

Implémentation de l'imagerie ultrasonore multi-éléments de
pièces complexes à l'aide d'un bras robotisé

par

Adrien SOETEMONT

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

MONTREAL, LE 22 NOVEMBRE 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Adrien Soetemont, 2023

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE 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. Thomas Dupont, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Martin Viens, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 17 NOVEMBRE 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon directeur de recherche, Pierre Bélanger pour son suivi de qualité, l'aide très précieuse qu'il m'a apporté grâce à son expérience et pour sa confiance tout au long de ce projet. Merci au partenaire industriel PagmaNDT et aux programmes de recherche ayant financé ce projet. Je remercie particulièrement François Lauzon pour son support tout au long de ce projet. Je remercie ensuite mes collègues du PulÉTS de m'avoir accompagné dans la prise en main des nombreux outils utilisés dans ce travail et de m'avoir aidé à avancer la réflexion sur la méthode de résolution de mon sujet. Je les remercie également pour l'ambiance de travail au laboratoire, notamment Thibault et Maxime avec qui j'aurai passé beaucoup de temps à la fin de ma maîtrise.

Merci aux amis avec lesquels j'ai vécu cette maîtrise à l'ÉTS, notamment Timothée, Manon et Chloé, mes compagnons pendant toutes les pauses déjeuner. Merci à eux, à Célia et à mes amis et colocataires, Jean, Andréa, Matthieu, Maëlle et Laura pour leur soutien précieux pendant la rédaction de ce mémoire.

Merci à mes papi et mamie Daniel et Lucette qui ont toujours été présents pour me soutenir et le seront toujours. Merci également à Laure et François, ma sœur et mon frère qui ont toujours été là pour moi, me donner confiance et me rendre heureux. Merci finalement à ma maman qui m'a donné plus que tout ce dont j'aurais rêvé pendant toute ma vie, et à qui je dois en partie la réussite de mon parcours depuis le plus jeune âge et jusqu'à quelques corrections sur ce mémoire.

Implémentation de l'imagerie ultrasonore multi-éléments de pièces complexes à l'aide d'un bras robotisé

Adrien SOETEMONT

RÉSUMÉ

Dans l'industrie, de nombreuses pièces mécaniques doivent être régulièrement inspectées car le maintien de leur intégrité structurelle est critique, une défaillance pouvant avoir de graves conséquences financières ou pire, humaines. Différentes techniques de contrôle non destructif ont donc été développées à cette fin. Il est souvent nécessaire d'obtenir des informations sur l'intérieur des composants à contrôler. Pour cela, les inspections ultrasonores ou par rayons X sont largement utilisées. La première comporte l'avantage d'être sans risque pour la santé humaine et plus flexible que la seconde car elle met en jeu des dispositifs plus compacts et généralement portatifs. De plus, des techniques avancées d'imagerie ultrasonore utilisant des sondes multi-éléments permettent d'obtenir des images de plus en plus précises, comme la méthode de focalisation en tout point (TFM pour Total Focusing Method) qui devient la référence dans ce domaine. Cependant, lorsqu'il faut vérifier des pièces de géométrie complexe, comme des raccordements de tuyaux, ou des pièces forgées, les inspections doivent être faites en immersion ou à l'aide d'un sabot qui se conforme à la surface concernée. Les ultrasons passent donc dans deux milieux de propagation différents et sont réfractés et déviés à l'interface. À cause de cela, il est difficile de bien paramétrer leurs inspections pour qu'elles soient fiables et répétables alors qu'il est nécessaire de détecter tous les défauts qu'elles pourraient comporter. En effet, une légère variation de la position de la sonde vis-à-vis de la pièce peut drastiquement changer le résultat de l'imagerie ultrasonore.

Il peut donc être intéressant de les réaliser dans une cellule robotisée pour obtenir un contrôle complet sur l'orientation et la position de la sonde. Afin de définir cette position, on peut utiliser des simulations numériques, déjà développées depuis des dizaines d'années dans le domaine des inspections ultrasonores. Dans ce mémoire on se propose de mettre en œuvre des simulations dans le cas de l'imagerie ultrasonore multi-éléments de pièces complexes. On utilisera une méthode par éléments finis pour prévoir la réponse de défauts de toutes formes. L'inconvénient de cette méthode est son temps de calcul long, qui est critique pour les simulations multi-éléments où l'on doit faire autant de simulations que le nombre d'émetteurs de la sonde. On choisira donc POGO, un logiciel de calculs par éléments finis sur carte graphique entièrement configurable et bien plus rapide que ceux utilisant le processeur central. De plus, on mettra en place une simulation hybride pour n'utiliser les éléments finis que dans la zone comportant potentiellement des défauts et des calculs analytiques pour le reste de la propagation ultrasonore. Enfin, on confrontera les images TFM simulées à des images TFM expérimentales dans des configurations simples pour commencer puis dans le cas d'un naseau raccordé sur un tuyau.

Mots-clés : inspection, ultrasons, pièces complexes, simulation éléments finis, imagerie multi-élément, TFM

Implementation of a multi-element ultrasonic imaging for complex parts using a robotic arm

Adrien SOETEMONT

ABSTRACT

In industry, many mechanical parts need to be regularly inspected because maintaining their structural integrity is critical, as failures can have serious financial or, worse still, human consequences. Various nondestructive testing techniques have therefore been developed for this purpose. It is often necessary to obtain subsurface information of the components to be inspected. Ultrasonic or X-ray inspections are widely used for this purpose. Ultrasounds have the advantage of being risk-free for human health and more flexible than X-Rays because it involves more compact and usually portable devices. In addition, advanced ultrasound imaging techniques using multi-element probes enable increasingly accurate images to be obtained, such as the Total Focusing Method (TFM), which is becoming the gold standard in this field. However, when it comes to inspecting parts with complex geometries, such as pipe connections or forged parts, inspections have to be carried out in immersion or using a wedge that conforms to the surface. Ultrasound passes through two different propagation media and is refracted and deflected at the interface. As a result, it is difficult to properly configurate the ultrasonic inspection of complex parts so that it is reliable and repeatable although it is necessary to detect all the defects that they may contain. Indeed, a slight variation in the position of the probe relative to the part can drastically change the result of the ultrasound imaging.

It may therefore be worthwhile to carry out these inspections in a robotic cell to obtain complete control over the orientation and position of the probe. In order to define this position, numerical simulations can be used, which have already been developed for several decades in the field of ultrasonic inspection. In this thesis, we propose to implement simulations in the case of multi-element ultrasonic imaging of complex parts. A finite element method will be used to model the response of defects of any shape. The disadvantage of this method is its long computation time, which is critical for multi-element simulations where the number of simulations that must be carried out is equal to the number of emitters in the probe. We will therefore choose POGO, a finite element calculation software implemented on graphics processors that is fully configurable and much faster than those using the central processor. In addition, a hybrid simulation method will be set up to use finite elements only in the area with potential defects and analytical calculations for the rest of the ultrasonic propagation. Finally, the simulated TFM images will be compared with experimental TFM images in simple configurations to begin with, and then in the case of a nozzle welded to a pipe containing known defects.

Keywords: inspection, ultrasound, complex parts, finite element simulation, multi-element imaging, TFM

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Théorie de la propagation des ultrasons.....	5
1.1.1 Équation de propagation des ondes ultrasonores de volume	6
1.1.1.1 Équation dans les liquides.....	6
1.1.1.2 Équation dans les solides	11
1.1.2 Impédance acoustique.....	15
1.1.3 Réflexion et transmission aux interfaces	16
1.1.4 Diffusion par un défaut	18
1.2 Techniques d'imagerie par ultrasons	20
1.2.1 A-Scan, B-Scan et S-Scan.....	21
1.2.2 Image TFM	22
1.3 Inspection de pièces mécaniques à la géométrie complexe	25
1.3.1 Inspection en contact.....	27
1.3.2 Inspection en immersion.....	28
1.4 Simulation numérique de la propagation des ultrasons	30
1.4.1 Simulation numérique par éléments finis	31
1.4.2 Simulation hybride : analytique et par éléments finis.....	33
1.4.3 Simulation de réponse de défaut : matrice de diffusion.....	34
1.5 Méthodologie du projet basée sur la revue de la littérature	36
CHAPITRE 2 MISE AU POINT DE L'OUTIL DE SIMULATION	39
2.1 Choix du logiciel de simulation par éléments finis.....	39
2.2 Évaluation de la simulation dans un cas d'inspection où la solution analytique est connue.....	39
2.3 Mise au point de la simulation hybride.....	46
2.3.1 Fonctionnement.....	46
2.3.2 Temps de calcul	48
2.4 Évaluation de la simulation hybride sur une inspection avec sabot.....	48
2.4.1 Configuration d'inspection	49
2.4.2 Comparaison entre les images simulées et expérimentales	52
2.5 Évaluation de la simulation hybride sur une inspection en immersion, avec interface courbe.....	54
2.5.1 Configuration d'inspection	54
2.5.2 Comparaison entre les images simulées et expérimentales	56
2.6 Mise au point de la simulation hybride avec matrice de diffusion	58
2.6.1 En 2D	58
2.6.2 En 3D	61
2.6.3 Temps de calcul	61

2.7	Évaluation de la simulation hybride avec matrice de diffusion sur une inspection avec sabot.....	62
2.7.1	En 2D	62
2.7.2	En 3D	64
CHAPITRE 3	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX SUR L'INSPECTION D'UNE PIÈCE DE GÉOMÉTRIE COMPLEXE	67
3.1	Configurations d'inspection.....	68
3.2	Protocole expérimental	69
3.3	Positionnement de la sonde.....	71
3.4	Comparaison entre les images simulées et expérimentales	72
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	83
	BIBLIOGRAPHIE.....	85

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 2.1	Résumé des paramètres de la simulation POGO en incidence normale	42
Tableau 2.2	Résumé des paramètres de la simulation hybride avec sabot incliné et pièce à contrôler de surface plane en acier	51
Tableau 2.3	Résumé des paramètres de la simulation hybride sur pièce en aluminium en immersion avec surface concave	56

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Réfraction et transmission des ultrasons à une interface	17
Figure 1.2	Transmission et réflexion à l'interface eau-aluminium (Tirées de Cheeke, 2012)	18
Figure 1.3	Champ de pression diffusé par une cavité sphérique, solution analytique représentée par les points, et modélisation par éléments finis en ligne continue (Tiré de Velichko & Wilcox, 2012)	20
Figure 1.4	Géométrie d'une sonde ultrasonore linéaire à 6 éléments	21
Figure 1.5	Schéma de principe de l'obtention d'un A-Scan et d'un B-Scan	22
Figure 1.6	Principe de construction d'une image TFM (Tiré de Hu, Du, Ye, & Li, 2018).....	23
Figure 1.7	Exemple d'image TFM d'un bloc d'acier comportant trois SDH	24
Figure 1.8	Imagerie ultrasonore d'une pièce à la surface sinusoïdale (a) TFM (b) PWI 64 tirs (c) PWI 4 tirs (d) PWI 16 tirs (Tiré de Rachev, Wilcox, Velichko & McAughey, 2020).....	25
Figure 1.9	Image TFM par immersion de 3 trous percés latéralement sur une pièce à surface (a) concave, sans optimisation d'éloignement de sonde (b) concave, avec optimisation d'éloignement de sonde (c) plane (Tirée de Mansur Rodrigues Filho & Bélanger, 2021)	26
Figure 1.10	Exemple de sonde piézoélectrique matricielle déformable (Tiré de Hu et al., 2018).....	28
Figure 1.11	Évolution de l'image TFM par immersion d'un trou percé latéralement à 40mm de profondeur selon la courbure de la surface et la distance sonde-pièce h (Tirée de Mansur Rodrigues Filho & Bélanger, 2021).....	29
Figure 1.12	Schéma de principe d'une simulation visant à obtenir la matrice de diffusion	35
Figure 2.1	Schéma d'acquisition de la FMC avec une sonde 32 éléments, en incidence normale et en contact direct sur surface plane.....	40

Figure 2.2	Émission avec l'élément 1, en incidence normale, simulée sur POGO et visualisée sur PogoPro	44
Figure 2.3	Évolution de l'écho L avec la distance du réflecteur à l'axe de la sonde, simulation analytique et par éléments finis	45
Figure 2.4	Schéma de fonctionnement de la simulation hybride	47
Figure 2.5	Configuration d'inspection et de simulation avec sabot en Rexolite incliné à 20°	50
Figure 2.6	Photographie du dispositif expérimental d'inspection avec sabot en Rexolite incliné à 20°	51
Figure 2.7	Images TFM simulées et expérimentales d'un trou percé latéralement inspecté avec une sonde ultrasonore 64 éléments, à 5MHz, montée sur un sabot en Rexolite d'inclinaison 20°	53
Figure 2.8	Configuration d'inspection utilisée pour la simulation hybride avec surface courbe	55
Figure 2.9	Évolution de l'image TFM d'un trou percé latéralement sur une pièce à surface concave en fonction de l'éloignement sonde-pièce (a) Images expérimentales (tirées de Mansur Rodrigues Filho & Bélanger, 2021) (b) Images simulées.....	57
Figure 2.10	Schéma de fonctionnement de la simulation de la matrice de diffusion d'un défaut – Exemple pour une émission à un angle d'incidence θ_{inc}	59
Figure 2.11	Schéma de simulation d'une FMC par propagation analytique et avec la matrice de diffusion	60
Figure 2.12	Images TFM d'un trou percé latéralement inspecté avec une sonde ultrasonore 64 éléments, à 5MHz, montée sur un sabot en Rexolite d'inclinaison 20° (a) Image expérimentale (b) Image simulée avec matrices de diffusion 2D.....	63
Figure 2.13	Image TFM obtenue avec une sonde ultrasonore 64 éléments, à 5MHz, montée sur un sabot en Rexolite d'inclinaison 20° (a) Image expérimentale (b) Image simulée avec matrices de diffusion 3D.....	65
Figure 3.1	Photographie du tuyau avec raccordement soudé.....	67
Figure 3.2	Vue du haut et de côté de la pièce de calibration.....	68

Figure 3.3	Vue en coupe de la pièce de calibration au niveau des porosités et au niveau du manque de fusion	69
Figure 3.4	Photographie de la sonde 64 éléments installée sur un sabot conformable rempli d'eau et attachée au bras robotisé.....	70
Figure 3.5	Image TFM de l'interface sabot conformable-pièce et points extraits de cette surface.....	71
Figure 3.6	Image TFM simulée dans la zone des porosités (L-L – 5 MHz – 64 éléments)	73
Figure 3.7	Image TFM dans la zone du manque de fusion (L-L – 5 MHz – 64 éléments)	74
Figure 3.8	Sonde ultrasonore montée sur sabot conformable et amenée à la position et l'orientation choisies pour sondes le manque de fusion (à gauche) et les porosités (à droite)	76
Figure 3.9	Image TFM dans la zone des porosités avec approximation de surface rectiligne (L-L – 5 MHz – 64 éléments)	77
Figure 3.10	Image TFM dans la zone du manque de fusion avec approximation de surface rectiligne (L-L – 5 MHz – 64 éléments).....	78
Figure 3.11	Image TFM dans la zone des porosités avec interface interpolée (L-L – 5 MHz – 64 éléments)	79
Figure 3.12	Image TFM dans la zone du lack of sidewall fusion avec interface interpolée (L-L – 5 MHz – 64 éléments)	80

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CND	Contrôle non destructif
TFM	Focalisation en tous points (traduction de Total Focusing Method)
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
FMC Capture)	Acquisition complète de la matrice de signaux (traduction de Full Matrix
DAS	Délai et sommation (traduction de Delay And Sum)
SDH	Trou percé latéralement (traduction de Side Drilled Hole)
PWI	Imagerie par ondes planes (traduction de Plane Wave Imaging)
CPU	Processeur central
GPU	Processeur graphique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

θ_c	Angle critique de transmission des ultrasons
ν	Coefficient de Poisson
R	Coefficient de réflexion
TR	Coefficient de transmission
χ	Compressibilité
u	Déplacement
S	Dilatation
\vec{x}	Direction d'un axe
F	Force
f	Fréquence d'acquisition
Hz	Hertz
Z	Impédance acoustique
L	Longitudinal
λ	Longueur d'onde
ρ	Masse volumique
D	Matrice de diffusion
mm	Millimètre
E	Module de Young
k	Nombre d'onde
dt	Pas de temps de simulation
ϕ	Potentiel scalaire
$\vec{\psi}$	Potentiel vectoriel

P	Pression
p	Pression acoustique
ω	Pulsation
A	Surface
a	Taille d'un défaut
dx	Taille d'un élément dans un maillage par éléments finis
t	Temps
T_{ij}	Terme du tenseur de contrainte
S_{kl}	Terme du tenseur de dilatation
c_{ij}	Terme du tenseur de raideur
T	Transverse
V_0	Vitesse d'une onde ultrasonore
c_L	Vitesse des ondes longitudinales
c_T	Vitesse des ondes transverses
v	Vitesse des particules
V	Volume

INTRODUCTION

Au fil des années, la maintenance prédictive remplace la maintenance curative dans l'industrie. En effet, la première approche permet d'éviter des ruptures de composants critiques pouvant entraîner de grandes pertes financières et de graves risques pour la santé humaine. Cette maintenance prédictive peut notamment être assurée par des contrôles non destructifs (CND) périodiques de composants en cours de fonctionnement. Ils consistent à inspecter une structure sans la dégrader et peuvent également être utilisés pour réaliser le contrôle qualité de produits finis ou semi-finis. Ces contrôles sont maintenant stamment installés dans les procédés industriels et la recherche vise à les rendre toujours plus précis, rapides, flexibles et économiques. Certaines techniques de CND comme l'inspection ultrasonore ou par rayons X permettent de voir à l'intérieur de la pièce, ce qui est nécessaire dans de nombreuses applications (Cheeke, 2012). Le CND par ultrasons se démarque par son absence de risques pour la santé humaine. Il consiste à envoyer des ondes ultrasonores dans la pièce avec un émetteur puis de recevoir ses échos ou sa transmission directe avec un récepteur. L'utilisateur peut alors détecter un défaut en voyant par exemple un écho revenir avant celui correspondant au fond de la pièce (Rose, 2014). Des techniques plus avancées ont été mises en place grâce à des sondes possédants de multiples éléments piézoélectriques permettant d'obtenir une image de l'intérieur de la pièce. Le fait d'avoir plusieurs éléments permet de créer des interférences constructives permettant par exemple l'imagerie par émissions d'ondes planes (Rachev, Wilcox, Velichko & McAughey, 2020) ou par la méthode de focalisation en tout point (TFM pour total focusing method), (Holmes, Drinkwater & Wilcox, 2005). Cette dernière technique se révèle de plus en plus comme un puissant outil de CND par la résolution d'image qu'elle permet d'obtenir.

Il reste cependant que les contrôles par sondes ultrasonores multi-éléments, performants sur les pièces à surfaces planes, sont rendus difficiles par la présence de surfaces à courbures complexes. En effet, ces dernières dévient les ultrasons se propageant à partir des multiples émetteurs de manière difficilement prévisible. Des méthodes de TFM avec compensation de surface ont alors été mises en place pour pallier cette difficulté (Kerr, Pierce, Rowe, 2016),

mais leurs résultats restent fortement dépendants de la position de la sonde (Mansur Rodrigues Filho & Bélanger, 2021). Il peut donc être utile de développer une méthode pour les prévoir et ainsi pouvoir choisir la position de la sonde en conséquence. Pour cela, des simulations numériques peuvent être utilisées, notamment par éléments finis pour pouvoir personnaliser les surfaces et les formes de défauts à détecter autant que le souhaite l'utilisateur. L'inconvénient de ces simulations est leur temps de calcul, fortement réduit récemment par l'utilisation de cartes graphiques (Huthwaite, 2014). Des techniques de simulations avancées, analytiques et par éléments finis ont également été utilisées dans la littérature pour drastiquement réduire cette durée (Wilcox et al., 2020).

0.1 Objectifs

L'objectif principal est de mettre au point une simulation numérique permettant de prévoir les résultats d'une inspection ultrasonore TFM sur pièce complexe pour une position et une orientation de sonde choisie. Dans ce type d'inspection, les ondes ultrasonores se propagent généralement dans deux milieux de propagation car une immersion de la pièce ou un sabot conformable doivent être utilisés, car les sondes multi-éléments conventionnelles ne peuvent s'adapter aux surfaces variables. L'objectif du chapitre 2 sera de mettre en place une méthode de simulation fiable et pouvant mettre en jeu plusieurs milieux de propagation, tous types de surfaces et de défauts. Cette simulation devra également être rapide, car la réalisation d'une image TFM requiert beaucoup de données. Finalement, elle devra être validée par comparaison avec une inspection expérimentale à deux milieux de propagation avec surface plane. Ensuite, on évaluera la méthode de simulation sur des géométries complexes contenant un plan de symétrie et pouvant donc être modélisées en 2D puis on la fera évoluer pour la rendre plus efficace et permettre ainsi de réaliser des simulations en 3D. L'objectif du chapitre 3 sera d'utiliser ces dernières pour prévoir le résultat de l'imagerie TFM d'une pièce de calibration comportant un naseau soudé sur un tuyau avec des porosités à un emplacement connu sous la soudure et un manque de fusion à une autre position. On cherchera à comparer les images simulées aux images expérimentales qui seront obtenues pour ces deux types de défauts puis à

tirer des conclusions sur la performance de la méthode de simulation développée, sur la qualité des acquisitions expérimentales et à formuler des recommandations pour de futurs travaux.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La recherche dans le domaine du contrôle non destructif par ultrasons se développe depuis longtemps. Ainsi, de nombreux éléments sont disponibles dans la littérature scientifique pour appuyer notre étude et définir une méthode pertinente pour mener à bien les objectifs de ce mémoire. Dans ce chapitre, on présentera tout d'abord les lois physiques caractérisant les ultrasons qui seront la base de notre étude. Ensuite, on évoquera différentes techniques d'imagerie ultrasonore existantes. Après cela, on étudiera des travaux appliquant ces techniques au contrôle de pièces à surfaces complexes. Finalement, on s'intéressera aux modèles de simulations numériques qui sont utilisés pour prévoir les résultats d'imagerie ultrasonore multi-éléments.

1.1 Théorie de la propagation des ultrasons

Ce chapitre présente les éléments de la théorie des ondes ultrasonores qui ont été utilisés pour la réalisation de ce mémoire. Cette théorie a été développée depuis de nombreuses années et reprise dans des livres récents (Cheeke, 2012 ; Rose, 2014). Pour produire de bonnes images ultrasonores d'une pièce, il est important de comprendre les principaux phénomènes physiques mis en jeu lors de la propagation d'ondes mécaniques. Cela sera indispensable pour générer des signaux ultrasonores, comprendre leur interaction avec la matière puis les recevoir et les analyser.

Les ultrasons sont des ondes mécaniques ayant une fréquence supérieure à 20 kHz, la limite du spectre audible. Selon leur milieu de propagation, ils peuvent prendre différentes formes : des ondes de surface, des ondes de plaque, des ondes d'interface ou des ondes de volume. Ce sera ce dernier type d'onde qui sera utilisé dans ce mémoire.

1.1.1 Équation de propagation des ondes ultrasonores de volume

Une onde ultrasonore correspond à la propagation dans l'espace d'une perturbation mécanique. Elle se propage en déplaçant les molécules composant le milieu de propagation. Une onde ultrasonore est qualifiée de longitudinale si sa direction de propagation est parallèle à la direction de la perturbation. Si ces directions sont perpendiculaires, il s'agit d'une onde de cisaillement.

Le comportement des ondes ultrasonores de volume peut être représenté par des équations. Celles-ci diffèrent selon l'état du milieu de propagation.

1.1.1.1 Équation dans les liquides

En s'appuyant sur (Cheeke, 2012), on commence tout d'abord par établir l'équation de propagation à une dimension, selon un axe noté \vec{x} . On considère que le fluide est homogène, isotrope et compressible. On note la pression d'équilibre P_0 et la masse volumique du milieu ρ_0 . Si l'on applique une augmentation de pression à l'origine du repère, les couches de fluide directement à proximité vont se comprimer, et la perturbation va se propager par une alternance de compressions et de dilatations.

On considère un élément de volume entre x et $x + dx$:

$$F_x = \left[P(x) - \left\{ P(x) + \frac{\partial P}{\partial x} dx \right\} \right] A = - \frac{\partial P}{\partial x} dx A \quad (1.1)$$

Où F_x est la composante de la force selon l'axe \vec{x} , P est le champ de pression et A est une surface. On applique ensuite la loi de Newton à cet élément de masse $\rho_0 dx A$:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.2)$$

Où u est le déplacement selon l'axe \vec{x} . On introduit maintenant la pression acoustique p telle que :

$$p = P - P_0 \quad (1.3)$$

Où P_0 est la pression d'équilibre. On a alors :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.4)$$

On introduit maintenant la compressibilité du fluide, notée χ :

$$\chi = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right) \quad (1.5)$$

Pendant une compression d'un volume $dV = A dx$ à la pression p en x , jusqu'à un volume $dV = A \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) dx$ à la pression $p + dp$ en $x + dx$, on a :

$$S = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1.6)$$

Où on utilise la dilatation, notée S . En utilisant la définition de la dilatation, on obtient alors :

$$p = -\frac{S}{\chi} = -\frac{1}{\chi} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1.7)$$

On aboutit alors à l'équation de propagation :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1.8)$$

Où :

$$V_0^2 = \frac{1}{\rho_0 \chi} \quad (1.9)$$

La compressibilité peut être écrite sous la forme :

$$\chi = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (1.10)$$

On peut alors aboutir à une nouvelle forme pour V_0^2 :

$$V_0^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho} \quad (1.11)$$

Finalement, d'après les équations 1.2 et 1.11 on peut écrire l'équation de propagation sous de nouvelles formes :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = V_0^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1.12)$$

Ou

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = V_0^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (1.13)$$

Où $v = \frac{\delta u}{\delta t}$ est la vitesse de la particule déplacée au passage de l'onde ultrasonore.

On peut maintenant s'intéresser aux solutions pour le déplacement $u(x, t)$. Elles s'écrivent :

$$u = B_1 e^{j(\omega t - kx)} + B_2 e^{j(\omega t + kx)} = u_+ + u_- \quad (1.14)$$

Où B_1 est l'amplitude de l'onde qui se déplace dans le sens positif de l'axe \vec{x} et B_2 celle de l'onde se propageant selon le sens négatif de l'axe \vec{x} , ω est la pulsation et k est le nombre d'onde. On a $\omega = 2\pi f$ où f est la fréquence de l'onde ultrasonore. Finalement, on a $k = 2\pi/\lambda$ où λ est la longueur d'onde.

De la même façon, on peut écrire :

$$p = -\rho_0 V_0^2 \frac{\partial u}{\partial x} = j\rho_0 \omega V_0 (u_+ - u_-) \quad (1.15)$$

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = j\omega (u_+ + u_-) \quad (1.16)$$

On observe alors un déphasage de $\frac{\pi}{2}$ entre la pression et le déplacement dans le sens positif et de $-\frac{\pi}{2}$ dans le sens négatif. Le déphasage entre la vitesse et le déplacement est lui de $\frac{\pi}{2}$ dans les deux cas.

Ces résultats peuvent être généralisés en trois dimensions. Ces équations s'appuient sur (Cheeke, 2012). On note \vec{u} et \vec{v} respectivement le déplacement et la vitesse. Selon le théorème de Gauss, pour un élément de volume $dV = \vec{u} \cdot \vec{dA}$ on a :

$$\Delta V = \oint_S \vec{u} \cdot \vec{dA} = \int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) dV = \int_V S(\vec{r}) dV \quad (1.17)$$

Où $S(\vec{r})$ est la dilatation.

Ainsi :

$$S(\vec{r}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \equiv \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (1.18)$$

On introduit ensuite la loi de Newton en 3 dimensions :

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = -\vec{\nabla} p \quad (1.19)$$

En utilisant ces deux dernières équations ainsi que l'équation 1.7 on obtient alors :

$$\rho_0 \frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = -\nabla^2(p) \quad (1.20)$$

On aboutit finalement à l'équation de propagation :

$$\nabla^2(p) = \frac{1}{v_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.21)$$

Par analogie on établit également les équations de propagation pour \vec{u} et \vec{v} :

$$\nabla^2 \vec{u} = \frac{1}{v_0^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (1.22)$$

$$\nabla^2 \vec{v} = \frac{1}{v_0^2} \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial t^2} \quad (1.23)$$

Et on obtient alors les solutions suivantes pour \vec{u} :

$$\vec{u} = \vec{u}_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (1.24)$$

Où \vec{k} est le vecteur d'onde, dont la direction est celle de la propagation (\vec{r}) et dont l'amplitude est :

$$|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.25)$$

1.1.1.2 Équation dans les solides

Le comportement des ondes ultrasonores dans les solides est légèrement différent de celui dans les fluides. Le développement ci-dessous est également inspiré de (Cheeke, 2012). On se concentre à nouveau sur la propagation à une dimension pour commencer, selon un axe noté \vec{x} . On peut alors généraliser les résultats obtenus en section 1.1.1.1 à un milieu de propagation solide homogène et isotrope dans le cas de la propagation d'un mode longitudinal à une vitesse V_L . Les paramètres utilisés ne sont plus la compressibilité et la pression, car les milieux solides sont généralement beaucoup moins compressibles. On introduit alors ceux de la théorie de l'élasticité : la contrainte T , qui correspond à une force par unité de surface et la déformation S qui, dans cette section, s'exprime de la manière suivante pour un élément de longueur ∂u :

$$S = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1.26)$$

On utilise ensuite la loi de Hooke qui caractérise le comportement élastique du solide :

$$T \equiv cS \quad (1.27)$$

Où c est le coefficient d'élasticité. On utilise ensuite la loi de Newton :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.28)$$

En combinant les trois équations précédentes, on obtient alors l'équation de propagation :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho_0}{c} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.29)$$

Comme dans la section précédente, elle peut également être obtenue pour d'autres paramètres qui sont, ici, la vitesse et la contrainte.

Les solutions pour le déplacement sont alors :

$$u_x = B_1 \exp j(\omega t - kx) + B_2 \exp j(\omega t + kx) \quad (1.30)$$

On retrouve un premier terme et un deuxième terme correspondant respectivement à une propagation dans le sens positif de l'axe \vec{x} et dans le sens négatif. Les paramètres de propagation sont le nombre d'onde $k = \frac{\omega}{V_L} = 2\pi/\lambda_L$ et la vitesse de propagation $V_L = \sqrt{c/\rho_0}$.

On étend alors ce raisonnement à un milieu de propagation à trois dimensions. En utilisant la notation d'Einstein, on a alors :

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} = \rho_0 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1.31)$$

De plus selon la loi de Hooke pour un solide en trois dimensions :

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} \quad (1.32)$$

Où S_{kl} est le tenseur de déformation, avec $S_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right)$, et c_{ijkl} est le tenseur de raideur.

La loi de Hooke donne également :

$$T_{ij} = \lambda S \delta_{ij} + 2\mu S_{ij} \quad (1.33)$$

Où λ et μ sont les coefficients de Lamé qui sont reliés à c_{11} et c_{44} par les relations $\mu = c_{44}$ et $\lambda = c_{11} - 2c_{44}$. Ces coefficients sont également reliés à des paramètres physiques mesurables, le module de Young E et le coefficient de Poisson ν :

$$E = \mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \quad (1.34)$$

$$v = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (1.35)$$

Ces relations seront très utiles pour ce mémoire une fois reliées aux vitesses de propagation des ondes ultrasonores en fin de cette section.

On peut alors écrire :

$$\begin{aligned} T_{ij} &= (c_{11} - 2c_{44})S\delta_{ij} + 2c_{44}S_{ij} \\ &= (c_{11} - 2c_{44})S\delta_{ij} + c_{44} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (1.36)$$

Et l'équation de propagation devient alors :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (c_{11} - 2c_{44}) \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + c_{44} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + c_{44} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (1.37)$$

Ce qui devient, en forme vectorielle :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (c_{11} - c_{44}) \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + c_{44} \nabla^2 \vec{u} \quad (1.38)$$

Ou encore :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (c_{11} - c_{44}) \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + c_{44} \nabla^2 \vec{u} \quad (1.39)$$

De plus, on peut introduire une nouvelle notation s'appuyant sur le fait que tout vecteur peut être décomposé comme le gradient d'un scalaire et le rotationnel d'un vecteur. On note alors :

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \phi + \vec{\nabla} \times \vec{\psi} \quad (1.40)$$

En substituant \vec{u} par sa nouvelle expression (équation 1.40) dans l'équation de propagation, on obtient alors deux relations indépendantes :

$$\rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = c_{11} \nabla^2 \phi \quad (1.41)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2} = c_{44} \nabla^2 \vec{\psi} \quad (1.42)$$

Cela montre que deux modes d'ondes indépendants se propagent dans les solides. D'abord, le mode longitudinal, qui est associé à la dilatation, un phénomène scalaire, est lié au potentiel scalaire. Les modes transverses, dont les polarisations ont deux composantes (y et z) dans le plan perpendiculaire à \vec{x} , sont reliés au potentiel vectoriel. Tous ces modes sont utilisés dans les inspections ultrasonores et sont adaptés à des configurations différentes. On note alors $\vec{u}_L = \nabla \phi$ et $\vec{u}_T = \vec{\nabla} \times \vec{\psi}$ et on obtient finalement les équations de propagation de chaque mode :

$$\frac{\partial^2 \vec{u}_L}{\partial t^2} = V_L^2 \nabla^2 \vec{u}_L \quad (1.43)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{u}_T}{\partial t^2} = V_T^2 \nabla^2 \vec{u}_T \quad (1.44)$$

Et on obtient alors aussi les expressions des vitesses de chaque mode, qui sont des paramètres que l'on utilisera tout au long de ce mémoire :

$$V_L = \sqrt{\frac{c_{11}}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1.45)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.46)$$

En utilisant les expressions des coefficients de Lamé données dans les équations 1.34 et 1.35, on peut relier ces vitesses à des grandeurs mesurables du milieu de propagation, le module de Young E et le coefficient de Poisson ν :

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1.47)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (1.48)$$

1.1.2 Impédance acoustique

L'impédance acoustique Z est une grandeur très utile pour caractériser un matériau de propagation. Elle est largement développée dans la littérature notamment dans (Shull, 2002). Elle représente la résistance du matériau à la mise en mouvement de ses particules quand une variation de pression est appliquée. Elle s'exprime :

$$Z = \frac{p}{v} \quad (1.49)$$

Où p est la pression acoustique et v est la vitesse instantanée des particules.

En utilisant les équations 1.15 et 1.16, on obtient l'expression couramment utilisée pour calculer cette impédance :

$$Z = \rho V \quad (1.50)$$

Où V est la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore.

Cette grandeur est particulièrement importante lorsque l'on s'intéresse à la transmission des ondes ultrasonores d'un milieu de propagation à un autre, comme nous le ferons dans le cadre de ce mémoire. Par analogie avec les circuits électriques, plus les impédances des milieux sont proches, meilleure sera la transmission des ultrasons de l'un vers l'autre.

1.1.3 Réflexion et transmission aux interfaces

Lorsqu'une onde ultrasonore rencontre une interface entre deux milieux d'impédances acoustiques différentes elle est convertie en une ou plusieurs ondes transmises et une ou plusieurs ondes réfléchies. Ce phénomène est largement décrit dans la littérature (Shull, 2002; Cheeke, 2012).

En incidence normale, il n'y a pas de conversion de mode à l'interface et il n'y a qu'une onde réfléchie et une transmise. Les rapports d'amplitude entre l'onde réfléchie et incidente et entre l'onde transmise et incidente sont notés respectivement R et TR . Ils dépendent des impédances acoustiques Z_1 et Z_2 des deux milieux de propagation et sont définis par les relations suivantes :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1.51)$$

$$TR = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (1.52)$$

En incidence oblique, une onde ultrasonore peut être convertie à l'interface en plusieurs modes de propagation distincts, réfléchis ou transmis. Ce phénomène suit la loi de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin \theta_i}{V_{L,1}} = \frac{\sin \theta_{r,L}}{V_{L,1}} = \frac{\sin \theta_{r,T}}{V_{T,1}} = \frac{\sin \theta_{t,L}}{V_{L,2}} = \frac{\sin \theta_{t,T}}{V_{T,2}} \quad (1.53)$$

Où les différents paramètres sont résumés dans la figure 1.1. Cette figure représente le cas d'une onde longitudinale se propageant vers un milieu de plus grande vitesse de propagation. Ce sera le cas utilisé dans ce mémoire, où les ultrasons passeront de l'eau vers l'acier, ou d'un sabot en plastique vers l'acier. Les indices L et T représentent respectivement les modes longitudinaux et transverses.

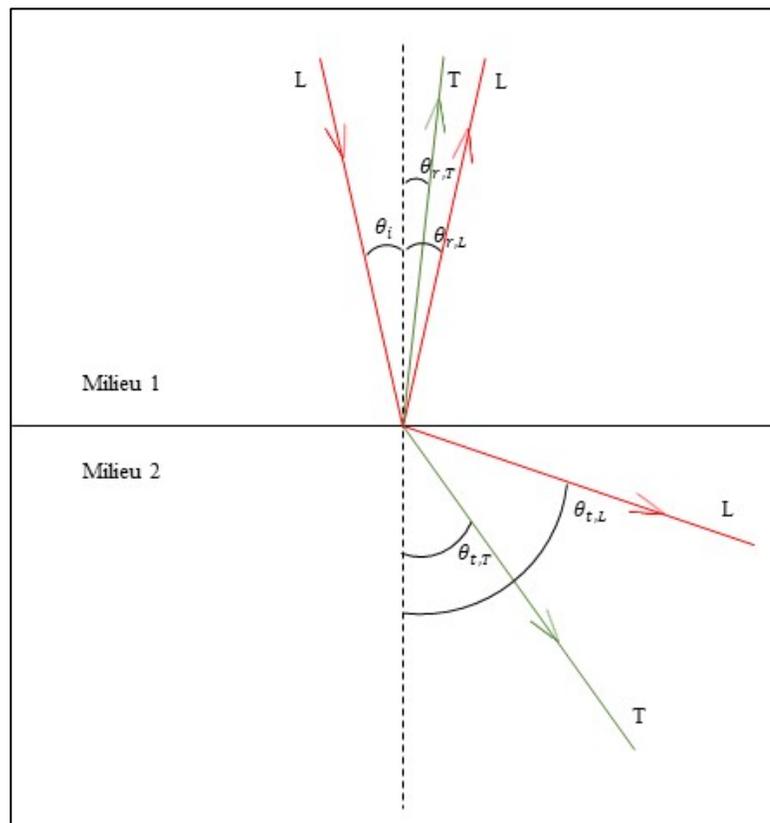


Figure 1.1 Réfraction et transmission des ultrasons à une interface

La loi de Snell-Descartes permet de mettre en évidence des angles d'incidence critiques à partir desquelles des modes d'ondes ne sont plus transmis. De l'eau vers l'acier, pour une onde incidente longitudinale, ces angles critiques sont $\theta_{cL, \text{eau-acier}} = 14,4^\circ$ et $\theta_{cT, \text{eau-acier}} = 28,0^\circ$. Ce seront des données importantes à prendre en compte pour configurer les inspections ultrasonores dans ce mémoire utilisant l'eau et l'acier comme milieux de propagation.

Un exemple de répartition entre l'énergie réfléchié ou transmise dans l'aluminium, sous forme d'onde longitudinale (L) ou transverse (S pour Shear) à partir d'une onde longitudinale incidente dans l'eau en fonction de l'angle d'incidence est présenté figure 1.2.

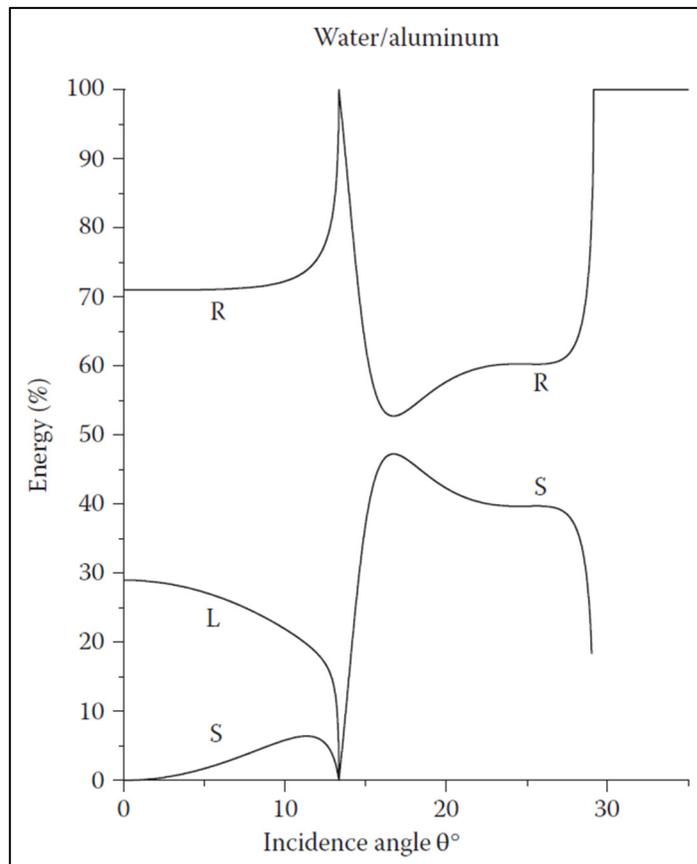


Figure 1.2 Transmission et réflexion à l'interface eau-aluminium
Tirées de Cheeke (2012)

1.1.4 Diffusion par un défaut

En contrôle non destructif par ultrasons, la détection de défauts est rendue possible par la diffusion qui se produit lorsqu'une onde les rencontre (Cheeke, 2012). Comprendre ce comportement diffusif est alors important pour préparer une bonne inspection. La réflexion qui se produit sur le défaut dépend du rapport entre sa taille et la longueur d'onde. Pour l'exprimer on utilise généralement la valeur de ka où a est la taille du défaut. Si $ka \ll 1$, la diffusion est

considérée comme une émission ponctuelle et de faible amplitude par rapport à l'amplitude de l'onde incidente et au contraire si $ka \gg 1$, la diffusion se compare à une réflexion spéculaire car la grande majorité de l'onde incidente est réfléchie.

Il existe des solutions analytiques pour la diffusion des défauts très simples comme une cavité sphérique (Farran, 1951). En considérant une onde incidente plane, un défaut de surface lisse et dont la taille est suffisamment petite par rapport à la longueur d'onde pour qu'il soit considéré comme ponctuel, on peut obtenir une expression pour le champ de pression p_s diffusé dans le champ lointain :

$$|p_s| \xrightarrow{r \rightarrow \infty} \frac{P_0}{kr} \left| \sum_{n=0}^{\infty} (2n + 1) \exp(j\eta_n) P_n(\cos \theta) \right| \quad (1.54)$$

Où r est la distance au centre du défaut, P_0 est l'amplitude du champ de pression incident, η_n est un coefficient qui dépend de la géométrie du défaut et P_n sont les polynômes de Legendre. Cette équation est tirée de (Farran, 1951). Pour un défaut donné, ce champ de pression dépend uniquement de l'angle entre la direction d'émission et celle de diffusion. Il est donc possible de le représenter en fonction de la différence entre ces angles, notée θ ou $\Delta\theta$. Cette courbe est montrée en figure 1.3 pour une onde incidente plane longitudinale et la réflexion longitudinale sur une cavité sphérique de diamètre λ_L . Les solutions analytiques sont affichées sous forme de points et une simulation par éléments finis donne une solution numérique sous la forme d'une courbe continue.

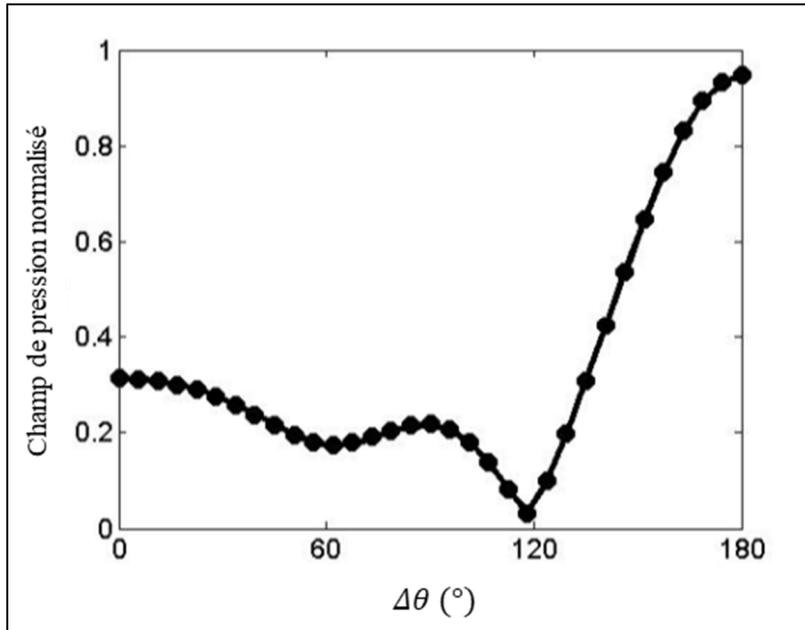


Figure 1.3 Champ de pression diffusé par une cavité sphérique, solution analytique représentée par les points, et modélisation par éléments finis en ligne continue
Tiré de Velichko & Wilcox (2012)

Pour les défauts plus complexes cependant, une loi de diffusion analytique ne peut être obtenue. Il peut alors être très utile d'employer une simulation par éléments finis afin de les caractériser.

1.2 Techniques d'imagerie par ultrasons

Obtenir des images d'une pièce permet de mettre rapidement en évidence les éventuelles imperfections qu'elle contient. Pour obtenir une image ultrasonore, il faut utiliser les signaux reçus par la sonde ultrasonore. Leur acquisition peut être réalisée en mode pulse-écho, où la sonde émettrice est également réceptrice, ou en mode pitch-catch où ces deux sondes sont distinctes. Le mode pulse-écho sera le seul utilisé dans ce mémoire.

1.2.1 A-Scan, B-Scan et S-Scan

Un A-Scan est la simple représentation de l'amplitude reçue par la sonde ultrasonore en fonction du temps de vol ou de la position qui peut être déduite grâce aux vitesses de propagation. Un B-Scan est une image obtenue par juxtaposition de A-Scans régulièrement espacés selon une direction donnée (Fatemi & Kak, 1980). Une représentation de ce processus est faite en figure 1.5.

Un B-Scan peut être obtenu avec une sonde ultrasonore multi-éléments linéaire. La géométrie d'une telle sonde est résumée à la figure 1.4.

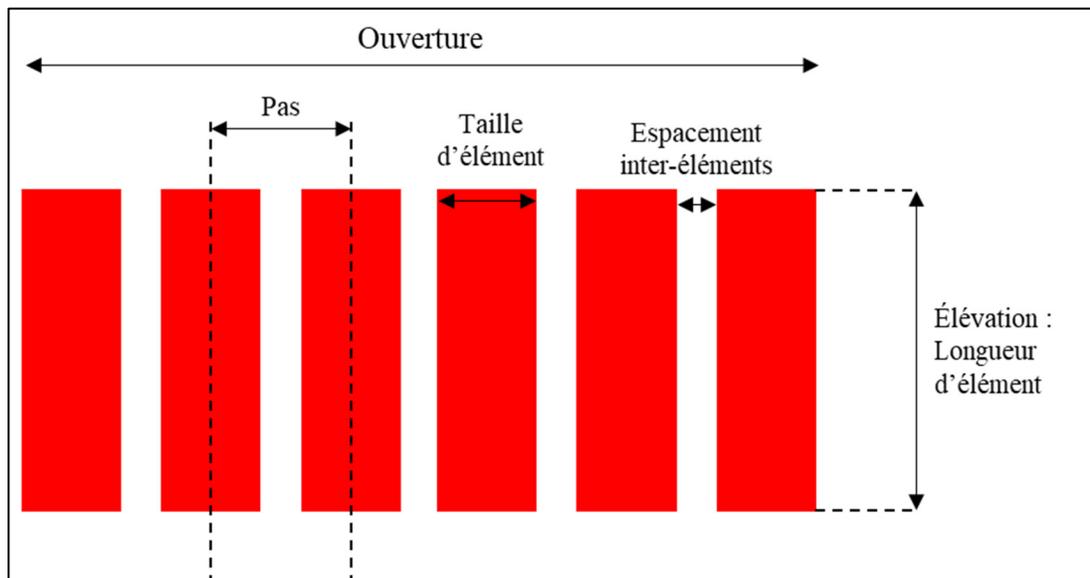


Figure 1.4 Géométrie d'une sonde ultrasonore linéaire à 6 éléments

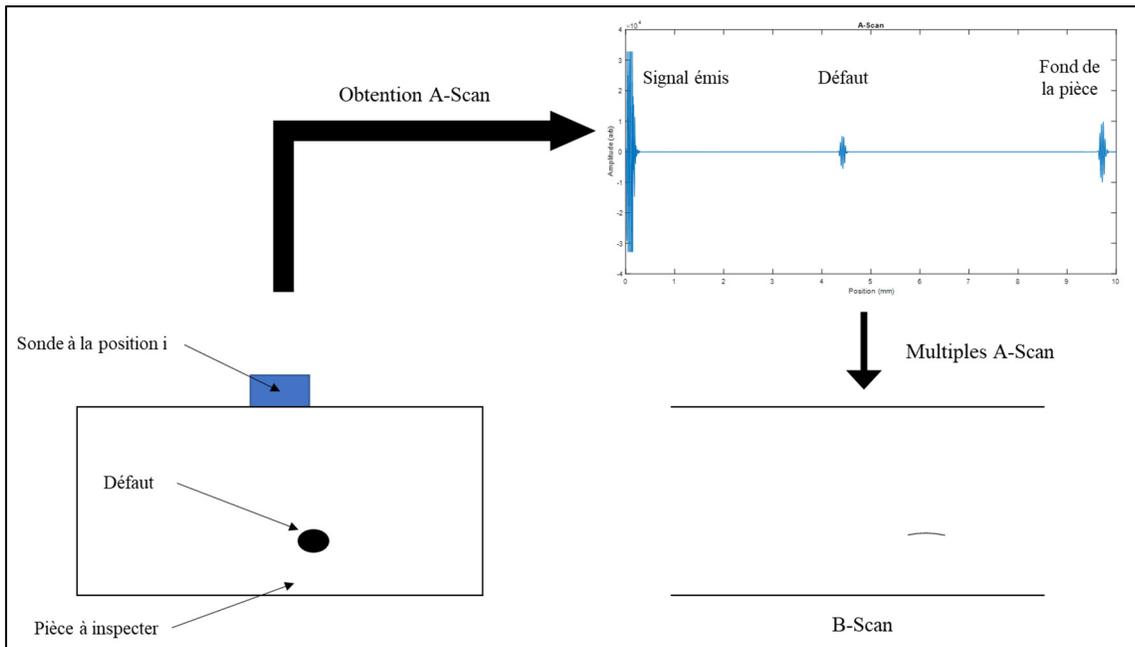


Figure 1.5 Schéma de principe de l'obtention d'un A-Scan et d'un B-Scan

Un S-Scan ou scan sectoriel est réalisé en pilotant, par une loi de délai, l'émission de chaque élément de la sonde. Le but est de diriger un faisceau ultrasonore vers la zone que l'on désire contrôler (Le Jeune, Robert, Villaverde, & Prada, 2016). C'est une technique encore très utilisée à ce jour qui permet d'inspecter des zones qui ne sont pas directement sous l'ouverture de la sonde.

1.2.2 Image TFM

Ce mode d'imagerie, plus récent que ceux évoqués en section précédente, est rendu possible grâce aux sondes ultrasonores multi-éléments. Il est considéré comme l'un des procédés d'imagerie ultrasonore les plus performants grâce à la résolution qu'il permet (Camacho, Atehortua, Cruza, Brizuela, & Ealo, 2018). Afin d'obtenir une image focalisée en tout point (TFM) (Holmes, Drinkwater & Wilcox, 2005), on doit tout d'abord réaliser l'acquisition complète de la matrice de signaux (FMC, Full Matrix Capture) qui se compose des traces temporelles enregistrées avec toutes les combinaisons émetteurs-récepteurs possibles avec les différents éléments de la sonde (procédé illustré en figure 1.6). Si on utilise une sonde

composée de N éléments, alors la FMC se compose de N^2 signaux. Ensuite, un post-traitement de ces données est fait pour aboutir à l'image focalisée en tout point. Dans ce mémoire, on utilisera l'algorithme délai et sommation (delay and sum, DAS) pour réaliser les images TFM. Il consiste à calculer les temps de vol de l'émetteur i jusqu'au récepteur j en passant par un pixel donné pour chaque combinaison émetteur-récepteur puis à sommer toutes les amplitudes correspondant à ces temps de vols sur les signaux associés. On obtient alors l'intensité F de ce pixel. La formule suivante résume le calcul de l'intensité d'un pixel :

$$F(x, z) = \left| \sum_{1 \leq i, j \leq N} \text{Signal}_{i,j}(t_{vol,i,j}) \right| \quad (1.55)$$

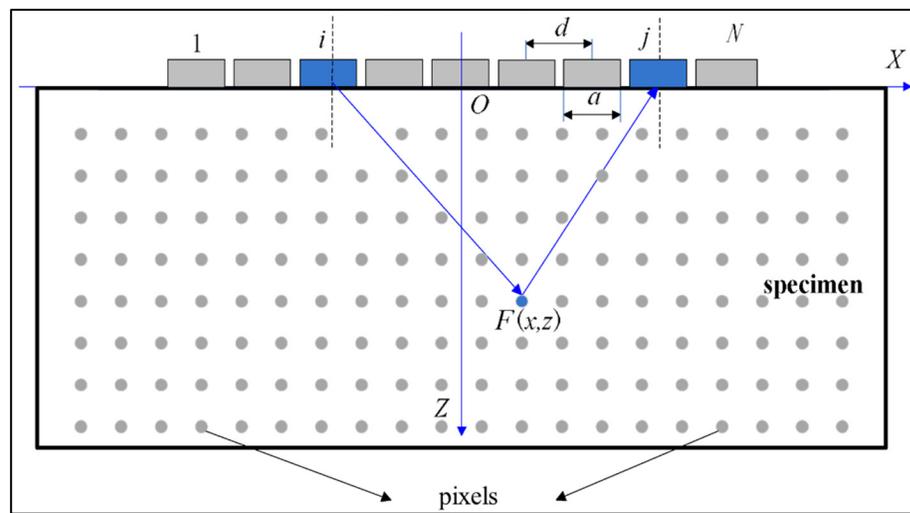


Figure 1.6 Principe de construction d'une image TFM
Tiré de Hu, Du, Ye, & Li (2018)

La figure 1.7 présente une image TFM d'une pièce en acier où l'on peut observer trois trous percés latéralement (nommés SDH pour Side Drilled Holes) et le fond de la pièce. Pour obtenir cette image, les données FMC ont été acquises avec une sonde ultrasonore composée de 64 éléments piézoélectriques de fréquence centrale 5MHz. Cette sonde était montée sur un sabot en Rexolite lui donnant une inclinaison de 20° .

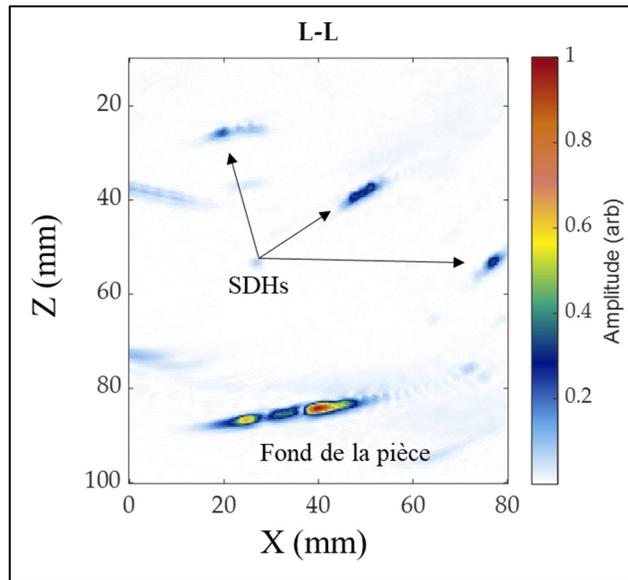


Figure 1.7 Exemple d'image TFM d'un bloc d'acier comportant trois SDH

L'imagerie ultrasonore par TFM est considérée comme l'une des méthodes permettant d'avoir la meilleure résolution dans la pièce. De plus, des études ont montré qu'elle permet de détecter des défauts situés directement sous une surface courbe (Sutcliffe, Weston, Charlton, Donne, Wright, Cooper, 2013 ; Hunter, Drinkwater, Wilcox, 2010), ce qui sera indispensable dans ce mémoire. En effet, cette méthode d'imagerie permet de prendre en compte la courbure de la surface pour calculer les temps de vol jusqu'au pixels de la zone d'intérêt. Ceci est une forme de compensation de la courbure de la surface en post-traitement qui permet de garder des bons résultats sur les pièces courbées. Cependant, son algorithme de reconstruction est plus complexe que pour les autres formes d'inspection cités dans la section précédente. Ainsi, des artefacts peuvent apparaître sur certaines images TFM et leur origine peut être difficile à expliquer. Ils cachent l'information sur la superficie qu'ils occupent et peuvent notamment être dus à la courbure de la surface de la pièce (Brath & Simonetti, 2017). Il est donc important de pouvoir prévoir l'apparition de ces artefacts et vérifier qu'ils ne se trouvent pas dans la zone d'intérêt que l'on souhaite contrôler. Finalement, l'imagerie TFM demande une grande capacité de stockage de données et une grande puissance de calcul donc des alternatives lui sont parfois préférées comme l'imagerie par ondes planes (PWI pour Plane Wave Imaging),

(Rachev, Wilcox, Velichko & McAughey, 2020). Une comparaison entre les résultats de ces deux modalités sur une pièce à surface courbe est montrée en figure 1.8. Ces images sont obtenues avec une sonde piézoélectrique linéaire de 64 éléments.

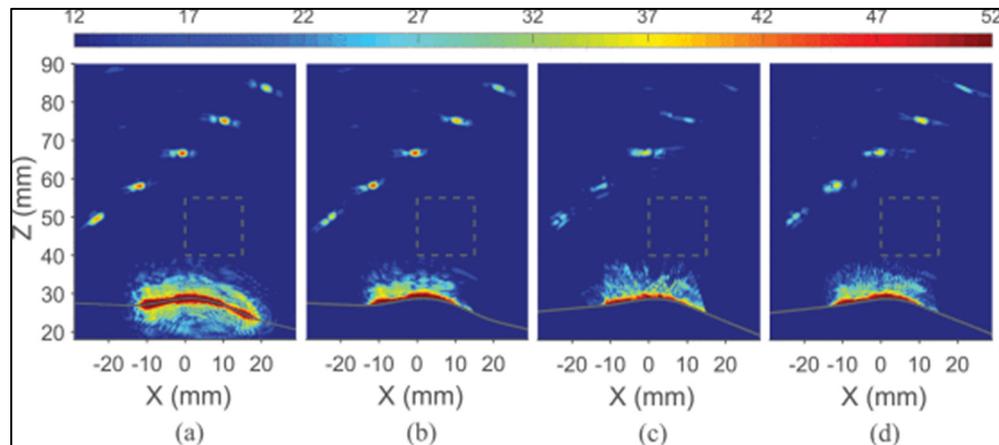


Figure 1.8 Imagerie ultrasonore d'une pièce à la surface sinusoïdale
 (a) TFM (b) PWI 64 tirs (c) PWI 4 tirs (d) PWI 16 tirs
 Tiré de Rachev, Wilcox, Velichko & McAughey (2020)

L'algorithme TFM est celui qui produit la meilleure image des défauts, avec un rendu similaire pour l'image réalisée avec 64 tirs d'ondes planes. Cependant les résultats sont amoindris avec 16 tirs et le défaut le plus éloigné de la sonde disparaît presque lorsque l'on n'utilise plus que quatre tirs d'ondes planes.

1.3 Inspection de pièces mécaniques à la géométrie complexe

Dans la majorité des cas, les inspections ultrasonores sont réalisées sur des pièces à surfaces planes ou dont la courbure est faible et constante comme les tuyaux. Lorsque la surface est complexe, il est difficile d'y conformer la sonde pour réaliser une inspection par contact direct. Des techniques existent alors pour contrôler la pièce sans mettre la sonde ultrasonore en contact, comme l'inspection en immersion. Cependant, la réfraction des ultrasons à une interface courbe est difficile à prévoir et la littérature montre que la qualité des images ultrasonores dépend alors beaucoup de la position de la sonde, notamment de son éloignement à la surface de la pièce (Mansur Rodrigues Filho & Bélanger, 2021). Une comparaison entre

l'image TFM d'une pièce concave avec trois trous percés latéralement obtenue avec ou sans optimisation de cet éloignement et sur la même pièce mais avec surface plane est montrée figure 1.9.

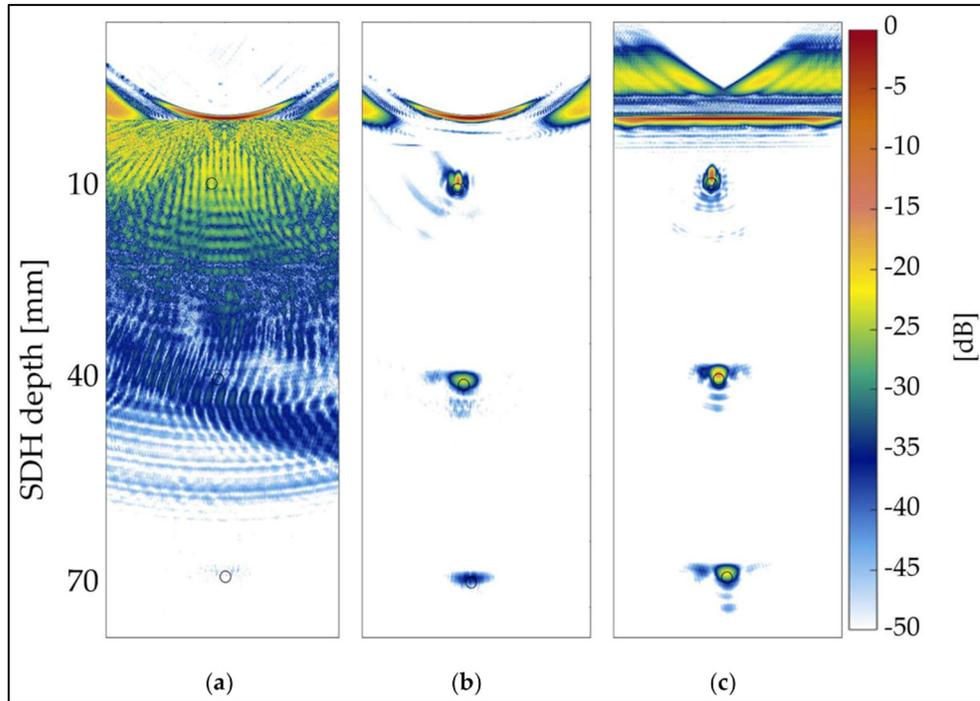


Figure 1.9 Image TFM par immersion de 3 trous percés latéralement sur une pièce à surface (a) concave, sans optimisation d'éloignement de sonde (b) concave, avec optimisation d'éloignement de sonde (c) plane
Tirée de Mansur Rodrigues Filho & Bélanger (2021)

On constate que selon l'éloignement de la sonde à la surface concave, l'image TFM peut être presque aussi précise que pour une pièce avec surface plane ou au contraire elle peut être totalement inexploitable. Optimiser la position de la sonde est donc capital lorsqu'il s'agit de contrôler une pièce complexe. Il peut donc être très intéressant de simuler le résultat d'imagerie que l'on pourrait obtenir avec une position et une orientation de sonde précise pour bien choisir ces paramètres. Par la suite une inspection robotisée peut permettre d'atteindre la position précise choisie. C'est ce que nous entreprendrons dans ce mémoire.

1.3.1 Inspection en contact

Il existe des solutions pour réaliser l'inspection en contact d'une pièce complexe, comme des sabots métalliques ou plastiques adaptés à la pièce. Mais si la courbure de la pièce change alors il faut un nouveau modèle de sabot. Si elle reste assez faible, un sabot en plastique avec surface plane peut être utilisé afin de se décaler d'une éventuelle surface irrégulière d'une soudure et y diriger les ondes grâce à l'angle du sabot. Il faut alors utiliser beaucoup de couplant ultrasonore pour assurer au mieux la transmission des ultrasons du sabot vers la pièce. Mais cette configuration d'inspection n'est pas très fiable ni répétable.

D'autres sondes multi-éléments plus adaptables ont commencé à être conçues, comme une sonde matricielle souple faite d'éléments piézoélectriques reliés entre eux par du silicone déformable (figure 1.10). Mais ces sondes ne sont pas disponibles à grande échelle chez les fournisseurs de solutions de contrôle par ultrasons, à la différence des sondes piézoélectriques linéaires maintenant commercialisées depuis plusieurs années.

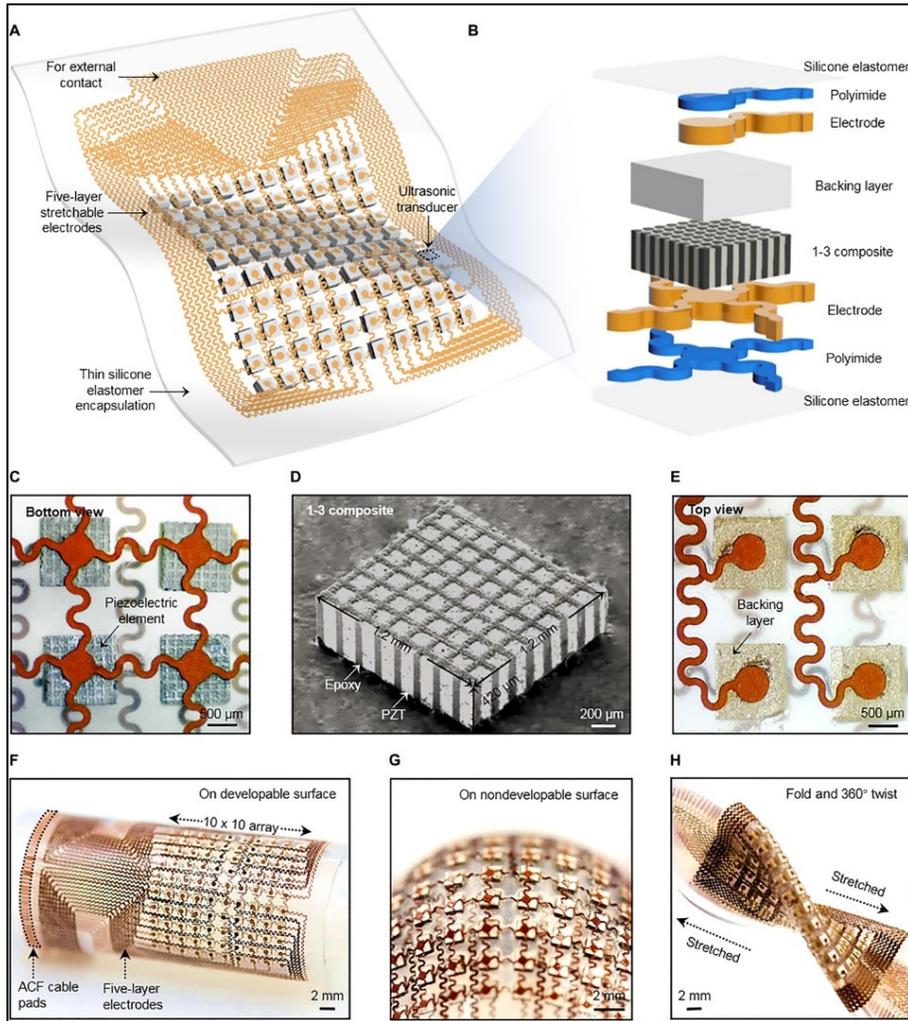


Figure 1.10 Exemple de sonde piézoélectrique matricielle déformable
Tiré de Hu et al. (2018)

1.3.2 Inspection en immersion

La technique d'inspection en immersion est couramment utilisée en contrôle non destructif par ultrasons (Honarvar, Varvani-Farahani, 2020). Elle consiste à baigner la pièce dans l'eau qui sert alors de couplant ultrasonore. La sonde peut donc être déplacée librement dans son environnement, sans contrainte de contact avec la pièce. Sa position peut alors être optimisée pour obtenir la meilleure image de la pièce. Une étude complète montre que la distance sonde-pièce est un paramètre déterminant pour la qualité d'image d'une pièce courbée, et la distance

préconisée varie en fonction de la courbure et de la convexité de la pièce (Mansur Rodrigues Filho & Bélanger, 2021). Les résultats de l'évolution de l'image obtenue d'un trou percé latéralement à 40mm de profondeur sous une surface plane, concave ou convexe sont résumés dans la figure 1.11. L'abréviation Cc5 signifie que l'interface est concave et que son profil est sinusoïdal, d'amplitude 5λ . Cx signifie convexe et F0 est une surface plane et ainsi une référence de comparaison.

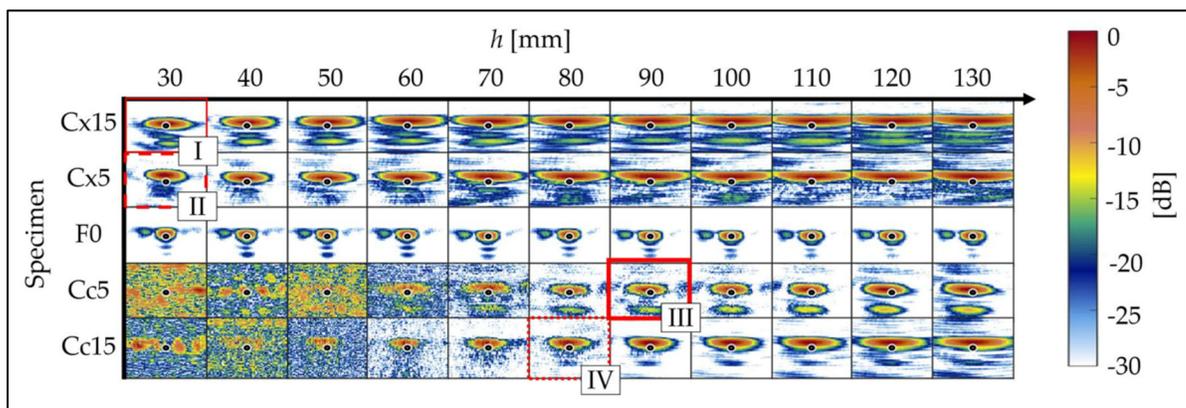


Figure 1.11 Évolution de l'image TFM par immersion d'un trou percé latéralement à 40mm de profondeur selon la courbure de la surface et la distance sonde-pièce h
Tirée de Mansur Rodrigues Filho & Bélanger (2021)

On remarque que pour une même surface concave, on peut passer d'une image où les artéfacts cachent totalement le défaut à une image où il est parfaitement détecté même s'il est toujours déformé. On constate également qu'un compromis doit être trouvé entre la valeur du contraste entre les artéfacts et le défaut et la présence d'un lobe secondaire plus ou moins intense près de celui-ci. Cette étude montre bien l'importance d'optimiser la position de la sonde en immersion et la complexité de l'évolution des résultats qui sont alors difficiles à prévoir. Il serait intéressant de pouvoir prendre en compte l'orientation de la sonde en plus de son éloignement à la pièce dans l'optimisation de la configuration d'inspection. Une simulation par éléments finis pourrait permettre de faire varier ces différents paramètres entre deux calculs. De plus cette méthode permettrait également de faire varier la forme du défaut selon le besoin rencontré, sans se limiter aux trous percés latéralement. Ce mémoire mettra cela en place.

L'inspection ultrasonore multi-éléments par immersion met en jeu une difficulté : connaître la surface de la pièce afin de pouvoir produire des images qui en tiennent compte. Si elle n'est pas connue préalablement on peut alors réaliser des acquisitions ultrasonores pour l'obtenir. Il est important d'avoir une bonne précision sur cette surface car des erreurs dans sa reconnaissance peuvent entraîner dans le calcul des temps de vol pour atteindre la pièce et ainsi compromettre la qualité de l'image TFM à l'intérieur de celle-ci. La littérature scientifique est assez développée sur cette détection de surface en immersion. Différentes méthodes sont utilisées pour la reconnaître : imagerie par émission d'ondes planes, acquisitions pitch-catch, utilisation du temps de vol ou encore imagerie TFM (Kerr, Pierce, Rowe, 2016 ; Matuda, Buiochi, Adamowski, 2019). Les points de surface extraits sont utilisés pour l'approximer au mieux par une courbe. Plusieurs travaux utilisent une image TFM pour détecter ces points, reliés ensuite par exemple par une spline. Des sondes ultrasonores linéaires ou matricielles sont utilisées (McKee, Bevan, Wilcox, & Malkin, 2020 ; Rachev, Wilcox, Velichko & McAughey, 2020). Cette dernière technique sera utilisée dans ce mémoire.

Une limitation à l'inspection en immersion est que certaines structures à contrôler ne peuvent parfois pas être déplacées dans un bassin d'immersion à cause de leur envergure ou du fait qu'elles soient corrodables. Une alternative est d'utiliser un sabot déformable rempli d'eau (Le Jeune, Robert, Dumas, Membre, & Prada, 2015 ; Robert et al., 2016). Ce sabot peut parfaitement se conformer à la pièce. De plus, il laisse un débattement angulaire et un intervalle de distance pièce-sonde utilisable pour optimiser l'inspection, même si les amplitudes de ces degrés de liberté sont moins importantes que dans une inspection par immersion classique.

1.4 Simulation numérique de la propagation des ultrasons

La complexité des méthodes d'imagerie multi-éléments et de l'inspection des pièces incurvées rendent les résultats des contrôles par ultrasons difficilement prévisibles, notamment dû à la forte sensibilité à la position de la sonde. Il peut donc être intéressant de s'aider d'un outil de simulation avant de réaliser un tel contrôle non destructif. Les méthodes de simulation de la

propagation des ultrasons sont nombreuses. Certaines sont analytiques, elles utilisent alors les équations de propagation et permettent de prendre en compte de nombreux phénomènes liés aux paramètres de la sonde piézoélectrique et aux matériaux de propagation. Mais comme évoqué en section 1.1.4, les formes de défaut dont on peut déterminer analytiquement le comportement diffusif sont peu nombreuses. Il peut alors être intéressant d'utiliser une simulation par éléments finis où l'on définit un maillage et pour laquelle la forme de la pièce et des défauts est alors entièrement personnalisable. L'inconvénient est le temps de calcul qui est largement supérieur à celui des simulations analytiques. Ce temps de calcul sera très important dans ce mémoire. En effet, pour simuler des images ultrasonores TFM, on doit modéliser les N émissions nécessaires à l'acquisition complète de la matrice de signaux (FMC) et donc réaliser N simulations, où N est le nombre d'éléments de la sonde ultrasonore.

1.4.1 Simulation numérique par éléments finis

Dans une simulation par éléments finis, l'utilisateur doit définir un maillage qui représente la géométrie et les matériaux dans lesquels vont évoluer les ultrasons émis par la sonde. Il est composé de nombreux nœuds, chacun reliés à certains de ses voisins selon le type de maillage choisi pour former des éléments. Ces derniers peuvent par exemple être triangulaires, quadrilatéraux, ou encore, en 3D, tétraédriques ou hexagonaux. De nombreux autres paramètres doivent être définis comme la position de la sonde, les caractéristiques de ses éléments piézoélectriques et le signal d'excitation. L'émission des ultrasons est réalisée par l'application de forces à certains nœuds du maillage à des instants donnés. Cela provoque des déplacements qui se propagent au reste du maillage.

Dans ce mémoire, des sondes composées d'éléments piézoélectriques de fréquence centrale 5MHz seront principalement employées. On choisit cette fréquence, car on tentera, en chapitre 3, d'obtenir une image TFM de fines porosités de diamètres de l'ordre de 1mm (voir section 1.1.4 pour le lien entre fréquence et taille de défauts à imager). Sachant que la longueur d'onde des ondes ultrasonores longitudinales, notée λ_L , à une fréquence de 5MHz dans l'acier est d'environ $\frac{5.10^{-3}m.s^{-1}}{5.10^6Hz} = 1mm$ et que l'on considère que la limite théorique pour détecter des

défauts est que leur taille soit supérieure à $\lambda/2$, cette fréquence est adaptée pour cette application. On note que plus la fréquence est élevée, plus volumineuses sont les données à acquérir et, comme évoqué dans les paragraphes suivants, plus longues sont les simulations par éléments finis.

L'avantage de ces simulations est la grande personnalisation qu'elles permettent généralement. Son inconvénient est le grand temps de calcul qu'elles nécessitent. Les logiciels de modélisation par éléments finis couramment utilisés, comme Abaqus ou COMSOL, réalisent leurs calculs grâce au processeur central (CPU) de l'ordinateur utilisé. Au contraire, il existe un logiciel par éléments finis, nommé POGO, qui calcule sur le processeur graphique (GPU). Cette simulation est alors beaucoup plus rapide que ses alternatives (Huthwaite, 2014). Cela pourrait donc rendre possible des simulations 3D. Cela peut être très utile dans ce mémoire, car dans le cas de l'inspection multi-éléments de pièce incurvées, les rayons ultrasonores ne sont pas forcément tous compris dans un seul et même plan. Une simulation 3D serait donc la meilleure solution pour représenter au mieux la complexité de la situation étudiée.

Des conditions aux limites doivent être implémentées aux frontières des maillages utilisés. Si elles ne sont pas précisées, ce sont généralement des conditions de frontières libres, ce qui correspond à des côtés de la pièce qui sont en contact avec l'air et où les ultrasons sont alors totalement réfléchis. Or les pièces inspectées peuvent généralement être considérées comme infinies selon une direction au vu de la largeur de cette dimension en comparaison à la largeur de la sonde. On implémente alors des frontières absorbantes pour éviter les réflexions non désirées sur certains bords du maillage. Pour cela, sur une distance de trois à cinq longueurs d'ondes avant les bords, on augmente graduellement l'atténuation du matériau jusqu'à annihiler l'onde sans produire de réflexion (Rajagopal, Drozd, Skelton, Lowe, & Craster, 2012).

La taille des éléments, notée dx , est un paramètre très important pour la qualité des résultats. Ils doivent être assez fins en comparaison avec la taille de la longueur d'onde dans leur milieu de propagation. La littérature préconise l'utilisation de 10 à 15 éléments par longueur d'onde

(Drozd, Moreau, Castaings, Lowe, & Cawley, 2006). Cependant le temps de calcul est proportionnel au nombre de nœuds du maillage, qui en 2D est proportionnel à dx^2 et à dx^3 en 3D. Ainsi, dans ce mémoire, on utilisera des éléments de taille minimale dx où :

$$dx = \lambda_{min}/15 \quad (1.56)$$

Où λ_{min} est la longueur d'onde minimale de tous les modes qui se propagent dans le matériau considéré.

Le pas de temps de simulation dt est directement lié à la taille des éléments (Cook, Malkus, Plesha, & Witt, 1974). En effet, il doit être inférieur à la durée de la traversée d'un élément par l'onde la plus rapide mise en jeu. On a alors :

$$dt = 0.8 \times \frac{dx}{V_{max}} \quad (1.57)$$

Où 0.8 est un facteur de sécurité.

1.4.2 Simulation hybride : analytique et par éléments finis

La section précédente a permis de mettre en avant le lien entre longueurs d'onde des modes se propageant dans la simulation par éléments finis et temps de calcul. On remarque que la longueur d'onde du mode ultrasonore longitudinal dans un matériau donné est :

$$\lambda_{L,matériau} = \frac{V_{L,matériau}}{f} \quad (1.58)$$

Où f est la fréquence d'acquisition. Ainsi, pour l'inspection en immersion d'une pièce en acier, selon l'équation 1.56 la taille des éléments doit être environ quatre fois inférieure dans l'eau (vitesses des ondes longitudinales d'environ 1480m/s) par rapport à l'acier (vitesses des ondes longitudinales d'environ 5900m/s). Ainsi, si la simulation dans l'eau et dans l'acier étaient

faites par éléments finis, une part très conséquente du temps de simulation seraient dédiée à la propagation dans l'eau. Or, c'est est un milieu sans défaut dans lequel la propagation des ultrasons est facilement modélisable analytiquement. Il est donc inutile d'utiliser une simulation par éléments finis dans ce milieu.

Des travaux ont donc mis au point avec succès une simulation ultrasonore hybride : analytique dans un milieu couplant sans défaut et par éléments finis dans la pièce à contrôler (Wilcox et al., 2020). Pour chaque émission simulée avec cette méthode, on calcule premièrement le champ ultrasonore qui arrive à la surface entre l'eau et la pièce grâce aux équations analytiques développées en section 1.1. Ensuite, on en déduit les forces normales à la surface à appliquer à tous les nœuds de surface du maillage par éléments finis supposés être en contact avec l'eau. Après cela, on enregistre les déplacements à ces mêmes nœuds pendant la simulation. Ces déplacements sont finalement propagés analytiquement jusqu'aux éléments piézoélectriques de la sonde. Ils traduiront donc les éventuels échos se produisant dans la simulation par éléments finis et revenant vers la sonde.

1.4.3 Simulation de réponse de défaut : matrice de diffusion

En poursuivant la réflexion de la section précédente, on remarque que la région d'intérêt de la pièce à contrôler par ultrasons n'en occupe généralement qu'une partie, comme par exemple une zone de soudure. La communauté scientifique a alors mis au point un procédé de simulation encore plus efficace que celui de la section précédente. Il consiste à modéliser le comportement diffusif d'un défaut dont on choisit la forme dans une simulation par éléments finis réalisée sur une petite zone tout autour de ce défaut (Wilcox, & Velichko, 2009). Dans cette méthode, plusieurs simulations sont réalisées en envoyant à chaque fois une onde plane vers le défaut depuis un angle différent. Les réflexions sont enregistrées tout autour du défaut. Les déplacements reçus sont ensuite convertis en ondes planes de différents modes. La géométrie de cette méthode de simulation est résumée en figure 1.12. Grâce à toutes ces données on obtient alors la matrice de diffusion D telle que :

$$u_R(\omega, \theta_R) = D(\theta_T, \theta_R, \omega) u_T(\omega, \theta_T) \quad (1.59)$$

Où u_R et u_T sont les déplacements reçus et transmis et θ_R et θ_T les angles reçus et transmis.

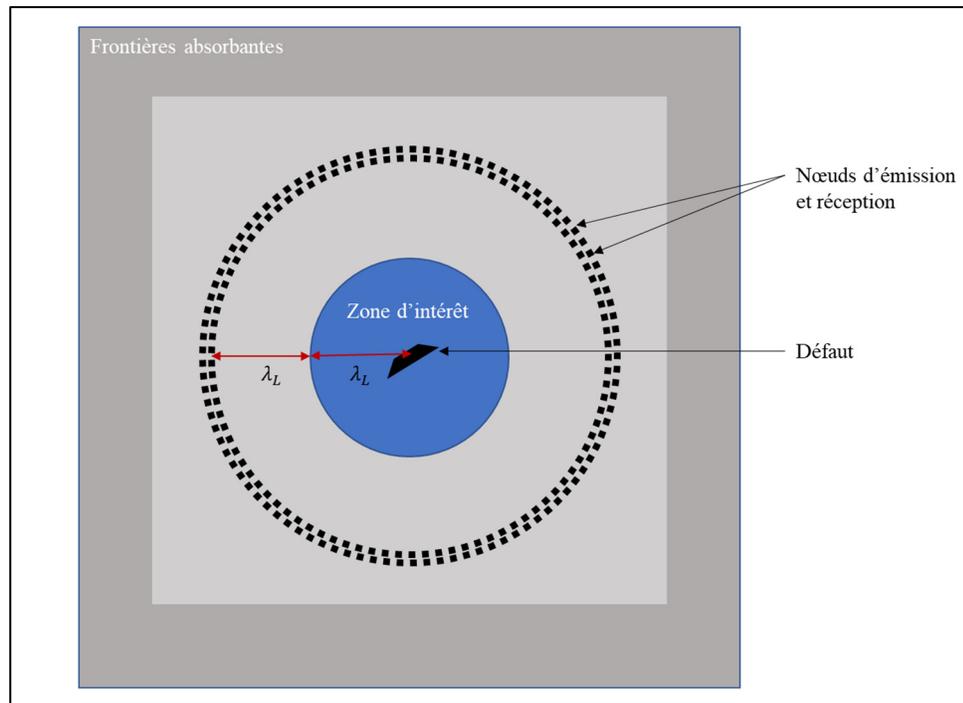


Figure 1.12 Schéma de principe d'une simulation visant à obtenir la matrice de diffusion

Les nœuds de réceptions sont les mêmes nœuds que les nœuds d'émissions. Un espacement d'une distance minimale λ_L est préconisé entre ces nœuds et la zone d'intérêt, si λ_L est la plus grande longueur d'onde mise en jeu dans la simulation. De même le rayon de la zone d'intérêt autour du défaut, noté R_{ZI} dans ce mémoire, doit être tel que $R_{ZI} \geq \lambda_L$.

De bons résultats sont obtenus grâce à cette méthode. Cela a notamment été démontré dans une étude qui compare les images TFM simulées grâce à elle avec des images TFM expérimentales de fissures (Felice, Velichko, Wilcox, Barden, & Dunhill, 2014).

La simulation de la matrice de diffusion permet de connaître la réponse d'un défaut choisi à une onde incidente selon n'importe quelle direction. Ainsi, une fois ces résultats enregistrés, on peut calculer analytiquement la réponse du défaut pour n'importe quelle position de sonde. Au contraire, dans la section précédente, chaque position de sonde nécessite de réaliser entièrement une nouvelle simulation hybride. La méthode décrite dans cette dernière section pourra donc être très utile dans ce mémoire pour simuler des images TFM de différents défauts, à diverses localisations et pour plusieurs positions et orientations de sonde vis-à-vis de surfaces courbes.

1.5 Méthodologie du projet basée sur la revue de la littérature

L'objectif principal de ce projet de recherche est de mettre au point une simulation numérique permettant de prévoir les résultats d'une imagerie ultrasonore TFM sur pièce complexe pour une position et une orientation de sonde choisie. On a sélectionné l'imagerie ultrasonore multi-éléments comme procédé de contrôle non destructif pour sa capacité à obtenir une très bonne résolution à l'intérieur des pièces à inspecter. Grâce à ce chapitre, on a identifié des outils et des procédés dans la littérature scientifique permettant de mettre au point une méthode pour mener à bien l'objectif de l'étude. Tout d'abord, on fera le choix dans ce mémoire d'utiliser une méthode de simulation par éléments finis pour pouvoir modéliser toute forme de défaut et de surface. Même si, pour simuler une image TFM, il faut produire beaucoup de données, l'utilisation d'un logiciel basé sur cartes graphiques et d'une méthode hybride (analytique et par éléments finis) permettront de garder un temps de calcul viable pour la programmation hors ligne de procédés de contrôle non destructifs robotisés. Premièrement, on validera expérimentalement cette méthode de simulation dans une configuration à deux milieux de propagation avec surface plane et plan de symétrie pour vérifier la bonne modélisation des phénomènes de transmission à l'interface qui ont été évoqués en début de chapitre. Deuxièmement, on évaluera les résultats de cette simulation dans une configuration avec surface courbe et plan de symétrie. On pourra alors vérifier qu'elle représente bien la forte influence de la courbure d'une pièce à inspecter sur les résultats d'imagerie TFM, un phénomène qui a été présenté et illustré dans ce chapitre. Troisièmement, on fera évoluer la

simulation pour l'adapter aux configurations sans plan de symétrie qui nécessitent une modélisation en 3D. Cela impliquera de restreindre la zone où une modélisation par éléments finis est utilisée pour conserver un temps de calcul viable pour ce projet et pour une utilisation en industrie. On mettra alors en place une méthode de simulation avec matrice de diffusion en s'inspirant des travaux présentés à la fin de cette partie. Une comparaison entre simulations et résultats expérimentaux sur une pièce de calibration comportant différents défauts au niveau d'un raccordement vertical soudé sur un tuyau sera finalement effectuée. Les études sur la détection de surface avec sonde ultrasonore multi-éléments évoquées seront alors très utiles pour pallier à l'écart entre la géométrie a priori de la surface de la pièce à inspecter et sa géométrie réelle (avec défauts ou tolérances de fabrication).

CHAPITRE 2

MISE AU POINT DE L'OUTIL DE SIMULATION

Dans ce chapitre, on se propose de développer un outil de simulation adapté aux enjeux de ce mémoire en s'appuyant sur le chapitre précédent. On mettra premièrement en place une simulation hybride (voir section 1.4.2) que l'on appliquera à des inspections ultrasonores simples, c'est-à-dire sur pièce à surface plane, en incidence normale en contact direct puis en incidence oblique avec utilisation d'un sabot en Rexolite. Cette simulation sera validée expérimentalement dans ces configurations. On la modifiera ensuite pour utiliser la méthode avec matrice de diffusion (voir section 1.4.3), qui se révélera indispensable pour les simulations en 3D. Ce nouvel outil de simulation sera à son tour validé expérimentalement dans un cas simple.

2.1 Choix du logiciel de simulation par éléments finis

De nombreuses simulations doivent être exécutées pour prévoir une FMC (voir section 1.2.3), ainsi elles doivent être rapides, tout en laissant la possibilité de personnaliser totalement de nombreux paramètres comme les caractéristiques de la sonde ultrasonore multi-éléments, la forme de la surface de la pièce et du défaut et sa position. Le logiciel POGO répond à ces besoins, ses principaux avantages étant d'être bien plus rapide que ses alternatives, entièrement personnalisable sur Matlab et relativement abordable financièrement. Les temps d'exécution des simulations que l'on réalise seront relevés afin de confirmer que POGO peut être une solution viable pour à terme prévoir des inspections robotisées dans l'industrie à l'aide de jumeaux digitaux.

2.2 Évaluation de la simulation dans un cas d'inspection où la solution analytique est connue

Le but de ce mémoire est de mettre au point un outil de simulation fiable dans des cas d'inspection complexes. Pour y parvenir, nous allons premièrement vérifier la fiabilité du

logiciel POGO dans une modélisation ultrasonore simple, dont on connaît la solution analytique. Le résultat de cette section confirmera la validité des signaux composant la FMC simulée avec POGO. Ce sont eux qui vont constituer les données d'entrée dans les algorithmes d'imagerie que l'on utilisera dans les sections suivantes. Il est donc important de vérifier leur qualité avant de poursuivre l'étude.

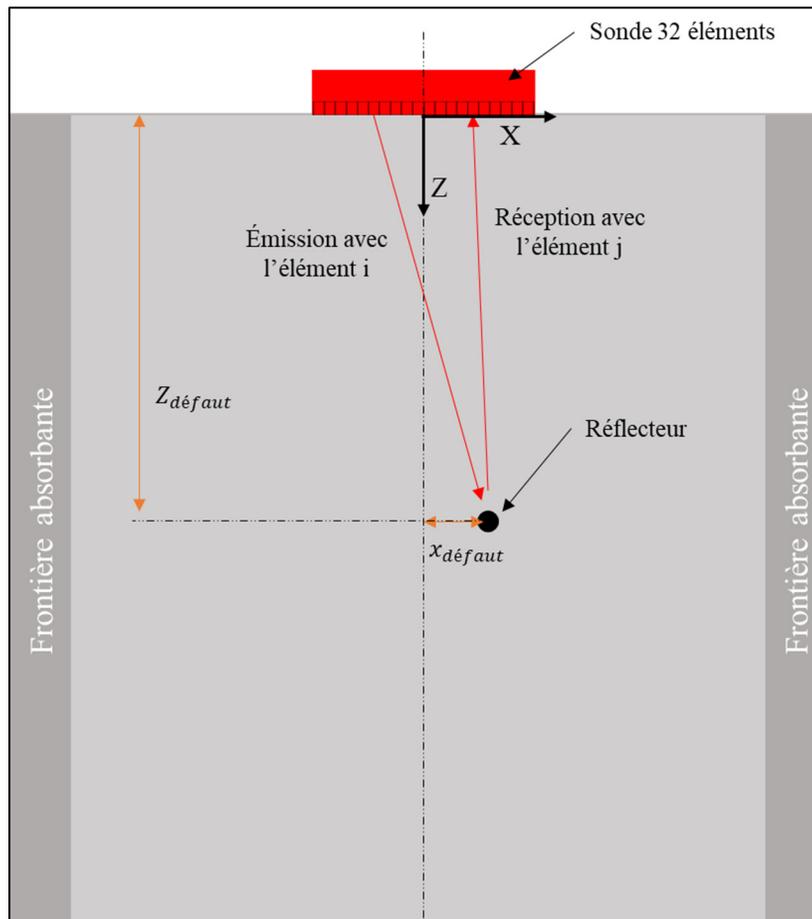


Figure 2.1 Schéma d'acquisition de la FMC avec une sonde 32 éléments, en incidence normale et en contact direct sur surface plane

La configuration de l'inspection ultrasonore utilisée est schématisée en figure 2.1. On simule l'acquisition de la FMC à 5MHz avec une sonde composée de 32 éléments piézoélectriques émettant des signaux longitudinaux dans la pièce. En analytique ou en éléments finis, on devra réaliser 32 simulations, correspondant chacune à l'émission avec un élément i . On effectue

ensuite une sommation a posteriori des signaux de la FMC en suivant une loi de délai pour synthétiquement focaliser les ondes émises sur un réflecteur circulaire situé dans la pièce, à une profondeur $Z_{défaut} = 40mm$. Pour finir, on s'intéresse à l'écho reçu par un élément au milieu de la sonde : l'élément 16. Le délai ajouté avant un signal émis par l'élément i , noté Δt_i s'exprime :

$$\Delta t_i = \frac{\sqrt{(x_{défaut} - X_i)^2 + (Z_{défaut} - Z_i)^2}}{V_{L,acier}} \quad (2.1)$$

Où X_i et Z_i sont les coordonnées de l'élément piézoélectrique i . On fait plusieurs simulations en décalant le défaut horizontalement de différentes distances $x_{défaut}$ à droite de l'axe de la sonde. On compare à chaque fois le résultat avec le signal reçu théoriquement dans la même situation.

Les équations analytiques utilisées sont tirées de la littérature (Drinkwater & Wilcox, 2006). L'expression analytique du signal $H_{m,n}$ reçu par un élément n lorsqu'une émission est réalisée par l'élément m s'exprime :

$$H_{m,n}(\omega) = I(\omega)[T(\omega)]^2 D(\omega, \theta_m) D(\omega, \theta_n) R(\omega, \theta_m, \theta_n) A(\omega, d_m) A(\omega, d_n) e^{ik(\omega)(d_m+dn)} \quad (2.2)$$

Où I est la transformée de Fourier du signal électrique envoyé à l'émetteur, T est la réponse d'un élément à une impulsion, A est le facteur d'atténuation (on prendra en compte uniquement l'atténuation due à l'étalement du faisceau dans la simulation analytique et en éléments finis car on restera dans des configurations où l'atténuation due au matériau est limitée), k est le nombre d'onde, d est la distance entre un élément et le réflecteur, R est le coefficient de réflexion du réflecteur et D est la directivité de l'élément. Les expressions de ces différentes fonctions sont détaillées dans la dernière référence citée.

Dans la simulation par éléments finis de nombreux paramètres doivent être soigneusement choisis pour bien modéliser la propagation des ultrasons. L'émission d'une onde ultrasonore par l'élément i , correspondant à la simulation i , est effectuée en appliquant une force à tous les nœuds du maillage étant positionnés au niveau de sa surface. La propagation de l'onde s'effectue ensuite dans le maillage généré. Elle interagit avec les défauts insérés par suppression de nœuds du maillage. Enfin, les échos sont obtenus en enregistrant les déplacements aux niveaux de tous les nœuds correspondant aux éléments de la sonde. Le signal $\{i, j\}$ finalement stocké dans la FMC est alors la moyenne des déplacements des nœuds situés au niveau du récepteur j . Les paramètres de simulation choisis sont résumés au tableau 2.1.

Tableau 2.1 Résumé des paramètres de la simulation POGO en incidence normale

Type de paramètre	Paramètre utilisé
Forme du maillage	Plaque 2D
Dimensions du maillage	80mm×80mm
Type de défaut	Défaut circulaire de diamètre 1 mm
Type d'élément	Quadrilatère CPE4R
Fréquence du signal émis	5MHz
Type de signal émis	Sinus 3 cycles pondéré par fenêtre de Hann
Taille d'élément piézoélectrique	0.75mm
Élévation	12mm
Pitch	0.8mm
Nombre d'éléments	32
Module de Young matériau	$206 \cdot 10^9$ Pa
Coefficient de Poisson matériau	0.29
Masse volumique matériau	7850 kg/m^3
Taille des éléments	$dx = \frac{\lambda_{T,acier}}{15} = 4.2 \cdot 10^{-5} m$
Pas de temps de simulation	$dt = 0.8 \times \frac{dx}{V_{L,acier}} = 5.6 \cdot 10^{-9} s$
Pas de temps d'échantillonnage	$5dt$

On choisit des éléments CPE4R qui se basent sur une approximation de déformation plane, qui est généralement utilisée pour modéliser des structures infinies dans la direction perpendiculaire au plan de déformation. On utilise un défaut circulaire de diamètre 1mm pour s'approcher d'un réflecteur ponctuel mais en conservant un diamètre environ égal à $\lambda_{L,acier}$. On a une fréquence d'échantillonnage d'environ 36MHz, ce qui respecte largement le critère de Shannon. Ces simulations POGO sont réalisées sur un serveur doté de deux cartes graphiques NVIDIA Quadro P6000.

On utilise tout au long de ce mémoire l'outil de visualisation PogoPro pour étudier la cohérence des résultats. Il permet d'afficher la propagation des ondes ultrasonores à un nombre choisi d'incrémentes de temps. L'émission avec l'élément 1, dans la configuration décrite dans cette section, simulée sur POGO est montrée en figure 2.2. On y observe une onde transverse environ deux fois moins rapide que l'onde longitudinale, ce qui est cohérent. Cette onde transverse ne devrait cependant pas être observée dans la réalité d'une émission avec sonde longitudinale en incidence normale (donc pas de conversion de mode) mais il est difficile de l'éviter sur POGO. En effet, tous les nœuds étant connectés, un déplacement complètement vertical est compliqué à obtenir sans aucun déplacement horizontal. On peut aussi constater grâce à cet outil que les ondes sont bien absorbées sur la droite et la gauche du modèle grâce aux frontières absorbantes.

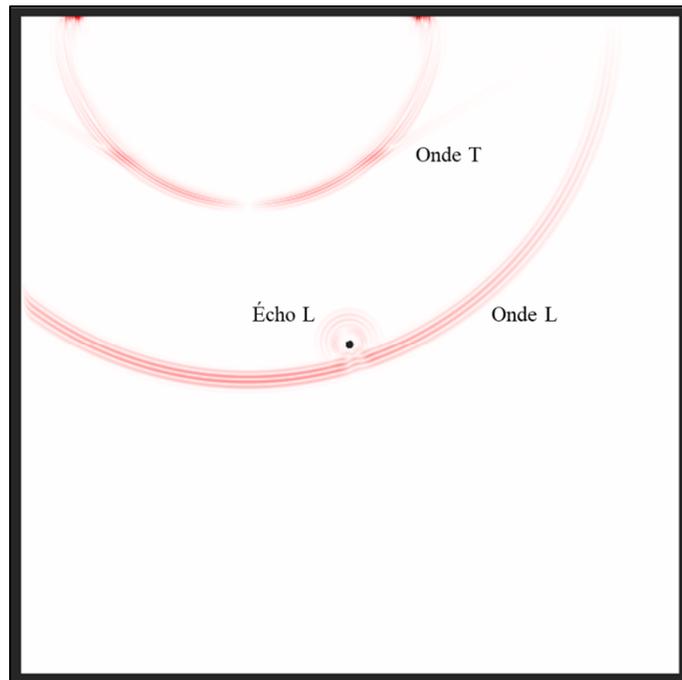


Figure 2.2 Émission avec l'élément 1, en incidence normale, simulée sur POGO et visualisée sur PogoPro

On effectue une comparaison de l'écho longitudinal (reçu par l'élément 16) du signal focalisé obtenu par sommation de signaux de la FMC simulée sur POGO et de la FMC analytique (calculée sur Matlab). Une superposition de ces échos est faite en figure 2.3. On obtient une bonne correspondance entre les signaux : les temps d'arrivée sont identiques, les formes de signaux sont très semblables. On remarque que quand le défaut est décalé de 10 et 20mm, les signaux POGO ont de légères perturbations après l'écho L, mais leur amplitude est environ 10 fois inférieure à celle de l'écho donc leur influence sera faible en imagerie. Du point de vue de l'analyse fréquentielle, les signaux sont bien centrés autour de 5MHz mais on constate également un spectre fréquentiel des signaux POGO moins régulier quand le défaut est décalé de 10 et 20mm. Cela peut être dû au fait que les éléments rectangulaires CPE4R modélisent moins bien une onde qui les traverse de manière oblique en comparaison avec une traversée perpendiculaire. Par ailleurs, le temps pour réaliser les 32 simulations avec POGO n'est que de 5 minutes. C'est bien plus long que le calcul analytique qui dure environ 5 secondes, mais cela reste très performant pour une simulation par éléments finis avec des éléments si fins. Ce

faible temps de calcul de POGO pourrait rendre plus attractives les solutions par éléments finis pour simuler des résultats d'imagerie multi-éléments en comparaison avec des logiciels basés sur CPU bien moins rapides.

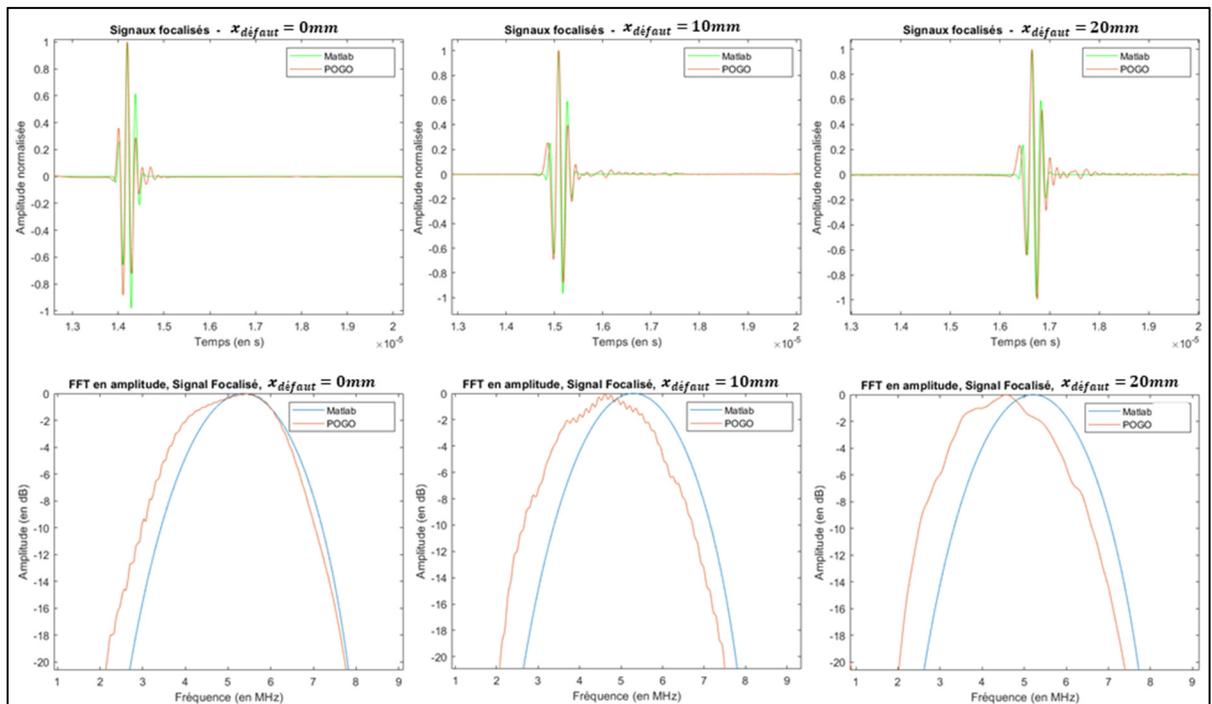


Figure 2.3 Évolution de l'écho L avec la distance du réflecteur à l'axe de la sonde, simulation analytique et par éléments finis

Les signaux de la FMC simulée sur POGO dans cette configuration d'une inspection multi-éléments en incidence normale correspondent très bien à ce que prévoit la théorie, même lorsqu'ils sont sommés de manière à former synthétiquement une onde focalisée, ce qui se rapproche de la sommation utilisée pour produire une image TFM. On peut donc continuer à utiliser le logiciel de calculs par éléments finis POGO dans ce mémoire pour développer la simulation dans des cas plus complexes, comme des simulations ultrasonores avec deux milieux de propagation.

2.3 Mise au point de la simulation hybride

Dans cette section, on se propose d'adapter pour des inspections complexes la simulation par éléments finis précédemment choisie et validée. Le but est de pouvoir simuler des inspections avec un sabot en plastique ou en immersion. Ces configurations impliquent deux milieux de propagation, ce qui rend la simulation plus difficile à mettre en œuvre. Il n'est notamment pas possible pour le moment de combiner les éléments acoustiques de POGO utilisés pour simuler le comportement des ultrasons dans l'eau et les éléments solides. Cela peut être réalisé en modélisant l'eau avec des éléments solides dont on choisit judicieusement les paramètres, mais il reste que la longueur d'onde du mode ultrasonore longitudinal dans l'eau est environ quatre fois inférieure à celle dans l'acier ou l'aluminium. Ainsi, comme expliqué en section 1.4.1, la taille des éléments dx dans l'eau doit ainsi être 4 fois inférieure à celle dans l'acier, ce qui accroît énormément le temps de calcul dans ce milieu. Or, il n'est pas intéressant de consacrer un temps de simulation conséquent à la propagation dans un milieu sans défaut ni variation de surface dont on connaît très bien le comportement analytiquement.

2.3.1 Fonctionnement

On met alors en place la simulation hybride : la propagation des ultrasons est calculée de manière analytique dans le milieu 1, qui peut être un sabot ou l'eau tandis qu'une simulation par éléments finis est faite dans le milieu 2, qui est la pièce à contrôler. On explique ici son fonctionnement et on l'illustre en figure 2.4. Il s'appuie sur (Wilcox et al., 2020).

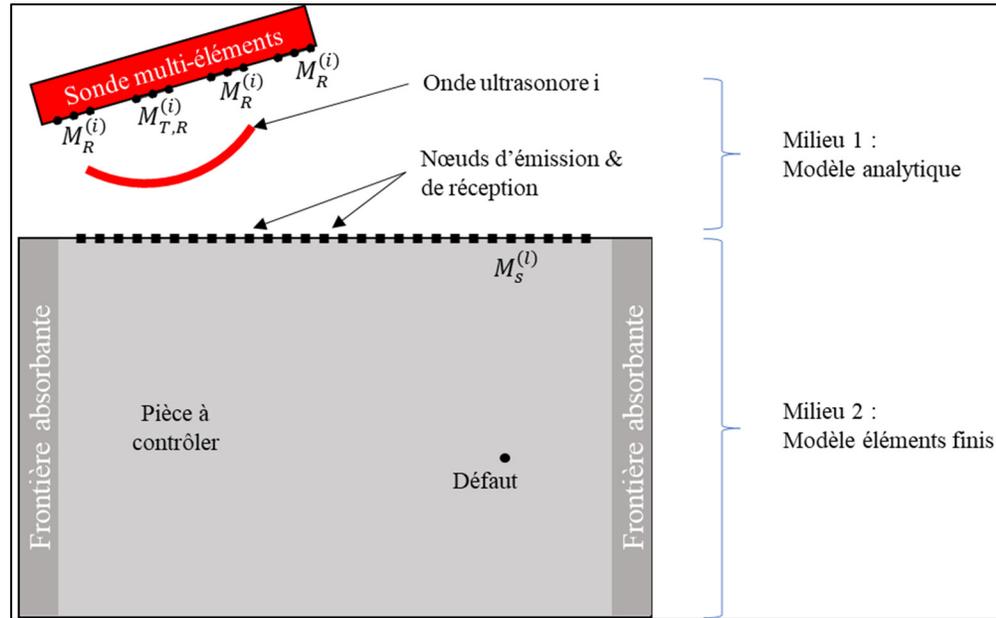


Figure 2.4 Schéma de fonctionnement de la simulation hybride

Comme précédemment, on réalise une simulation pour chaque élément piézoélectrique émetteur T, en recevant à chaque fois sur tous les éléments, pour modéliser une acquisition de la FMC. Premièrement, on discrétise les émetteurs de la sonde en plusieurs points $M_T^{(i)}$ pour prendre en compte leur directivité, ces points émettent le signal d'émission simultanément. Ensuite on calcule le champ de pression produit par cette émission d'onde au niveau des nœuds à l'interface entre le milieu 1 et le milieu 2, de coordonnées $M_s^{(l)}$. Ce champ de pression peut s'exprimer comme suit :

$$P_T(M_s, t) = \sum_{i=1}^n \frac{s\left(t - \left|M_T^{(i)} - M_s^{(l)}\right|/V_{L,milieu\ 1}\right)}{\sqrt{\left|M_T^{(i)} - M_s^{(l)}\right|}} \quad (2.3)$$

Où on note s le signal émis. Cette équation symbolise le déplacement du signal ultrasonore de la sonde jusqu'à l'interface, en prenant en compte l'étalement du faisceau. On exécute ensuite une simulation par éléments finis POGO où des signaux émanent de tous les nœuds de surface. Leur norme est égale à la pression calculée ci-dessus pour chacun de ces nœuds, et leur

direction est normale à la surface. La simulation POGO peut ensuite se dérouler comme dans la section précédente. Cependant, ici, on enregistre les déplacements de tous les nœuds à l'interface selon sa normale. Ils sont ensuite déplacés analytiquement et sommés au niveau des récepteurs R. Les signaux reçus s'expriment alors :

$$u_{TR}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m \frac{u^T(M_S^{(l)}, t - |M_R^{(i)} - M_S^{(l)}|/V_{L,milieu 1})}{\sqrt{|M_R^{(i)} - M_S^{(l)}|}} \quad (2.4)$$

Où u^T est le déplacement normal à l'interface et m est le nombre de nœuds à cette interface.

2.3.2 Temps de calcul

On relève la durée nécessaire pour obtenir une FMC simulée dans la configuration décrite dans la section suivante en utilisant la simulation hybride. Cette durée est de 20 minutes. La presque totalité est consacrée aux 64 simulations par éléments finis (sonde 64 éléments), les calculs analytiques ne prenant toujours que quelques secondes. Cela reste convenable pour produire un tel nombre de simulations dotées de la grande personnalisation que permettent les éléments finis. Ce délai reste utilisable dans un contexte de programmation de contrôles non destructifs industriels sur jumeaux digitaux et peut encore être réduit en utilisant des cartes graphiques plus puissantes que les deux NVIDIA Quadro P6000 utilisées ici.

2.4 Évaluation de la simulation hybride sur une inspection avec sabot

Les inspections ultrasonores avec sabots en plastique sont courantes en contrôle non destructif. Ils sont généralement utilisés pour incliner la sonde par rapport à la surface de la pièce et ainsi envoyer les ultrasons vers une zone qui peut être non accessible en incidence normale. Cet angle peut également être utilisé pour profiter de la conversion de mode et par exemple générer des ondes ultrasonores transverses (T) dans la pièce à partir d'ondes longitudinales dans le sabot. Ces ondes T, qui, dans l'acier ou l'aluminium, ont une longueur d'onde environ deux fois inférieure aux ondes L peuvent être utiles pour détecter des défauts de petites tailles.

Il peut donc être intéressant de valider la simulation hybride sur cette technique d'inspection ultrasonore à deux milieux de propagation dont les résultats expérimentaux sont bien connus et facilement obtenables.

2.4.1 Configuration d'inspection

On utilise une sonde longitudinale constituée de 64 éléments piézoélectriques de fréquences centrales 5MHZ. Cette sonde est montée sur un sabot en Rexolite avec une inclinaison de 20° et une hauteur du premier élément de 30mm. Ce sabot vient sur un bloc de calibration à surface plane en acier composé de trous percés latéralement (SDH pour Side-Drilled Hole) de diamètre 1.2mm. Son inspection peut être modélisée en 2D dans le plan de la sonde. On utilise la même configuration expérimentalement et en simulation, celle-ci est détaillée en figure 2.5. La seule différence est qu'expérimentalement, la pièce est plus longue et peut donc être considérée comme infinie selon l'axe \vec{X} en simulation. On note qu'avec la simulation hybride, les réflexions sur le côté du sabot ne sont pas prises en compte comme l'a montré la figure 2.4.

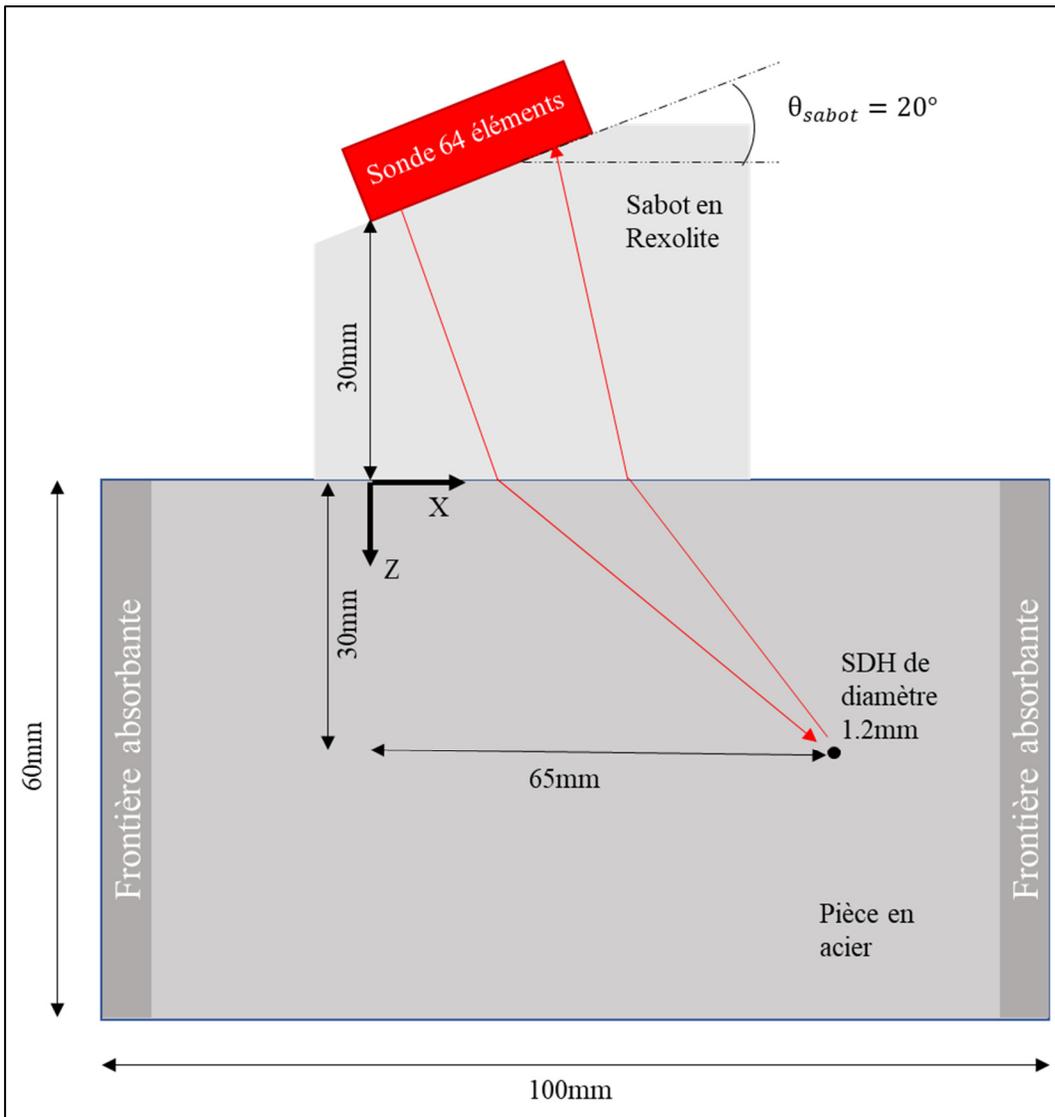


Figure 2.5 Configuration d'inspection et de simulation avec sabot en Rexolite incliné à 20°

Pour l'expérimental, on utilise une console d'acquisition Verasonic Vantage 64 LE, une sonde ultrasonore Olympus 64 éléments 5L64-A32 de 0.5mm de pitch, monté sur le sabot Olympus SA32-N60L-IHC. On fait l'acquisition de la FMC. Une photographie du dispositif est présentée en figure 2.6.

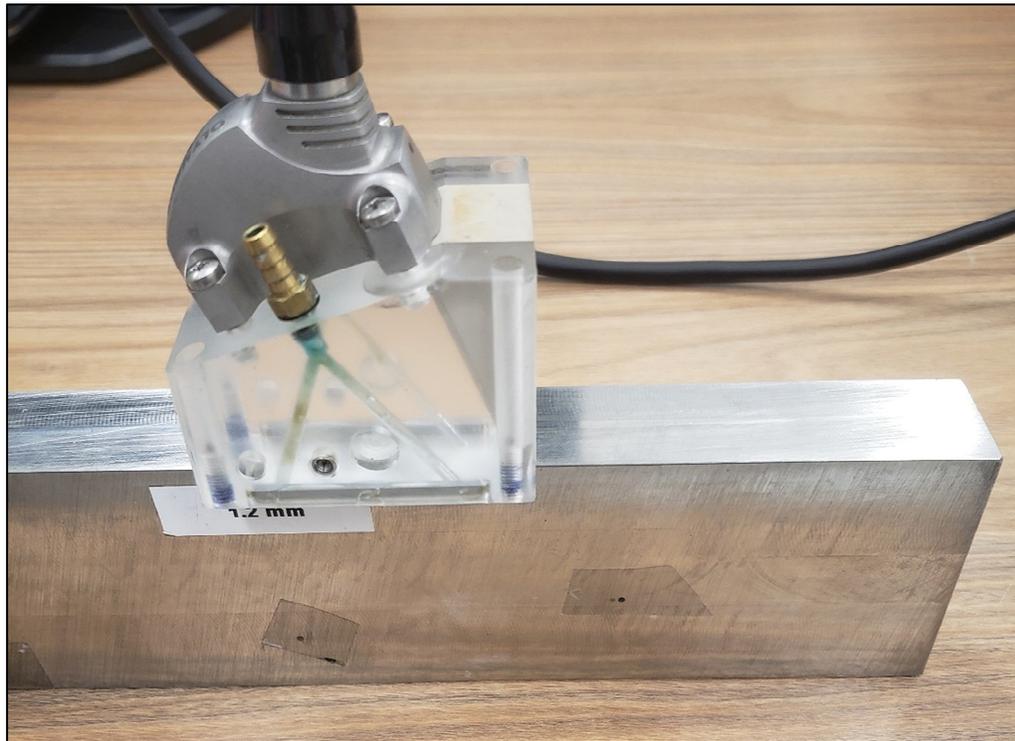


Figure 2.6 Photographie du dispositif expérimental d'inspection avec sabot en Rexolite incliné à 20°

Du point de vue de la simulation, les paramètres utilisés sont très similaires à ceux utilisés en section 2.2, on y ajoute les paramètres utilisés pour la partie analytique du modèle et on résume le tout dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Résumé des paramètres de la simulation hybride avec sabot incliné et pièce à contrôler de surface plane en acier

Type de paramètre	Paramètre utilisé
Forme du maillage	Plaque 2D
Dimensions du maillage	100mm×60mm
Type de défaut	Défaut circulaire de diamètre 1.2 mm
Type d'élément	Quadrilatère CPE4R
Fréquence du signal émis	5MHz
Type de signal émis	Sinus 3 cycles pondéré par fenêtre de Hann

Tableau 2.2 Résumé des paramètres de la simulation hybride avec sabot incliné et pièce à contrôler de surface plane en acier (suite)

Type de paramètre	Paramètre utilisé
Taille d'élément piézoélectrique	0.42mm
Élévation	10mm
Pitch	0.5mm
Nombre d'éléments	64
Module de Young matériau	$206 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
Coefficient de Poisson matériau	0.29
Masse volumique matériau	7850 kg/m^3
Taille des éléments	$dx = \frac{\lambda_{T,acier}}{15} = 4.2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$
Pas de temps de simulation	$dt = 0.8 * \frac{dx}{V_{L,acier}} = 5.6 \cdot 10^{-9} \text{ s}$
Pas de temps d'échantillonnage	$5dt$
Nombre de points utilisés pour discrétiser les éléments	5
Vitesse des ondes longitudinales dans le sabot	2330 m/s

2.4.2 Comparaison entre les images simulées et expérimentales

On utilise les FMC simulées et expérimentales obtenues dans la section précédente dans un code d'imagerie TFM à deux milieux. Ce code calcule les temps de vol jusque chaque pixel du bloc de calibration en trouvant les points de la surface par lesquels passent les rayons ultrasonores. Ces points sont trouvés grâce à la résolution d'une équation polynomiale d'ordre quatre, qui est une modélisation valide pour les surfaces planes (Schmerr, 2016). On obtient alors les images ultrasonores présentées en figure 2.7.

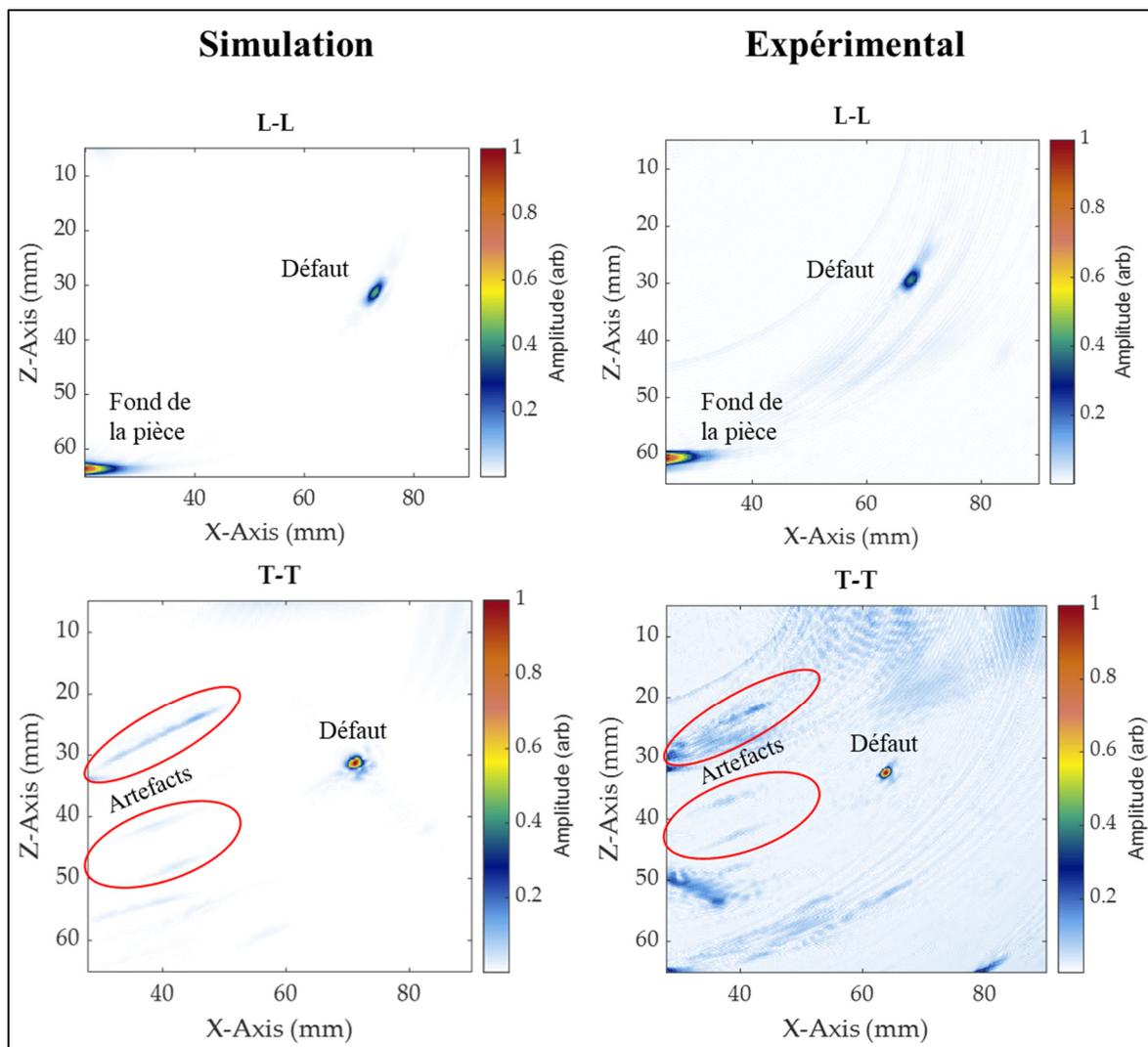


Figure 2.7 Images TFM simulées et expérimentales d'un trou percé latéralement inspecté avec une sonde ultrasonore 64 éléments, à 5MHz, montée sur un sabot en Rexolite d'inclinaison 20°

On obtient une très bonne correspondance entre images TFM simulées et expérimentales que ce soit pour le mode direct L-L où l'on considère les ondes longitudinales transmises vers le défaut puis réfléchies par celui-ci ou pour le mode direct T-T, où l'on considère les ondes transverses provenant de la conversion des ondes longitudinales à l'interface. Ces ondes transverses sont ensuite réfléchies par le défaut puis à nouveau converties en ondes L lorsqu'elles repassent par l'interface sabot-pièce. Dans les deux modes d'imagerie, on obtient des formes de défauts très similaires entre images expérimentales et simulées. La simulation

hybride modélise donc bien la conversion de mode à l'interface. En mode L-L, une partie des ondes ultrasonores émises passe l'interface en incidence normale, est réfléchi sur le fond de la pièce puis revient à la sonde selon le même chemin. Le fond de la pièce est bien visible sur les images en mode L-L. Au contraire, les ondes T ne sont pas transmises lorsque l'incidence est normale. Les ondes T sont ici réfléchies sur le fond de la pièce avec un angle et ne reviennent pas vers la sonde, ce qui explique que l'on ne voit pas le fond de la pièce en mode T-T. On note également que la simulation hybride permet de voir une partie des artefacts : on en retrouve au même endroit en simulation et en expérimental en mode T-T. Il reste quelques détails présents sur les images expérimentales et non sur images simulées, cela est notamment dû au fait que la simulation ne prend pas en compte les réflexions à l'interface du sabot et ne modélise pas le bruit de mesure.

2.5 Évaluation de la simulation hybride sur une inspection en immersion, avec interface courbe

La simulation hybride appliquée à une inspection à deux matériaux de propagation séparés par une surface plane a fourni de bons résultats en section précédente. On se propose ainsi de complexifier l'inspection en y ajoutant une surface courbe pour évaluer à nouveau les résultats de la simulation hybride et se rapprocher de l'objectif de ce mémoire qui est d'inspecter des pièces complexes.

2.5.1 Configuration d'inspection

On utilise la configuration d'inspection utilisée dans (Mansur Rodrigues Filho & Bélanger, 2021). On pourra donc comparer les images obtenues grâce aux simulations hybrides dans cette section avec les résultats expérimentaux de cette référence. La pièce à contrôler est en aluminium. Elle présente une surface concave sinusoïdale d'amplitude 6.5mm ($5\lambda_{L,Alu}$) et contient un trou percé latéralement à 40 mm de profondeur. On la place en immersion et on vient l'inspecter en utilisant différents éloignements h entre la sonde et la pièce. Cette configuration est présentée en figure 2.8.

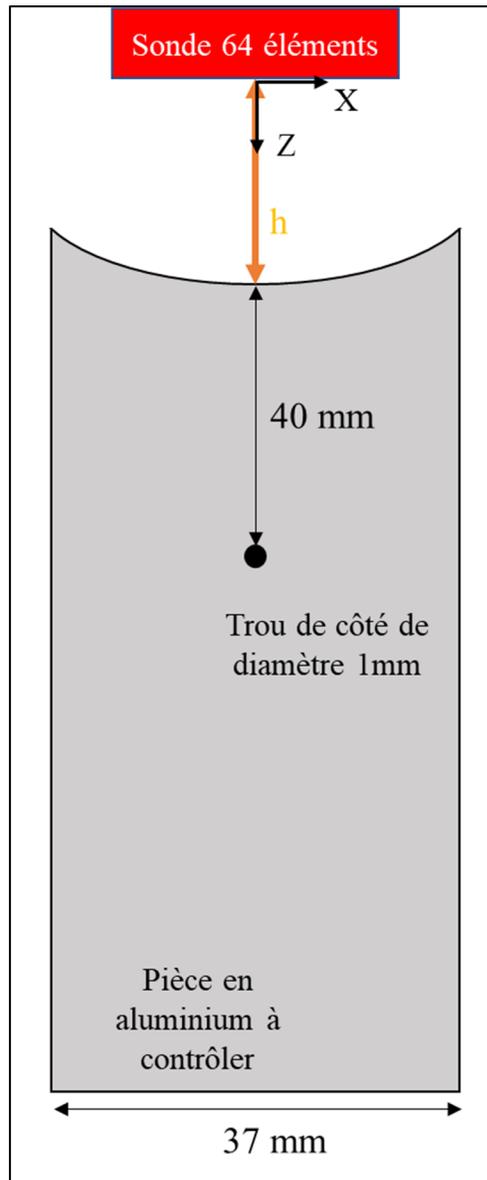


Figure 2.8 Configuration d'inspection utilisée pour la simulation hybride avec surface courbe

Dans la simulation hybride, un maillage rectangulaire est utilisé, et les nœuds de surface sont sélectionnés à l'intérieur du maillage. Une frontière absorbante est présente sur le dessus du maillage pour éviter les réflexions de l'excitation des nœuds de surface. Au niveau des paramètres de simulation, seules les caractéristiques des matériaux et de la sonde changent légèrement par rapport à ceux du tableau 2.2. Ils sont présentés dans le tableau 2.3 ci-dessous.

Tableau 2.3 Résumé des paramètres de la simulation hybride sur pièce en aluminium en immersion avec surface concave

Type de paramètre	Paramètre utilisé
Forme du maillage	Plaque 2D
Dimensions du maillage	45mm×70mm
Type de défaut	Défaut circulaire de diamètre 1 mm
Type d'élément	Quadrilatère CPE4R
Fréquence du signal émis	5MHz
Type de signal émis	Sinus 3 cycles pondéré par une fenêtre de Hann
Élévation	10mm
Pitch	0.6mm
Nombre d'éléments	64
Module de Young matériau	$69 \cdot 10^9$ Pa
Coefficient de Poisson matériau	0.33
Masse volumique matériau	2770 kg/m^3
Taille des éléments	$dx = \frac{\lambda_{T,alu}}{15} = 4.08 \cdot 10^{-5} m$
Pas de temps de simulation	$dt = 0.8 * \frac{dx}{V_{L,alu}} = 5.37 \cdot 10^{-9} s$
Pas de temps d'échantillonnage	$5dt$
Nombre de points utilisés pour discrétiser les éléments	5
Vitesse des ondes longitudinales dans l'eau	1480 m/s

2.5.2 Comparaison entre les images simulées et expérimentales

On effectue des simulations hybrides pour obtenir des FMC à différentes valeurs d'éloignement entre la sonde et la surface concave. On utilise ensuite un code d'imagerie TFM

où maintenant on discrétise la surface concave puis on cherche le point de passage des rayons ultrasonores sur celle-ci en utilisant le principe de temps de parcours minimal de Fermat. À partir des FMC simulées, on produit des images TFM centrées autour du défaut de manière à ce qu'elles soient comparables aux images expérimentales obtenues dans littérature et présentées en section 1.3.2 (figure 1.10, ligne Cc5). On présente les images simulées et expérimentales en figure 2.9.

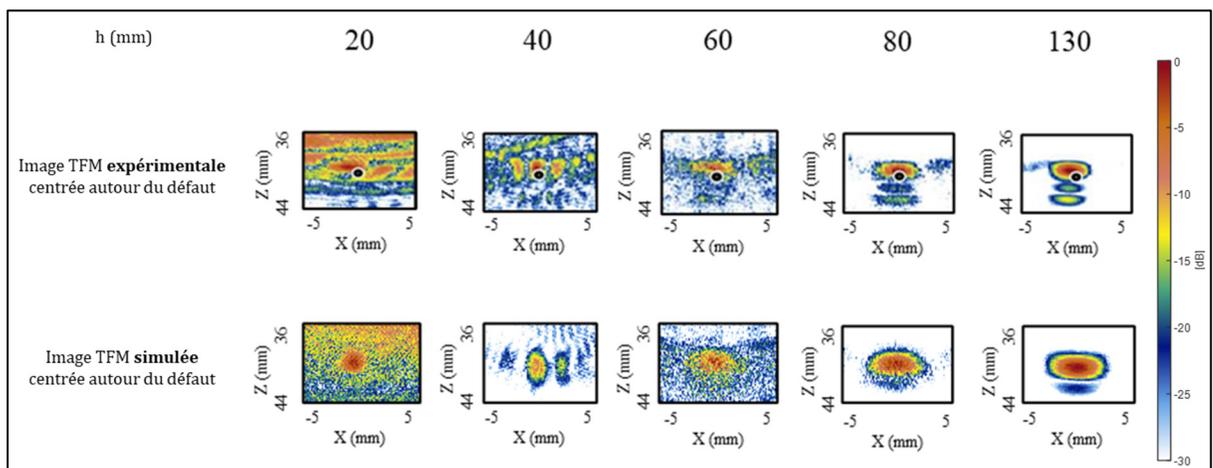


Figure 2.9 Évolution de l'image TFM d'un trou percé latéralement sur une pièce à surface concave en fonction de l'éloignement sonde-pièce (a) Images expérimentales tirées de Mansur Rodrigues Filho & Bélanger (2021) (b) Images simulées

Bien que les images simulées soient quelque peu différentes des images expérimentales, elles contiennent les mêmes éléments et leur évolution avec h est la même que dans les résultats expérimentaux : l'image est inexploitable pour $h = 20\text{mm}$, pour $h = 40\text{mm}$ un artefact longiligne apparaît en haut de l'image et deux lobes secondaires sont présents de part et d'autre du défaut. Pour $h = 60\text{mm}$, le défaut est visible mais se mélange à des artefacts. Finalement pour pour $h = 80\text{mm}$ et pour $h = 130\text{mm}$, les défauts sont mieux discernables, ils ont une forme plus allongée que le défaut réel qui est un cercle que ce soit en expérimental ou ici en simulation et sont au-dessus d'un artefact. La simulation hybride peut ainsi permettre de prévoir l'évolution de la qualité d'imagerie TFM sur une pièce complexe en fonction de la position de la sonde.

2.6 Mise au point de la simulation hybride avec matrice de diffusion

Les sections précédentes ont montré une bonne corrélation entre les résultats de la simulation hybride et l'expérimental en deux dimensions. Il peut alors être intéressant d'élargir cette méthode de simulation dans un environnement 3D. En effet, lors de l'inspection de pièces avec des courbures complexes, les rayons ultrasonores ne sont pas compris dans un plan, il est donc bénéfique de prendre en compte leur trajectoire réelle grâce à une simulation 3D. Cependant, dans la simulation hybride préalablement présenté, les excitations imposées aux nœuds de surface pour réaliser la simulation par éléments finis dépendent de la position de la sonde. Ainsi, dès lors que l'on veut simuler des résultats avec une nouvelle position de sonde avec N éléments, on doit refaire N simulations par éléments finis. Si leur durée totale est de l'ordre de 10 minutes, cela reste acceptable mais en 3D, sur un pavé droit de seulement $10\text{mm}\times 20\text{mm}\times 20\text{mm}$, 64 simulations durent environ 10 heures, ce qui signifie qu'il faudrait 10 heures pour chaque position à simuler. Cela n'est plus viable.

On met alors en place la méthode de la simulation hybride avec matrice de diffusion. D'abord en 2D, puis en 3D. Elle consiste à enregistrer la réponse du défaut à des ondes ultrasonores émises alternativement à différents angles d'incidence dans des simulations par éléments finis. Ensuite, il reste uniquement à exécuter la partie analytique de la simulation pour aboutir à la FMC simulée. Ainsi, calculer une nouvelle FMC pour une nouvelle position de sonde ne demande plus que quelques secondes.

2.6.1 En 2D

On commence par implémenter la simulation hybride avec matrice de diffusion en 2D. Cela permettra de comparer ses résultats avec ceux précédemment obtenus avec la simulation hybride et l'expérimental.

On s'inspire de la méthode présentée en revue de littérature (Wilcox, & Velichko, 2009), mais ici, au lieu de simuler dans le domaine fréquentiel, nous resterons dans le domaine temporel pour être au plus proche des signaux réellement acquis. Un schéma de la géométrie de

simulation utilisée est présentée en figure 2.10. On réalise ces simulations à un nombre définis d'angles θ_{inc} équitablement répartis tout autour du défaut (ou seulement sur une partie si l'on peut exploiter des symétries). Elles seront modélisées dans l'acier, avec une fréquence d'onde incidente de 5MHz. On utilise les nœuds situés sur un arc de cercle de 10 mm de rayon (environ $10 \lambda_{L,acier}$ à 5MHz) pour l'émission et la réception des ondes. Ce rayon est choisi pour que le défaut ne soit pas situé dans le champ proche des nœuds émetteurs utilisés. En effet, un point est considéré dans le champ lointain d'une source d'ultrasons lorsqu'il est situé à une distance de l'émetteur grande devant la longueur d'onde utilisée (Shull, 2002) (cette distance sera d'environ $9\lambda_L$ ici). Le choix de ce rayon permet aussi de s'assurer que l'émission est finie quand les premiers échos y reviennent. Pour la réception, on utilise tous les nœuds sur le cercle de rayon 10mm, et pour l'émission, on sélectionne tous ceux situés à un angle inférieur à $\beta/2$ par rapport au nœud d'angle θ_{inc} . Ces nœuds vont émettre alternativement, selon une loi de délai pour envoyer une onde plane vers le défaut, situé au centre du modèle. Cela modélise une onde émise par un élément piézoélectrique de la sonde qui peut être considérée comme plane au niveau du défaut car la distance de propagation jusqu'à ce dernier est grande devant la longueur d'onde λ_L à 5MHz (supérieure à $10 \lambda_L$).

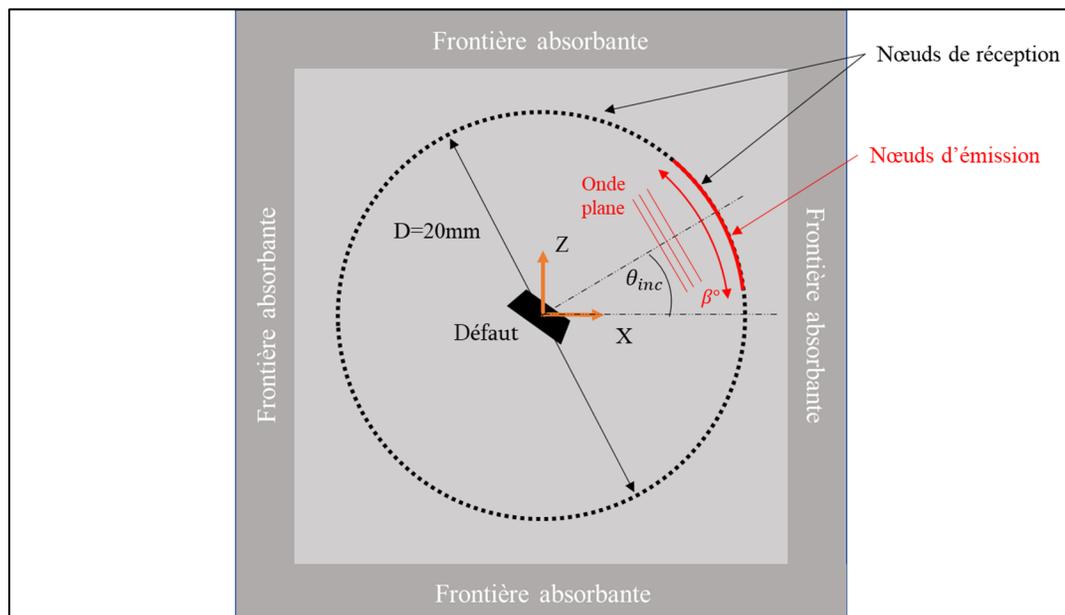


Figure 2.10 Schéma de fonctionnement de la simulation de la matrice de diffusion d'un défaut – Exemple pour une émission à un angle d'incidence θ_{inc}

Grâce à cette simulation de la matrice de diffusion, nous enregistrons les traces temporelles de la réponse du défaut $D(\theta_1, \theta_2)$ à un angle θ_2 pour une émission à un angle θ_1 où θ_1 et θ_2 varient entre 0 et 360°. On peut alors ensuite calculer la FMC par calculs analytiques de tracés de rayons ultrasonores. Cela permettra de calculer les temps de vol depuis les éléments de la sonde jusqu'au défaut. Ainsi, on peut produire le signal $\{i,j\}$, reçu par l'élément j après une émission par l'élément i qui est un signal nul jusqu'au temps de vol, puis la réponse du défaut, préalablement enregistrée. Un exemple de tracé de rayon, qui correspond à la partie analytique de la simulation est montré figure 2.11.

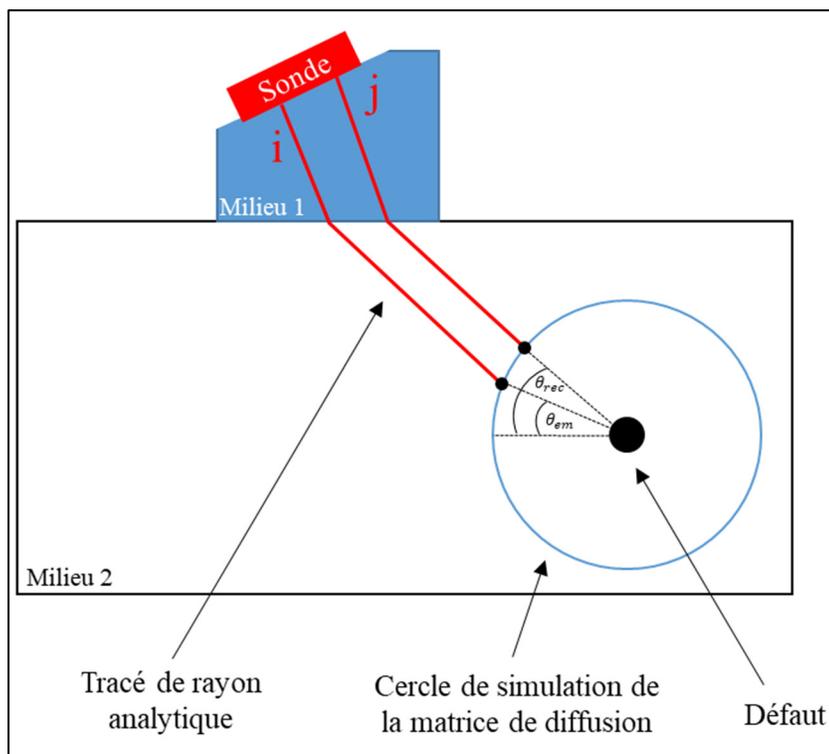


Figure 2.11 Schéma de simulation d'une FMC par propagation analytique et avec la matrice de diffusion

2.6.2 En 3D

En 3D, on reproduit la même démarche qu'en 2D pour la simulation de la matrice de diffusion. Maintenant les nœuds d'émission et de réception seront situés sur une sphère de diamètre 20mm. On utilise alors les coordonnées sphériques, et le centre de l'arc d'émission sera maintenant repéré par deux angles, θ_{az} et θ_{el} . On émet toujours une onde plane dirigée vers le défaut au centre de la sphère. Les simulations seront faites à 2MHz pour éviter un temps de calcul trop élevé. En contrepartie, on s'éloignera des conditions permettant de considérer les ondes émises comme planes et le défaut situé dans leur champ lointain. En effet, la distance entre l'émission et le défaut ne sera plus que d'environ $3,5 \lambda_{L,acier}$.

De même, la démarche de calculs analytiques de la FMC à partir de la matrice de diffusion 3D utilise une méthode de tracé de rayon en 3D qui est une adaptation directe de celle présentée en section précédente.

2.6.3 Temps de calcul

Le temps de calcul nécessaire pour aboutir à une FMC simulée avec la méthode hybride avec matrice de diffusion se sépare en deux parties. Tout d'abord, il faut réaliser la simulation par éléments finis de diffusion du défaut dans un matériau donné, à une fréquence donnée. Mais elle ne doit être effectuée qu'une fois. Ensuite, ce défaut peut être placé dans toute situation d'inspection, avec n'importe quelle position de sonde car les calculs hors de la zone du défaut sont faits analytiquement et ne nécessitent donc que quelques secondes.

La durée d'obtention de la matrice de diffusion en 2D, avec un cercle de simulation de diamètre 20mm est de seulement 20 minutes pour 30 angles d'incidence (donc 30 simulations), dans l'acier à 5MHz. En 3D, avec une sphère de simulation de diamètre 20mm et pour 10 angles d'incidence, cette durée est d'environ 2h30 dans l'acier à 2MHz. Une fois que ces données sont enregistrées, on peut tester de nombreuses configurations d'inspection avec pour chacune seulement quelques secondes de calcul pour aboutir à la FMC simulée car le reste de la modélisation est analytique.

2.7 Évaluation de la simulation hybride avec matrice de diffusion sur une inspection avec sabot

On se propose de valider les résultats de la simulation de FMC avec matrice de diffusion en 2D et en 3D, dans le cas d'une inspection avec sabot en Rexolite déjà utilisée dans la section 2.4. Ainsi, ces résultats pourront être comparés avec ceux de la simulation hybride précédente.

2.7.1 En 2D

Premièrement, on s'intéresse à une inspection ultrasonore multi-éléments avec sabot incliné en Rexolite. La sonde et la configuration utilisées sont identiques à celles en section 2.4.1. On effectue la simulation par éléments finis de la matrice de diffusion d'un trou percé latéralement de diamètre 1.2mm. On utilise 30 angles d'émission équitablement répartis sur un quart de sphère (on exploite les symétries du trou circulaire). Cette simulation de défaut a donc une résolution angulaire de 3°. On effectue également une simulation de matrice de diffusion pour le fond de la pièce, que l'on modélise par une fin rectangle de 10mm de longueur, en utilisant 60 angles d'émission répartis sur un demi-cercle. On calcule ensuite analytiquement la FMC contenant la somme des échos longitudinaux du trou percé latéralement et du fond de la pièce. Enfin on réalise une image TFM à partir de ces données, on la présente en figure 2.12.

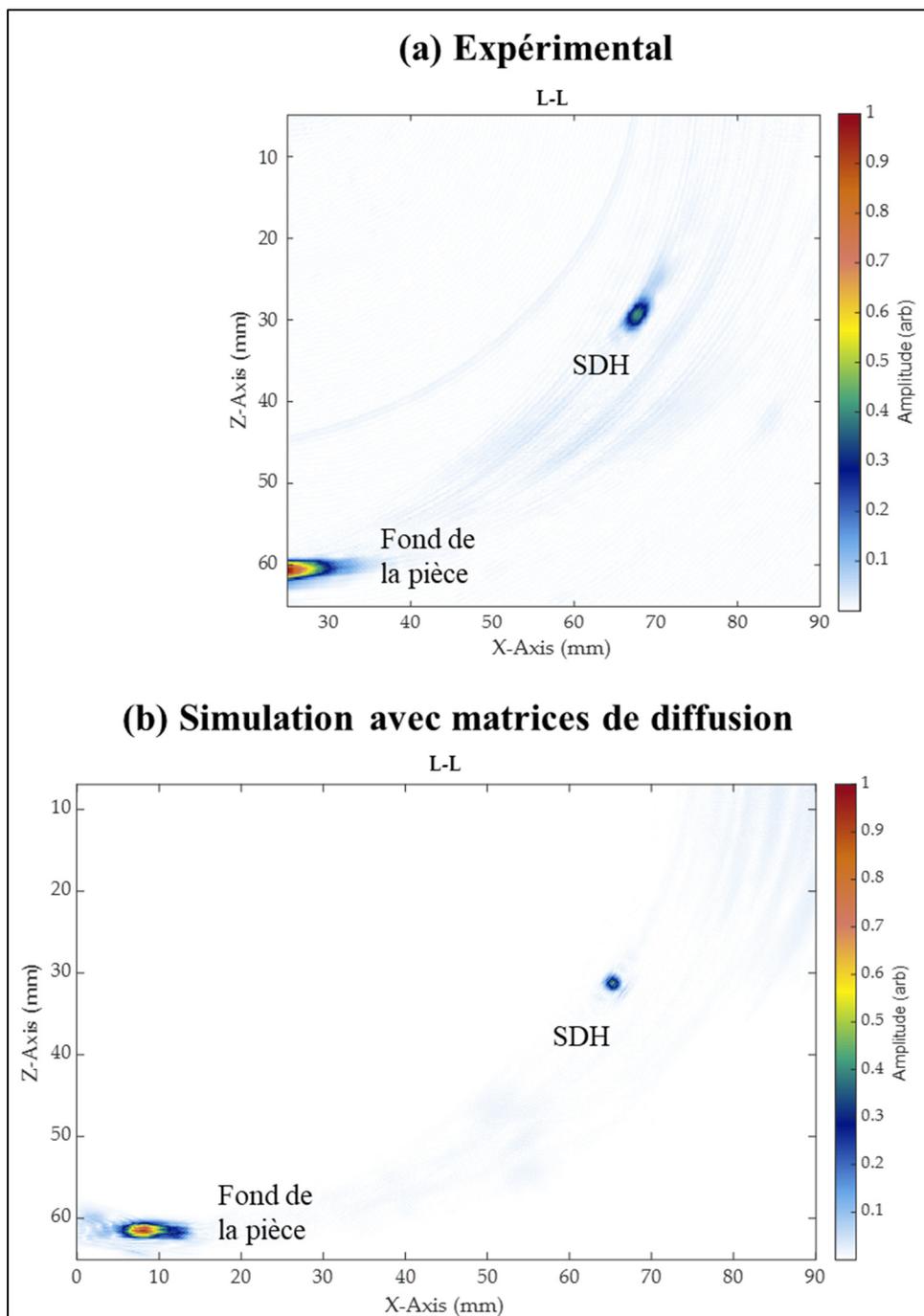


Figure 2.12 Images TFM d'un trou percé latéralement inspecté avec une sonde ultrasonore 64 éléments, à 5MHz, montée sur un sabot en Rexolite d'inclinaison 20° (a) Image expérimentale (b) Image simulée avec matrices de diffusion 2D

Les résultats avec la simulation hybride présentée précédemment dans ce chapitre et ceux utilisant la matrice de diffusion sont très similaires : la forme du trou percé latéralement, son emplacement et le ratio d'amplitude relative entre le fond de la pièce et le défaut sont très proches. Cependant, l'image du fond de la pièce est plus fine qu'en expérimental mais cela est dû au fait qu'on le modélise par un fin trou de 10mm de longueur et non par un milieu considéré comme infini en comparaison avec les autres dimensions de l'inspection. Il serait intéressant d'intégrer la réflexion sur le fond de la pièce au modèle analytique. En effet, cette réflexion spéculaire est facilement prévisible et cela permettrait de prendre en compte la grandeur réelle de la pièce.

2.7.2 En 3D

On utilise toujours la même configuration d'inspection avec bloc d'acier et sabot en Rexolite incliné présentée en section 2.4.1, à deux différences près. Premièrement le défaut considéré sera une porosité, modélisée par un trou sphérique. Le patron de diffusion d'un trou sphérique est légèrement différent de celui d'un cylindre infini (Cheeke, 2012). On s'intéresse aux porosités car elles sont souvent utilisées dans les pièces de calibration sans plan de symétrie qui nécessitent donc un environnement de simulation 3D. De plus, elles seront étudiées dans le chapitre final de ce mémoire. Deuxièmement, les matrices de diffusion seront simulées à 2MHz pour éviter une taille de modèle trop importante. Pour rester supérieur à la longueur d'onde longitudinale dans l'acier, le diamètre de la sphère sera de 3mm. On garde une résolution angulaire d'environ 3° dans le plan de l'image. Hors de ce plan on choisit une résolution angulaire de 5° . Comme précédemment, on se sert des matrices de diffusion de la porosité et du fond de la pièce (ici représenté par un trou en forme de fin pavé droit de $10\text{mm}\times 10\text{mm}\times 2\text{mm}$) pour ensuite calculer analytiquement la FMC qui contiendra leurs échos simulés. Finalement, on choisit de produire une image TFM en 2D à partir de ces données car c'est la modalité qui prédomine actuellement dans l'industrie pour des raisons de temps d'exécution. Le résultat est montré en figure 2.13 ci-dessous.

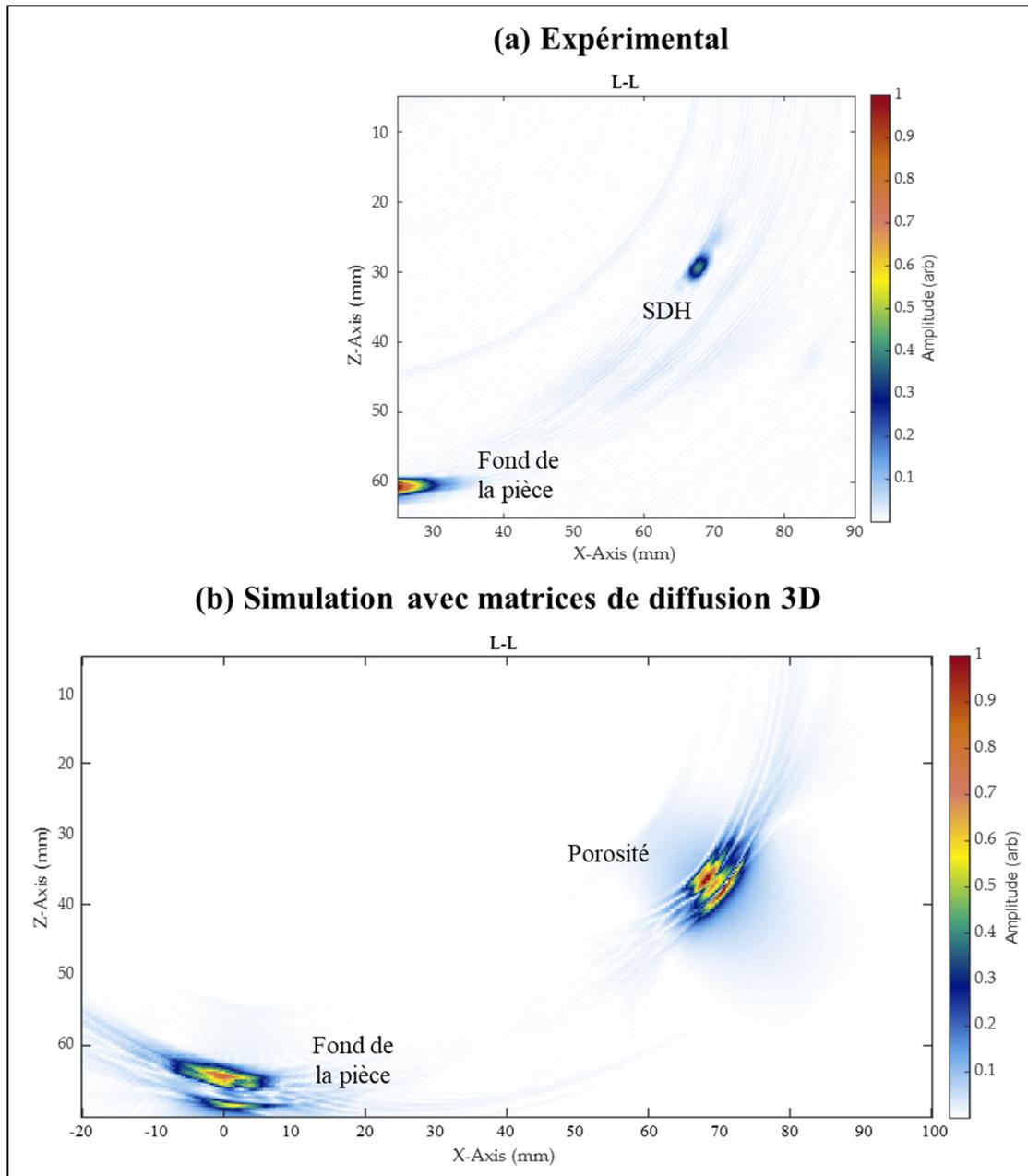


Figure 2.13 Image TFM obtenue avec une sonde ultrasonore 64 éléments, à 5MHz, montée sur un sabot en Rexolite d'inclinaison 20° (a) Image expérimentale (b) Image simulée avec matrices de diffusion 3D

On observe toujours les défauts aux emplacements attendus. Les formes du défaut et du fond de la pièce changent cependant ce qui est normal car leur modélisation a changé. Une onde ultrasonore arrivant sur une sphère peut y être reflétée à différents endroits, ce qui peut

expliquer les différentes raies observées au niveau de la porosité. De même, deux raies sont présentes au niveau du fond de la pièce, modélisé par un trou en forme de pavé droit. Cela peut être dû à un écho produit au niveau de ses bords, qui revient après la réflexion principale en son milieu.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX SUR L'INSPECTION D'UNE PIÈCE DE GÉOMÉTRIE COMPLEXE

L'objectif final de ce mémoire est de prévoir l'inspection ultrasonore par imagerie TFM d'une pièce complexe grâce à la simulation hybride développée dans le chapitre précédent. La pièce que l'on se propose d'inspecter est un tuyau en acier d'épaisseur 25.4mm comportant un raccord vertical soudé (voir photographie en figure 3.1). C'est une pièce de calibration dans laquelle ont été placés six différents défauts à des emplacements précis.

On se concentre sur deux types de défauts distincts et pour chacun d'eux, on définit la position et l'orientation de sonde les plus propices à de bons résultats d'imagerie. Ensuite, on exécute une simulation hybride avec matrice de diffusion 3D pour prévoir les résultats et valider ou non la configuration choisie. Finalement, on réalise une acquisition ultrasonore expérimentale en atteignant précisément la position préalablement préconisée grâce à un bras robotisé puis on compare l'image ultrasonore obtenue avec celle simulée.

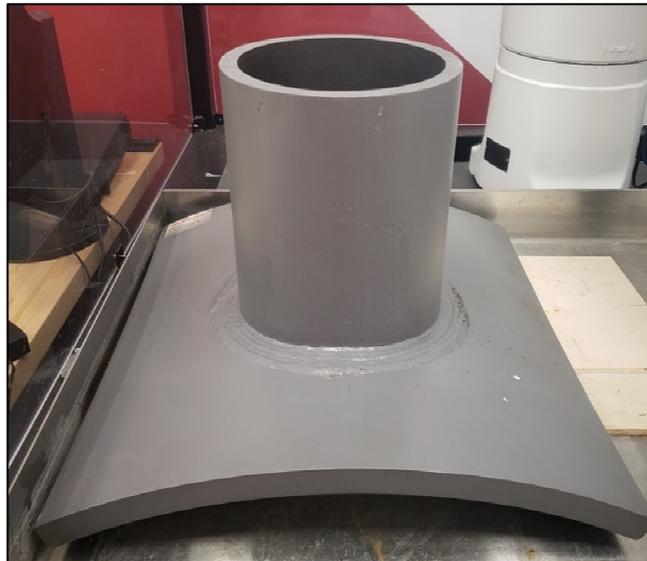


Figure 3.1 Photographie du tuyau avec raccordement soudé

3.1 Configurations d'inspection

On choisit de réaliser deux inspections pour imager deux défauts différents, une porosité et un manque de fusion sur le côté de la soudure. Ils sont situés à des distances différentes sous des courbures différentes. Ces deux acquisitions expérimentales permettront ainsi de mettre en jeu plusieurs paramètres géométriques pouvant influencer sur la qualité des images TFM produites. Les vues en coupe qui présentent ces deux configurations utilisées par la suite sont données en figure 3.3. Une vue de haut et de côté de la pièce, faisant apparaître les six défauts y étant présent et la soudure sont données en figure 3.2.

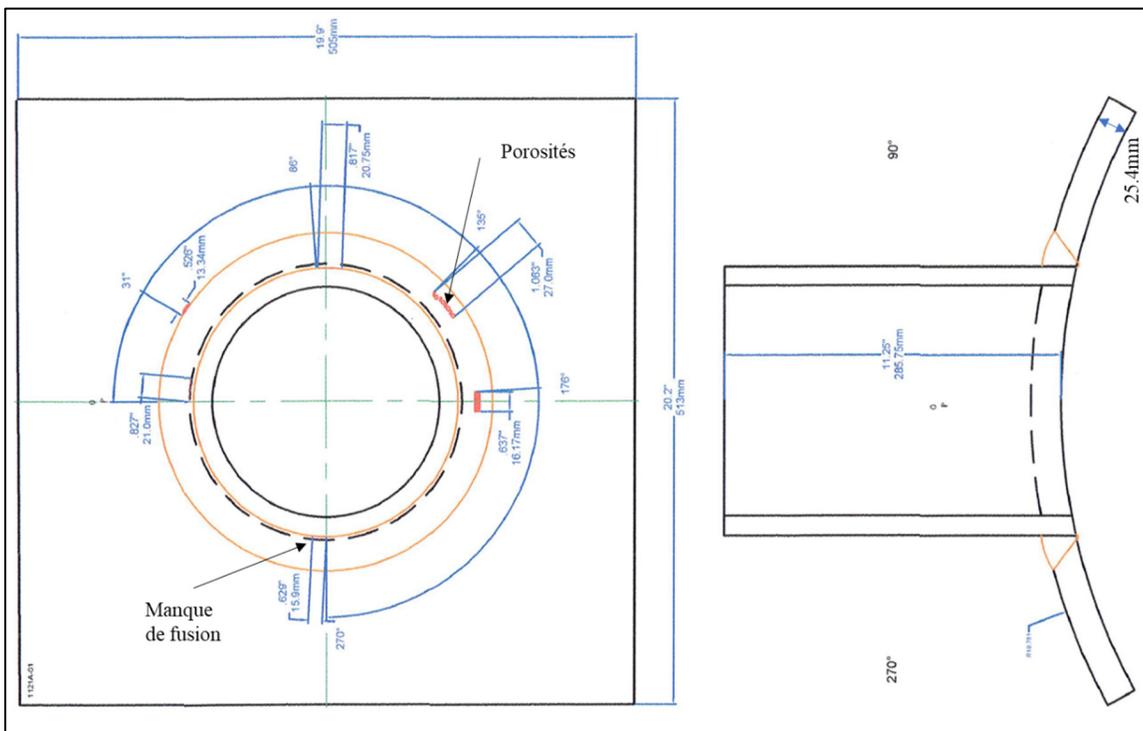


Figure 3.2 Vue du haut et de côté de la pièce de calibration

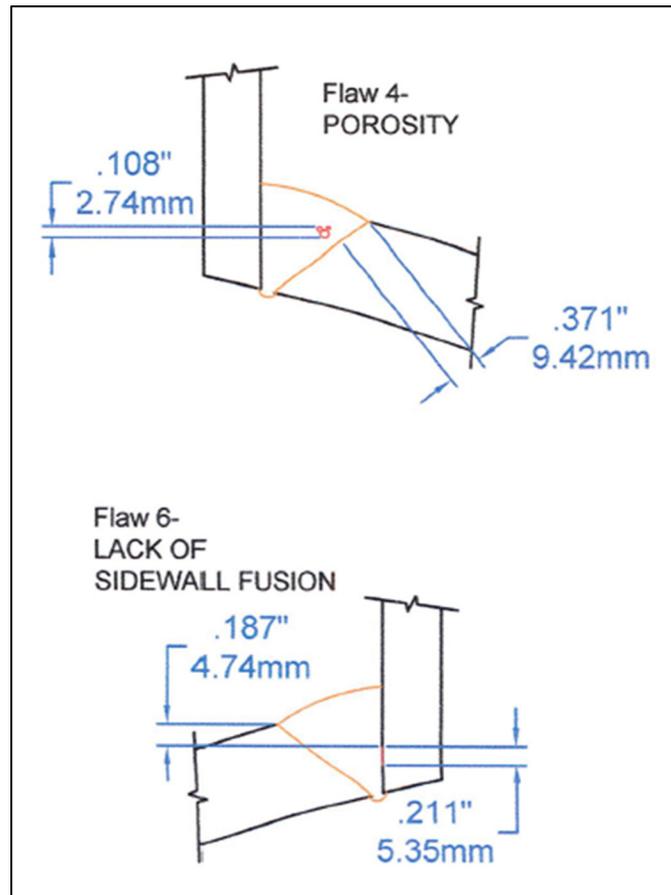


Figure 3.3 Vue en coupe de la pièce de calibration au niveau des porosités et au niveau du manque de fusion

3.2 Protocole expérimental

On utilise une sonde ultrasonore linéaire d'immersion Olympus 5L64I composée de 64 éléments piézoélectriques. Le pas est de 0.6mm et l'ouverture est donc de 38.4mm, leur fréquence centrale est de 5MHz, elle est choisie pour permettre de détecter les porosités dont la taille est de l'ordre de 1mm. Cette sonde est conçue pour avoir un bon couplage d'impédance acoustique avec l'eau. On l'installe sur un sabot conformable rempli d'eau. Cela permet de réaliser une inspection comme en immersion, avec néanmoins des degrés de libertés plus limités, mais sans immerger la pièce qui est d'un volume conséquent et qui est sensible à la rouille. On utilise un gel couplant ultrasonore entre la pièce et le sabot conformable pour éviter

la présence d'une fine couche d'air qui empêcherait la transmission des ultrasons vers la pièce. De même on s'assure de l'étanchéité entre la sonde et le sabot conformable pour y insérer de l'eau avec une pression suffisante pour chasser une éventuelle couche d'air entre la sonde et l'eau. Finalement, on fixe la sonde sur le robot grâce à un adaptateur imprimé en 3D. Une photographie du dispositif expérimental est présentée en figure 3.4.

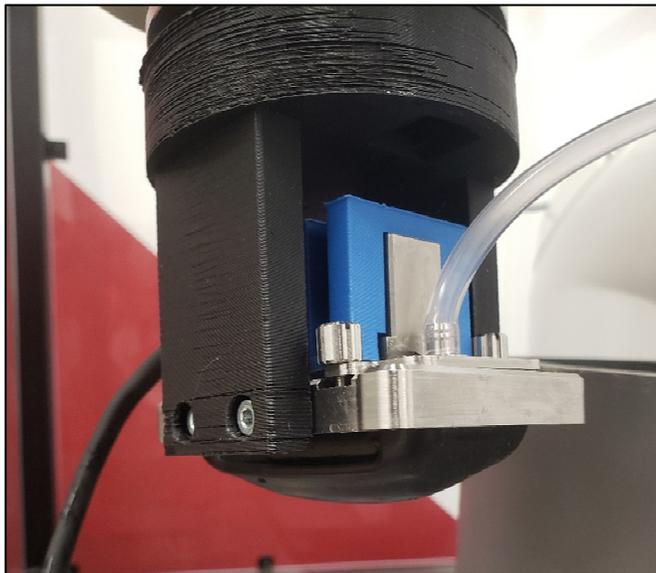


Figure 3.4 Photographie de la sonde 64 éléments installée sur un sabot conformable rempli d'eau et attachée au bras robotisé

On choisit la position de la sonde par rapport au défaut que l'on cherche à détecter et son orientation par rapport à l'interface grâce à une modélisation 3D de la pièce. Celle-ci est rendue possible grâce à un nuage de points laser de sa surface. Ce procédé est détaillé dans la section suivante. Finalement la position et l'orientation sont atteintes grâce au bras robotisé à six axes Stäubli TX90 et l'acquisition de la FMC est faite à l'aide de la console Verasonics Vantage 64LE.

La FMC obtenue est ensuite utilisée pour détecter la surface entre l'eau et la pièce. Pour cela on utilise un code TFM à un milieu de propagation, il produit une image de cette interface. On en extrait des points comme montré en figure 3.5. Pour finir, deux reconstructions différentes

sont comparées. Dans la première on utilise les points extraits pour approximer l'interface par une ligne et ainsi éviter des oscillations dues à une certaine irrégularité de ces points. Dans la deuxième, on prend en compte la géométrie réelle en définissant une courbe qui modélise l'interface par interpolation linéaire des points extraits et extrapolation pour la partie de l'interface dont l'écho ne revient pas à la sonde.

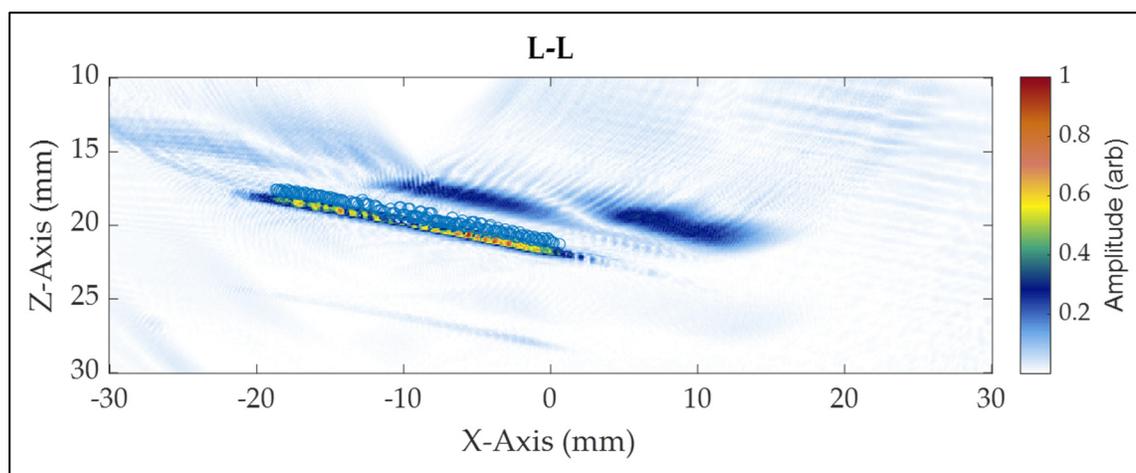


Figure 3.5 Image TFM de l'interface sabot conforme-pièce et points extraits de cette surface

Enfin, ces mêmes données FMC et l'interface approximée sont prises en entrée d'un code TFM avec compensation de surface qui renvoie l'image de la pièce dans une zone d'imagerie correspondant à une vue radiale de la pièce au niveau du défaut que l'on cherche à détecter.

3.3 Positionnement de la sonde

Tout d'abord, on choisit un positionnement radial pour la sonde car un positionnement circconférentiel rendrait les ondes ultrasonores parallèles aux défauts ce qui empêcherait la production d'échos à leur rencontre et donc leur détection. Pour choisir la position et l'orientation de la sonde, on s'aide d'un nuage de points laser du tuyau. Sa forme réelle ne correspondant pas exactement aux définitions sur le plan à cause de défauts de fabrication, ces points lasers sont indispensables pour la bonne prise en compte de la géométrie effective. On les place dans un repère, on y insère également le centre du défaut que l'on veut imager.

Ensuite, on sélectionne des points de surface du tuyau proches de ce défaut, mais hors de la surface irrégulière de la soudure. Étant donné la proximité des défauts de la surface de la pièce (moins de 15mm de profondeur) seule une position de sonde relativement proche du défaut peut convenir pour que des ondes ultrasonores de volume lui soient transmises. À l'inverse, si la sonde est au-dessus des défauts, et donc de la soudure, les ondes ultrasonores vont passer par une surface très irrégulière et les données seront alors inexploitable. On choisit un compromis entre ces deux critères pour la position de la sonde. On calcule ensuite la normale à la surface en ce point choisi, on trace le segment le reliant au centre du défaut visé, qui correspond au rayon ultrasonore réfracté souhaité, puis on applique la loi de Snell-Descartes pour obtenir le rayon ultrasonore incident correspondant. On place alors la sonde orthogonale à ce rayon incident, ce qui définit son orientation.

3.4 Comparaison entre les images simulées et expérimentales

Les images simulées sont obtenues en suivant le même protocole que pour les acquisitions expérimentales. Les positions de sonde, et configurations de pièces inspectées sont donc identiques en simulation et en expérimental. Cependant, on utilise la simulation hybride avec matrice de diffusion réalisée à une fréquence de 2MHz pour éviter de trop grandes tailles de modèles éléments finis. Le diamètre des porosités simulées, alors fixé à 3mm, pour rester légèrement supérieur à la longueur d'onde longitudinale dans l'acier, est donc supérieur à celui des porosités expérimentales de l'ordre du millimètre de diamètre. Les calculs analytiques par tracés de rayons ultrasonores de la simulation sont réalisés en utilisant les points laser de la pièce. Ce procédé de simulation en 3D permet d'obtenir une FMC simulée au niveau des porosités (ici une seule porosité est mise en simulation par souci de simplicité) et au niveau du manque de fusion de la soudure. On réalise finalement une image TFM avec compensation de surface à partir de ces données et des points laser de la surface de la pièce. On obtient alors les images TFM en figure 3.6 et 3.7.

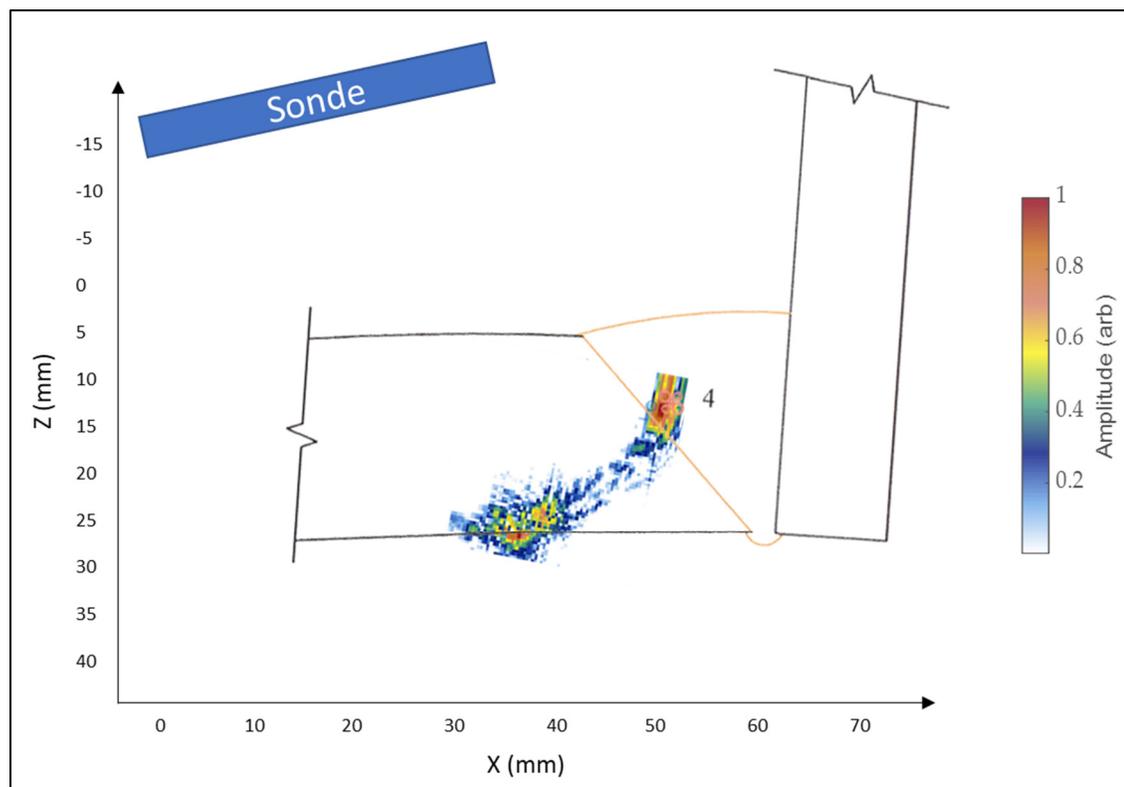


Figure 3.6 Image TFM simulée dans la zone des porosités (L-L – 5 MHz – 64 éléments)

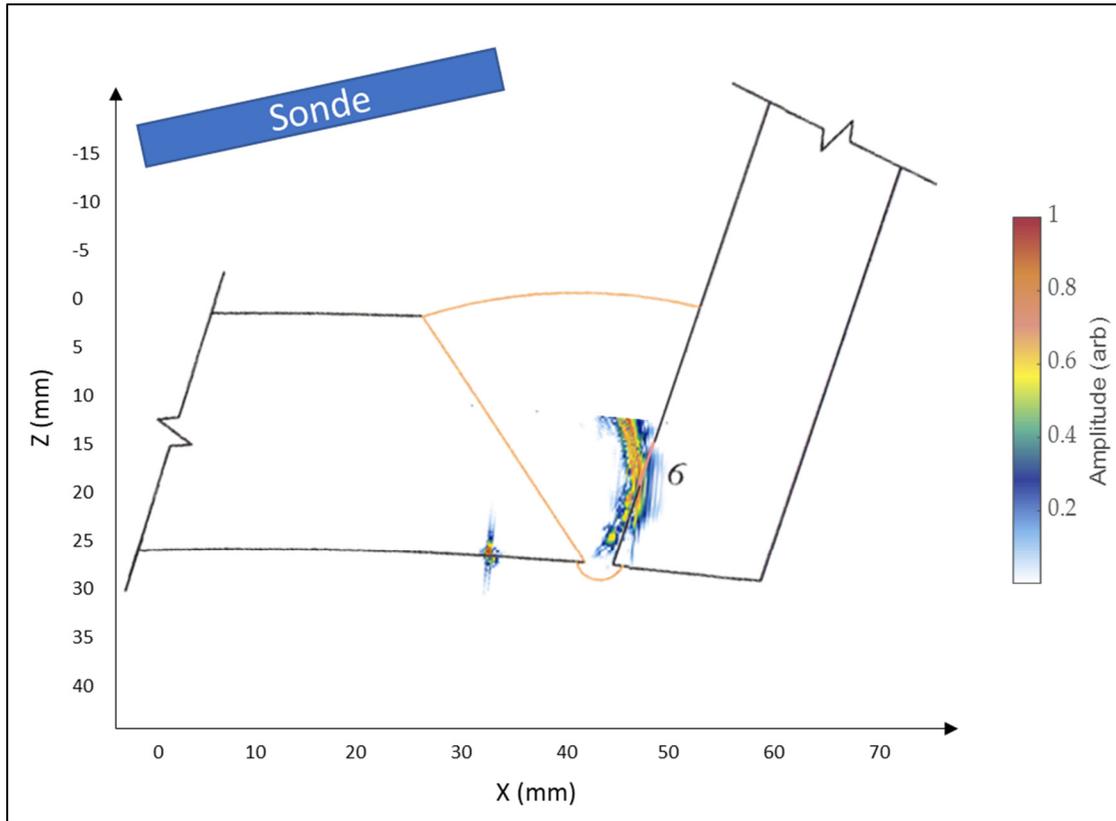


Figure 3.7 Image TFM dans la zone du manque de fusion (L-L – 5 MHz – 64 éléments)

On observe dans les deux cas une marque au niveau du défaut et au niveau du fond de la pièce à des emplacements cohérents. De plus, on observe une variation dans la forme des défauts, ce qui confirme leur bonne prise en compte dans notre simulation. La porosité a une forme ovale, et est plus grande que dans la réalité, ce qui est dû à la plus grande taille du défaut sphérique utilisé pour obtenir sa matrice de diffusion. L'image du manque de fusion est aplatie par rapport à celle de la porosité, ce qui correspond à sa forme de fin rectangle. Ces simulations indiquent que les défauts sont détectés avec cette position et cette orientation de sonde, ce qui conforte leur choix pour réaliser les validations expérimentales. Cependant, ces deux images TFM sont entachées d'erreurs, les formes y apparaissant ne sont pas aussi claires et définies que dans les simulations en 2D que l'on a réalisé dans la section précédente. Cela peut être dû à plusieurs approximations utilisées. Premièrement, dans les calculs analytiques de tracé de rayon qui fournissent les temps de vol des ultrasons et permettent de construire la FMC simulés, les points laser de la surface du naseau sont utilisés pour chercher les points d'intersection des

rayons ultrasonores et de la surface. Les coordonnées de ces derniers points ont alors une erreur de l'ordre de la résolution de l'image laser de la surface de la pièce. Ainsi, cela implique une erreur sur les temps de vol, ce qui en induit une dans la localisation des pixels de haute intensité dans l'image TFM finalement obtenue. Cela est exacerbé par la différence des vitesses des ondes ultrasonores longitudinales dans l'acier par rapport à l'eau qui est environ multipliée par quatre. Ainsi, si dans la modélisation, une onde ultrasonore parcourt une unité de distance en moins dans l'eau par rapport à ce qui se passe en réalité, dans l'image TFM, tous les échos qu'elle produira dans l'acier seront situés à environ trois unités de distance plus proche de la sonde. Ainsi, ces erreurs sur la géométrie réelles de la surface produisent des marques plus larges et éparées que dans les simulations 2D où la surface est connue analytiquement. De la même manière, le nombre d'angles d'émissions utilisés pour obtenir les matrices de diffusion étant limité, des erreurs de trajectoires ultrasonores sont induites, ce qui élargit aussi les marques sur l'image TFM.

La simulation nous confirmant que la position et l'orientation de sonde préalablement définies permettent de détecter les défauts, nous les utilisons pour réaliser les acquisitions de FMC expérimentales. On présente une photographie de la sonde et son sabot conformable amenés à ces positions en figure 3.8. Avec ces données expérimentales, on calcule ensuite les images TFM de deux façons différentes. Premièrement, la compensation de surface est faite en utilisant une interface eau-pièce discrétisée, obtenue par interpolation puis extrapolation des points extraits. Secondement, pour éviter d'éventuelles irrégularités de surface et constatant que l'interface est approximable à une ligne dans nos inspections, on utilisera une résolution de l'équation quartique permettant de trouver les points d'intersection des rayons ultrasonores et de l'interface.

On obtient alors une bonne image des défauts avec la technique de compensation de surface avec approximation rectiligne. Ils sont présents à la position prévue et ont une forme ressemblante à celle indiquées sur les plans de la pièce inspectée (figure 3.9 et 3.10). En effet, sur la première image TFM on observe bien plusieurs porosités de formes ovales au bon emplacement, le ratio signal sur bruit étant bon, elles se distinguent bien du reste de l'image.

On voit également des marques faisant penser à des porosités plus loin dans l'acier mais cela peut être dû aux échos transverses T-T provenant de la conversion de mode ayant lieu à l'interface. La vitesse de ce mode étant environ deux fois inférieure à celle des ondes longitudinales, ces marques sont environ deux fois plus loin dans la pièce. On note également la présence de traces qui suivent plutôt fidèlement le fond de la pièce et l'extrémité inférieure de la soudure. Sur la deuxième image TFM, on retrouve une réponse avec un très bon ratio signal sur bruit au niveau du manque de fusion, celle-ci est de forme allongée et aplatie ce qui peut être obtenue si les ultrasons arrivent perpendiculairement à la plus grande dimension de ce défaut longiligne, ce qui est le cas dans notre configuration d'inspection. De plus, on remarque à nouveau des marques réparties sur le fond de la pièce et ses extrémités.

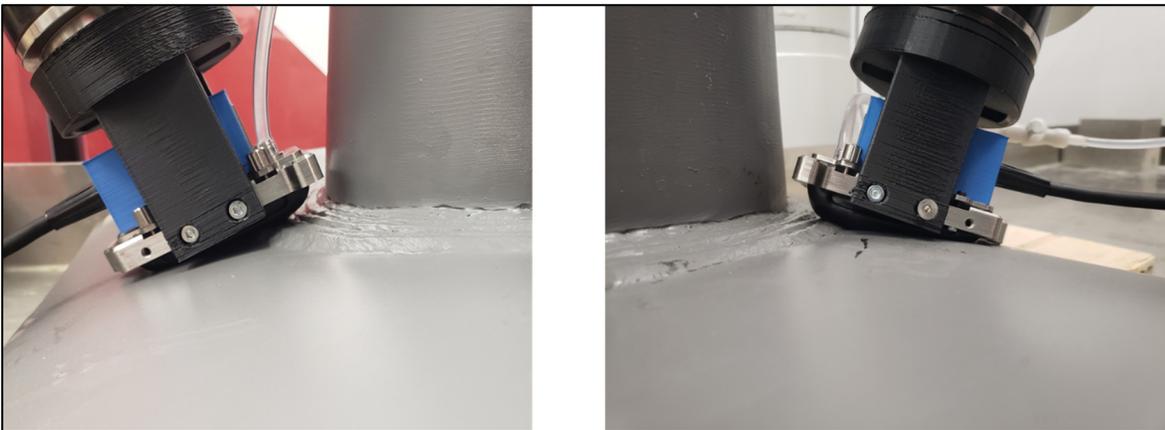


Figure 3.8 Sonde ultrasonore montée sur sabot conformable et amenée à la position et l'orientation choisies pour sonder le manque de fusion (à gauche) et les porosités (à droite)

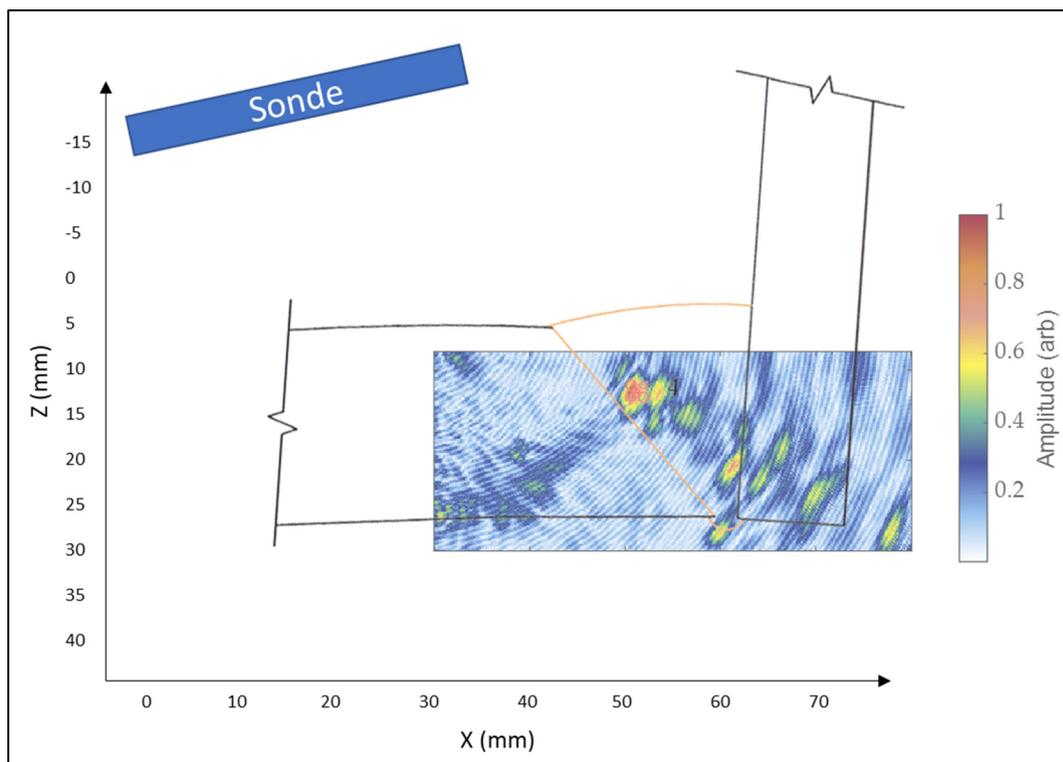


Figure 3.9 Image TFM dans la zone des porosités avec approximation de surface rectiligne (L-L – 5 MHz – 64 éléments)

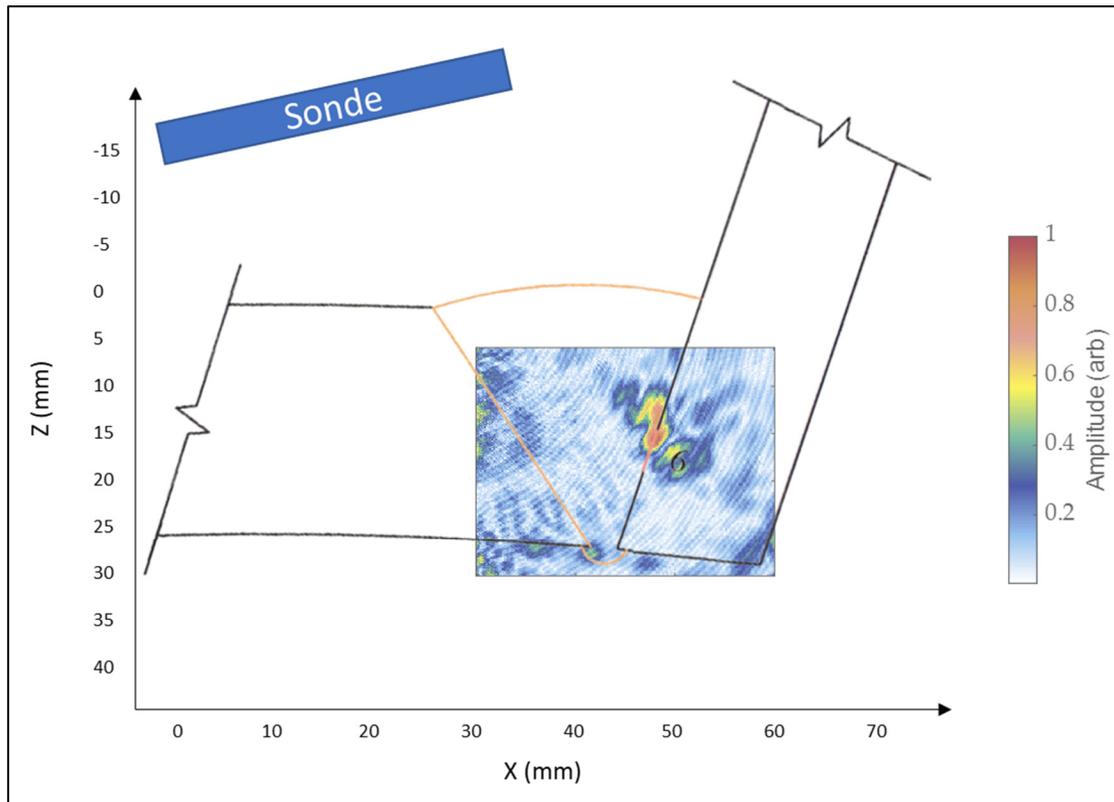


Figure 3.10 Image TFM dans la zone du manque de fusion avec approximation de surface rectiligne (L-L – 5 MHz – 64 éléments)

Ces résultats expérimentaux permettent de clairement détecter les deux différents défauts choisis dans cette étude, et situés sous deux courbures différentes. Les images TFM les mettent bien en valeur et ne présentent pas d'artefacts pouvant dissimuler d'autres défauts qui auraient pu être présents dans la pièce. Cela valide la méthode de positionnement de la sonde, qui s'adapte bien à la courbure.

Les formes des défauts sur les TFM obtenues expérimentalement se rapprochent de ceux obtenus en simulation 3D, ce qui renforce la pertinence de ces simulations, même si la ressemblance entre expérimentations et simulation n'est pas probante à cause des erreurs dû aux approximations et différences de modélisation des défauts dans la simulation. Il serait intéressant d'affiner les modèles pour obtenir des simulations plus précises et ainsi plus fiables. De plus, on pourrait modéliser toutes les extrémités de la pièce par un modèle analytique au

lieu d'utiliser la réponse d'une fine plaque pour modéliser le fond de la pièce, ce qui est une première approximation mais ne peut représenter ce qui est de très grande dimension dans la réalité. À la rencontre des extrémités de la pièce, les ultrasons subissent généralement une réflexion totale, cela est possible à modéliser analytiquement.

Avec la technique d'imagerie TFM sur les mêmes données FMC expérimentale mais avec utilisation de la surface détectée puis interpolée, on obtient des images bien différentes que ce soit dans le cas de la porosité ou du manque de fusion (figure 3.11 et 3.12). Au niveau des porosités, la réponse du défaut n'est pas visible, l'image est très bruitée et on observe des artefacts entre la surface et le fond de la pièce. On en observe aussi dans la configuration avec manque de fusion. Ils peuvent être dû à la courbure ou à une réflexion sur le cordon de soudure irrégulier à l'extrémité du sabot conformable. On aperçoit également une trace au niveau du défaut, mais elle ressemble davantage à un artefact qu'à la forme attendue du manque de fusion.

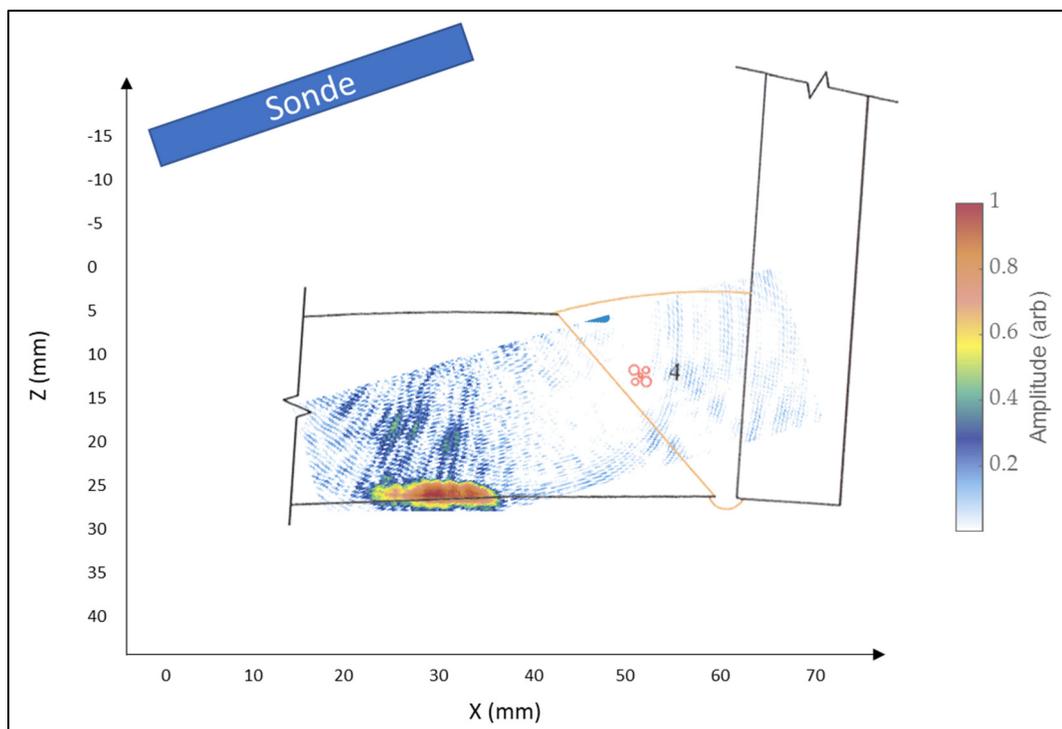


Figure 3.11 Image TFM dans la zone des porosités avec interface interpolée (L-L – 5 MHz – 64 éléments)

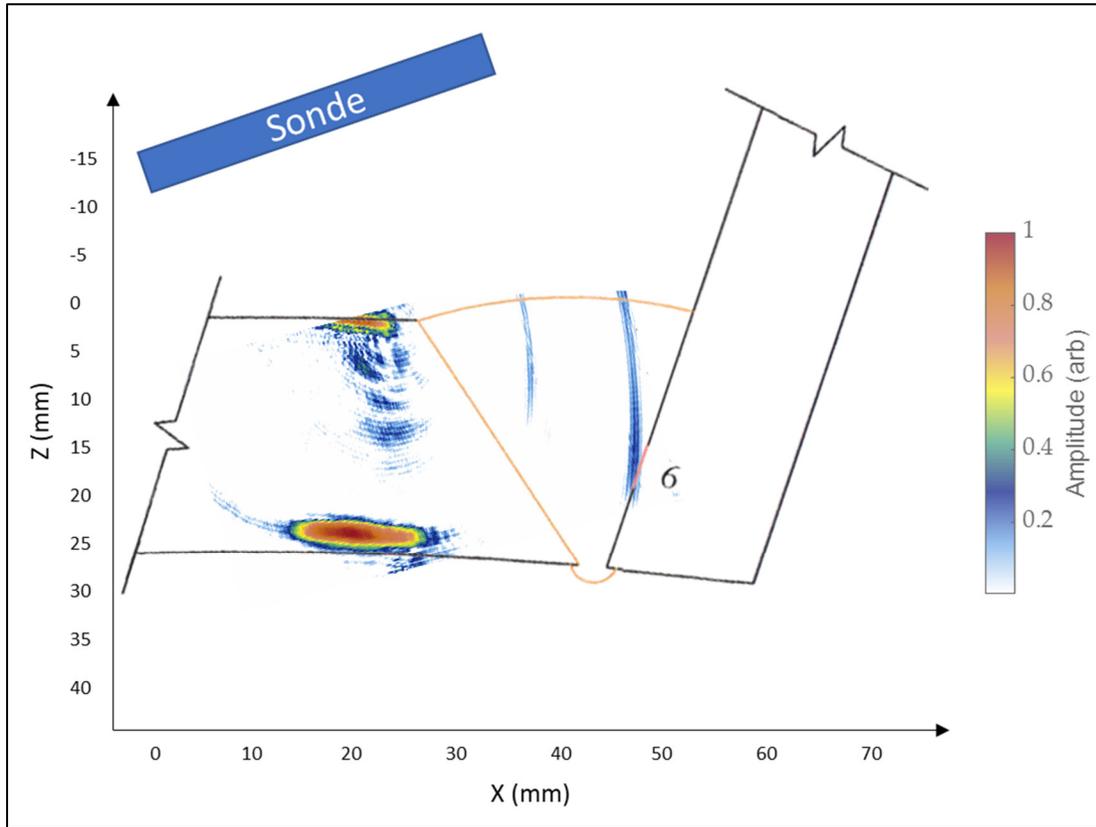


Figure 3.12 Image TFM dans la zone du lack of sidewall fusion avec interface interpolée (L-L – 5 MHz – 64 éléments)

À la différence des précédentes images expérimentales, celles-ci ne sont pas exploitables car les défauts ne sont pas détectés à cause d'un trop grand niveau d'artefacts. Les données expérimentales étant les mêmes, la seule chose ayant changé est la modélisation de l'interface. Elle est ici obtenue par interpolation des points extraits. On constate en améliorant au fur et à mesure cette interpolation que les résultats d'imagerie sont très sensibles même à de faibles variations de la forme de la surface. Comme expliqué dans l'interprétation des résultats des images simulées, un petit écart de surface a de grandes conséquences à cause de l'importante différence de vitesse des ondes ultrasonores dans l'eau et l'acier. Or, on a ici des erreurs dans l'interpolation, rendue difficile notamment à cause d'une irrégularité des points extraits de la détection de surface (voir figure 3.5), ainsi que dans l'extrapolation de la surface dont l'écho ne revient pas à la sonde et dans la discrétisation finale. Elles impliquent de grands écarts dans

les calculs des temps de vol et ainsi les sommations des données FMC sont faussées. Cela peut impliquer que la réponse des porosités ou du manque de fusion soit dispersée dans l'espace et donc pas assez intense pour être prédominante sur les artefacts et le bruit présents.

Ainsi, cette technique d'imagerie TFM avec détection de surface requiert beaucoup de précision sur la détermination de celle-ci. Cependant, elle est indispensable quand la surface n'est pas approximable à une géométrie connue. Pour obtenir cette précision, plusieurs solutions sont envisageables. Premièrement, si la géométrie de la pièce est connue analytiquement ou si un modèle de conception assistée par ordinateur est disponible, alors ils peuvent être utilisés. Ici, la pièce ayant subi des déformations inattendues en fin de fabrication, ces éléments ne sont pas exploitables. Deuxièmement, des points laser de la pièce peuvent être employés. Ils fournissent alors une interface en 3D qui peut être très précise, et non en 2D comme ce qui a été utilisé expérimentalement. Pour les utiliser, il faut alors garantir une bonne calibration de la position de la sonde par rapport à la pièce, avec une erreur bien inférieure à 1mm, ce qui est tout à fait envisageable en utilisant un palpeur de calibration fixé au robot et intégré à la cellule robotique. Dans ce mémoire, l'utilisation de pièces imprimées en 3D pour fixer la sonde au robot apportait déjà des incertitudes de position éloignant la possibilité d'une calibration avec cette précision. Finalement, plusieurs acquisitions ultrasonores auraient pu être réalisées avec des orientations de sonde favorisant l'imagerie de la surface. Ensuite, les différents points de surface extraits grâce à cela auraient pu être combinés dans une seule et même approximation de surface. Ainsi, une interface en 3D aurait pu être obtenue. Un effet de moyennage aurait pu améliorer les résultats, ainsi que l'absence de nécessité d'une extrapolation pour modéliser une partie de surface non détectée. Cependant, toutes ces acquisitions et leur combinaison l'interpolation en 3D de tous les points extraits représentent un procédé nécessitant beaucoup de temps et des algorithmes avancés. Mais cette détection de surface avec les mêmes sondes que celles utilisées pour finalement détecter d'éventuels défauts est un procédé flexible, qui peut être précieux lorsque d'autres techniques de métrologie ne sont pas disponibles ou pour éviter la perte de temps dû à un changement d'outil sur une installation robotisée.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le but l'étude était de mettre en place une méthode d'imagerie ultrasonore multi-éléments pour inspecter les pièces mécaniques de géométries complexes. Connaissant la sensibilité de cette technique à la position de la sonde, il a été proposé d'utiliser un bras robotisé pour précisément la contrôler et de développer une méthode de simulation permettant de la sélectionner et de l'évaluer avant d'entreprendre une acquisition expérimentale.

Ce mémoire a montré la pertinence de l'utilisation de simulations hybrides, analytiques et par éléments finis pour prévoir avec précision le résultat d'une imagerie ultrasonore TFM en 2D, sur une pièce avec un plan de symétrie en une dizaine de minutes. Ce temps de calcul peut encore être réduit avec des cartes graphiques plus performantes. Ces résultats confortent l'intérêt d'utiliser ce type de simulation sur des jumeaux numériques permettant de faire de la programmation hors ligne de procédés de contrôle non destructifs par ultrasons.

Des travaux ont été réalisés pour permettre de réaliser des simulations en 3D, ce qui est nécessaire pour modéliser précisément les inspections sur pièces complexes, notamment en obtenant les matrices de diffusion des défauts que l'on souhaite pouvoir détecter. Cette technique permet d'obtenir très rapidement de nouvelles images simulées lorsque l'on change la position de la sonde ou du défaut, car seuls des calculs analytiques qui durent quelques secondes sont à refaire entre chaque configuration.

Une modélisation 3D a été mise en place pour prévoir l'inspection d'une pièce de géométrie complexe, un naseau soudé sur un tuyau, pour deux types de défauts sous deux courbures différentes. Pour chacun, une position et une orientation de sonde précise ont été définies. Des simulations 3D ont validé le choix de ces positions en prévoyant des résultats d'imagerie permettant bien de détecter ces défauts. Des acquisitions de FMC expérimentales ont ensuite permis de valider leur détection par imagerie TFM.

Cela a donc aussi validé partiellement les simulations 3D qui représentent la réalité, mais actuellement avec une faible précision. Il est alors recommandé de réaliser des études sur les matrices de diffusion à propos de l'influence des paramètres tels que la résolution angulaire et le diamètre de la zone de simulation pour s'assurer de minimiser les erreurs de simulations tout en gardant des tailles de modèles exploitables.

Finalement, des travaux ont été réalisés sur la détection d'interface avec sonde ultrasonore multi-éléments puis sur son utilisation pour l'imagerie TFM avec compensation de surface. Les erreurs d'imagerie pouvant être entraînées par cette technique ont été expliquées et des recommandations ont été formulées pour la rendre fonctionnelle.

BIBLIOGRAPHIE

- Brath, A. J., & Simonetti, F. (2017). Phased array imaging of complex-geometry composite components. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 64(10), 1573-1582. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2017.2726819>
- Camacho, J., Atehortua, D., Cruza, J. F., Brizuela, J., & Ealo, J. (2018). Ultrasonic crack evaluation by phase coherence processing and TFM and its application to online monitoring in fatigue tests. *Ndt & E International*, 93, 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.10.007>
- Cheeke, J. D. N. (2012). *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press. <http://doi.org/10.1201/b12260>
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (1974). *Concepts and applications of finite element analysis* (Vol. 4). Wiley New York.
- Drozd, M., Moreau, L., Castaings, M., Lowe, M. J. S., & Cawley, P. (2006, March). Efficient numerical modelling of absorbing regions for boundaries of guided waves problems. In *AIP conference proceedings* (Vol. 820, No. 1, pp. 126-133). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.2184520>
- Faran Jr, J. J. (1951). Sound scattering by solid cylinders and spheres. *The Journal of the acoustical society of America*, 23(4), 405-418. <https://doi.org/10.1121/1.1906780>
- Fatemi, M., & Kak, A. C. (1980). Ultrasonic B-scan imaging: Theory of image formation and a technique for restoration. *Ultrasonic imaging*, 2(1), 1-47. [https://doi.org/10.1016/0161-7346\(80\)90201-1](https://doi.org/10.1016/0161-7346(80)90201-1)
- Felice, M. V., Velichko, A., Wilcox, P. D., Barden, T., & Dunhill, T. (2014). Obtaining geometries of real cracks and using an efficient finite element method to simulate their ultrasonic array response. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 56(9), 492-498. <https://doi.org/10.1784/insi.2014.56.9.492>
- Holmes, C., Drinkwater, B. W., & Wilcox, P. D. (2005). Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation. *NDT & e International*, 38(8), 701-711. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.04.002>
- Honarvar, F., & Varvani-Farahani, A. (2020). A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultrasonics*, 108, 106227. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106227>

- Hu, H., Du, J., Ye, C., & Li, X. (2018). Ultrasonic phased array sparse-TFM imaging based on sparse array optimization and new edge-directed interpolation. *Sensors*, *18*(6), 1830. <https://doi.org/10.3390/s18061830>
- Hu, H., Zhu, X., Wang, C., Zhang, L., Li, X., Lee, S., ... & Xu, S. (2018). Stretchable ultrasonic transducer arrays for three-dimensional imaging on complex surfaces. *Science advances*, *4*(3), eaar3979. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar3979>
- 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>
- Hunter, A. J., Drinkwater, B. W., & Wilcox, P. D. (2010). Autofocusing ultrasonic imagery for non-destructive testing and evaluation of specimens with complicated geometries. *Ndt & E International*, *43*(2), 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.09.001>
- Kerr, W., Pierce, S. G., & Rowe, P. (2016). Investigation of synthetic aperture methods in ultrasound surface imaging using elementary surface types. *Ultrasonics*, *72*, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.08.007>
- Le Jeune, L., Robert, S., Dumas, P., Membre, A., & Prada, C. (2015, March). Adaptive ultrasonic imaging with the total focusing method for inspection of complex components immersed in water. In AIP Conference proceedings (Vol. 1650, No. 1, pp. 1037-1046). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.4914712>
- Le Jeune, L., Robert, S., Villaverde, E. L., & Prada, C. (2016). Plane wave imaging for ultrasonic non-destructive testing: Generalization to multimodal imaging. *Ultrasonics*, *64*, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.08.008>
- Mansur Rodrigues Filho, J. F., & Bélanger, P. (2021). Probe standoff optimization method for phased array ultrasonic TFM imaging of curved parts. *Sensors*, *21*(19), 6665. <https://doi.org/10.3390/s21196665>
- Matuda, M. Y., Buiochi, F., & Adamowski, J. C. (2019). Experimental analysis of surface detection methods for two-medium imaging with a linear ultrasonic array. *Ultrasonics*, *94*, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.12.004>
- McKee, J. G., Bevan, R. L., Wilcox, P. D., & Malkin, R. E. (2020). Volumetric imaging through a doubly-curved surface using a 2D phased array. *NDT & E International*, *113*, 102260. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102260>
- Rachev, R. K., Wilcox, P. D., Velichko, A., & McAughey, K. L. (2020). Plane wave imaging techniques for immersion testing of components with nonplanar surfaces. *IEEE*

Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 67(7), 1303-1316. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2020.2969083>

- Rajagopal, P., Drozd, M., Skelton, E. A., Lowe, M. J., & Craster, R. V. (2012). On the use of absorbing layers to simulate the propagation of elastic waves in unbounded isotropic media using commercially available finite element packages. *Ndt & e international*, 51, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.04.001>
- Robert, S., Cartier, F., De Roumilly, L., Mondou, R. O., Lhuillier, P. E., & Garzino, G. (2016, June). Adaptive ultrasonic imaging with a phased-array probe equipped with a conformable wedge. In *Proc. 19th World Conf. Non-Destruct. Testing* (pp. 13-16). <https://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/th3a1.pdf>
- Rose, J. L. (2014). *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. New York : Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107273610>
- Schmerr, L. W. (2016). *Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation* (Vol. 122, No. 5, pp. 85-140). New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30463-2>
- Shull, P. J. (2002). *Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications*. CRC Press.
- Sutcliffe, M., Weston, M., Charlton, P., Donne, K., Wright, B., & Cooper, I. (2013). Full matrix capture with time-efficient auto-focusing of unknown geometry through dual-layered media. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 55(6), 297-301. <https://doi.org/10.1784/insi.2012.55.6.297>
- Velichko, A., & Wilcox, P. D. (2012, May). Efficient finite element modeling of elastodynamic scattering with non-reflecting boundary conditions. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1430, No. 1, pp. 142-149). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.4716224>
- Wilcox, P. D., Croxford, A. J., Budyn, N., Bevan, R. L., Zhang, J., Kashubin, A., & Cawley, P. (2020). Fusion of multi-view ultrasonic data for increased detection performance in non-destructive evaluation. *Proceedings of the Royal Society A*, 476(2243), 20200086. <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0086>
- Wilcox, P. D., & Velichko, A. (2009, April). Efficient finite element modeling of elastodynamic scattering. In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2009* (Vol. 7295, pp. 426-434). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.815454>

