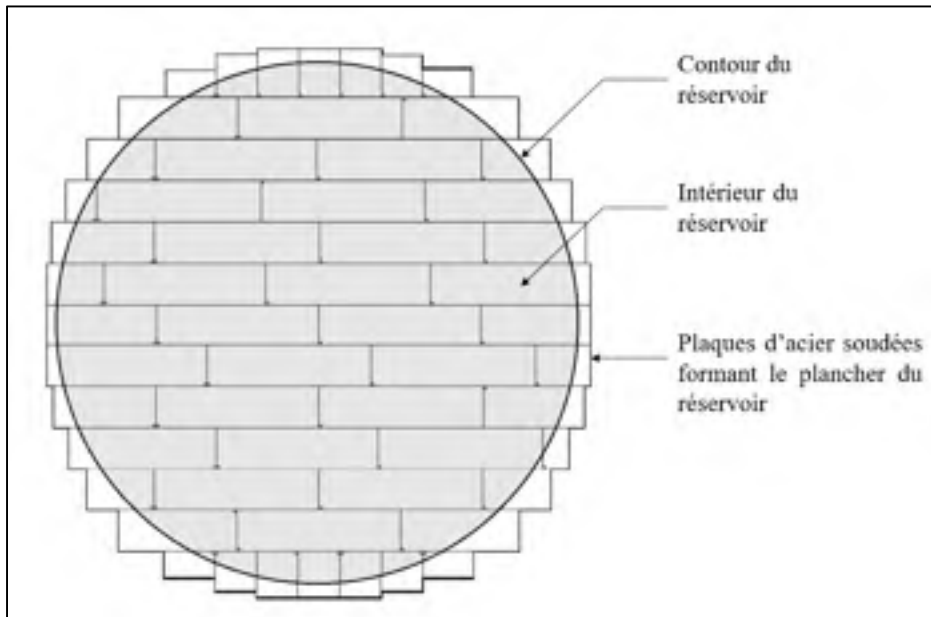


Figure 2.1 Schéma d'un plancher de réservoir industriel formé de plaques d'acier rectangulaires soudées

Pour contrôler ces planchers, l'idée retenue est d'inspecter chaque rangée de plaques d'aciers. Cela implique donc d'utiliser un mode qui sera le moins atténué par les joints de soudure pour que l'onde puisse traverser l'intégralité du diamètre de la cuve. Le modèle retenu pour les simulations sera donc deux plaques d'acier soudées entre elles par un joint de recouvrement soudé, conformément aux joints présents dans les planchers de réservoirs.

#### 2.2.1.1 Caractéristiques du modèle de simulation

Les simulations sont réalisées à l'échelle 1:1 afin d'avoir une géométrie identique à celle des joints de recouvrement présents dans les réservoirs. Le matériau utilisé est de l'acier d'une densité de  $7900 \text{ kg/m}^3$ , d'un coefficient de poisson de 0.33 et d'un module d'Young de 210



GPa. Les dimensions précises du modèle sont données par la figure 2.2. Le modèle est considéré homogène isotrope.

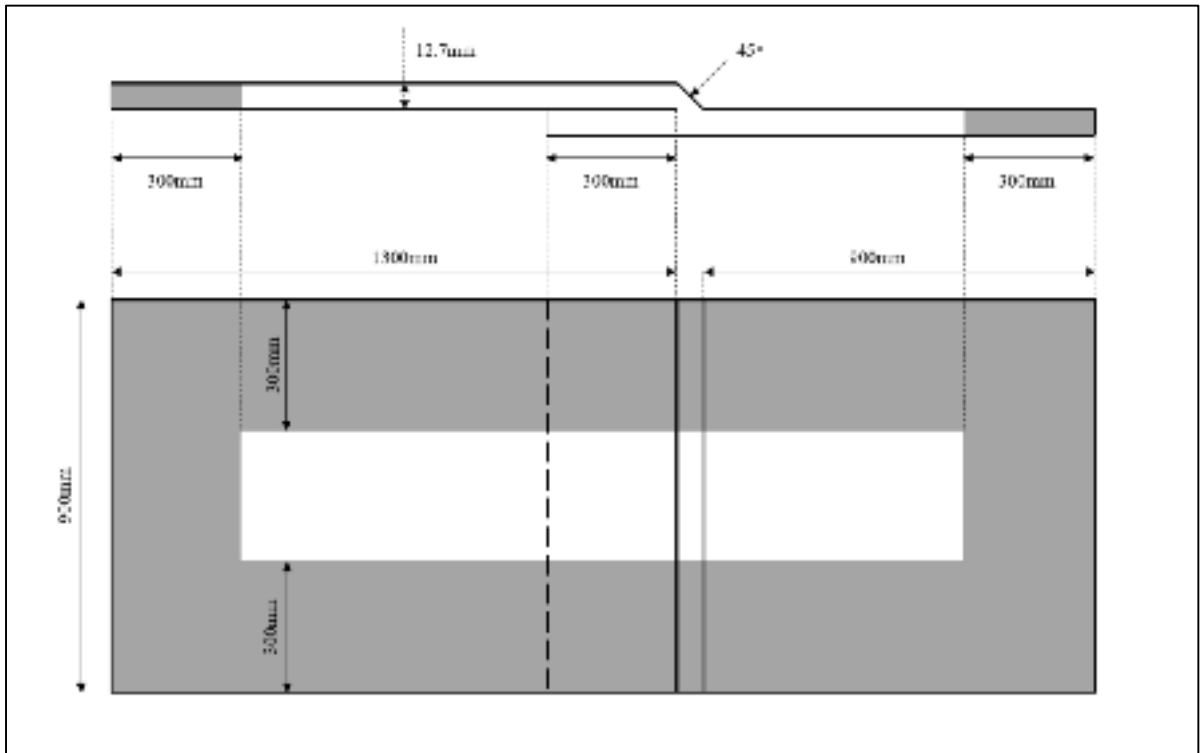


Figure 2.2 Dimensions du modèle par éléments finis

Il est à noter que les échelles verticales et horizontales ne sont pas égales sur le schéma.

Les zones grises représentent les couches absorbantes du modèle. Elles permettent d'éviter toute réflexion provenant des rebords qui pourrait interférer avec le signal incident. Les propriétés mécaniques de la zone absorbante restent les mêmes que pour le reste du modèle mis à part qu'un paramètre d'atténuation évoluant de manière exponentielle dans la zone permet à celle-ci d'absorber l'onde qui la traverse et ainsi éviter toute réflexion des limites du modèle. Il est considéré que la longueur de la zone absorbante doit être d'environ 3 fois la taille de la plus grande longueur d'onde excitée au cours des simulations pour éviter toutes réflexions (Drodz, 2006). Dans cette étude, la plus grande longueur d'onde excitée correspond à celle du

mode  $S_0$  pour une fréquence de 50 kHz soit 108.6 mm. La longueur de la région absorbante a donc été fixée à 300 mm.

### 2.2.1.2 Protocole de mesure

Étant donné le diamètre important des réservoirs, il est nécessaire d'utiliser des modes non dispersifs à basse fréquence afin de pouvoir traverser l'intégralité du plancher. Ainsi, les modes  $S_0$  et  $SH_0$  sont privilégiés pour des fréquences allant de 50 kHz à 120 kHz. La fréquence maximale de 120 kHz a été choisie, car elle correspond à la fréquence de coupure des modes  $S_1$  et  $SH_1$  pour une plaque d'acier de 12.7 mm d'épaisseur.

L'influence du joint sur les différents modes sera déterminée par la perte d'amplitude entre l'onde se propageant avant le joint et celle se propageant après. Pour se faire, une zone d'émission rectangulaire permettant de générer une onde unidirectionnelle (Boivin et al., 2016) est placée à une distance de 500 mm du joint. Cette zone d'émission est excitée avec un signal harmonique de 5 cycles fenêtré par une fonction de Hann centré de 50 kHz à 120 kHz par pas de 10 kHz (Figure 2.3).

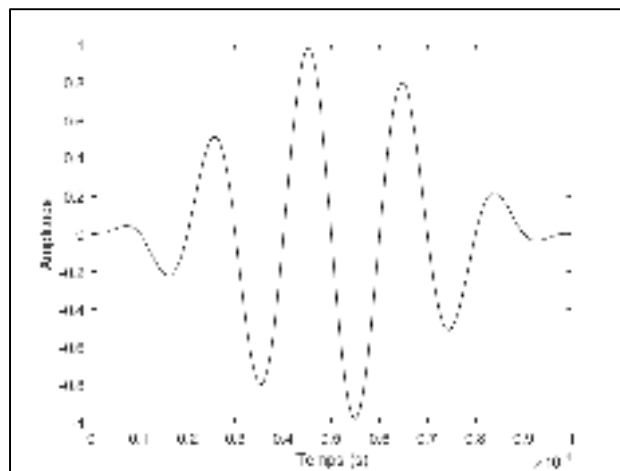


Figure 2.3 Signal d'excitation de 5 cycles centré à 50 kHz avec fenêtré de Hann

Une première ligne de 128 points de réception espacés de 1.3 mm est placée en amont du joint à une distance de 10 cm. Une seconde identique est placée en aval à la même distance. Ces deux lignes de mesures permettent d'effectuer des transformées de Fourier spatiales (FFT2D) afin de mesurer l'amplitude du mode désiré avant et après le joint. La distance totale regroupant les 128 points est de 166.4 mm. Cela permet de pouvoir dissocier sur notre FFT2D deux nombres d'onde espacés de  $6 \text{ 1/m}$  (D. Alleyne & Cawley, 1991). Dans notre étude les modes ayant les nombres d'ondes les plus proches sont les modes  $S_0$  et  $A_0$  à 120 kHz qui ont une différence en nombre d'onde de  $23 \text{ 1/m}$ .

Néanmoins, il serait impossible de réaliser une FFT2D sur l'anneau extérieur d'un plancher de cuve en raison de la distance nécessaire à l'acquisition des données. Afin de reproduire au mieux les mesures qui seront faites expérimentalement, l'influence du joint sera également mesurée grâce à la différence d'amplitude entre des transformées de Fourier temporelles réalisées sur les points de mesure situés à 10 cm de part et d'autre du joint. La différence entre les résultats obtenus par FFT2D et par FFT nous permettra de conclure sur la véracité des mesures ponctuelles. La Figure 2.4 résume la disposition des points d'émissions et de mesures.

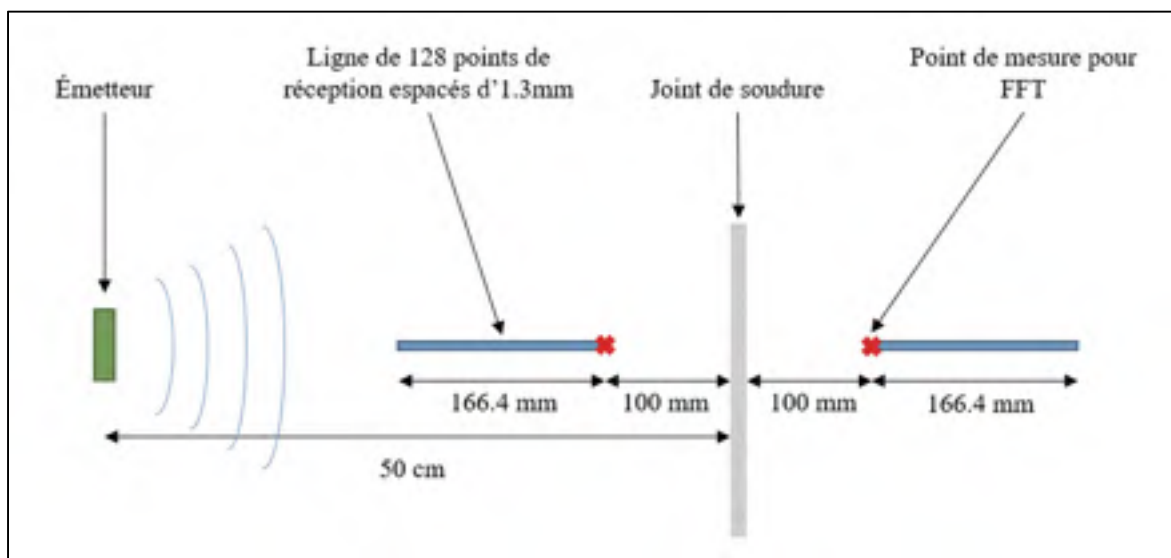


Figure 2.4 Disposition des points d'émission et de réception pour le modèle de simulation

## 2.2.2 Résultats de simulation

Il est à noter que le modèle de simulation reste un modèle simplifié de la réalité. Aucun fluide n'est ajouté sur le dessus des plaques. Une étude a tout de même été menée pour s'assurer que les modes étudiés ne soient pas atténués par tout liquide présent dans le réservoir. Cette section détaille les résultats obtenus dans le cas d'une onde arrivant avec une incidence normale sur le joint, mais également dans le cas d'une incidence oblique.

### 2.2.2.1 Atténuation des modes en présence d'un liquide

Le logiciel DISPERSE (Pavlakovic et al., 1997) permet de simuler la présence d'un fluide au-dessus des plaques d'aciers. Il est ainsi possible d'obtenir les courbes d'atténuation des modes en fonction de la fréquence (Figure 2.5).

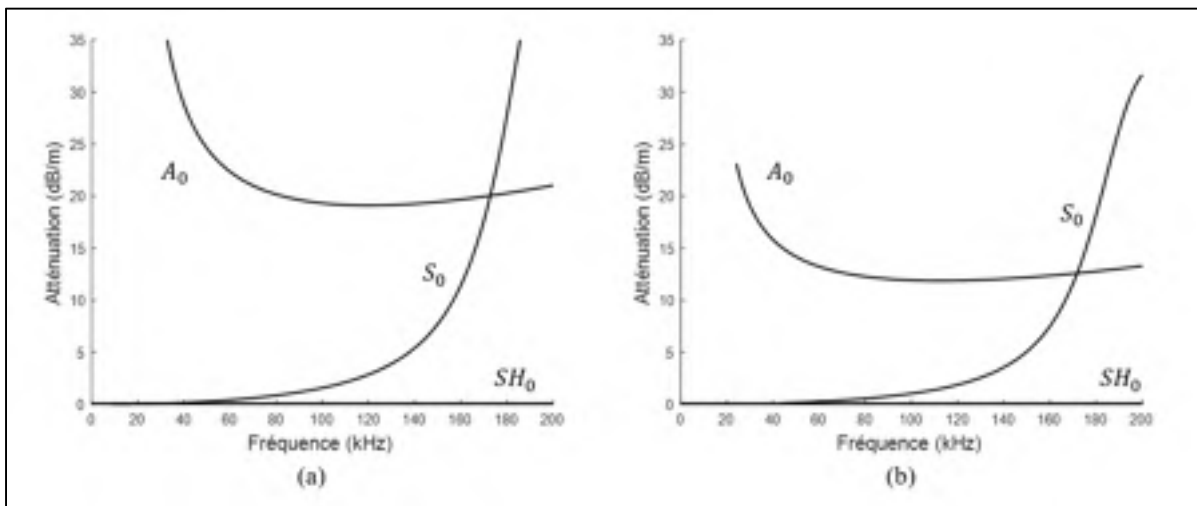


Figure 2.5 Courbes d'atténuation des modes  $A_0$  et  $S_0$  dans de plaques d'acier submergées par (a) de l'eau et (b) du pétrole

Il est à noter que le mode d'onde guidée  $SH_0$  n'est pas atténué en cas de présence d'un liquide non visqueux dans le réservoir, car lors de sa propagation, le déplacement des particules se fait uniquement dans le plan de la plaque. En revanche, le mode  $A_0$  est quant à lui très atténué du fait d'un fort mouvement hors plan des particules lors de sa propagation. Pour  $S_0$ , l'atténuation

provoquée par un fluide est beaucoup plus faible, car le déplacement des particules hors plan est bien moins important. Le tableau 2.2 résume les valeurs d'atténuation pour les différents modes en fonction de la fréquence.

Tableau 2.2 Valeurs d'atténuation provoquée par l'eau et le pétrole pour les modes  $A_0$  et  $S_0$

Fréquence (kHz)	Atténuation de mode $A_0$ (dB/m)		Atténuation du mode $S_0$ (dB/m)	
	Eau	Pétrole	Eau	Pétrole
50	24.75	14.08	0.29	0.19
60	22.18	13.20	0.43	0.28
70	20.93	12.63	0.62	0.40
80	20.13	12.27	0.86	0.58
90	19.62	12.05	1.21	0.78
100	19.32	11.93	1.60	1.03
110	19.16	11.88	2.12	1.41
120	19.11	11.89	2.83	1.92

Il est considéré qu'une atténuation de 20 dB/m équivaut à une perte du signal. À la vue des valeurs d'atténuation présentées ci-dessus, il est possible d'en déduire que le mode  $A_0$  sera trop atténué pour pouvoir être mesuré d'un bout à l'autre du réservoir. En ce sens, l'étude se concentrera sur les modes  $S_0$  et  $SH_0$  qui sont très peu atténués en cas de présence d'un fluide dans la cuve.

### 2.2.2.2 Influence du joint en incidence normale

Comme expliqué précédemment, l'étude de l'influence du joint en incidence normale a été mesurée par FFT2D, mais aussi par FFT. Les deux méthodes sont comparées afin de représenter au mieux les mesures effectuées expérimentalement.

Premièrement, les mesures effectuées par FFT2D mettent en évidence une conversion du mode  $S_0$  en mode  $A_0$  lors de son interaction avec le joint (Figure 2.6). En comparaison le mode  $SH_0$

ne subit aucune conversion en raison de l'incidence normale. La conversion de mode s'explique par le couplage des ondes de Lamb. En effet, lors de son interaction avec le joint, la réflexion du mode  $S_0$  va engendrer à la fois une onde réfléchie  $S_0$  mais aussi une onde réfléchie  $A_0$ .

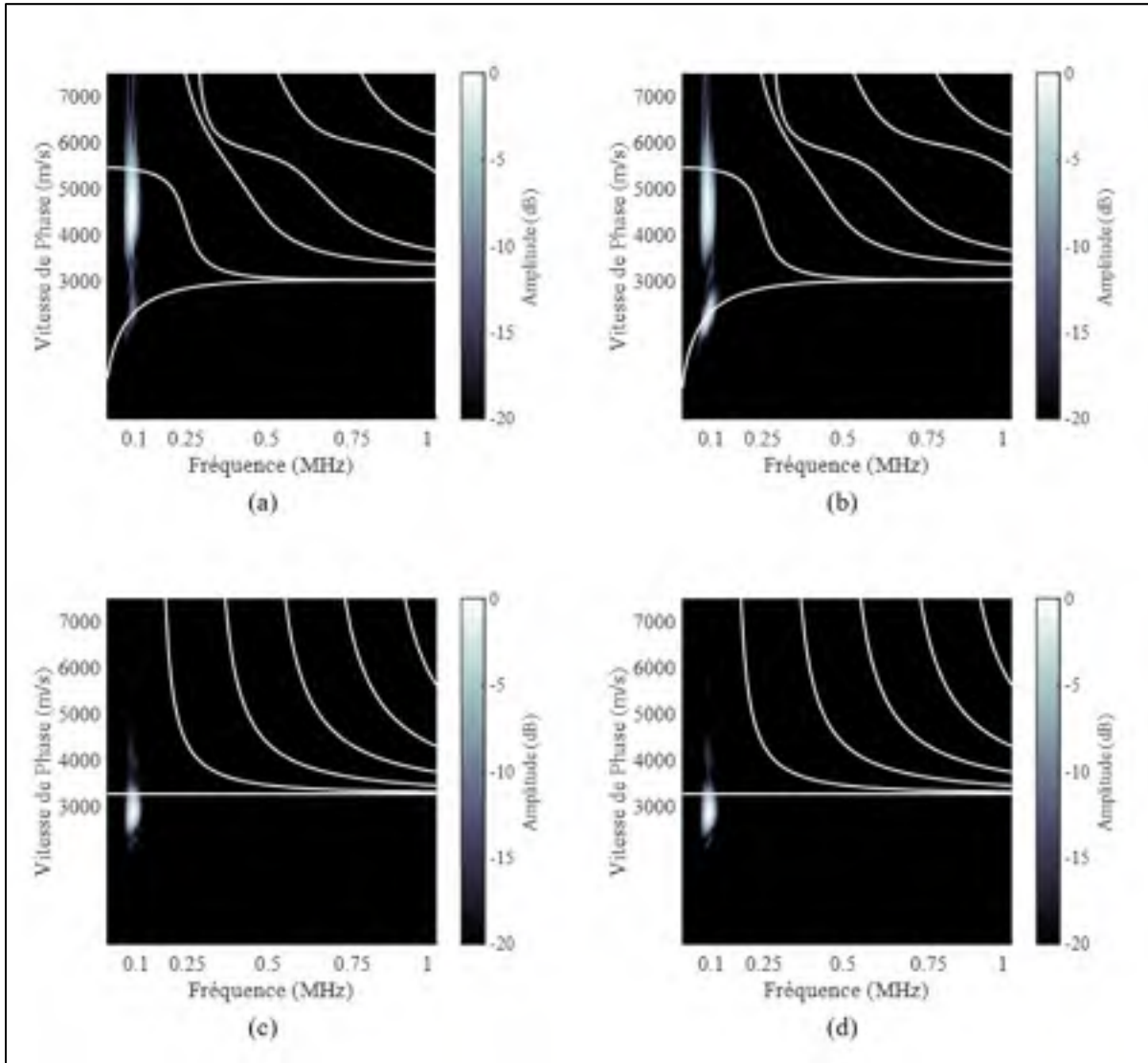


Figure 2.6 Transformée de Fourier 2D des signaux obtenus par simulation. (a) FFT2D de  $S_0$  en amont du joint et (b) en aval du joint, (c) FFT2D de  $SH_0$  en amont du joint et (d) en aval du joint.

Sur chaque FFT2D, l'amplitude maximale est relevée en amont et en aval du joint pour le mode  $S_0$  et  $SH_0$ . La comparaison des amplitudes permet de mesurer l'influence du joint pour chaque fréquence. La Figure 2.7 présente ces résultats.

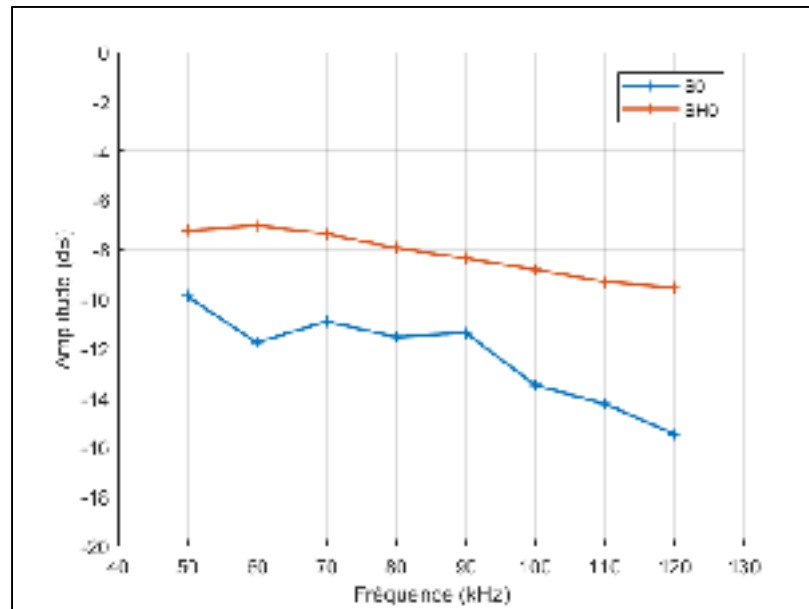


Figure 2.7 Atténuation du joint mesurée par FFT2D réalisée sur la surface de la plaque pour les modes  $S_0$  et  $SH_0$

On remarque que le mode  $SH_0$  est moins atténué que le mode  $S_0$ . Cela peut s'expliquer par la conversion du mode  $S_0$  lors de son interaction avec le joint. La diminution progressive de l'amplitude pour les deux modes peut s'expliquer par l'augmentation de la fréquence. En effet plus la fréquence de l'onde est élevée, plus l'atténuation lors de sa propagation est grande.

Afin de se rapprocher des mesures expérimentales, l'atténuation provoquée par le joint a été mesurée par la différence d'amplitude entre le signal reçu en un point de surface situé avant le joint, et celui reçu en un point de surface après le joint. Les deux points de mesure sont situés à 10 cm de la soudure (se référer à la Figure 2.4). La forme des signaux reçus est présentée Figure 2.8. La différence d'amplitude entre chaque FFT est reportée sur la Figure 2.9.

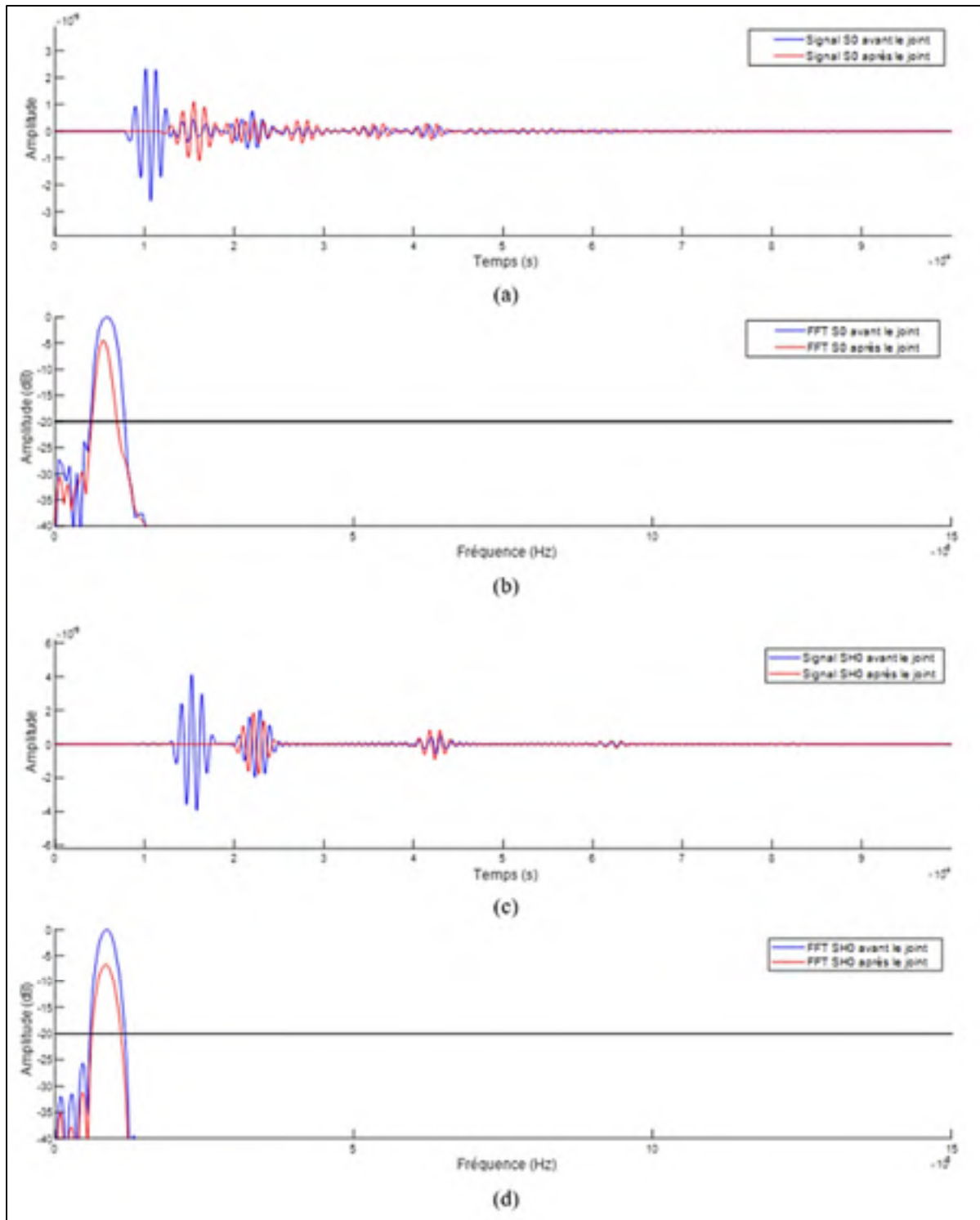


Figure 2.8 Formes des signaux obtenus par simulation et leur transformée de Fourier associée. (a) Signaux du mode  $S_0$  reçu en amont et en aval du joint à 90 kHz et (b) leur FFT associée. (c) Signaux du mode  $SH_0$  reçu en amont et en aval du joint à 90 kHz et (d) leur FFT associée.



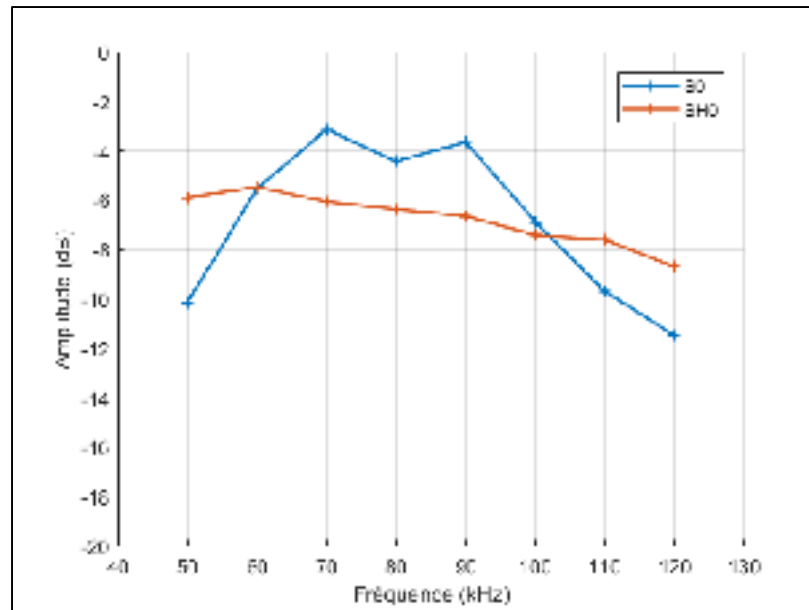


Figure 2.9 Atténuation du joint mesurée par FFT en surface pour les modes  $S_0$  et  $SH_0$

Les résultats sont cohérents et en accord avec ceux obtenus par FFT2D pour le mode  $SH_0$ . Ce mode n'a pas de problème de conversion lors de son interaction avec le joint et il est facile de distinguer l'onde incidente sur les signaux. Cependant pour le mode  $S_0$  la conversion de mode rend très difficile la séparation entre  $S_0$  et  $A_0$  sur le signal reçu en aval du joint. Cela explique la différence obtenue entre les résultats par FFT2D et ceux par FFT.

Néanmoins, il est possible de contourner le problème du mode  $A_0$ . En effet, en regardant la forme d'onde du mode  $S_0$  (Figure 2.10), on observe que les particules situées sur le plan médian de la plaque n'ont pas de déplacement selon l'épaisseur lors de la propagation de l'onde. En positionnant les points de mesures dans le plan médian du modèle de simulation, il est possible de relever uniquement l'atténuation du mode  $S_0$ . Les résultats obtenus sont présentés Figure 2.11.

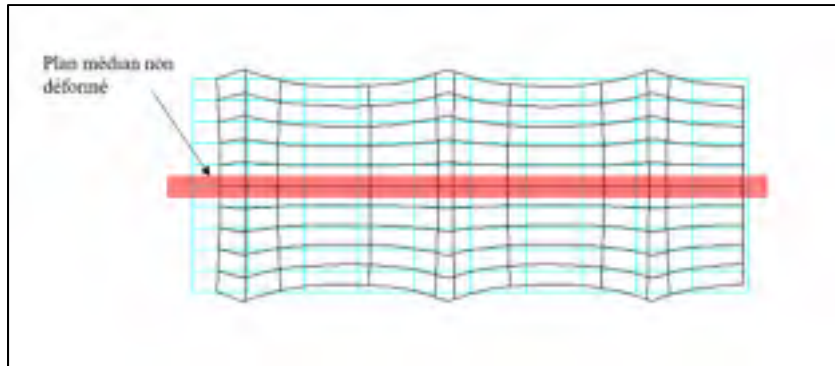


Figure 2.10 Forme du mode d'onde  $S_0$  pour une plaque d'acier de 12.7 mm d'épaisseur. Obtenu avec DISPERSSE (Pavlakovic et al., 1997)

Ces résultats nous montrent une bonne corrélation entre les mesures par FFT2D et celles par FFT simple avec en moyenne une différence de 1.2 dB qui s'explique par la différence de position des points de mesure. Ils laissent à penser que le mode  $SH_0$  est préférable au mode  $S_0$  avec une atténuation moyenne de 6.75 dB contre 11.30 dB. À titre de comparaison, après le passage de 5 joints, l'amplitude du mode  $SH_0$  serait 14 fois plus importante que celle du mode  $S_0$ , ce qui correspondrait à une différence de 23 dB. Il est possible de considérer un signal négligeable devant un autre si la différence d'amplitude entre les deux est supérieure ou égale à 20 dB, bien qu'un SNR typique se situe au-delà de 30 dB. Sachant que les planchers de réservoirs ont en moyenne une dizaine de joints par colonne de plaques, le mode  $S_0$  serait négligeable devant le mode  $SH_0$ .

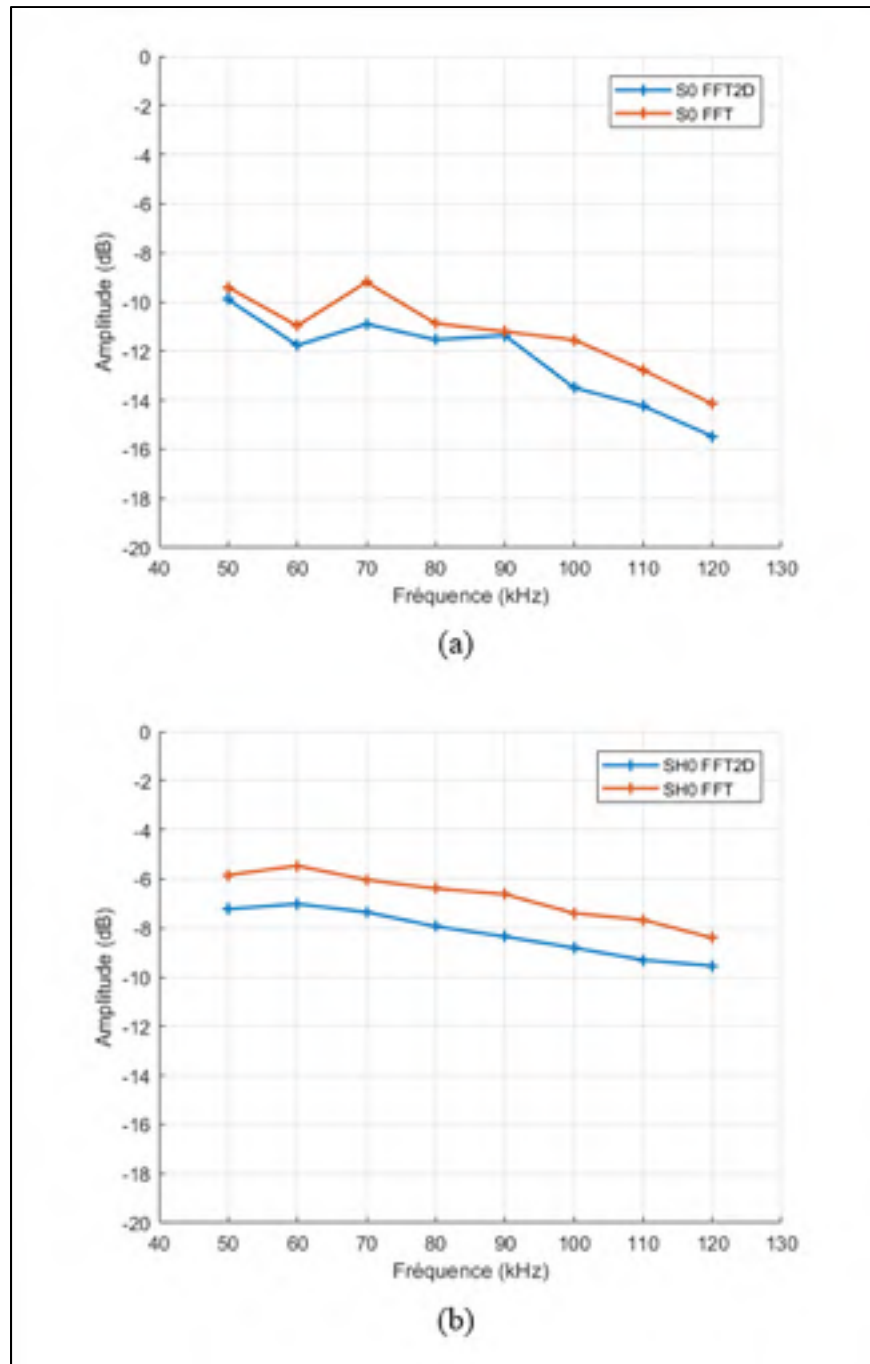


Figure 2.11 Comparaison des résultats obtenus par FFT2D réalisées en surface et par FFT avec des points de mesure dans le plan médian pour (a)  $S_0$  et (b)  $SH_0$

### 2.2.2.3 Influence du joint en incidence oblique

Dans la pratique, il peut être difficile de placer l'émetteur de manière à ce que l'onde émise arrive avec une incidence normale sur le joint. Afin de mesurer l'influence de l'angle d'incidence et conformément à la géométrie des plaques, l'onde incidente a été orientée de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  et  $30^\circ$  par rapport à la normale au joint. Les distances ont été gardées identiques à celles utilisées pour les simulations en incidence normale. Pour simplifier les simulations, la zone rectangulaire d'émission a été remplacée par une zone ponctuelle. La Figure 2.12 présente le dispositif de mesure. Les résultats obtenus par FFT dans le plan médian sont présentés Figure 2.13.

Ces simulations démontrent qu'un angle d'incidence inférieur à  $30^\circ$  n'aura pas ou peu d'influence sur l'atténuation provoquée par le joint. Cela permet d'établir que les expérimentations ne nécessitent pas un positionnement extrêmement précis des sondes pour l'inspection des cuves.

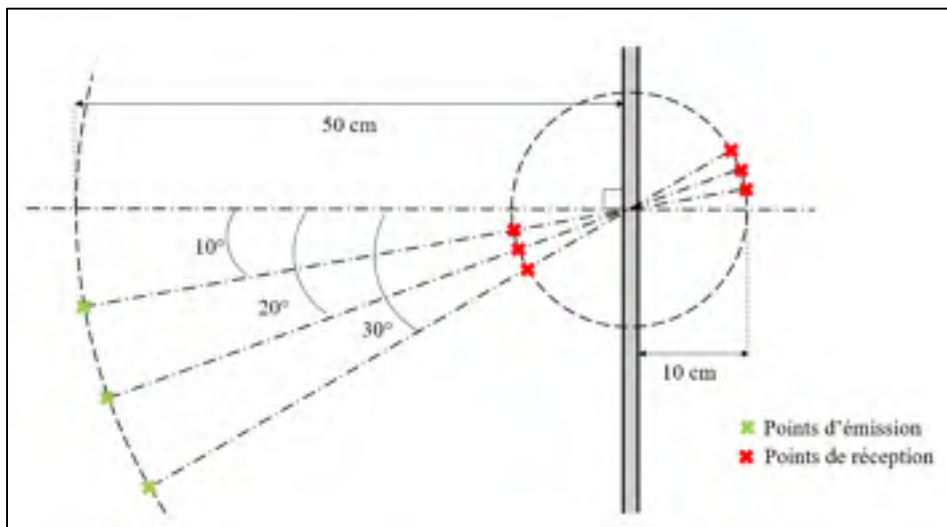


Figure 2.12 Disposition des points d'émission et de réception pour le modèle de simulation à incidences obliques

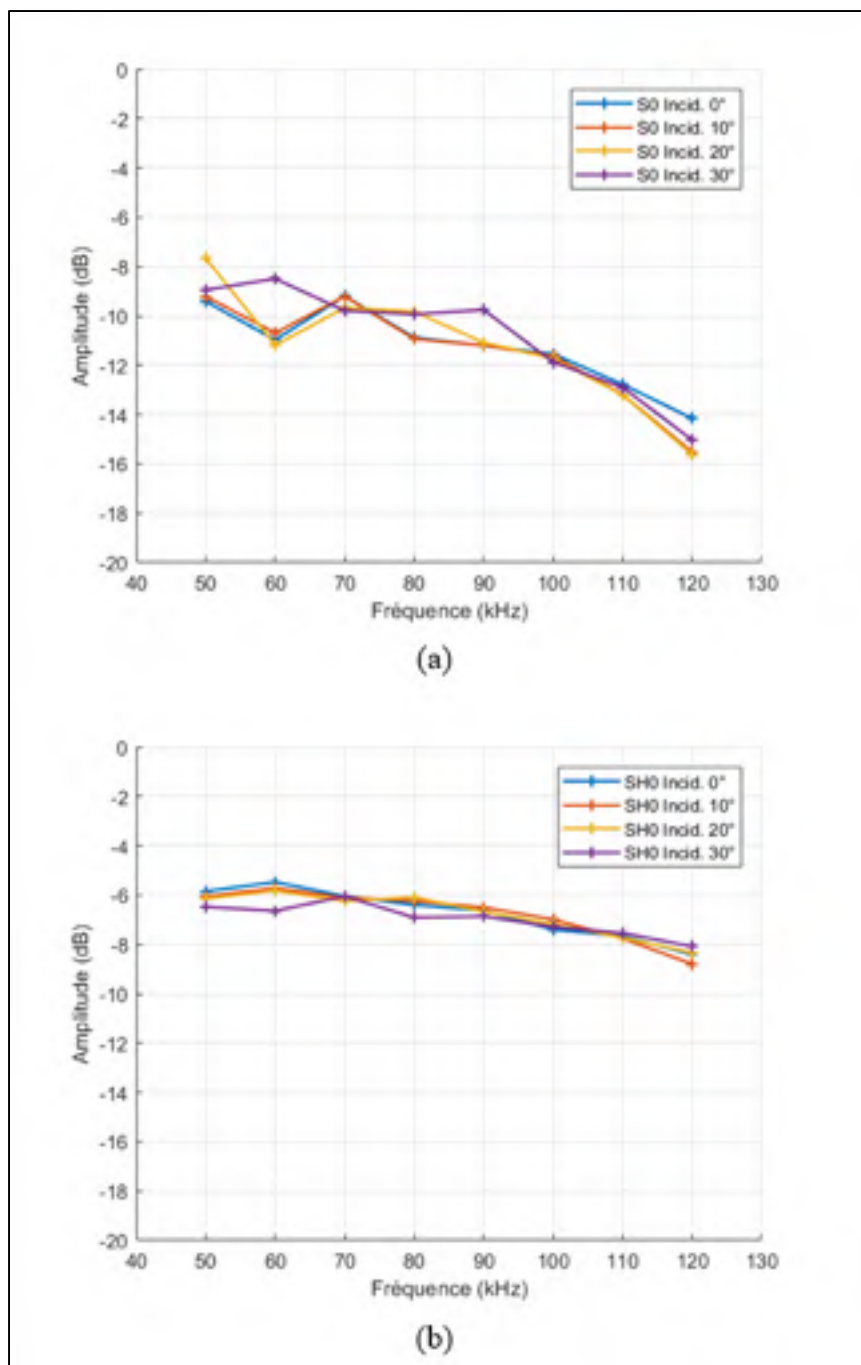


Figure 2.13 Comparaison des résultats obtenus par FFT des signaux reçus sur des points de mesures dans le plan médian pour différents angles d'incidence. (a) Résultats obtenus pour  $S_0$  et (b) Résultats obtenus pour  $SH_0$

### **2.3 Conclusions des résultats obtenus par simulation**

L'étude par simulation de l'influence du joint sur les modes d'ondes guidées  $S_0$  et  $SH_0$  a démontré que l'utilisation du mode fondamental de cisaillement horizontal est à privilégier pour l'inspection des planchers de réservoirs. De plus, la méthode de mesure par points uniques de réception (plus rapide qu'une FFT2D) donne des résultats similaires à ceux obtenus par transformée de Fourier spatiale. Le prochain chapitre cherchera à vérifier expérimentalement ces résultats.

## **CHAPITRE 3**

### **VALIDATION EXPÉRIMENTALE**

Cette partie présente la mise en œuvre expérimentale qui a été effectuée afin de valider le modèle de simulation utilisé et de conclure sur les résultats obtenus et détaillés dans le chapitre précédent. Le partenaire industriel Nucléom a permis la fabrication du dispositif expérimental composé de deux plaques d'acier de 12.7 mm d'épaisseur soudées entre elles via un cordon de soudure réalisé selon les recommandations de l'API. Ce chapitre détaillera les points suivants : la conception des sondes ultrasonores unidirectionnelles, la présentation du dispositif et du protocole de mesure utilisé et pour finir, les résultats obtenus lors des expérimentations.

#### **3.1 Conception des transducteurs unidirectionnels**

Conformément aux simulations réalisées en amont, les mesures expérimentales doivent être réalisées avec des transducteurs unidirectionnels. Cependant les sondes disponibles commercialement pour les expérimentations sont omnidirectionnelles. Une grande part de l'énergie de l'onde est donc perdue lors de sa propagation et il y a un risque d'interaction avec les frontières des plaques. Afin de générer des ondes ultrasonores les plus directives possibles, il a donc été nécessaire de concevoir et de fabriquer des transducteurs spécifiques à l'étude menée.

##### **3.1.1 Sondes piézoélectriques**

Les sondes piézoélectriques sont les plus couramment utilisées pour générer des ondes ultrasonores. Des études menées ultérieurement ont démontré l'efficacité de ces sondes afin de générer des ondes unidirectionnelles via l'utilisation d'une céramique piézoélectrique (Boivin, Viens et Bélanger, 2016).

### 3.1.1.1 Céramique piézoélectrique utilisée

Afin de générer des ondes de cisaillement, il est nécessaire d'utiliser une céramique piézoélectrique ayant une déformation latérale selon son épaisseur. La céramique choisie pour la fabrication de nos transducteurs est la céramique Titano-Zirconate de Plomb PZT-5H. Ce matériau piézocéramique possède la matrice piézoélectrique suivante :

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 730 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 730 & 0 & 0 \\ -265 & -265 & 530 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{V}}$$

Cette céramique est utilisée car elle possède la constante piézoélectrique  $d_{15}$  la plus élevée liée à la génération d'un mouvement de cisaillement pur. Les propriétés détaillées du PZT-5H sont disponibles sur le site du fournisseur (<http://bostonpiezooptics.com/ceramic-materials-pzt>).

Des contraintes techniques imposées par Boston Piezo-Optics limitent les dimensions de la céramique à 5 cm de longueur pour 2.5 cm de largeur. Le mouvement de cisaillement ne peut se faire uniquement selon les 2.5 cm de largeur. La Figure 3.1 détaille la géométrie de la plaque piézocéramique.

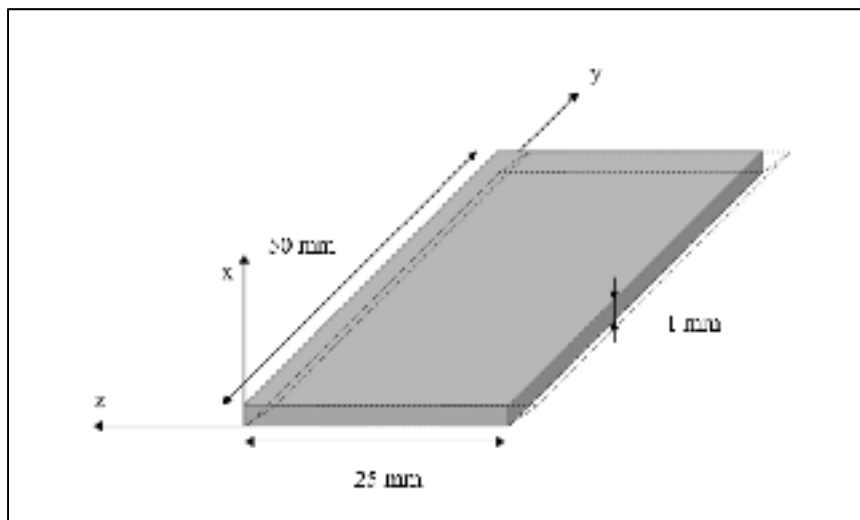


Figure 3.1 Géométrie de la céramique piézoélectrique PZT-5H



Afin d'utiliser le moins de plaques PZT-5H possible, et pour respecter les critères géométriques permettant la génération d'ondes guidées ultrasonores unidirectionnelles (Boivin, Viens et Bélanger, 2016), il a été nécessaire de choisir les fréquences centrales de fonctionnement des transducteurs  $S_0$  et  $SH_0$ . Ne pouvant fabriquer un transducteur par mode et par fréquence, seulement une fréquence par mode sera sélectionnée.

Pour générer le mode  $S_0$ , la déformation de la céramique piézoélectrique doit se faire selon la direction de propagation de l'onde, c'est-à-dire selon l'axe  $z$ . Les dimensions du matériau piézocéramique seront donc limitées à 25 mm dans la direction de propagation de l'onde et 50 mm perpendiculairement à cette direction. Inversement, pour  $SH_0$  la déformation doit se faire perpendiculairement à la direction de propagation qui est selon l'axe  $y$ . Dans ce cas, les dimensions seront limitées à 50 mm dans la direction de propagation et 25 mm perpendiculairement à celle-ci.

Les tailles idéales et possibles techniquement des plaques piézoélectriques pour chaque fréquence sont présentées Tableau 3.1 :

Tableau 3.1 Dimensions des céramiques piézoélectriques pour la génération d'ondes guidées unidirectionnelles

Fréquence (kHz)	Transducteur $S_0$		Transducteur $SH_0$	
	Dimension axe $y$ (mm)	Dimension axe $z$ (mm)	Dimension axe $y$ (mm)	Dimension axe $z$ (mm)
50	63.2   50	27.2   25	31.6	108.6   25
60	52.7   50	22.6	26.3	90.2   25
70	45.1	19.3	22.6	77.1   25
80	39.5	16.8	19.7	67.2   25
90	35.1	14.8	17.6	59.4   25
100	31.6	26.4   25	15.8	53.1   25
110	28.7	23.9	14.4	48.0   25
120	26.	21.7	13.2	43.4   25

En rouge sont représentées les dimensions non réalisables avec les plaques PZT-5H fournies par Boston Piezo-Optics. Les dimensions en oranges sont celles présentant une variation inférieure à 10% de la dimension nominale de la céramique. Il est possible de considérer que cette variation n'a qu'une influence minime sur l'unidirectivité de l'onde générée. Les dimensions en vert représentent les dimensions techniquement réalisables à la place des dimensions rouge et orange.

À la vue de ces dimensions, les fréquences choisies sont 100 kHz pour le mode  $S_0$  et 90 kHz pour le mode  $SH_0$ . Ces fréquences permettent d'effectuer une seule et unique coupe sur la plaque PZT-5H afin d'obtenir nos deux transducteurs (Figure 3.2).

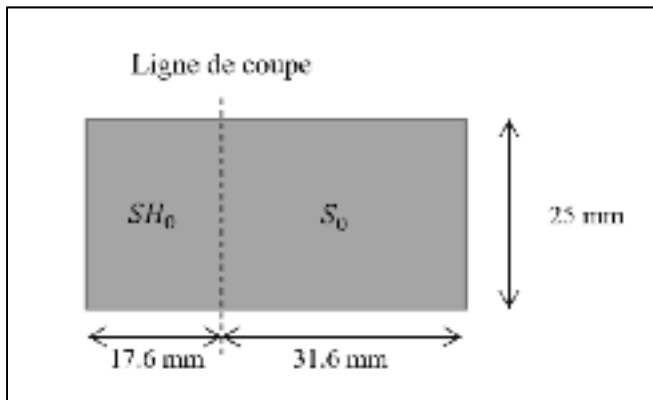


Figure 3.2 Schéma de coupe du matériau piézo-céramique PZT-5H

### 3.1.1.2 Réalisation des transducteurs piézoélectriques

Afin de fabriquer les sondes ultrasonores piézoélectriques, des boîtiers en ABS ont été réalisés par impression 3D afin de maintenir le matériau piézo-céramique et les autres constituants des sondes. La Figure 3.3 détaille les dimensions des sondes :

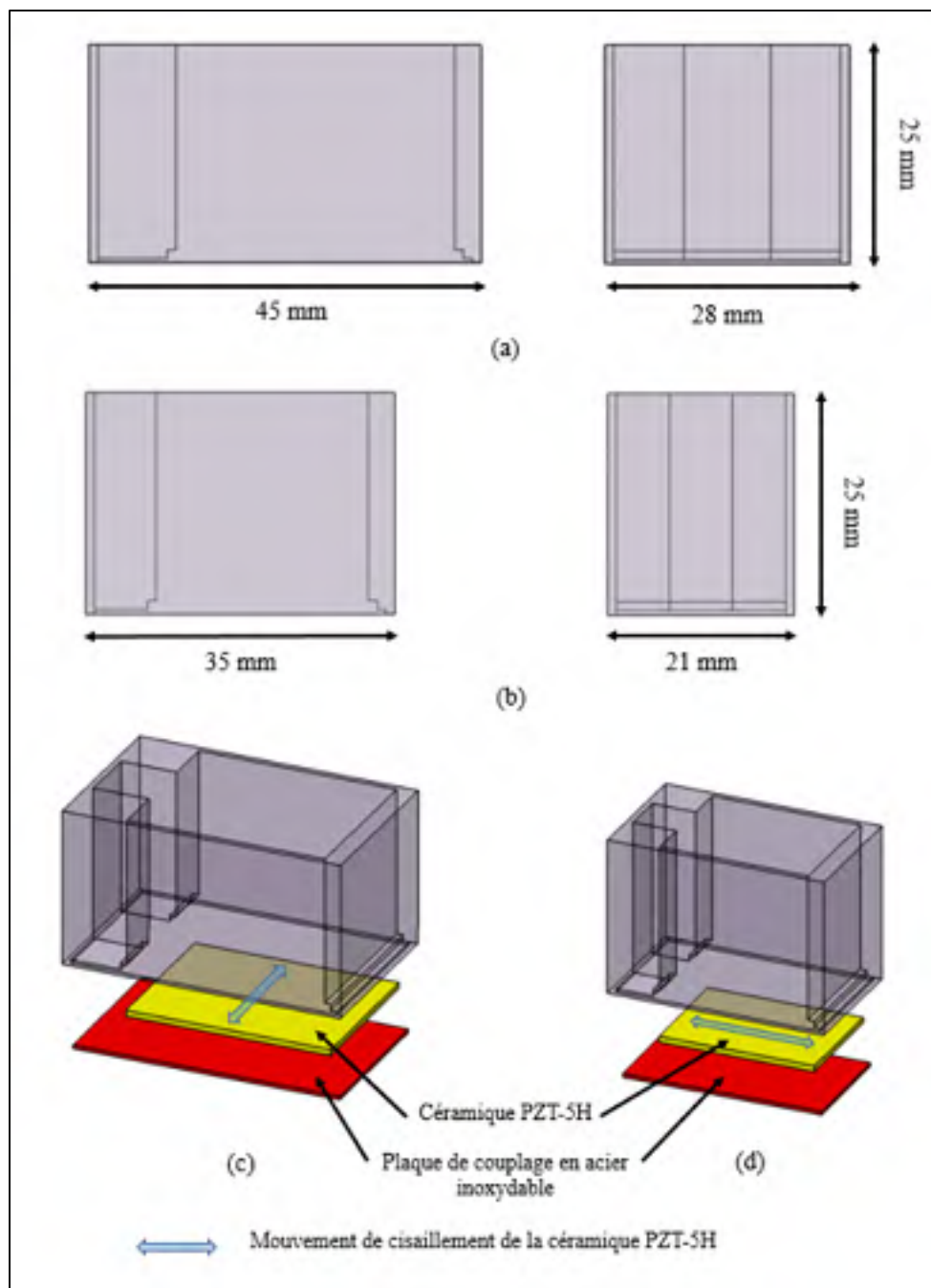


Figure 3.3 Dimensions des boîtiers ABS et composants des transducteurs piézoélectriques. (a) Dimensions du boîtier  $S_0$  centré à 100 kHz, (b) Dimensions du boîtier  $SH_0$  centré à 90 kHz, (c) Vue éclatée du transducteur  $S_0$ , (d) Vue éclatée du transducteur  $SH_0$

Les sondes sont donc constituées d'un boîtier ABS, du matériau piézocéramique PZT-5H, d'une plaque de couplage en acier inoxydable et d'une couche absorbante placée au-dessus de la céramique. La plaque d'acier est collée au matériau piézocéramique par de l'époxy d'argent. Cet époxy conducteur permet de relier l'électrode inférieure de la céramique à un des deux fils d'alimentation qui est collé directement sur le dessus de la plaque d'acier.

La partie supérieure des transducteurs est faite d'un mélange d'époxy et de tungstène (Archambault, 2010). Ce mélange absorbant permet d'éviter les réflexions avec la céramique, mais aussi de consolider toute la sonde. Une photographie des sondes réalisées est présentée Figure 3.4.

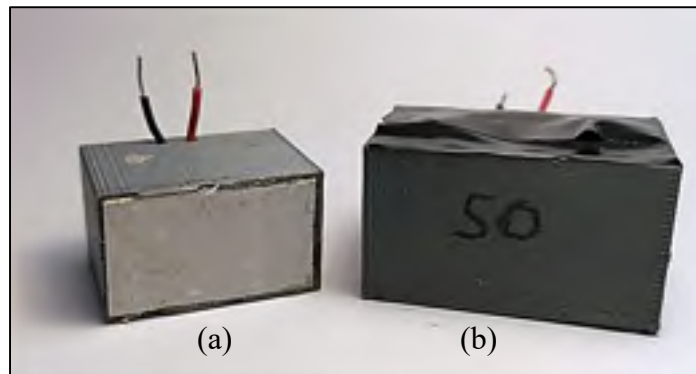


Figure 3.4 Photographie des transducteurs fabriqués. (a) Transducteur  $SH_0$  vu de dessous, (b) Transducteur  $S_0$  vu de face

Après la fabrication des sondes, leur directivité a été vérifiée afin de valider l'unidirectivité des transducteurs. Pour se faire, la sonde est placée sur une plaque d'acier de 12.7 mm d'épaisseur et des mesures sont effectuées de 0 à 90 degrés à partir de l'axe représentant la direction de propagation de l'onde. L'amplitude maximale de l'onde incidente est relevée pour chaque angle et est normalisée selon l'amplitude du signal mesuré pour un angle de 0 degré. Les transducteurs utilisés pour la réception de l'onde sont des transducteurs à ondes de cisaillement V154-RM d'Olympus. Ils sont capables de mesurer à la fois des ondes S et SH en fonction de leur orientation. La Figure 3.5 présente un schéma du dispositif et les résultats obtenus.

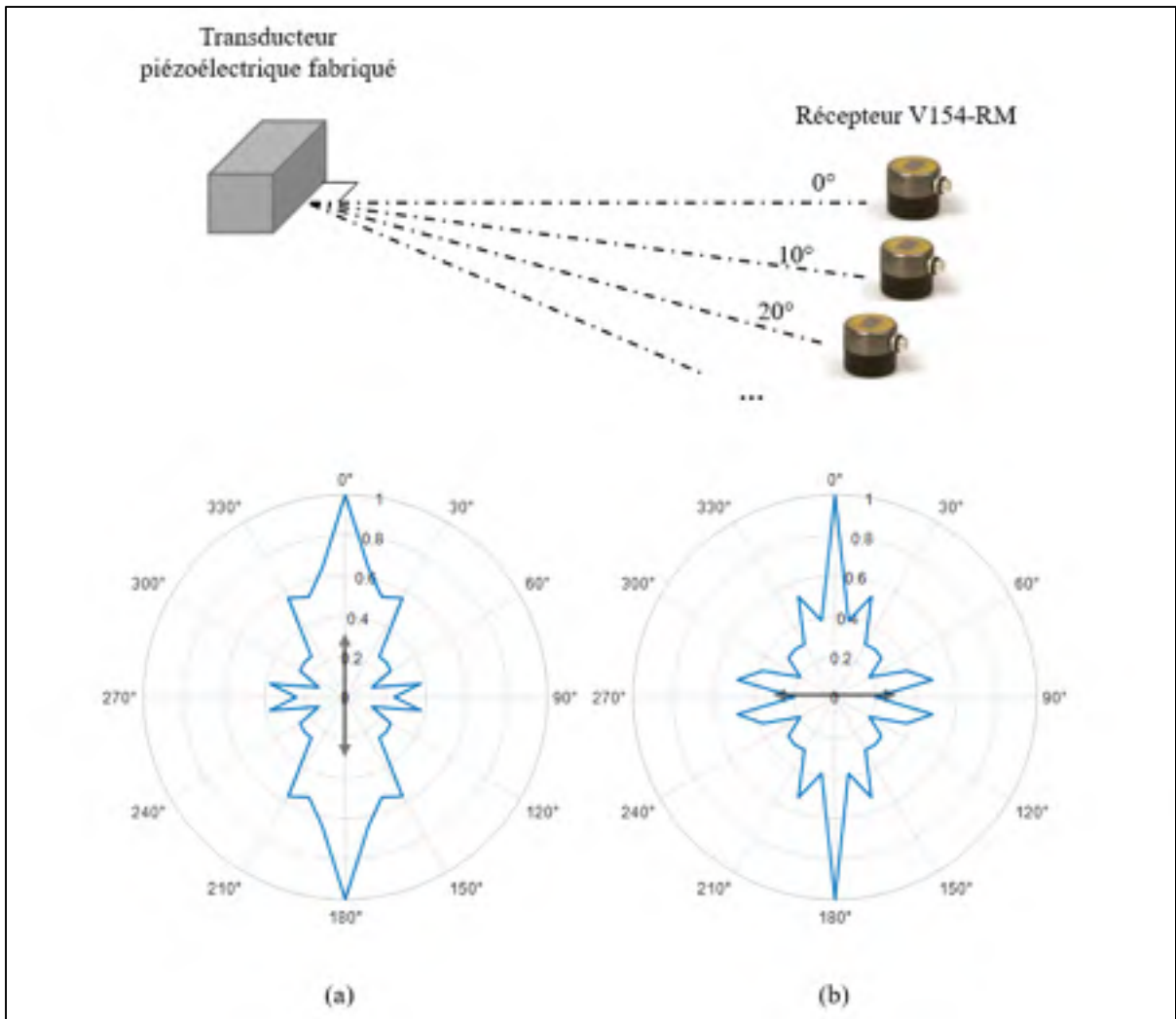


Figure 3.5 Schéma de mesure des directivités et modèles de directivité des transducteurs (a)  $S_0$  à 100 kHz et (b)  $SH_0$  à 90 kHz

Les modèles de directivités présentés montrent que le transducteur  $S_0$  possède une meilleure directivité que le transducteur  $SH_0$  avec l'énergie de l'onde principalement concentrée dans une ouverture de  $\pm 30^\circ$ . Cela peut s'expliquer par le fait que générer une onde SH par transducteur piézoélectrique est compliqué, car la direction de déformation du matériau piézocéramique (flèche noire sur la figure) est perpendiculaire à la direction de propagation (angle de  $0^\circ$ ). De plus, si l'on se réfère au Tableau 3.1, les dimensions de la céramique  $SH_0$  ne sont pas idéales avec une longueur de 25 mm au lieu de 59.4 mm. Il est donc compréhensible que la directivité de l'onde ne soit pas parfaite. Ce problème n'a pas lieu dans le cas du

transducteur  $S_0$  car les dimensions sont elles correctes à une légère variation prêt de 1.4 mm dans la largeur. Il est donc normal qu'une différence entre les deux directivités soit visible.

Pour pallier le problème du transducteur  $SH_0$ , une méthode de génération différente a été utilisée : la magnétostriction.

### 3.1.2 Fabrication de la sonde magnétostrictive

Les règles de géométrie des transducteurs magnétostrictifs ont été développées précédemment dans la revue de littérature (cf. paragraphe 1.2.2.1). Contrairement au transducteur piézoélectrique  $SH_0$ , il n'y a pas de limite géométrique à la fabrication de la sonde. Néanmoins, afin d'avoir une comparaison la plus exacte possible, la fréquence centrale de la sonde magnétostrictive  $SH_0$  a été fixée elle aussi à 90 kHz. De plus, contrairement aux sondes piézoélectriques, la gamme fréquentielle de fonctionnements du transducteur est très limitée étant donné que la géométrie de la sonde définit la longueur d'onde du signal.

Comme précisé dans la section 1.2.2.1, l'espace entre le centre de deux enroulement définit la longueur d'onde générée (Lee et al., 2009). Dans notre cas et pour une fréquence centrale de 90 kHz, nous avons donc :

$$D = \frac{\lambda}{2} = 17.6 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Le nombre de bobine détermine la sélectivité en nombre d'onde du transducteur. En considérant un nombre de 4 enroulements, il est possible de calculer les nombres d'ondes excités en effectuant une transformé de Fourier du schéma de polarisation spatiale des bobines (Figure 3.6 (a)). Ce schéma de polarisation est une fonction carrée d'une période égale à  $2xD$ .

De plus, le nombre de cycles du signal envoyé dans le transducteur va définir le contenu fréquentiel du signal généré. Comme précisé précédemment, les transducteurs sont alimentés par un signal de 5 cycles fenêtré par une fonction de Hann. Dans le cas d'une fréquence centrale

de 90 kHz, les fréquences à -20 dB en dessous de la fréquence d'amplitude la plus élevée sont 60 kHz et 120 kHz (Figure 3.6 (b)). En dehors de ces fréquences, on peut considérer que l'onde émise est totalement réfléchiée ou convertie.

Avec tous ces paramètres, la région de fonctionnement de notre transducteur est donnée Figure 3.6 (c). Ainsi, en choisissant une fréquence centrale de fonctionnement de 90 kHz pour notre sonde magnétostrictive, nous pouvant générer le mode  $SH_0$  dans la quasi-totalité de notre plage d'étude.

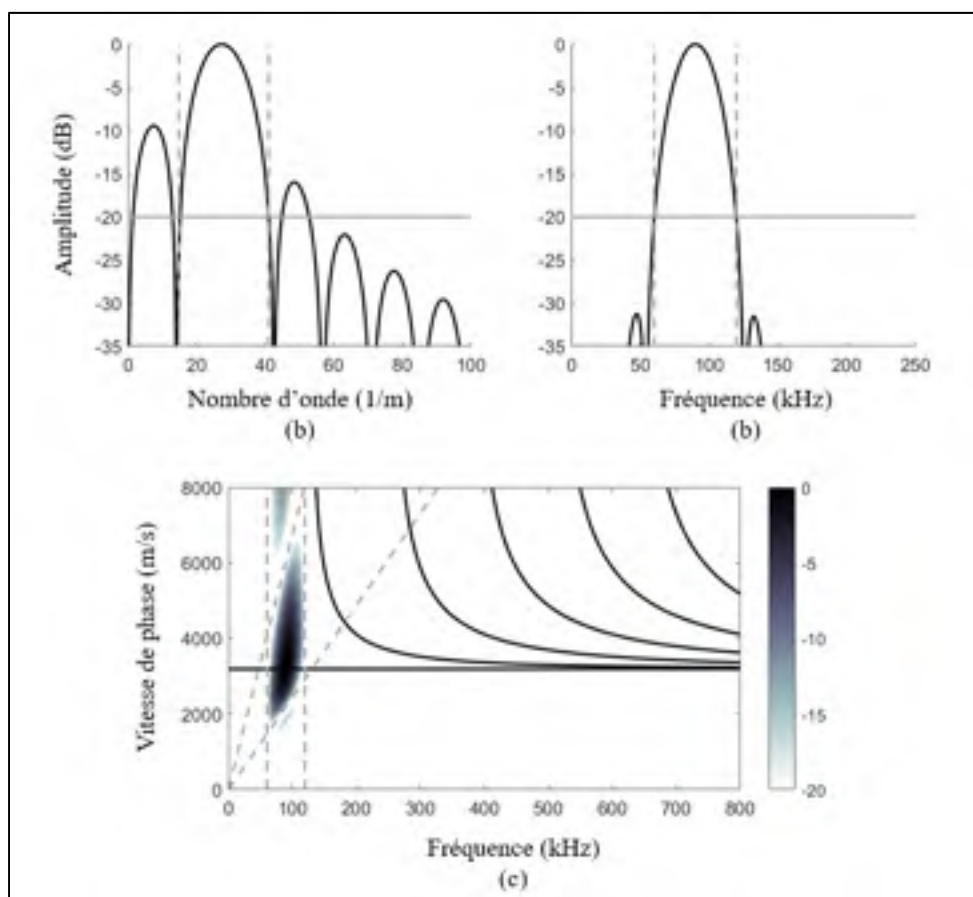


Figure 3.6 (a) Sélectivité en nombre d'onde de la sonde magnétostrictive, (b) Contenu fréquentiel pour une fréquence centrale de fonctionnement de 90 kHz, (c) Plage de fonctionnement du transducteur magnétostrictif dans le plan fréquence - vitesse de phase

Les enroulements autour du support sont réalisés avec un fil de cuivre d'un diamètre de 0.315 mm, ainsi l'espace entre deux bobines reste minimal. Dans notre cas, le nombre de bobines sera limité à 4 afin d'avoir une sonde de taille raisonnable. Les aimants utilisés sont des aimants de forte puissance (Néodyme de grade N55). La Figure 3.7 présente une photographie de la sonde magnétostrictive.

Une étude de directivité a été menée dans les mêmes conditions que celles effectuées pour les transducteurs piézoélectriques. La comparaison entre la sonde magnétostrictive et la sonde piézoélectrique pour  $SH_0$  est présentée Figure 3.8.

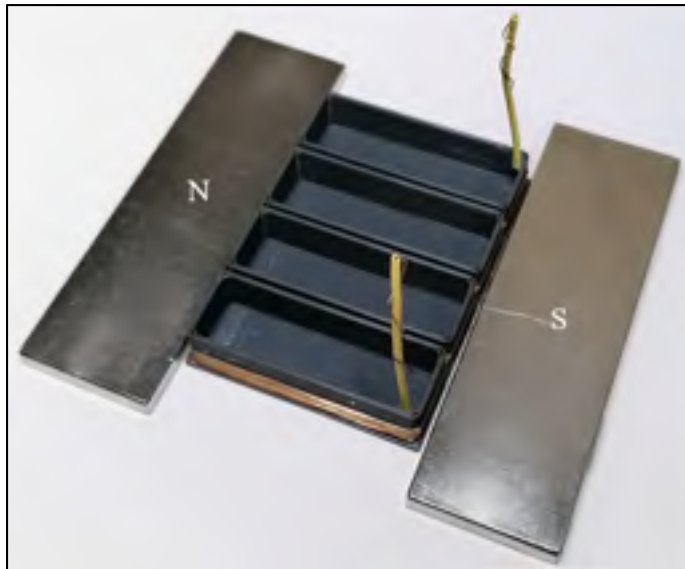


Figure 3.7 Photographie du transducteur Magnétostrictif  $SH_0$  centré à 90 kHz



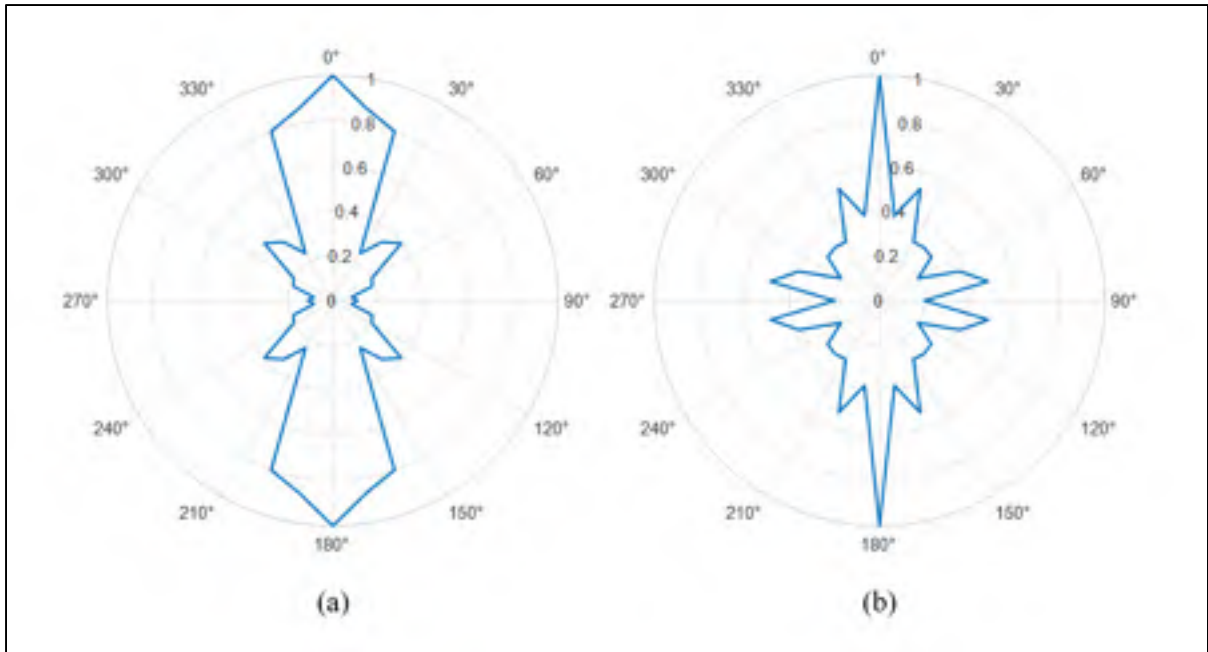


Figure 3.8 Comparaison des modèles de directivité pour (a) le transducteur Magnétostrictif  $SH_0$  90 kHz et (b) le transducteur Piézoélectrique  $SH_0$  90 kHz

La directivité de la sonde magnétostrictive est bien meilleure et beaucoup plus uniforme que celle du transducteur piézoélectrique avec une concentration de 80% de l'énergie de l'onde dans une ouverture de  $\pm 20^\circ$ . Cela laisse à penser que ce type de transducteur serait plus adapté à la génération d'onde SH dans notre cas d'étude.

Les deux sondes  $SH_0$ , magnétostrictive et piézoélectrique, seront tout de même utilisées pour effectuer les mesures expérimentales afin d'obtenir une comparaison dans le cas d'une application concrète.

### 3.2 Dispositif expérimental et expérimentations

Cette section présente les caractéristiques du dispositif expérimental réalisé et détaille le matériel utilisé. Une description du protocole sera effectuée avant la présentation des résultats.

### 3.2.1 Présentation du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été réalisé avec l'aide du partenaire industriel Nucléom. Il est composé de 3 plaques de dimensions 46x32x1/2'', 32x32x1/2'' et 32x16x1/2'' composées d'acier carbone tel que celui utilisé pour la fabrication des planchers de réservoirs industriels. Les plaques sont soudées entre elles selon les recommandations de l'Institut Américain du Pétrole (API). Un technicien qualifié dans la soudure des planchers de réservoirs a été contacté afin de reproduire des soudures conformes à celles présentes dans les cuves. Le schéma ainsi que la photographie du dispositif expérimental sont présentés Figure 3.9.

Un signal de 5 cycles fenêtré par une fonction de Hann est envoyé de l'ordinateur vers le générateur de signal (Agilent® 33500B). Un amplificateur de puissance (Ritec® RPR-400 Pulser Receiver) amplifie le signal qu'il reçoit du générateur avant de l'envoyer vers les transducteurs qui ont été fabriqués en passant par une résistante (Ritec® RT-150). L'onde générée est ensuite mesurée par un transducteur omnidirectionnel à ondes de cisaillement V154-RM d'Olympus, capable de mesurer des ondes S ou SH en fonction de son orientation. Le signal est ensuite enregistré sur l'ordinateur via un oscilloscope (Keysight® DSOX314T).

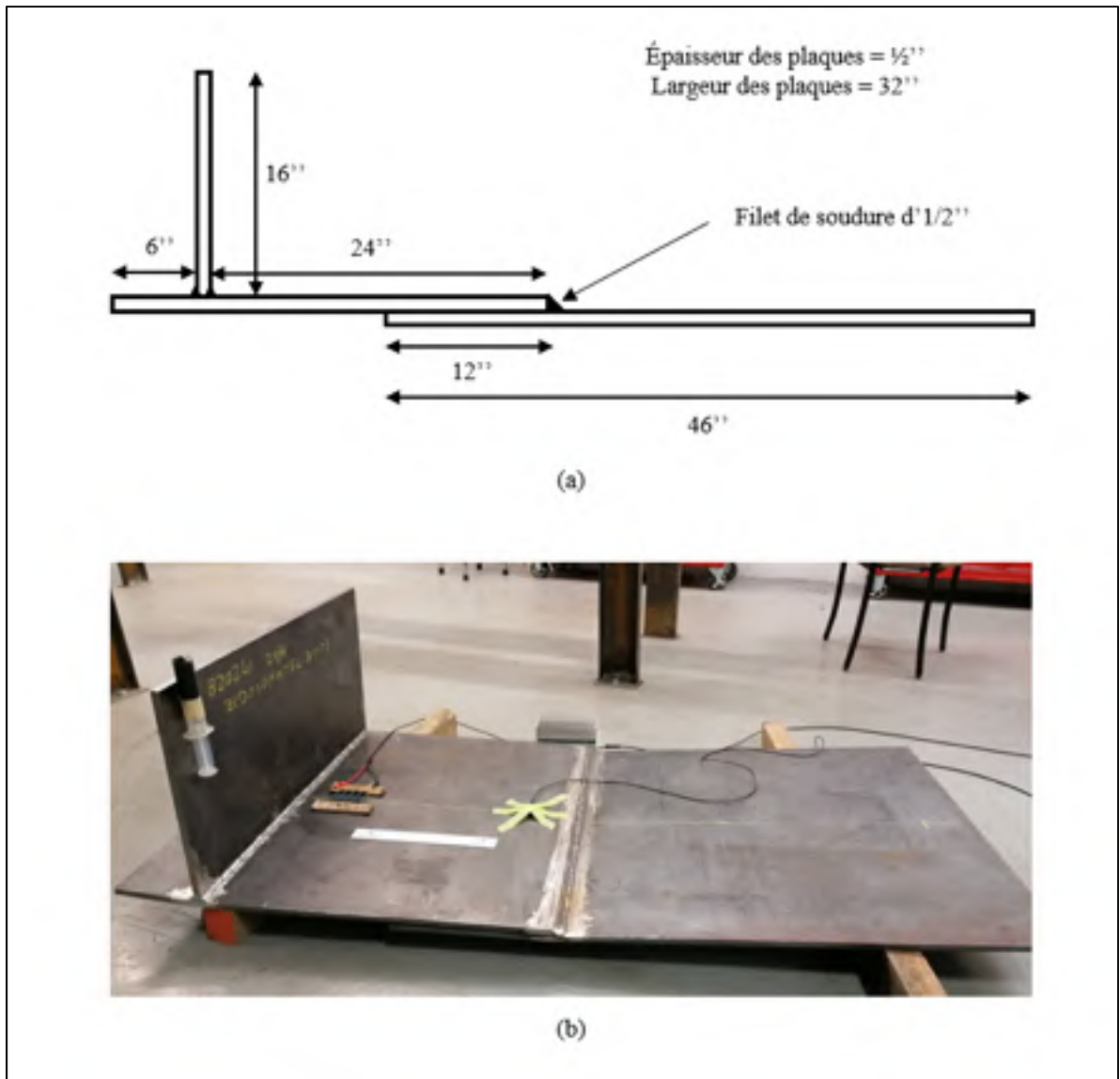


Figure 3.9 (a) Schéma du dispositif expérimental et (b) Photographie du dispositif

Le schéma des branchements entre les différents dispositifs est présenté Figure 3.10. Il est à noter que le contrôle du générateur de signal est fait par ordinateur, et que l'oscilloscope communique lui aussi directement avec l'ordinateur pour l'enregistrement des données.

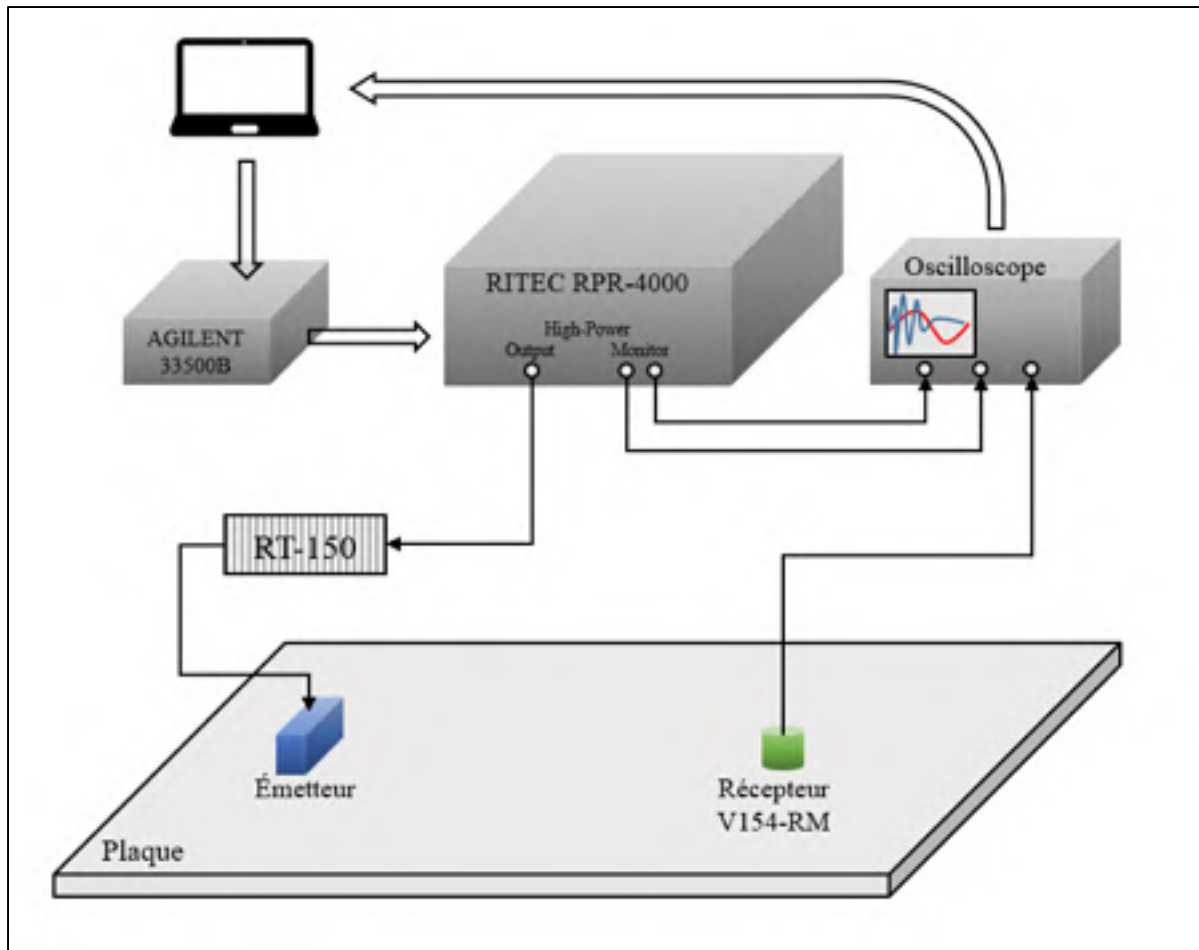


Figure 3.10 Communications entre les différents dispositifs utilisés pour les mesures expérimentales

### 3.2.2 Protocole expérimental

Un protocole expérimental a été mis en place afin de reproduire des séries de mesures identiques et de pouvoir mener une étude comparative la plus exacte possible. Pour commencer, le positionnement des sondes (émetteurs et récepteurs) est identique aux simulations pour une incidence normale (se référer à la Figure 2.4). Les mesures sont réalisées ponctuellement avant et après le joint et l'atténuation induite par le joint de recouvrement est mesurée par la différence d'amplitude entre les FFT des signaux reçus en amont et en aval du joint. Une photographie et un schéma de la disposition des sondes sur le dispositif expérimental sont présentés Figure 3.11.

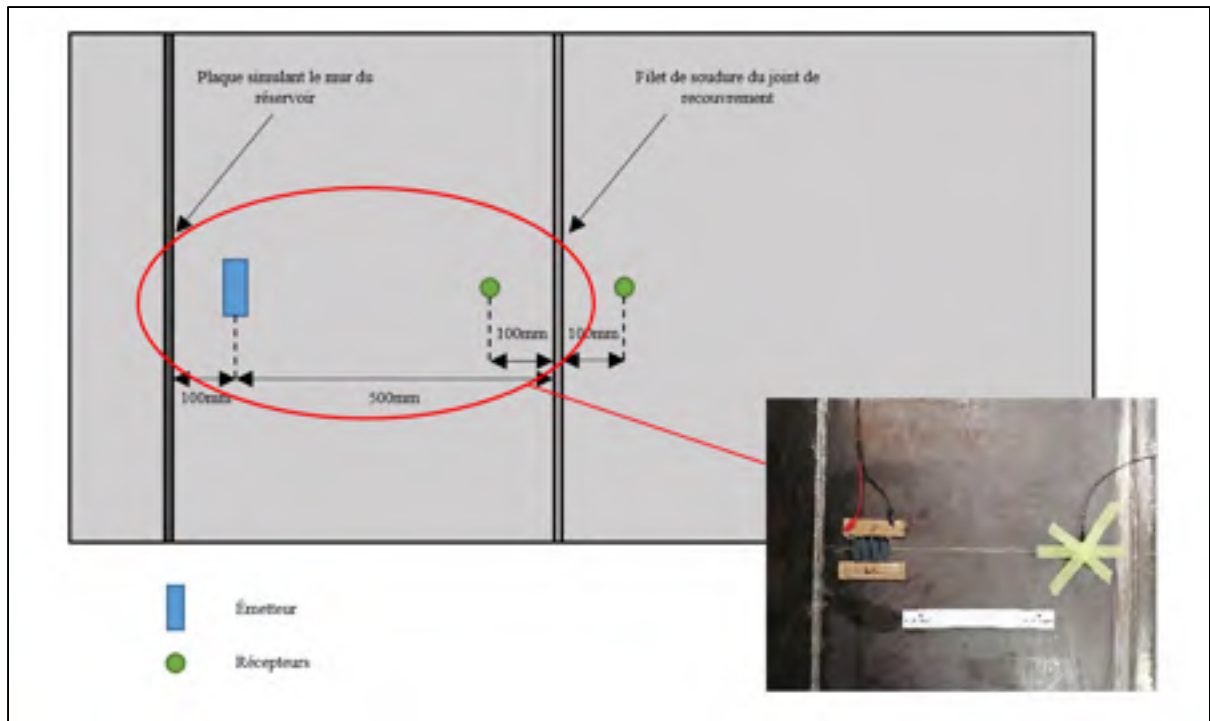


Figure 3.11 Schéma et photographie de la disposition des sondes sur le dispositif expérimental

Le protocole de mesure est détaillé selon l'organigramme Figure 3.12. Ce protocole est répété pour chacune des sondes ( $S_0$  piézoélectrique,  $SH_0$  piézoélectrique et  $SH_0$  magnétostrictive). De plus, un test de répétabilité a été effectué afin de s'assurer que le positionnement de la sonde réceptrice n'influence pas les mesures. En effet, le transducteur émetteur n'est positionné qu'une seule fois pendant les mesures contrairement à la sonde réceptrice qui est placée en amont et en aval du joint. Afin de tester la répétabilité des mesures, le même protocole que celui détaillé Figure 3.12 est utilisé avec les changements suivants :

- La sonde réceptrice n'est pas repositionnée en aval du joint, mais seulement retirée puis replacée au même endroit en amont.
- Les mesures sont répétées 4 fois de suite.

La différence d'amplitude entre les FFT des signaux reçus pour chaque série de mesures permet d'obtenir le niveau de répétabilité des expériences.

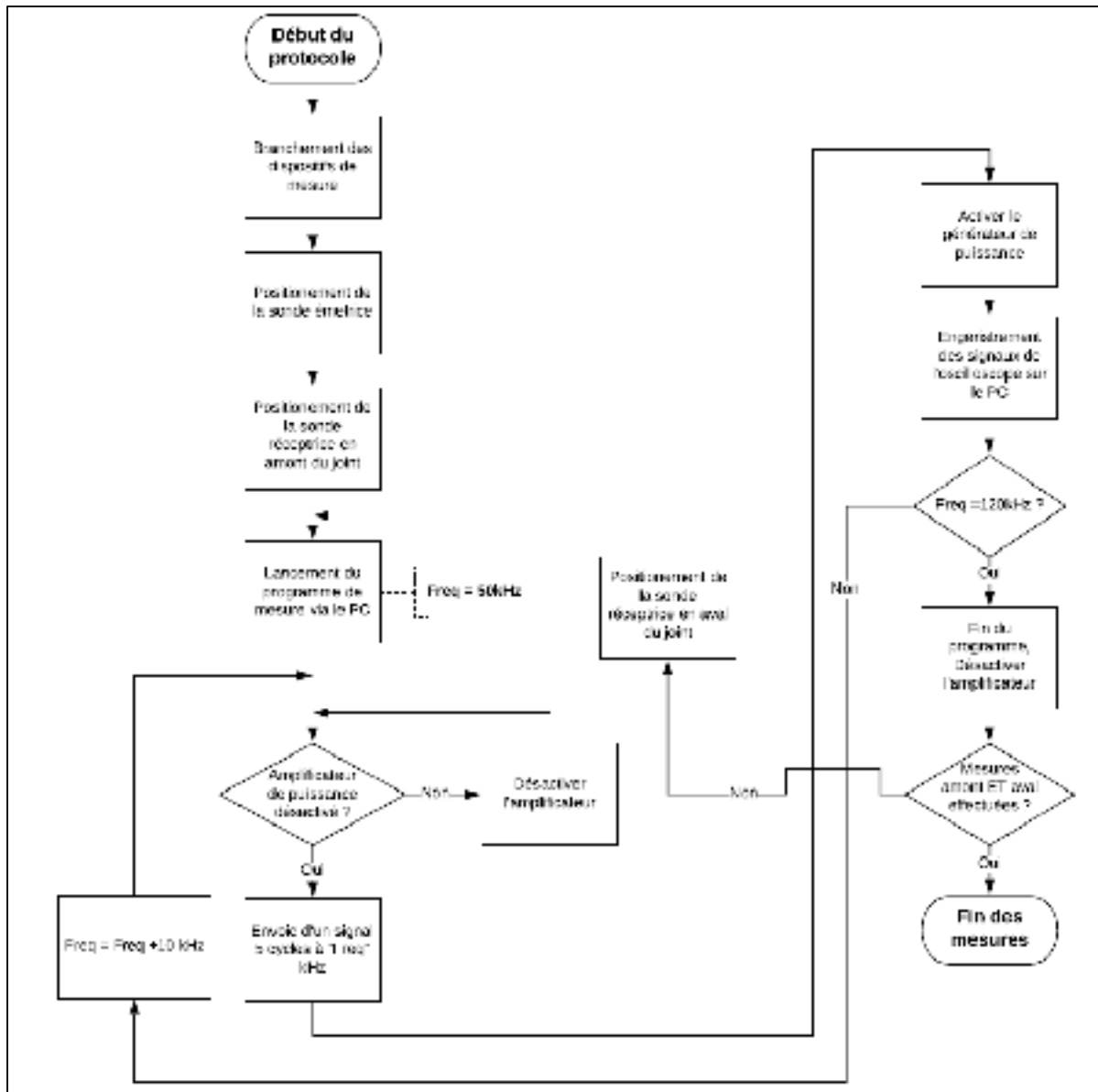


Figure 3.12 Protocole de mesures suivi pour les expérimentations

### 3.2.3 Résultats expérimentaux

La première partie des expérimentations consiste à vérifier la bonne répétabilité des mesures via le protocole détaillé dans la section précédente. Les 4 séries de mesures permettent d'effectuer 6 comparaisons pour chacune des fréquences. De ces comparaisons est mesurée la

variation d'amplitude des signaux par FFT. Un exemple de comparaison entre deux signaux est donné Figure 3.13.

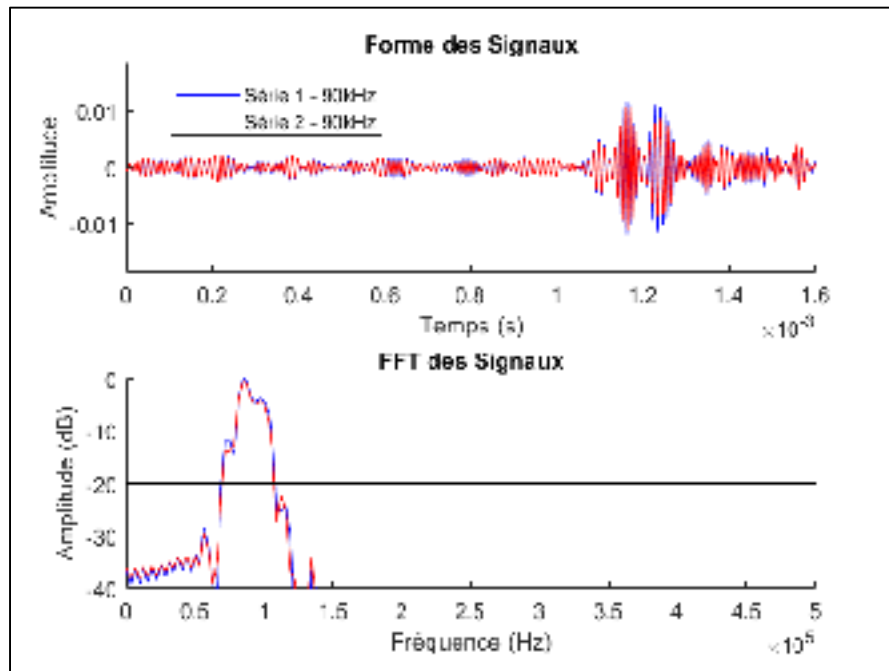


Figure 3.13 Exemple de mesure de répétabilité pour un signal à 90 kHz

L'écart type des variations d'amplitude pour chaque fréquence est donné par la formule suivante :

$$S = \sqrt{\sum \frac{(x - \bar{x})^2}{N}} \quad (3.2)$$

Avec  $\bar{x}$  la moyenne des variations d'amplitude mesurées,  $N$  le nombre de répétitions. Le tableau 3.2 résume les variations d'amplitude en dB pour chaque fréquence ainsi que la moyenne et l'écart type associé.

Tableau 3.2 Différences d'amplitude entre les différentes séries de mesure, moyenne et écart type pour chaque fréquence étudiée

<b>Fréquences (kHz)</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>110</b>	<b>120</b>
1 vs 2 (dB)	1.48	0.74	1.16	1.35	0.38	0.82	1.32	0.92
1 vs 3 (dB)	1.05	0.40	0.84	0.40	1.03	0.11	1.03	0.69
1 vs 4 (dB)	3.02	1.86	2.74	1.45	1.44	1.93	0.45	1.87
2 vs 3 (dB)	0.73	1.07	0.66	0.89	0.54	0.50	0.15	0.13
2 vs 4 (dB)	1.51	1.37	1.32	1.51	1.05	1.10	0.89	1.01
3 vs 4 (dB)	1.97	2.04	2.35	2.43	2.24	2.02	1.40	1.31
<b>Moyenne (dB)</b>	<b>1.63</b>	<b>1.25</b>	<b>1.51</b>	<b>1.34</b>	<b>1.11</b>	<b>1.08</b>	<b>0.87</b>	<b>0.99</b>
<b>Écart type (dB)</b>	<b>0.73</b>	<b>0.58</b>	<b>0.77</b>	<b>0.62</b>	<b>0.61</b>	<b>0.70</b>	<b>0.45</b>	<b>0.53</b>

Ces valeurs d'écart type montrent que la variation d'amplitude conséquente au repositionnement du récepteur ne dépasse pas 1dB. Cela implique qu'une variation inférieure à 10% est générée lors de nos mesures ce qui peut être considéré comme acceptable. La répétabilité des expérimentations est donc validée.

Par la suite, les expérimentations ont été menées suivant le protocole présenté Figure 3.12 pour chacune des sondes construites. Les résultats expérimentaux sont comparés à ceux obtenus par simulation afin de valider ou non le modèle par éléments finis.

La Figure 3.14 présente l'atténuation induite par le joint pour chaque mode d'onde en fonction de la fréquence, comparée à celle obtenue par simulation.



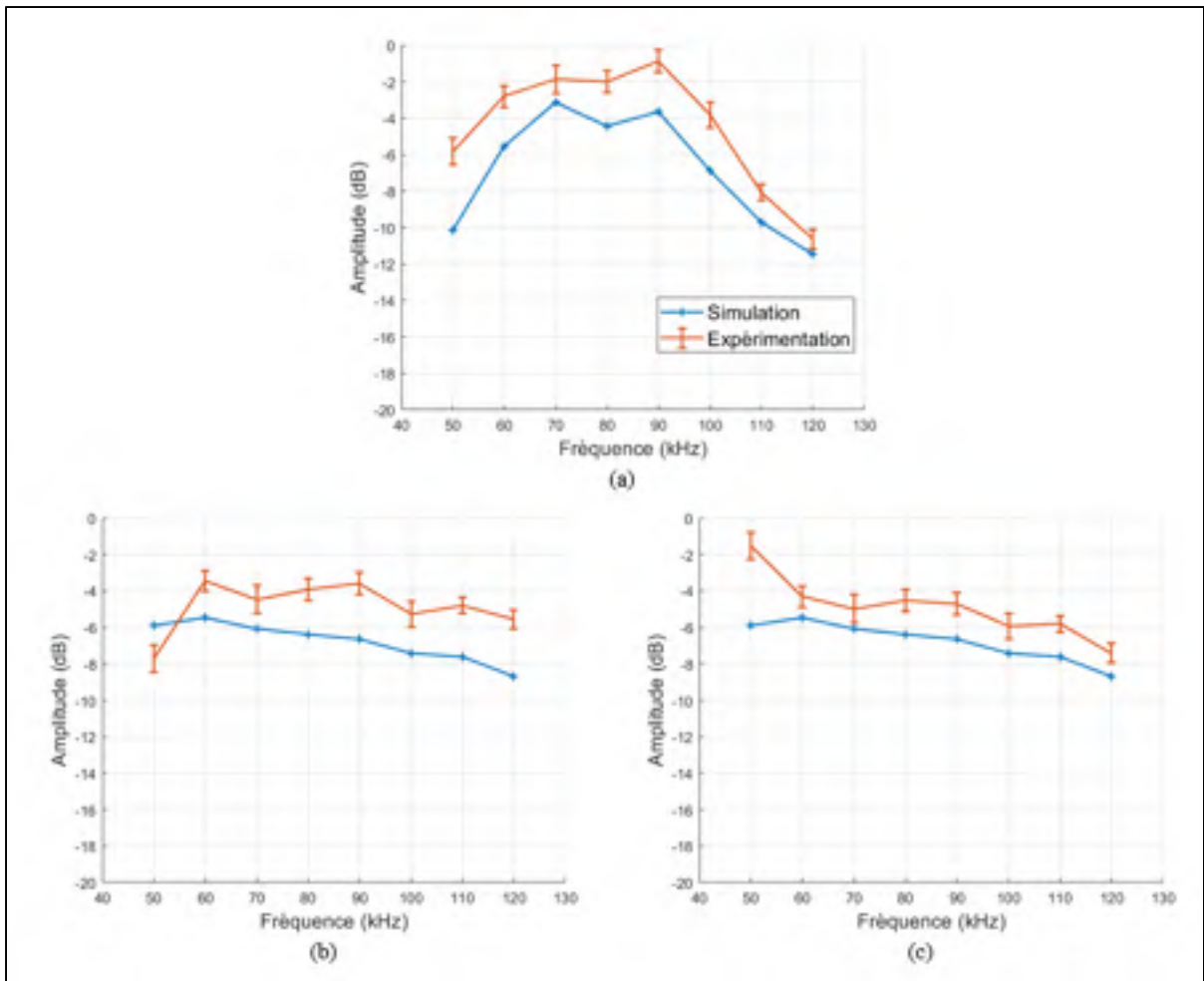


Figure 3.14 Comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus par simulation pour chaque mode et sonde utilisés : (a) sonde piézoélectrique  $S_0$ , (b) sonde piézoélectrique  $SH_0$ , (c) sonde magnétostrictive  $SH_0$

La comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation montre une bonne corrélation pour le mode  $S_0$ . En effet dans le cas de ce mode le coefficient de corrélation entre les deux courbes est de 94.5%. La différence d'amplitude entre les deux courbes peut s'expliquer de différentes façons. Le modèle de simulation comporte des couches absorbantes qui évitent toutes réflexions parasites des limites de la plaque, réflexions qui ne peuvent être évitées expérimentalement. De plus, le joint de soudure simulé dans notre modèle forme un angle à exactement 45 degrés. La soudure réalisée sur le dispositif expérimental est un peu plus

allongée ce qui agrandit la zone de liaison entre les deux plaques. L'onde ultrasonore est donc moins atténuée par le joint.

Pour le mode  $SH_0$ , la corrélation est moins évidente. On remarque des valeurs d'atténuation aberrantes pour les deux sondes à 50 kHz. Ces valeurs s'expliquent différemment pour les deux transducteurs. Concernant le transducteur piézoélectrique, sa conception laisse apparaître un dysfonctionnement à cause d'une fuite de courant entre les deux électrodes de la céramique. Néanmoins, le transducteur reste fonctionnel, mais la forme du signal n'est pas idéale lorsque l'on s'éloigne de la fréquence centrale de fonctionnement. Pour ce qui est du transducteur magnétostrictif, la géométrie définit la longueur d'onde optimale générée. Dans l'étude présentée, la sonde a été conçue pour une fréquence centrale de 90 kHz. Plus l'on s'éloigne de cette fréquence centrale, plus le signal généré est de mauvaise qualité ce qui explique la valeur aberrante obtenue à 50 kHz, puisque la plage de fonctionnement se situe en 60 kHz et 120 kHz.

Néanmoins, en excluant ces deux valeurs obtenues à 50 kHz, la corrélation entre les résultats obtenus en simulation et ceux expérimentaux est de 85.6% pour le transducteur piézoélectrique et de 94.8% pour la sonde magnétostrictive.

Les manipulations expérimentales ont également démontré la capacité du transducteur magnétostrictif à générer une onde SH plus proprement qu'un transducteur piézoélectrique. Cela peut s'expliquer par la directivité des deux transducteurs, mais également par le fait que la génération d'une onde SH par une céramique piézoélectrique nécessite un très bon couplage entre la plaque et le transducteur ce qui est difficile à obtenir. En comparant les deux signaux reçus avant le joint à 90 kHz (fréquence centrale des deux transducteurs), il est possible de voir clairement la différence entre les deux types d'émission (Figure 3.15).

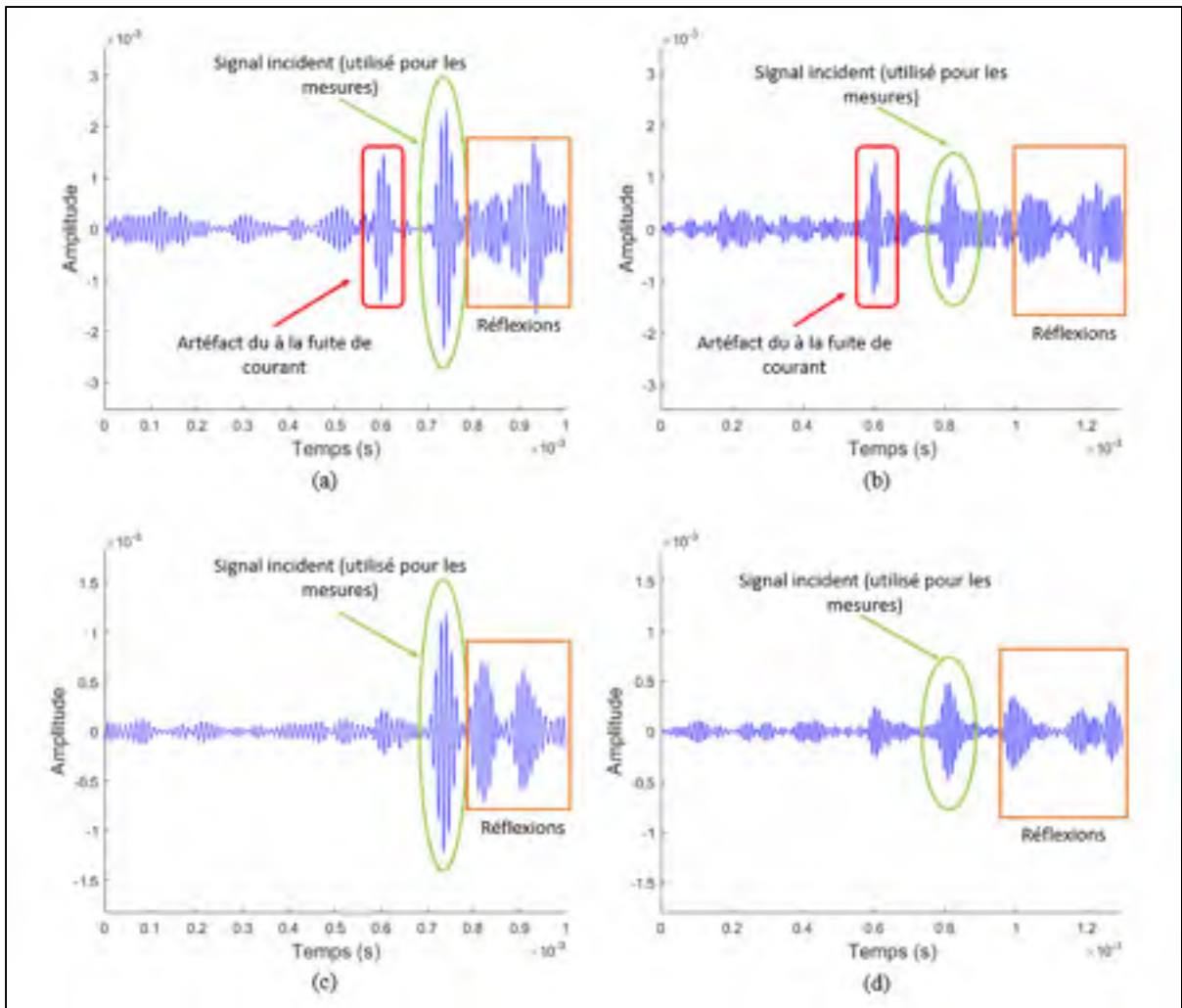


Figure 3.15 Comparaison des émissions du mode  $SH_0$  à 90 kHz : (a) Sonde Piézoélectrique avant le joint, (b) Sonde Piézoélectrique après le joint, (c) Sonde Magnétostrictive avant le joint, (d) sonde magnétostrictive après le joint

Le signal incident arrivant avant le joint reste similaire pour les deux sondes. Cependant les réflexions produites par le joint et les rebords de la plaque sont beaucoup moins nettes avec le transducteur piézoélectrique (a) qu'avec le magnétostrictif (c). Cela influence sur le signal incident reçu après le joint (b), et rend le traitement du signal plus difficile. À l'opposé, le transducteur magnétostrictif produit des signaux réfléchis nets ce qui permet d'obtenir un signal incident bien défini après le joint (d).

### **3.3 Conclusion sur les résultats expérimentaux**

Les résultats obtenus lors des expérimentations démontrent une bonne corrélation avec ceux obtenus par simulations. Le mode de traitement utilisé est identique dans les deux études ce qui permet de comparer les résultats. Il est donc possible de considérer le modèle de simulation comme valide, car les courbes d'atténuation ont été vérifiées expérimentalement.

De plus, les expériences ont montré qu'un transducteur magnétostrictif est plus apte à générer une onde SH qu'un transducteur piézoélectrique. Ce point est intéressant par le fait qu'un transducteur magnétostrictif représente un coût de fabrication beaucoup moins élevé qu'un transducteur piézoélectrique.

## CONCLUSION

L'étude menée dans ce mémoire a démontré que le mode d'onde guidée  $SH_0$  est moins atténué que le mode  $S_0$  par des joints de recouvrement soudés. Les simulations réalisées ainsi que l'étude des résultats par FFT dans le plan milieu et FFT2D en surface montrent que le mode  $SH_0$  est en moyenne atténué de 5 dB de moins que le mode  $S_0$ . Une étude réalisée avec des points de mesures en surface a permis d'obtenir des résultats dans les mêmes conditions que celles expérimentales.

L'étude expérimentale a été conduite dans le but de valider les résultats obtenus par simulations et donc de valider le modèle par éléments finis. Des transducteurs spécifiques ont été construits afin de maximiser la génération des ondes guidées ultrasonores et de se rapprocher au mieux du modèle de simulation. Les résultats obtenus par FFT sur des points de mesures en surface concordent avec ceux obtenus dans les mêmes conditions en simulation. Le modèle par éléments finis est donc validé expérimentalement et les résultats obtenus en simulation par FFT2D peuvent être considérés comme exacts.

Des résultats encourageants ont été obtenus avec un transducteur magnétostrictif ce qui laisse à penser que cette technologie mérite d'être développée pour le contrôle des planchers de réservoirs industriels.

De futures études évalueront si le mode d'onde guidée  $SH_0$  est un candidat efficace pour le contrôle de la corrosion dans les planchers de grands réservoirs de stockage.



## RECOMMANDATIONS

Cette étude a démontré que le mode d'ondes guidées  $SH_0$  est le moins atténué par des joints de recouvrement soudés. En ce sens, des travaux futurs pourraient se concentrer sur la capacité du mode  $SH_0$  à contrôler les planchers de réservoir industriels. Pour se faire, voici quelques recommandations pouvant être utiles.

Le joint de soudure est considéré comme homogène dans le modèle de simulation. Afin de se rapprocher au plus près du cas réel d'étude, il serait nécessaire d'élaborer un modèle de simulation prenant en compte toutes les phases matériau présentes dans le joint soudé.

Les études menées ont été effectuées sans chargement de liquide non visqueux sur les plaques, que ce soit en simulation ou expérimentalement. Bien que des valeurs d'atténuations soient données par le logiciel DISPENSE, il serait intéressant de simuler la propagation des modes d'ondes guidées au travers d'un joint avec un chargement fluide et de le vérifier expérimentalement.

Le dernier chapitre de l'étude a porté un regard sur l'émission du mode  $SH_0$  par transduction magnétostrictive. Il peut être intéressant de développer cette méthode d'émission afin de concevoir une sonde capable de se positionner rapidement sur le périmètre extérieur de la cuve et d'effectuer un contrôle du plancher. Il serait également nécessaire d'élaborer un système permettant d'orienter la sonde le plus perpendiculairement possible aux joints de recouvrement. Une étude devra être menée pour déterminer dans quelles mesures différents défauts tels que la corrosion ou des fissures peuvent être détectés par le mode  $SH_0$  à basse fréquence.





## BIBLIOGRAPHIE

- Alleyne, D., & Cawley, P. (1991). A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89(3), 1159-1168. <https://doi.org/10.1121/1.400530>
- Alleyne, D. N., Pavlakovic, B., Lowe, M. J. S., & Cawley, P. (2004). Rapid, Long Range Inspection of Chemical Plant Pipework Using Guided Waves. *Key Engineering Materials*, 270-273, 434-441. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.434>
- Alvarez-Arenas, T. E. G. (2004). Acoustic impedance matching of piezoelectric transducers to the air. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 51(5), 624-633. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2004.1320834>
- Archambault, S. (2010). *Conception et caractérisation d'un système d'imagerie photoacoustique pour application biomédicale*. masters. École Polytechnique de Montréal. Repéré à <https://publications.polymtl.ca/255/>
- Boivin, G., Viens, M., & Belanger, P. (2016). Development of a low frequency shear horizontal piezoelectric transducer for the generation of plane SH waves (p. 030019). Communication présentée au *42nd annual review of progress in quantitative nondestructive evaluation: Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability of NDE*, Minneapolis, Minnesota. <https://doi.org/10.1063/1.4940491>
- Buchanan, J. P. (1954). *Handbook of Piezoelectric Crystals for Radio Equipment Designers*. (S.l.) : Wright Air Development Center, Air Research and Development Command, U.S. Air Force. (Google-Books-ID: YBTlsuhDHnkC).
- Castaigns, M. (2014). SH ultrasonic guided waves for the evaluation of interfacial adhesion. *Ultrasonics*, 54(7), 1760-1775. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.03.002>
- Chandrasekaran, J, Anto, I., Balasubramaniam, K., & Venkataraman, K. S. (2009). Higher order modes cluster (HOMC) guided waves for online defect detection in annular plate region of above-ground storage tanks. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 51(11), 606-611. <https://doi.org/10.1784/insi.2009.51.11.606>

- Chandrasekaran, Jayaraman, Krishnamurthy, C. V., Balasubramaniam, K., Thompson, D. O., & Chimenti, D. E. (2010). Axial higher order modes cluster (A-HOMC) guided wave for pipe inspection (pp. 161-168). Communication présentée au *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation volume 29*, Kingston (Rhode Island). <https://doi.org/10.1063/1.3362262>
- Cheeke, J. D. N. (2012). *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press. <http://doi.org/10.1201/b12260>
- Comot, P., Bocher, P., & Belanger, P. (2017). Ultrasonic guided wave inspection of Inconel 625 brazed lap joints: Simulation and experimentation. *NDT & E International*, 91, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.06.007>
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2007). *Concepts and applications of finite element analysis*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Drozdz, M. (2006). Efficient Numerical Modelling of Absorbing Regions for Boundaries Of Guided Waves Problems. Dans *AIP Conference Proceedings* (Vol. 820, pp. 126-133). Brunswick, Maine (USA) : AIP. <https://doi.org/10.1063/1.2184520>
- Feld, G., Labouré, E., Hoang, E., & Revol, B. (2008). Mesure de la déformation d'un matériau piézoélectrique par interférométrie. *J3eA*, 7, 1013. <https://doi.org/10.1051/j3ea:2008012>
- Feng, Q., Li, R., Nie, B., Liu, S., Zhao, L., & Zhang, H. (2017). Literature Review: Theory and Application of In-Line Inspection Technologies for Oil and Gas Pipeline Girth Weld Defection. *Sensors*, 17(1), 50. <https://doi.org/10.3390/s17010050>
- Huthwaite, P. (2014). Accelerated finite element elastodynamic simulations using the GPU. *Journal of Computational Physics*, 257, 687-707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2013.10.017>
- Huthwaite, P., & Zarogoulidis, K. (s.d.). Pogo User's Manual, 85.
- Jankauskas, A., & Mazeika, L. (2016). Ultrasonic Guided Wave Propagation through Welded Lap Joints. *Metals*, 6(12), 315. <https://doi.org/10.3390/met6120315>
- Krausmann, E., Renni, E., Campedel, M., & Cozzani, V. (2011). Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: lessons learned from a database analysis. *Natural Hazards*, 59(1), 285-300. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9754-3>

- Laguerre, L., & Treysse, F. (2011). Non destructive evaluation of seven-wire strands using ultrasonic guided waves. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(4), 487-500. <https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9693342>
- Lanza di Scalea, F., Rizzo, P., & Marzani, A. (2004). Propagation of ultrasonic guided waves in lap-shear adhesive joints: Case of incident a0 Lamb wave. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(1), 146-156. <https://doi.org/10.1121/1.1630999>
- Lee, J. S., Kim, Y. Y., & Cho, S. H. (2009). Beam-focused shear-horizontal wave generation in a plate by a circular magnetostrictive patch transducer employing a planar solenoid array. *Smart Materials and Structures*, 18(1), 015009. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/1/015009>
- Li, J. (2005). On Circumferential Disposition of Pipe Defects by Long-Range Ultrasonic Guided Waves. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 127(4), 530-537. <https://doi.org/10.1115/1.2083867>
- Lowe, M. J. S., Alleyne, D. N., & Cawley, P. (1998). Defect detection in pipes using guided waves. *Ultrasonics*, 36(1-5), 147-154. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00038-3](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00038-3)
- Pavlakovic, B., Lowe, M., Alleyne, D., & Cawley, P. (1997). Disperse: A General Purpose Program for Creating Dispersion Curves. Dans D. O. Thompson & D. E. Chimenti (Éds), *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (pp. 185-192). Boston, MA : Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5947-4\\_24](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5947-4_24)
- Rose, J. L. (2014). *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. New York : Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107273610>
- Royer, D. & Dieulesaint, E. (1996). *Ondes élastiques dans les solides*. Paris: Masson.
- Santos, M. J., & Faia, P. (2009). Propagation of Ultrasonic Lamb Waves in Aluminium Adhesively Bonded LAP Joints and in Single Plates. *Research in Nondestructive Evaluation*, 20(3), 178-191. <https://doi.org/10.1080/09349840902755867>
- Thon, A., & Bélanger, P. (2019). EMAT design for minimum remnant thickness gauging using high order shear horizontal modes. *Ultrasonics*, 95, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.03.006>

Zhu, J. (2008). Optimization of Matching Layer Design for Medical Ultrasonic Transducer.  
Repéré à <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/8444>

