

Imagerie ultrasonore multimodale par focalisation en tous points pour l'inspection de plaques d'acier soudées

par

Nicolas TREMBLAY

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

MONTRÉAL, LE 12-01-2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Nicolas Tremblay, 2020



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Pierre Bélanger, directeur de mémoire
Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

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

M. Frédéric Morrow, examinateur externe
ZETEC CANADA

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

LE 11 DÉCEMBRE 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

En premier lieu, il m'est personnellement impossible d'imaginer l'ampleur de tout ce que m'a apporté cette collaboration avec Pierre Bélanger qui fut à la fois mon professeur, mon directeur de stage, mon directeur de maîtrise en plus d'être un ami. Cette relation m'a fait grandir tant au niveau professionnel en collaborant sur des projets passionnants que du point de vue relationnel en s'impliquant dans la vie sociable du laboratoire PULETS.

Ensuite, je tiens à remercier le bureau de Zetec Canada situé dans la ville de Québec, plus particulièrement Frédéric Morrow, Patrick Deschênes-Labrie, Jimy Kom-Mogto ainsi qu'Hamid Habibzadeh Boukani. Leur amabilité, leur soutien et leurs grandes compétences techniques ont grandement contribué à la réalisation de cette œuvre.

Au long de ces études, j'ai forgé des amitiés solides et profondes avec certains individus qui furent d'honorables membres du PULETS tels que Guillaume Boivin (mon mentor), Victor Cerda-Carvajal (le sportif), Frédéric Dupont-Marilla (le roux), Aurélien Thon (mon compagnon de beuverie!), ainsi que Baptiste Gauthier, Geoffrey Veit, Arthur Chapon, Sévan Bouchy, Aubin Chaboty, Damien Cuiec-Aime et Thibault Latête. Jamais je ne serais passé à travers toutes ces années de travail épuisantes sans le support de ces êtres exceptionnels. Une mention spéciale à André Dionne et Maxime Guilbault, qui m'accompagnèrent tout au long du Bacc. en démontrant une patience exemplaire.

Enfin, j'aimerais remercier ceux qui sont toujours présents quand je rentre au bercail, Simon-Pierre Corneau et Maxime Gravel qui partagent avec moi pratiquement toutes mes passions les plus folles. Enfin, un grand merci à ceux qui me supportent depuis plus longtemps qu'il m'est possible de me souvenir. Je veux bien sûr parler de ma famille, Martine Dufresne, Yvan Tremblay et ma sœur Sabrina. Ils sont à mes côtés depuis le début des temps et m'ont sorti si souvent du pétrin que je n'ose pas imaginer de ce que je serais devenu sans eux. Je leur suis à jamais redevable!

Imagerie ultrasonore multimodale par focalisation en tous points pour l'inspection de plaques d'acier soudées

Nicolas TREMBLAY

RÉSUMÉ

Les structures modernes comme les ponts et les bâtiments ont tous un point en commun, l'utilisation de l'acier pour leur structure. Ce matériau omniprésent dans nos vies est souvent soumis à des contraintes importantes, aussi bien mécanique que chimique. Ces éléments structuraux étant utilisés pour leur grande résistance, la rupture de ces derniers peut avoir des conséquences catastrophiques. Il est donc primordial d'en assurer la qualité, lors de leur fabrication ou alors au courant de leur vie utile. Le contrôle non destructif comporte des techniques puissantes d'analyse et de contrôle pouvant détecter les défauts présents dans les pièces sans en affecter l'intégrité physique. L'une de ces techniques, l'inspection ultrasonore, est très efficace pour analyser les plaques d'acier soudées. Effectivement, lors du procédé de soudure, certains défauts comme des manques de fusion ou des fissures peuvent fragiliser la soudure, jusqu'à la rendre dangereuse.

Ce mémoire porte donc sur l'analyse de plaques d'acier soudées. Premièrement, il sera question d'approfondir les connaissances quant à l'inspection des plaques soudées ainsi que les processus d'imagerie ultrasonore moderne. Ensuite suivra la mise en place d'une procédure de test d'un algorithme d'imagerie multimodale développée en combinant plusieurs images produites avec une technique de focalisation en tous points (TFM). Chacune de ces images étant produites avec la reconstruction d'un mode de propagation ultrasonore différent. Cette procédure comporte une partie simulation ainsi qu'une partie expérimentale.

La partie simulation est effectuée à l'aide du logiciel CIVA afin d'évaluer la performance de l'algorithme avant d'effectuer le processus expérimental, mais aussi de fournir une base de comparaison avec les résultats expérimentaux qui suivront. Les conclusions de l'évaluation de la performance en simulation étant concluantes, la partie expérimentale a pu être effectuée. À l'aide d'un appareil de type Topaz64, d'une sonde à éléments multiples (64) centrée à 5 MHz ainsi que de deux sabots, soit l'un à 19 degrés et l'autre à 36 degrés, l'analyse expérimentale a démontré l'efficacité de détecter un manque de fusion ainsi qu'un manque de pénétration. Une conclusion intéressante fût d'observer que bien que l'angle du sabot a une influence sur la forme de l'indication, l'algorithme a démontré une performance de détection similaire dans les deux cas.

Mots-clés : Soudure, Inspection, Ultrason, Sonde à éléments multiples, Imagerie, TFM, Multimodale.

Ultrasonic welded plate inspection using multi modal total focusing method imaging

Nicolas TREMBLAY

ABSTRACT

Most bridges and buildings have a point in common, they are made of steel. This material is omnipresent around us and endure a huge amount of mechanical or chemical stress. Steel is typically chosen for its great strength. However, its failure can be catastrophic. It is important to monitor steel assemblies during their fabrication and all along their useful life. Non-destructive testing uses powerful techniques to detect flaws without affecting the integrity of the host structure. Ultrasonic testing is one of these techniques and it is particularly relevant for the inspection of welded plates. During the welding process, some flaws such as lacks of fusion or cracks can greatly weaken welded joints or even make them brittle and dangerous.

This thesis discusses ultrasonic testing of welded plates. First, a review of the current state-of-the-art is made to study more deeply the inspection of welded plates as well as modern ultrasonic imaging protocols. A case study of a multimodal imaging algorithm developed by combining many images made by total focusing method (TFM) is then presented. The images are generated by using different ultrasonic propagation modes. This case study compares simulation and experimental approaches.

The simulation was performed using CIVA software to evaluate the performance of the algorithm before going into experimental testing, as well as to use the results as a base of comparison with further experimental results. The results from simulations were promising enough to perform the experimental validation. Using an ultrasonic phased array controller (Topaz 64), a phased array probe with 64 elements centered at 5 MHz and two wedges with respectively 19° and 36° of incidence angle, the experimental testing showed the ability of the algorithm to effectively detect a lack of fusion and a lack of penetration. An interesting point to mention is that the algorithm appears to work independently of the wedge angle, which affects the shape of the signal but has little effect on its amplitude.

Keywords: Weld, Inspection, Ultrasonic, Phased array, Imaging, TFM, Multi modal.

CHAPITRE 4 CARTES DE SENSIBILITÉ À BASE DE SIMULATIONS	69
4.1 Résultats de l'application des cartes de sensibilité basées sur les simulations	72
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	83
ANNEXE I PARAMÈTRE DE LA PLAQUE D'ACIER SOUDÉE	85
BIBLIOGRAPHIE	87

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 2.1	Paramètres de la sonde.....	42
Tableau 2.2	Paramètres des sabots	43

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Préparation des plaques en vue de la soudure, tirée de https://studopedia.org/12-2660.html (2020)	6
Figure 1.2	Types de défaut présent dans les soudures en « V ». Figure tirée de www.olympus-ims.com (2020)	7
Figure 1.3	Déformation liée à la propagation d'une onde dans un milieu homogène isotrope : (a) onde de cisaillement verticale (SV), (b) onde de cisaillement horizontale (SH), (c) onde longitudinale (L)	13
Figure 1.4	Interaction d'une onde incidente avec une interface entre deux milieux avec une impédance acoustique spécifique qui est différente	18
Figure 1.5	Phénomène de conversion des ondes lors d'interactions avec des interfaces. En rouge, les ondes longitudinales et en vert les ondes transversales	19
Figure 1.6	Exemple d'une sonde à éléments multiples, représentant le câble d'alimentation (A), le boîtier (B), les éléments piézo-électriques (C) et la lame quart d'onde (D).....	20
Figure 1.7	Exemple de sabots tiré de www.Zetec.com (2020)	20
Figure 1.8	Représentation schématique d'une inspection ultrasonore et son A-scan correspondant.....	22
Figure 1.9	Exemple de B-scan représentant la même situation que la figure 1.8, produit avec une sonde à éléments multiples.....	23
Figure 1.10	Représentation schématique de la technique de reconstruction à synthèse d'ouverture focalisée (SAFT). Avec en vert la perturbation du défaut sur le A-scan (en rouge) de chacun des éléments (en jaune).....	24
Figure 1.11	Représentation schématique du principe de l'imagerie TFM, avec les éléments de la sonde (en jaune) et les points focaux (en bleu).....	26
Figure 1.12	Imagerie ultrasonore TFM d'un défaut cylindrique.....	27
Figure 1.13	Imagerie TFM (échelle à 40 dB) d'un bloc d'acier utilisant une sonde 32 éléments. (a) Analyse fixe utilisant une normalisation de 16 et (b) un balayage de 100 mm le long de l'échantillon. Figure tirée de Holmes <i>et al</i> (2008).....	28

Figure 1.14	Imagerie TFM avec défauts et fond de la pièce identifiés. (a) L'imagerie de l'échantillon de référence à surface plane, ainsi que les imageries de l'échantillon à surface sinusoïdale (b) en assumant sa surface comme plane, (c) en assumant la vraie géométrie de la surface, et (d) avec le procédé autofocus. Figure tirée de Hunter <i>et al</i> (2010).....	29
Figure 1.15	L'homogénéisation du trajet d'un faisceau ultrasonore traversant plusieurs couches de matériau. Figure tirée de Yan <i>et al</i> (2013)	30
Figure 1.16	Représentation schématique de l'algorithme de sommation, multiplication et délai.....	31
Figure 1.17	Résultats de l'imagerie TFM d'un trou de côté utilisant l'algorithme DAS (à gauche) et l'algorithme DMAS (à droite). Figure tirée de Matrone <i>et al</i>	32
Figure 1.18	Différents parcours de reconstruction TFM, montrant la sonde (en jaune), le sabot (en orange), l'échantillon (en gris), un point focal (en bleu), ainsi que les différentes conversions des modes longitudinaux (en rouge) et transversaux (en vert).....	34
Figure 1.19	Exemple de distribution de l'énergie d'une onde rencontrant une interface selon l'angle d'incidence, avec l'énergie réfléchie (R), l'énergie transmise en onde longitudinale (L) ainsi que l'énergie transmise en onde de cisaillement (S). Figure tirée de Cheeke (2012)	36
Figure 1.20	Exemple de carte de sensibilité produite à l'aide du code de l'Université de Bristol, Budyn <i>et al</i> (2018), pour un défaut de type manque de fusion situé sur la jonction entre le métal de base et la soudure	37
Figure 2.1	Échantillon expérimental avec la vue de plan (en haut) et la vue de profil (en bas).....	40
Figure 2.2	Exemple d'une sonde avec ses dimensions caractéristiques, le nombre des éléments (n), leur taille (w), leur pas (p) et leur largeur (l)	42
Figure 2.3	Exemple d'un sabot avec ses dimensions caractéristiques, la hauteur (H), la longueur (L), son angle d'incidence (θ_i), la hauteur (he) et le décalage (O) du premier élément de la sonde.....	43
Figure 3.1	Détails des représentations TFM classiques	48
Figure 3.2	Imagerie TFM d'un manque de fusion en milieu de pièce utilisant les parcours directs de reconstruction : L-L (en haut), L-T (au milieu) et T-T (en bas).....	49

Figure 3.3	Imagerie TFM d'un manque de fusion en milieu de pièce utilisant les parcours indirects de reconstruction : LL-LL (en haut), TT-TT (en bas)..50
Figure 3.4	Imagerie TFM d'un manque de fusion en milieu de pièce utilisant les parcours de coins : LL-L (en premier), LL-T (en second), TT-L (en troisième) et TT-T (en quatrième)51
Figure 3.5	Détail des représentations TFM multimodales, avec l'imagerie sans filtres (en haut), et l'imagerie avec les filtres (en bas).....52
Figure 3.6	Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de fusion en utilisant un sabot de 19°55
Figure 3.7	Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de fusion en utilisant un sabot de 36°55
Figure 3.8	Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de fusion en utilisant un sabot de 19°56
Figure 3.9	Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de fusion en utilisant un sabot de 36°57
Figure 3.10	Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de pénétration en utilisant un sabot de 19°58
Figure 3.11	Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de pénétration en utilisant un sabot de 36°59
Figure 3.12	Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de pénétration en utilisant un sabot de 19°60
Figure 3.13	Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de pénétration en utilisant un sabot de 36°61
Figure 3.14	Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) de la fissure débouchante en utilisant un sabot de 19°63

Figure 3.15	Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) de la fissure débouchante en utilisant un sabot de 36°	63
Figure 3.16	Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) de la fissure débouchante en utilisant un sabot de 19°	64
Figure 3.17	Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) de la fissure débouchante en utilisant un sabot de 36°	65
Figure 4.1	Imagerie TFM sommative pour le parcours « TT-L » d'un défaut de type manque de fusion qui est déplacée de 2 mm 16 fois, qui présente l'image brute (en haut) et l'image filtrée (en bas).....	70
Figure 4.2	Exemple de la série de filtres établie avec la procédure pour un défaut de type manque de fusion en milieu de pièce. En jaune, les zones d'intérêts à conserver, en bleu, les zones à éliminer.....	71
Figure 4.3	Paramètres des simulations du manque de fusion (à gauche) et de la fissure débouchante (à droite).....	72
Figure 4.4	Imagerie TFM multimodale d'un manque de fusion produite par simulation.....	73
Figure 4.5	Imagerie TFM multimodale d'un manque de fusion simulé avec filtre à base de carte de sensibilité par la méthode de simulation successive (en bas).....	74
Figure 4.6	Imagerie TFM multimodale d'un manque de fusion simulé avec filtre à base de carte de sensibilité produite par l'algorithme de l'Université de Bristol.....	75
Figure 4.7	Imagerie TFM multimodale du manque de fusion expérimentale avec la représentation sans filtres (A), la représentation avec filtres de l'université de Bristol (B) et la représentation avec filtres basés sur les simulations (C)	76
Figure 4.8	Imagerie TFM multimodale de la fissure débouchante simulé avec la représentation sans filtres (A), la représentation avec filtres de l'université de Bristol (B) et la représentation avec filtres basés sur les simulations (C)	78
Figure 4.9	Imagerie TFM multimodale de la fissure débouchante expérimentale avec la représentation sans filtres (A), la représentation avec filtres de	

l'université de Bristol (B) et la représentation avec filtres basés sur les
simulations (C).....80

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AAI	Indicateur de la superficie des artéfacts (Artefact Area Indicator)
CND	Contrôle Non Destructif
DAS	Algorithme sommation et délais (Delay And Sum)
DMAS	Algorithme sommation, multiplication et délais (Delay, Multiply And Sum)
FMC	Acquisition de la matrice complète (Full Matrix Capture)
TFM	Focalisation en tous points (Total Focusing Method)
TOFD	Diffraction du temps de vol (Time Of Flight Diffraction)
SAFT	Technique à synthèse d'ouverture focalisée (Synthetic Aperture Focusing Technique)
SNR	Ratio signal sur bruit (Signal to noise ratio)
SH	Onde de cisaillement horizontale
SV	Onde de cisaillement verticale

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Amplitude
c_L	Vitesse du son (mode longitudinal)
c_S	Vitesse du son (mode transversal)
E	Module de Young
f	Fréquence
k	Nombre d'onde
L	Longueur d'onde du signal émis
t	Temps
T	Période
x	Position
Z	Impédance acoustique spécifique
ω	Fréquence angulaire
λ	Premier coefficient de Lamé
μ	Second coefficient de Lamé
ρ	Masse volumique
ν	Coefficient de Poisson
ϕ	Potentiel scalaire
ψ	Potentiel vectoriel
α	Coefficient d'atténuation
Pa	Pascal
s	Seconde
g	Gramme
m	Mètre
°	Degré
Hz	Hertz
B	Bel

INTRODUCTION

Les structures en acier sont omniprésentes dans les constructions modernes. Que ce soit pour la structure de bâtiments, de différents tuyaux d'acheminement, réservoirs de liquide ou de gaz ou même d'éléments de sécurité. Ces structures sont soumises à de fortes contraintes, mécaniques et chimiques, ce qui fait qu'à différents degrés, il est important que leur intégrité soit surveillée afin qu'ils effectuent leur tâche au mieux. Plusieurs techniques non destructives existent pour contrôler ces structures et elles interviennent à différentes étapes de leur conception et utilisation. Dans le but de garantir la qualité d'un produit, pendant le processus de fabrication, il est possible de contrôler la matière première, les résultats intermédiaires ainsi que le résultat final. Par contre, tous ces différents contrôles ont un coût, que ce soit monétaire ou en temps, et donc l'industrie actuelle porte un intérêt certain à améliorer et accélérer ces techniques d'inspection afin d'offrir des produits de qualité tout en restant compétitif.

Il n'est pas nécessaire d'observer longuement un bâtiment ou un pont avant de trouver des plaques d'acier soudées. Cette technique d'assemblage est très fortement utilisée, et ce depuis de nombreuses années. Ces structures vieillissantes sont souvent contraintes à des chargements importants ce qui rend leur rupture catastrophique. Ces plaques peuvent être contrôlées de plusieurs façons, l'utilisation d'huiles pénétrantes, de rayons X ou d'ultrasons n'est que des exemples parmi tant d'autres (Ditchburn *et al*).

Actuellement, si l'on se concentre sur les inspections de plaque d'acier soudée utilisant les ondes ultrasonores, il existe plusieurs techniques visant la détection des défauts. Premièrement, l'utilisation des ultrasons pour inspecter des structures en acier soudées date de la Seconde Guerre (Dijkstra *et al*). Plusieurs sondes pouvant émettre et recevoir des ondes ultrasonores étaient branchées à un indicateur à papier. L'idée était de faire traverser l'élément à inspecter d'ondes ultrasonores et d'analyser la réponse. À ce moment, l'inspection ultrasonore est venue concurrencer l'inspection aux rayons X, couramment employée à cette époque. Dans les années 80, Thompson (1983), Ogilvy et Temple (1983), Coffey et Chapman (1983), Silk (1987) ainsi que plus récemment, Charlesworth et Temple (2001) et Baskaran *et al* (2004)

proposent et améliorent une technique basée sur la diffraction temporelle de l'onde ultrasonore qui rencontre un défaut (TOFD). Cette méthode utilise deux sondes à la fois en émission et réception qui produisent chacune un faisceau à angle large. Ces sondes inondent la zone à inspecter, la soudure dans le cas qui nous intéresse, avec des ondes ultrasonores. Plusieurs traces seront donc analysées. La première trace, soit celle du parcours le plus court d'une sonde à l'autre, proviendra de la surface de la soudure. On considèrera comme dernière trace, celle du rebond au fond de la pièce. Toutes informations se trouvant entre ces deux indications se trouveront à être celles d'un éventuel défaut. Finalement, en 2016, Grotenhuis *et al*, proposa d'utiliser une sonde à éléments multiples avec un algorithme de focalisation en tous points (TFM) afin d'imager l'intérieur de la soudure et ainsi d'en détecter les défauts. Une sonde à éléments multiples pouvant produire plusieurs fronts d'onde successivement, couplée à un algorithme calculant le temps de vol nécessaire à l'onde pour atteindre différents endroits dans la pièce, rend possible l'imagerie de la zone inspectée. Depuis 2017, Sy *et al* ainsi que Budyn *et al*, s'intéressent aux analyses de plusieurs possibilités d'imageries TFM. Ils utilisent les phénomènes de conversion modale se produisant lorsque l'onde ultrasonore rencontre une interface. Cette méthode est efficace pour prédire différents chemins parcourus possibles et en faire la reconstruction. Ces chemins produisant différentes images TFM ne contenant pas les mêmes informations peuvent aider à mieux identifier et dimensionner un défaut potentiel.

0.1 Objectifs de l'étude

Cette recherche vise à comprendre et à utiliser les travaux précédemment entrepris en imagerie ultrasonore, afin de produire une image TFM unique qui contiendra toutes les indications fournies par les différents modes de reconstruction, tout en réduisant les artéfacts inhérents à ce processus. Cela dans le but de simplifier et d'accélérer la procédure d'inspection des plaques soudées. Les sous-objectifs de cette étude sont :

- Comprendre et développer l'algorithme d'imagerie TFM multimodale.
- Effectuer les simulations afin de vérifier la faisabilité de l'expérience.
- Produire les résultats expérimentaux afin de valider l'algorithme.

0.2 Structure du mémoire

Le premier chapitre présente l'état de l'art actuel concernant l'inspection des plaques d'acier soudées, plus spécifiquement avec l'utilisation des ultrasons. Le chapitre suivant installe les bases qui seront utilisées lors des simulations et du protocole expérimental. Ensuite, le troisième chapitre présente et discute des résultats obtenus en simulations et ceux obtenus expérimentalement. Finalement, le dernier chapitre expose la création de cartes de sensibilité à base de simulations afin d'amplifier les informations d'un éventuel défaut tout en réduisant les artefacts de reconstruction.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, il est présenté un ensemble de connaissances qui établissent les bases techniques nécessaires à la compréhension de ce qui est abordé dans ce mémoire. Afin de pouvoir interpréter correctement les indications présentées lors d'analyse ultrasonore de pièces métalliques soudées, il est important de bien comprendre le matériau, le procédé de soudure ainsi que les défauts qui peuvent être présents dans ce type d'ouvrage. Effectivement, selon la position et la géométrie du défaut, la réponse ultrasonore lors de l'analyse sera très différente. Il est donc primordial de bien comprendre ce que l'on cherche lors de ce type d'inspection. Suite au matériau et au procédé, plusieurs techniques d'inspection seront présentées avec leurs avantages et inconvénients. Finalement, l'analyse ultrasonore et plus particulièrement l'imagerie sera détaillée davantage puisque ce présent ouvrage apportera une proposition novatrice à son utilisation.

1.1 Le procédé de soudure et ses imperfections

Le procédé de soudure consiste à lier deux pièces métalliques de façon solide et durable. Une des techniques les plus courantes consiste à installer deux plaques de bout en bout et déposer entre les deux un métal d'apport à température de fusion. Le métal extrêmement chaud fusionne localement avec les deux plaques en créant un lien métallique sans discontinuité. Par contre, en effectuant la soudure, il est possible que des défauts s'y glissent. Selon la nature de ces défauts, certains peuvent être détectés à la surface de la pièce tandis que d'autres se situeront à l'intérieur même de la soudure. Avec les attentes des clients qui augmentent concernant la qualité des pièces soudées et considérant les normes de sécurité de plus en plus sévères, l'industrie accorde une importance considérable à l'analyse de ces structures. Afin de pouvoir correctement interpréter les indications que donnent ces analyses, il est important de comprendre le type de défaut que peut comporter une soudure.

1.1.1 La composition d'une soudure

Avant d'effectuer la soudure des plaques, une préparation adéquate de la surface où seront jointes les deux pièces est primordiale. Comme le démontre la figure 1.1, cette préparation peut prendre plusieurs formes dont celles principalement retrouvées en industrie soit : droites, en « V », en « double V ». Ensuite, un métal d'apport est injecté à haute température entre les deux pièces à joindre, ce qui crée une fusion locale. Cet ajout de métal induit un gradient de température abrupt dans le métal environnant ce qui crée une zone thermiquement affectée. Cette dernière voit un choc thermique et ses propriétés sont affectées de sorte que cela crée une zone propice à l'apparition d'imperfections diverses.

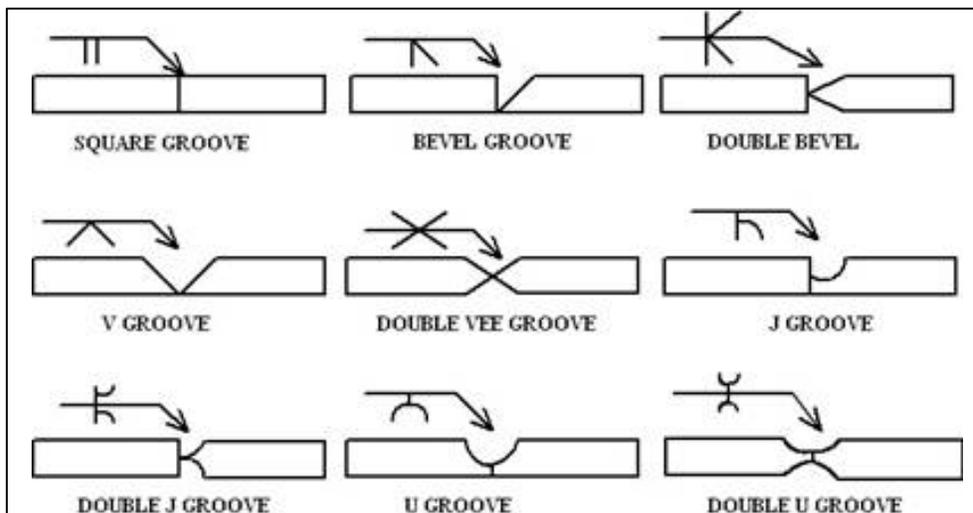


Figure 1.1 Préparation des plaques en vue de la soudure, tirée de <https://studopedia.org/12-2660.html> (2020)

1.1.2 Les défauts typiques lors du soudage

Le procédé de soudage est sujet aux imperfections (Baughurst, 2011). Comme l'indique la figure 1.2, les défauts présents dans les soudures peuvent être variés. Ils se catégorisent en différentes familles : les chevauchements, les caniveaux, les fissures, les manques de fusion, les manques de pénétration, les porosités ou les inclusions. Bien connaître la nature de ces

défauts permettra de choisir au mieux la méthode d'inspection appropriée ainsi que le type d'équipement à utiliser.

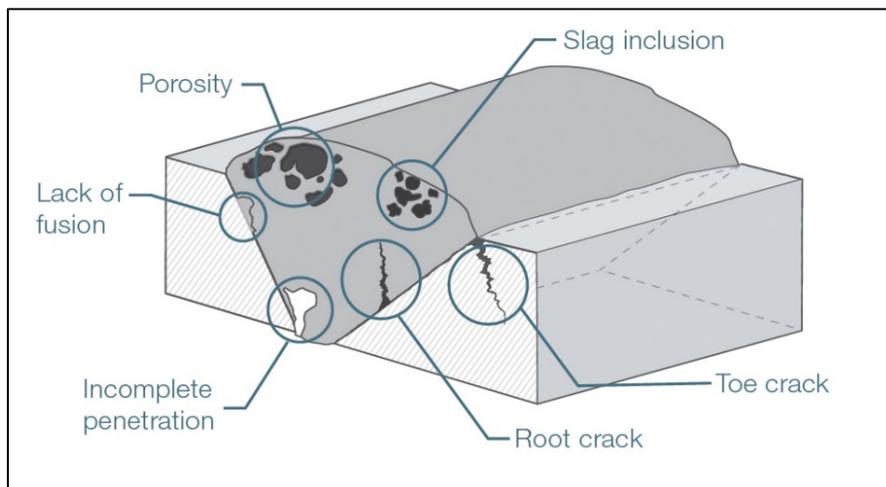


Figure 1.2 Types de défaut présent dans les soudures en « V ».
Figure tirée de www.olympus-ims.com (2020)

1.1.2.1 Les fissures

Les fissures produites lors du procédé de soudage sont très dangereuses, plus particulièrement lorsque la structure sera mise sous fortes contraintes. Les fissures représentent non seulement un endroit où l'aire de section est plus faible, mais constituent aussi un concentrateur de contraintes important. Si la structure est sujette à des chargements cycliques, les fissures amplifieront le phénomène de fatigue du matériau soit en se propageant elles-mêmes, soit en fournissant un site propice à la prolifération d'autres fissures.

Comme décrit dans l'étude de Carlucci, en 2014, les fissures peuvent prendre une configuration longitudinale ou transversale et se situeront dans la soudure même ou dans les pièces métalliques de base, avec de fortes probabilités de se retrouver dans la zone thermiquement affectée. Les fissures longitudinales sont causées principalement par le refroidissement du métal d'apport. Il existe plusieurs causes à ce phénomène : une préchauffe des pièces à souder insuffisante, un courant ou une vitesse d'avance trop élevés ou un espace à la racine trop

important. Ces facteurs induisent des différences importantes dans la vitesse de refroidissement des strates de soudure, ce qui peut mener à des délaminations.

Les fissures transversales sont principalement dues à un stress transversal induit lors du refroidissement de la zone thermiquement affectée. Le gradient de température important indique que le métal de la pièce à souder, la partie froide, a une dilatation thermique différente du métal d'apport, la partie chaude. Les différentes vitesses de rétrécissement induisent une contrainte de tension dans la zone thermiquement affectée. Pour éviter ce phénomène, il est recommandé d'augmenter la préchauffe des pièces ou d'utiliser un métal d'apport plus ductile.

1.1.2.2 Manques de fusion

Un manque de fusion est le fruit d'une fusion incomplète entre le métal d'apport et celui de la structure. Lors du procédé de soudure, il peut advenir que l'énergie thermique à un endroit donné soit insuffisante pour produire le bain de fusion complet, et donc le métal d'apport se dépose sur la pièce sans se fusionner à elle. Ce phénomène crée une interface dans le joint soudé qui représente un danger potentiel. En effet, l'interface ne contribuant pas à la surface réelle du joint crée une faiblesse en diminuant la surface effective, la contrainte à cet endroit sera donc supérieure à celle théoriquement attendue lors de la conception de l'assemblage. Lors de la recherche de ce genre de défaut, la stratégie est de cibler les interfaces théoriques entre la pièce et le métal d'apport puisque c'est à cet endroit que la fusion des deux métaux doit être effectuée (de Schiara *et al*, 2016).

1.1.2.3 Manque de pénétration

Le manque de pénétration se produit lorsque le métal d'apport ne remplit pas complètement la cavité préparée pour la soudure. Ce type de défaut crée une poche d'air importante dans la soudure ou à sa surface inférieure qui agit de façon similaire à un manque de fusion en diminuant la surface effective du joint soudé (Moyer *et al*, 1975).

1.1.2.4 Inclusions

Les inclusions représentent la présence d'un élément non désiré dans la soudure. Cet élément peut être une scorie, un élément de l'électrode tel que du tungstène ou du flux. Aussi, si la soudure n'est pas totalement submergée de gaz, de l'oxyde peut la contaminer. Ces éléments non désirables sont souvent associés à d'autres défauts tels qu'un manque de fusion. Les inclusions représentent un risque important de prolifération de fissures et réduisent la surface effective du joint soudé, augmentant considérablement la contrainte réelle qu'il subit (Bowman *et al*, 1984).

1.1.2.5 Porosités

Les inclusions étant des éléments solides venant polluer la soudure, les porosités sont leur homologue gazeux. Ces bulles de gaz piégées dans la soudure au moment de la solidification du métal peuvent avoir plusieurs causes, les plus probables sont: une protection gazeuse incomplète, des paramètres de soudure inadéquats ou simplement l'inexpérience du soudeur. Les porosités forment souvent des réseaux complexes regroupant plusieurs configurations de bulles de gaz. Plus le réseau est important, plus il diminue l'intégrité physique de la soudure, en la rendant moins résistante à une charge statique ou à la fatigue. L'effet de ces porosités sur la résistance en tension et flexion des joints soudés fut étudié par Ashton *et al*, en 1975.

1.2 Le contrôle non destructif des plaques soudées

Les défauts discutés précédemment sont la plupart du temps situés à l'intérieur même de la soudure. Il faut donc utiliser une des nombreuses techniques de contrôle non destructif pour les détecter et les caractériser. Le contrôle non destructif comprend plusieurs méthodes différentes les unes des autres, et chacune d'elles comporte ses avantages et ses inconvénients. Pour l'analyse des soudures, les méthodes les plus utilisées dans l'industrie sont le ressuage, la magnétoscopie, les rayons X et l'analyse par ultrasons (Ditchburn *et al*).

1.2.1 Ressuage et magnétoscopie

Le ressuage et la magnétoscopie sont deux techniques qui sont utilisées pour détecter des fissures de surface. Le ressuage implique d'utiliser des huiles qui interagiront avec les fissures de surface s'il y a lieu. Quant à la magnétoscopie, l'utilisation de particules métalliques révèle les potentielles perturbations que causera un éventuel défaut se situant dans un champ magnétique parcourant la soudure. Le ressuage utilisant des agents matériels et prenants en compte que la perturbation du champ magnétique n'est détectable seulement qu'en superficie de la pièce, il est effectivement impossible de pénétrer au cœur de la soudure pour l'inspection. Cette technique fut le sujet d'une étude en 1971, par Hocker *et al.*

Le principe général du ressuage est d'asperger la zone à inspecter d'un liquide pénétrant coloré ou fluorescent qui s'incrusterait dans les fissures et crevasses. Dans un second temps, un révélateur créant un contraste maximal avec l'huile pénétrante sera appliqué sur la même surface. Par capillarité, le pénétrant suinte de la fissure et crée une indication contrastante avec le révélateur, ce qui rend la détection possible. Pour une analyse plus performante, du liquide pénétrant fluorescent est utilisé et la pièce est alors inspectée en chambre noire. Ce procédé a pour avantage d'être peu coûteux en matériel. Par contre, il nécessite une exécution laborieuse. Soit parce que sa méthodologie comporte plusieurs étapes de nettoyage intensives. Ou alors, parce que des temps d'attente qui peuvent être très précis à respecter selon la technique d'imprégnation utilisée. Pour un exemple de procédure d'inspection moderne utilisant les liquides pénétrants, se référer à Endramawan, T. & Sifa, A. (2018).

Similaire aux inspections avec des liquides pénétrants, la magnétoscopie consiste elle aussi à asperger la zone de particules métalliques, soit fluorescentes ou colorées. En utilisant un appareil fournissant un champ magnétique linéaire dans la pièce à inspecter, un défaut le perturbera. Ces perturbations créent des dipôles en surface et seront visibles grâce à l'agglutinement des particules ferromagnétiques à la surface de la pièce (Blitz, 2012). Cette méthode, comparée au ressuage, est limitée à des pièces ferromagnétiques, mais elle est non seulement plus simple d'utilisation, elle permet de localiser des fissures en surface qui ne sont

pas forcément débouchantes ou qui ont leur ouverture obstruée. Par contre, cette méthode demeure une technique de détection de défauts en surface parce que plus la fissure est située profondément, moins la perturbation du champ magnétique qu'elle causera aura le potentiel de créer le dipôle magnétique essentielle à sa détection.

1.2.2 Radiographie

Lors de la radiographie, les rayons X sont utilisés pour leur habilité à pénétrer au cœur de la pièce, ce qui donne une possibilité de détection des défauts à l'intérieur même de la soudure. Ce procédé implique d'installer une source de rayons X canalisés vers la soudure à inspecter et d'appliquer derrière la pièce un film qui réagira à la quantité de rayons qu'il absorbera (Broberg *et al*, 2015). Cette méthode donne une représentation de l'intérieur de la soudure, où il sera possible de voir les imperfections. Comme proposé par Gayer *et al*, en 1990, il est possible d'automatiser cette procédure directement à la chaîne de montage.

Le procédé d'inspection par radiographie met en œuvre la capacité de la matière à résister au passage des rayons X. Une matière plus dense résistera davantage qu'une matière moins dense. Donc, avec un rayonnement constant et un temps d'exposition connu, il est possible d'estimer la densité ou l'épaisseur d'un matériau. La représentation que donne la radiographie donne une image de la densité des éléments présents dans la soudure. Il est donc possible d'identifier ces éléments, et de détecter ceux qui ne devraient pas se retrouver dans une soudure saine.

Cela va sans dire que ce procédé est très coûteux et possiblement dangereux d'utilisation. Par contre, cette technique est très efficace pour détecter les inclusions, les porosités, ainsi que les manques de pénétration et certains manques de fusion. En effets, ces défauts sont des éléments volumiques ayant une densité très différente de celle du métal de base ou du métal d'apport. Par contre, cette méthode est moins appropriée concernant les fissures et délaminations. À moins d'être si importantes qu'elles créent des poches d'air, ces défauts ne sont pas volumiques, il s'agit de discontinuités dans la cohésion du matériau, et n'ont, par conséquent, que très peu d'interaction avec les rayons X.

1.2.3 Ultrasons

En plus des rayons X, les ultrasons ont eux aussi l'habilité de pénétrer au coeur de la pièce pour l'inspecter. Ce procédé fait appel au principe de propagation d'ondes mécaniques haute fréquence dans les matériaux. Une sonde produit des ondes dans les fréquences ultrasonores, dans l'ordre des centaines de kilohertz jusqu'au mégahertz. Utilisées seules ou en réseau, les sondes produisent et reçoivent les ondes haute fréquence qui se propagent dans le matériau, interagissant avec les frontières qu'elles rencontrent. Les parcours de ces ondes sont théoriquement connus, avec leur vitesse de propagation connue elle aussi, il est possible de prévoir le temps qu'elles prendront pour parcourir certains trajets précisément. Sur un appareil de mesure qui affiche l'amplitude reçue en fonction du temps par une sonde, communément appelé « A-scan », il est possible d'identifier les échos critiques tels que la surface ou le fond de la pièce inspectée. Si une indication supplémentaire à celles attendues s'affiche, c'est qu'une partie de ces ondes ultrasonores ont interagi avec un élément qui ne devrait pas être présent dans une pièce saine. Avec le temps de vol de cette perturbation, il sera possible de localiser le défaut. L'avantage des ultrasons par rapport aux autres méthodes d'inspection, c'est qu'avec certaines limitations, les ondes ultrasonores interagiront avec tous les types de défauts mentionnés précédemment. L'inconvénient est qu'il faut avoir une idée préalable du type de défaut recherché ainsi que de sa localisation probable afin de situer la ou les sondes aux bons endroits et d'utiliser les bons modes de propagation. Cette technique est efficace lors de recherche de manque de pénétration (Hardt & Katz, 1984) ou alors de recherche de fissure de surface (Arakawa *et al*, 1985).

1.3 Introduction aux ultrasons et aux ondes de volume

Dans le cadre de l'inspection de soudures par l'utilisation d'ondes ultrasonores, il est nécessaire de bien comprendre les principes physiques concernant la propagation des ondes traversant différents matériaux. La limite audible théorique étant fixée à 20 kHz, toute onde mécanique ayant une fréquence au-delà sera caractérisée comme étant ultrasonore. Ces ondes ont été étudiées par le passé (Cheeke, 2012; Gazanhes & Jessel, 1976; Shull, 2016) et ces travaux permettront de prévoir leur comportement.

1.3.1 Propagation des ondes de volume ultrasonores

Les ondes ultrasonores sont produites par une perturbation, soit une contrainte de tension, de compression ou de cisaillement sur un médium. Si ce dernier est suffisamment vaste, l'onde ultrasonore prendra forme. Le type de contrainte commandera son comportement suivant l'axe de propagation. Une contrainte dans le médium engendrera un déplacement des molécules dans la matière. Ce déplacement créera une onde longitudinale suivant son vecteur de propagation ainsi qu'une onde de cisaillement suivant son vecteur normal. On désigne ces lois de comportement par le terme : mode de propagation. La figure 1.3 représente deux modes qui peuvent être présents à différents niveaux énergétiques lors de la propagation d'ondes ultrasonores : soit le mode longitudinal (L) et le mode de cisaillement. Dans un volume fini, une plaque par exemple, selon la direction de polarisation, le mode de cisaillement peut être vertical (SV) ou horizontal (SH).

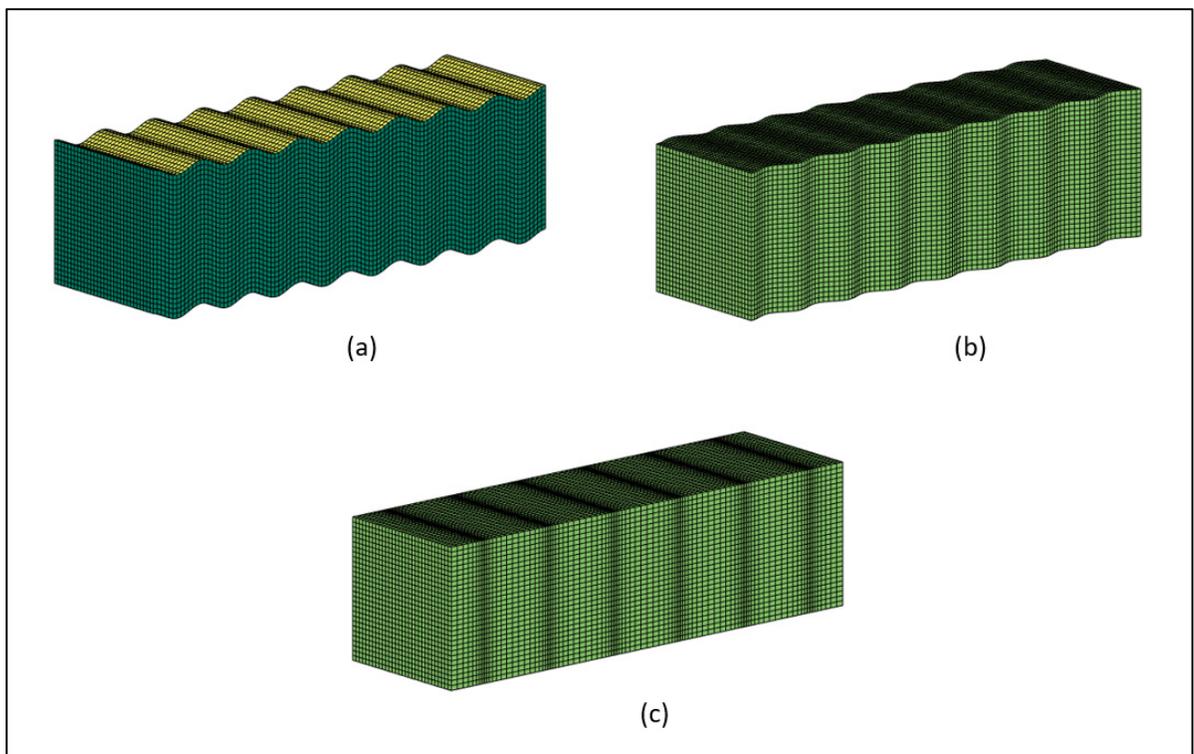


Figure 1.3 Déformation liée à la propagation d'une onde dans un milieu homogène isotrope : (a) onde de cisaillement verticale (SV), (b) onde de cisaillement horizontale (SH), (c) onde longitudinale (L)

1.3.1.1 Formulation des équations de propagation d'ondes ultrasonores

À la fin du 18^e siècle, d'Alembert fut le premier scientifique à formuler une équation de propagation dans un milieu à une dimension :

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

Cette équation contient les variables suivantes : le déplacement (u), la position (x), la vitesse du son en fonction du milieu (c) ainsi que le temps (t). Lors d'une perturbation sinusoïdale, la solution de cette équation prend la forme suivante :

$$u(x, t) = A \cos(\omega t - kx) \quad (1.2)$$

Avec :

- La vitesse angulaire ou la pulsation en fonction de la période ($\omega = \frac{2\pi}{T}$)
- Le nombre d'onde en fonction de la longueur d'onde ($k = \frac{2\pi}{\lambda_{wl}}$)

Dans un milieu à trois dimensions, homogène et isotrope, l'équation de Navier sans force de volume peut exprimer le comportement des ondes :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (1.3)$$

Les variables de l'équation (1.3) sont : la densité du milieu (ρ), les coefficients de Lamé (λ, μ) peuvent être obtenus pour un milieu précis par le module d'élasticité (E) et le coefficient de Poisson (ν) décrit par l'équation (1.4) :

$$\begin{cases} E = \mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \\ v = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \end{cases} \quad (1.4)$$

Finalement, la décomposition de Helmholtz permet d'exprimer le vecteur déplacement (\vec{u}) comme étant la somme de deux composantes, soit un champ de déplacement à rotation nulle (\vec{u}_L) et un champ de déplacement sans divergence (\vec{u}_T). le vecteur déplacement (\vec{u}) est donc la somme du gradient d'un champ scalaire (ϕ) et du rotationnel d'un champ vectoriel ($\vec{\Psi}$).

$$\vec{u} = \vec{\nabla}\phi + \vec{\nabla} \times \vec{\Psi} = \vec{u}_L + \vec{u}_T \quad (1.5)$$

En utilisant l'équation (1.4) et (1.5), on peut isoler la portion longitudinale du mouvement avec l'équation (1.6) ainsi que la portion représentant le mouvement de cisaillement avec l'équation (1.7).

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = c_L^2 \nabla^2 \phi \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = c_S^2 \nabla^2 \Psi \quad (1.7)$$

C'est donc dire que la vitesse longitudinale (c_L) et celle de cisaillement (c_S) seront gouvernées par les équations (1.8).

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.8)$$

Ces équations prouvent que dans un milieu vaste à trois dimensions, homogène et isotrope, seulement deux types d'ondes peuvent se propager indépendamment : les ondes longitudinales

(L) et les ondes de cisaillement (S). Les équations (1.9) et (1.10) représente les solutions des équations précédentes à une perturbation de type harmonique.

$$\phi, \Psi = A e^{i(\omega t - k_{L,S}x)} \quad (1.9)$$

$$k_{L,S} = \frac{\omega}{c_{L,S}} \quad (1.10)$$

Avec comme variable : l'amplitude (A), la pulsation (ω), le temps (t), le nombre d'onde longitudinale ou de cisaillement ($k_{L,S}$), la direction de propagation (x) et les vitesses de l'onde longitudinale ou de cisaillement ($c_{L,S}$).

1.3.1.2 Formulation de l'équation d'atténuation

Lorsqu'une onde ultrasonore se propage dans un matériau, elle est soumise au phénomène d'atténuation. Ce phénomène a pour incidence de réduire l'amplitude de l'onde en fonction de la distance parcourue. Selon cette équation :

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (1.11)$$

Où A représente l'amplitude de l'onde, A_0 son amplitude initiale, α le coefficient d'atténuation et x la distance parcourue. Le coefficient d'atténuation est déterminé par différentes caractéristiques résultant de la combinaison de la sonde utilisée et du matériau inspecté, telles que l'absorption, la diffraction ou la diffusion. Somme toute, le principe général qui en découle est que plus la fréquence de l'onde est importante, plus l'atténuation sera importante, ce qui réduira la distance d'inspection.

1.4 L'impédance acoustique spécifique

Kinsler *et al* (1999) définissent l'impédance acoustique spécifique comme étant une propriété intensive du milieu à résister lorsqu'il est traversé par une onde mécanique. Cette propriété est définie par le rapport entre la pression acoustique et la vitesse de la particule dans le milieu. Pour une onde de volume, ce rapport est défini comme suit :

$$Z = \rho c \quad (1.12)$$

Où l'impédance acoustique spécifique (Z) est le produit de la masse volumique du milieu (ρ) et de la vitesse de l'onde (c). Considérant que les ondes longitudinales n'ont pas la même vitesse que les ondes transversales, un même milieu aura deux impédances acoustiques spécifiques différentes, une pour l'onde longitudinale et une pour l'onde transversale.

1.5 Le phénomène de conversion de mode

Lorsqu'une onde ultrasonore rencontre une interface avec un milieu ayant une impédance acoustique différente, une partie de l'onde sera transmise et l'autre sera réfléchi.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad T = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (1.13)$$

L'équation 1.13 donne les coefficients de pression acoustique en réflexion (R) et en transmission (T), en fonction de l'impédance acoustique spécifique du milieu en amont (Z_1) et celui en aval (Z_2). Selon la loi de Snell-Descartes, l'angle d'incidence et les différentes vitesses du son dans les milieux impliqués induiront un changement de direction du vecteur de propagation de l'onde. De plus, étant donné que, dans un matériau donné, l'onde longitudinale n'a pas la même vitesse de propagation que l'onde transversale, selon les coefficients de réflexion et de transmission, ces derniers distribueront l'énergie de l'onde incidente entre le mode longitudinal et le mode transversal en fonction de son angle d'incidence.

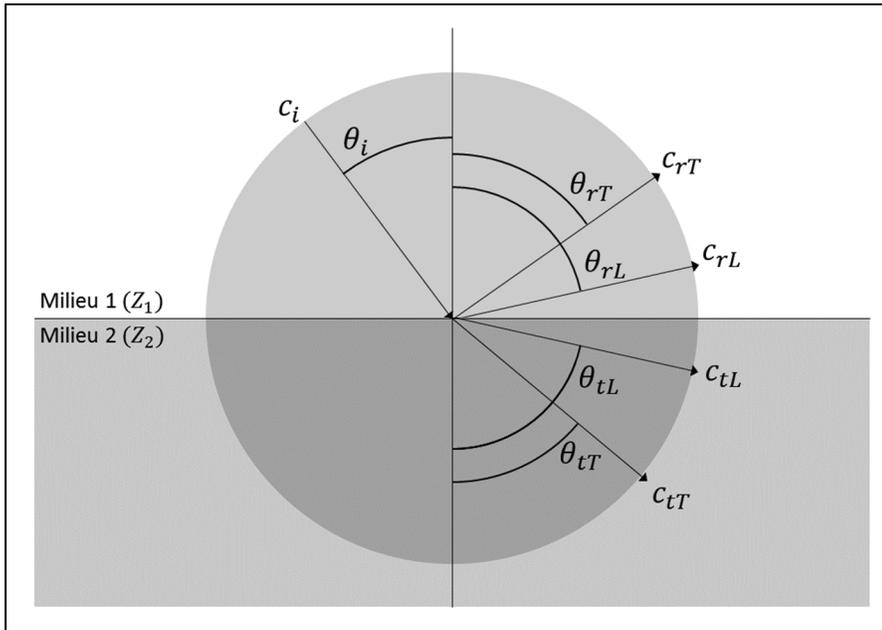


Figure 1.4 Interaction d'une onde incidente avec une interface entre deux milieux avec une impédance acoustique spécifique qui est différente

$$\frac{\sin \theta_i}{c_i} = \frac{\sin \theta_{rL}}{c_{rL}} = \frac{\sin \theta_{rT}}{c_{rT}} \quad (1.14)$$

$$\frac{\sin \theta_i}{c_i} = \frac{\sin \theta_{tL}}{c_{tL}} = \frac{\sin \theta_{tT}}{c_{tT}} \quad (1.15)$$

Où (c_i) représente la vitesse de propagation de l'onde incidente, (θ_i) son angle d'incidence formé entre son vecteur de propagation et la normale à l'interface; (θ_{rL} , c_{rL} et θ_{rT} , c_{rT}) les angles et vitesses de réflexion des ondes longitudinale et transversale, ainsi que (θ_{tL} , c_{tL} et θ_{tT} , c_{tT}) les mêmes paramètres en transmission.

Ce phénomène se produisant à chaque interface, il est possible d'identifier des chemins précis qui seront parcourus. Selon la figure suivante, quand l'onde partant de la sonde rencontrera la pièce, il y aura transmission et réflexion. Les réflexions seront détruites par la géométrie du sabot. En se transmettant, une partie de l'onde longitudinale sera convertie en onde

transversale. Par la suite, si l'une d'elles rencontre le fond de la pièce, il y aura réflexion et conversion de mode. Finalement, si parmi ces ondes, l'une d'elles rencontre un défaut, il y aura aussi une réflexion ainsi qu'une possible conversion de mode. La transmission sera possible seulement pour certains types de défauts, comme une inclusion par exemple qui représente un changement de densité et non pas une discontinuité dans les matériaux. En isolant une onde en particulier, on identifie son cheminement par ses conversions. La figure 1.5 démontre une onde « TT-T » représentant une onde transversale (en vert) transmise à la pièce due à une conversion avec la surface, se reflétant avec le fond de la pièce ainsi que sur le défaut en subissant une nouvelle conversion en mode longitudinale (en rouge) en traversant le sabot pour se rendre à la sonde.

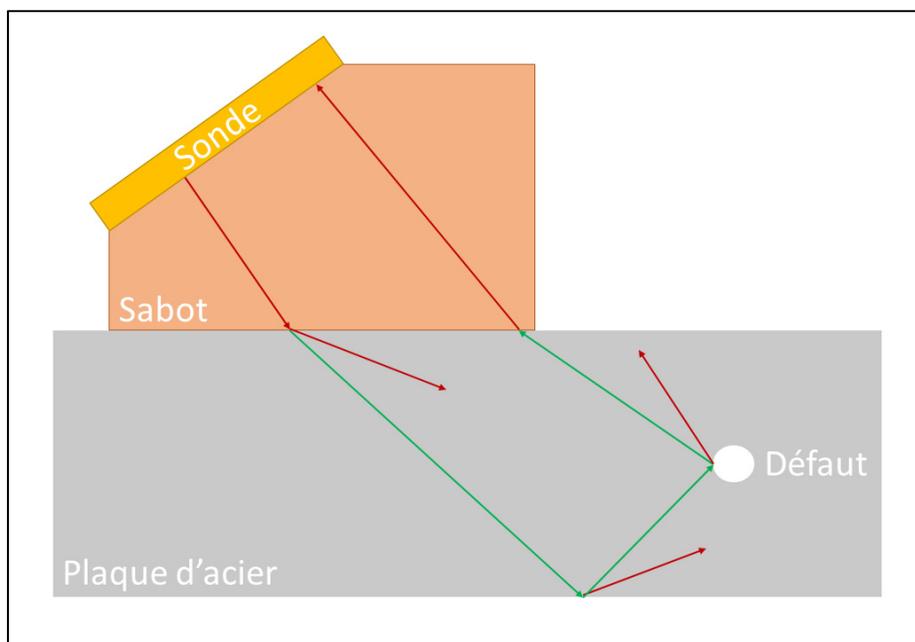


Figure 1.5 Phénomène de conversion des ondes lors d'interactions avec des interfaces. En rouge, les ondes longitudinales et en vert les ondes transversales

1.6 Principes d'inspection ultrasonore

En pratique, une inspection ultrasonore comprend un élément qui peut produire des ondes ultrasonores que l'on appelle la sonde. La figure 1.6 représente schématiquement les

constituants de cette dernière. Contenu dans le boîtier, les éléments piézo-électriques sont fixés sur une lame quart-d'onde qui les protège de l'abrasion et maximise l'énergie transmise à la pièce.

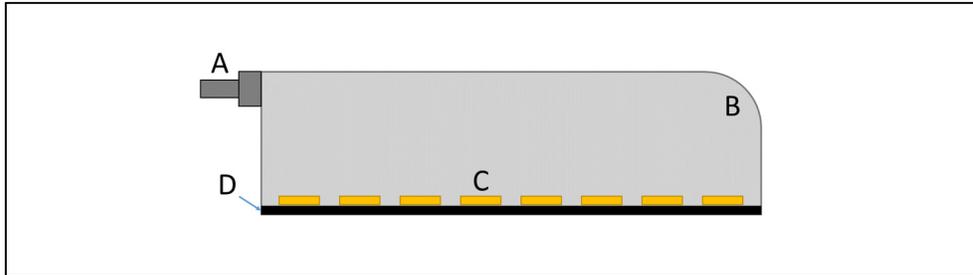


Figure 1.6 Exemple d'une sonde à éléments multiples, représentant le câble d'alimentation (A), le boîtier (B), les éléments piézo-électriques (C) et la lame quart d'onde (D)

En appliquant directement la sonde sur la pièce à inspecter, il est possible d'émettre et de recevoir des ondes ultrasonores dans la pièce. Lorsqu'on désire en éloigner la source ou imposer un angle précis à l'onde produite, il est possible d'utiliser un sabot. Ces derniers représentent un médium connu et contrôlé positionné entre la sonde et la surface de la pièce. La figure 1.7 représente un ensemble de sabot angulaire (en haut) et plat (en bas) couplé avec une sonde typique.



Figure 1.7 Exemple de sabots tiré de www.Zetec.com (2020)

Les ondes émises voyageront et interagiront avec toute interface entre deux milieux présentant une différence d'impédance acoustique spécifique, une partie de leur énergie se reflétera vers la sonde, le reste sera transmis. En traçant sur un graphique montrant l'amplitude de l'onde reçue en fonction du temps (A-scan), il sera possible d'identifier à quel temps les indications apparaissent. En analysant le temps de vol de ces perturbations, il est possible d'identifier leur positionnement. Quelques indications servent de barème comme la surface de la pièce (en immersion) ou le fond de la pièce.

1.6.1 Émission et réception avec une sonde en contact

La figure 1.8 représente une inspection ultrasonore classique pour découvrir l'épaisseur d'un matériau ou la présence d'une fissure ou d'une délamination. La technique est de mettre la sonde directement en contact avec la pièce à inspecter par l'intermédiaire d'un couplant. De cette façon, à l'aide des ondes longitudinales, il est possible d'identifier le fond de la pièce ainsi qu'une possible imperfection. Dans cette configuration, tout défaut n'ayant pas de surface perpendiculaire au vecteur de propagation reflétera moins d'énergie et sera plus difficile à repérer. Sur le A-scan représenté à la figure 1.8, plusieurs échos représentent le fond de la pièce. Ces différentes perturbations indiquent chaque rebond que l'onde ultrasonore fait entre le fond de la pièce et la surface. Il est ainsi possible de calculer l'influence de l'atténuation en analysant leur perte d'amplitude respective. Si un défaut est présent dans la pièce, une indication apparaîtra avant le premier écho de fond. Si la longueur d'onde est suffisamment courte par rapport à la taille d'une discontinuité, l'amplitude reçue est directement affectée par la taille et l'orientation de celle-ci. Deux facteurs sont importants à prendre en compte, l'énergie de la perturbation et la perte d'amplitude de l'écho de fond. Plus l'amplitude de l'écho du défaut est importante, plus sa surface sera imposante ou son alignement sera perpendiculaire au vecteur de propagation de l'onde. Aussi, une énergie de perturbation faible combinée avec une baisse importante d'amplitude de l'écho de fond signifie que la surface du défaut est orientée de façon à refléter l'énergie dans une direction différente de celle qui l'acheminerait à la sonde.

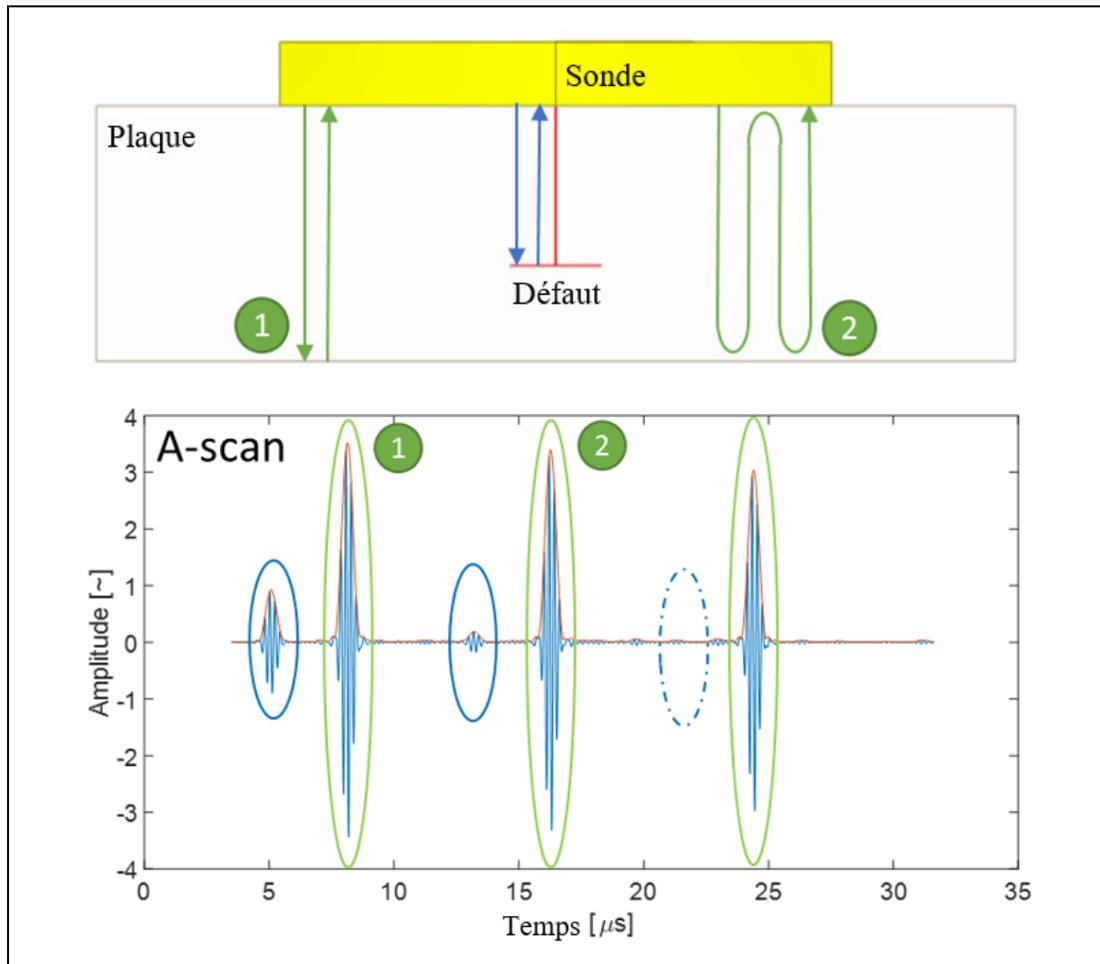


Figure 1.8 Représentation schématique d'une inspection ultrasonore et son A-scan correspondant

1.6.2 Émission et réception avec une sonde et un sabot

Pour l'inspection de soudure, la méthode d'inspection en contact ne peut pas être utilisée en raison de la géométrie convexe du cordon de soudure. L'utilisation d'un sabot induit un angle au vecteur de propagation de l'onde ce qui rend l'inspection possible. La différence de vitesse de propagation des ondes acoustiques entre les matériaux constituant le sabot et la pièce induit un phénomène de réfraction qu'il faut prendre en compte. Non seulement l'angle du vecteur de propagation changera, mais l'énergie pourrait se séparer entre deux modes. Selon la loi de Snell-Descartes, il est possible d'identifier l'angle qu'auront les modes longitudinal et transversal. Ce phénomène nuit aux inspections conventionnelles. Les deux modes n'ayant pas

la même vitesse de propagation, un défaut apparaîtra plusieurs fois sur le A-scan, ce qui polluera la lecture. Avec une bonne connaissance des matériaux utilisés, il est cependant possible de choisir un angle critique qui fera disparaître presque complètement l'énergie de l'onde longitudinale en conservant la présence de l'onde transversale.

1.7 Algorithmes d'imagerie

En inspection ultrasonore, il est nécessaire de sélectionner une zone à inspecter ainsi qu'une direction d'inspection. Selon la direction de propagation, seulement certains défauts seront détectés. Il est donc important d'avoir une idée préalable du type de défaut recherché ainsi que de son orientation. Soit en déplaçant la sonde ou en utilisant des sondes comportant plusieurs éléments pouvant être déclenchés individuellement, il est possible de produire une image sommaire de la zone couverte par la sonde, le B-scan. La figure 1.9 représente un exemple de B-scan de la même situation que celle imagée à la figure 1.8. Cette dernière est créée en affichant côte à côte les différents A-scan provenant de chaque déplacement ou de chaque élément de la sonde. On y voit notamment le défaut ainsi que l'écho de fond. Par contre, avec un balayage angulaire ou une sonde à éléments multiples, il est possible de détecter plusieurs types de défauts en minimisant l'influence de leur géométrie et orientation.

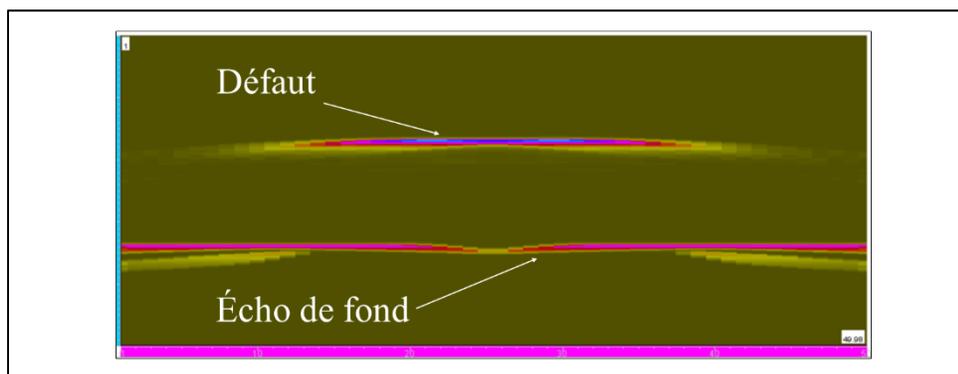


Figure 1.9 Exemple de B-scan représentant la même situation que la figure 1.8, produit avec une sonde à éléments multiples

1.7.1 Imagerie par technique à synthèse d'ouverture focalisée (SAFT)

La technique à synthèse d'ouverture focalisée (SAFT) est un algorithme d'imagerie qui fragmente la zone à inspecter en pixel pour en faire l'imagerie (Nanekar *et al*, 2015). Chaque pixel représentant une localisation précise de la pièce, avec des coordonnées spatiales connues. Avec la vitesse du son dans les matériaux inspectés connue, il est possible de calculer le temps de vol d'un aller-retour de l'onde ultrasonore, d'une position émettrice à un pixel donné. Pour chaque élément, ou position de la sonde, avec ce temps de vol et le A-scan correspondant, l'amplitude est alors sommée pour le pixel. En effectuant cette opération pour chacun des pixels, certaines indications, comme celle du fond de la pièce ou d'un défaut par exemple, s'additionneront et apparaîtront clairement sur l'image.

La figure 1.10 présente la sonde avec cinq éléments piézo-électriques. Chaque élément reçoit l'information du trou et de l'écho de fond en effectuant leur A-scan (en rouge sur la figure). L'information provenant du trou est plus tôt si l'élément est plus près du trou, plus tard s'il est plus loin. En discrétisant la zone à inspecter, l'information du défaut s'affichera en cercle (en vert sur la figure). Par processus similaire à une triangulation spatiale, le phénomène d'interférence constructive fera apparaître le défaut là où les cercles se rejoignent.

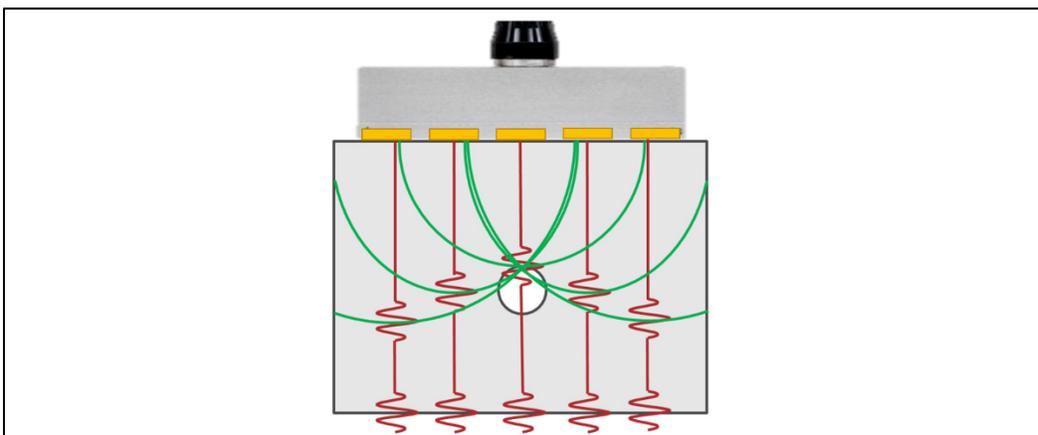


Figure 1.10 Représentation schématique de la technique de reconstruction à synthèse d'ouverture focalisée (SAFT). Avec en vert la perturbation du défaut sur le A-scan (en rouge) de chacun des éléments (en jaune)

1.7.2 Imagerie TFM

Holmes *et al* (2004) explique que, contrairement au SAFT qui pourrait être utilisé avec une sonde mono élément en la déplaçant très précisément, l'algorithme TFM doit être utilisé avec les données produites par une sonde à éléments multiples. L'imagerie TFM utilise le même principe de pixellisation spatiale que le SAFT, mais il somme davantage que les simples aller-retour entre l'émetteur et le pixel. Cet algorithme classe les données de chaque A-scan dans une matrice complète d'acquisition (Full Matrix Capture, FMC). Cette matrice prend la forme suivante :

$$\begin{array}{c} \text{Récepteur :} \\ \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \\ \text{Émetteur :} \end{array} \begin{bmatrix} x & x & x & x \\ x & x & x & x \\ x & x & x & x \\ x & x & x & x \end{bmatrix}$$

Où x représente le A-scan correspondant au couple émetteur et récepteur.

Le principe de la TFM est de séparer les différentes étapes d'émission en évènement. Un évènement correspond à l'émission sur un élément et la réception par tous les éléments. Selon le principe de la pixellisation, le volume de la pièce est donc discrétisé en points de focalisation où leur position est connue par rapport à un référent. Avec la position des différents éléments de sonde déterminée selon le même référent, avec l'équation de Pythagore, il est possible de calculer la distance qui sépare chaque élément de chaque point focal.

$$d = \sqrt{(x_{e,r} - x_{pf})^2 + (y_{e,r} - y_{pf})^2 + (z_{e,r} - z_{pf})^2} \quad (1.16)$$

Où (d) représente la distance qui sépare un élément d'un point focal, $((x, y, z)_{e,r})$ représente la position dans l'espace de l'élément émetteur ou récepteur et $((x, y, z)_{pf})$ représente la position dans l'espace du point focal.

La figure 1.11 représente le principe schématique de l'imagerie TFM. La pièce est discrétisée en points focaux (points bleus). Cette figure montre spécifiquement le premier évènement, soit l'émission par l'élément numéro 1 (flèche jaune), qui rejoint un point focal. Suite à cela, si un réflecteur est présent à ce point focal, ce dernier reflétera l'onde vers tous les éléments de la sonde (flèches vertes), ces derniers enregistrant la perturbation.

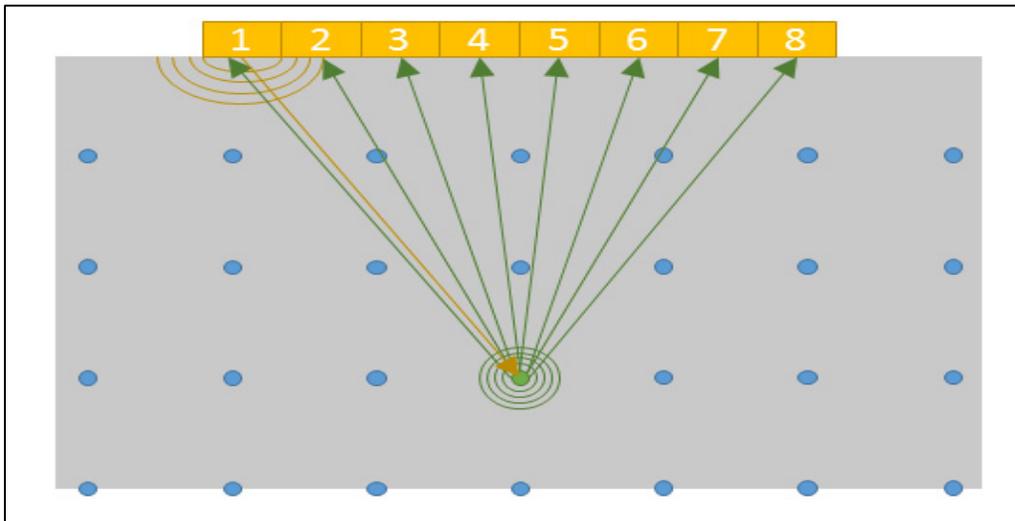


Figure 1.11 Représentation schématique du principe de l'imagerie TFM, avec les éléments de la sonde (en jaune) et les points focaux (en bleu)

Suite au calcul de la distance entre l'émetteur et le point focal, ainsi que la distance entre l'élément récepteur et le même point focal, les deux distances sont additionnées et converties en amplitude à partir du A-scan correspondant au couple émetteur et récepteur contenu dans la FMC. En répétant cette opération pour chaque couple émetteur et récepteur, on obtient plusieurs amplitudes qui peuvent être additionnées. En créant une carte imageant les points focaux selon leur position dans la pièce et en attribuant une échelle de couleur selon leur amplitude, il est possible de faire l'imagerie de la pièce.

La figure 1.12 donne l'exemple du résultat d'une imagerie TFM. On y voit l'écho du fond de la pièce très présent parce que ce dernier représente une surface perpendiculaire de grande envergure qui reflète une grande quantité d'énergie lors de chaque évènement. Il est aussi

possible d'y voir la partie supérieure du défaut. Cette représentation à la forme d'un point au sommet du défaut circulaire. Cet emplacement est la partie du défaut qui reflète le plus d'énergie vers l'ensemble des éléments de la sonde. Les artéfacts de reconstruction sont les endroits clairs sur l'image. Ces indications sont des échos virtuels du défaut qui apparaissent lors de la reconstruction. Ces artéfacts sont nuisibles, car ils augmentent significativement les chances de mésinterpréter l'information contenue dans l'image.

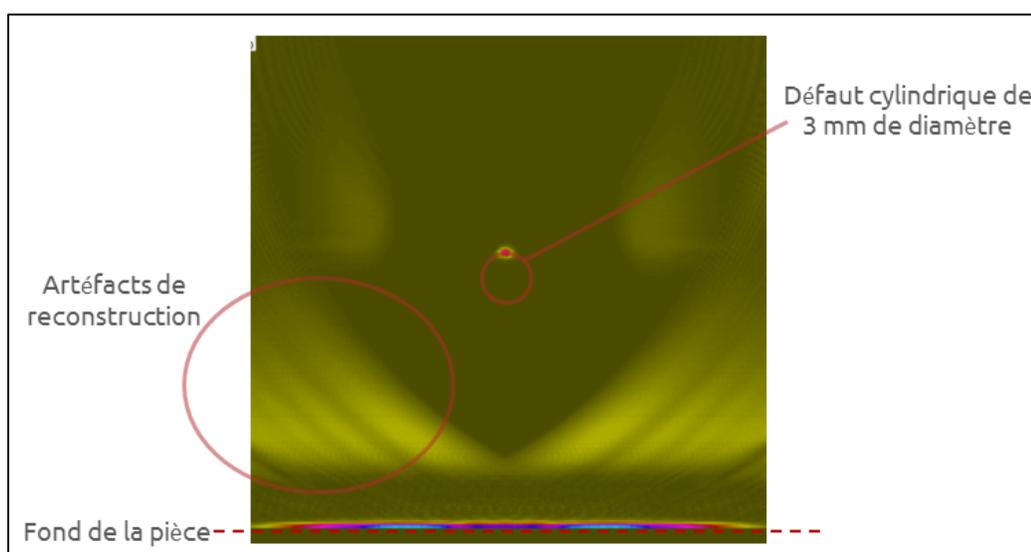


Figure 1.12 Imagerie ultrasonore TFM d'un défaut cylindrique

Suite au développement de la méthode d'imagerie TFM, Holmes *et al* (2008) publièrent une méthode de balayage pour construire une FMC plus complexe à partir d'une sonde avec un nombre minimal d'éléments. L'étude démontre qu'en déplaçant la sonde d'une distance égale au pas des éléments, il est possible de regrouper les données de façon à construire une FMC correspondant à une sonde au nombre d'éléments voulus. La figure 1.13 tirée de cet article représente l'amélioration significative de l'image utilisant un balayage progressif au lieu d'une sonde statique. Les défauts, positionnés en demi-cercle, sont définis plus adéquatement selon le balayage que selon l'emplacement statique, de par leur amplitude relative ainsi que par la précision de l'indication.

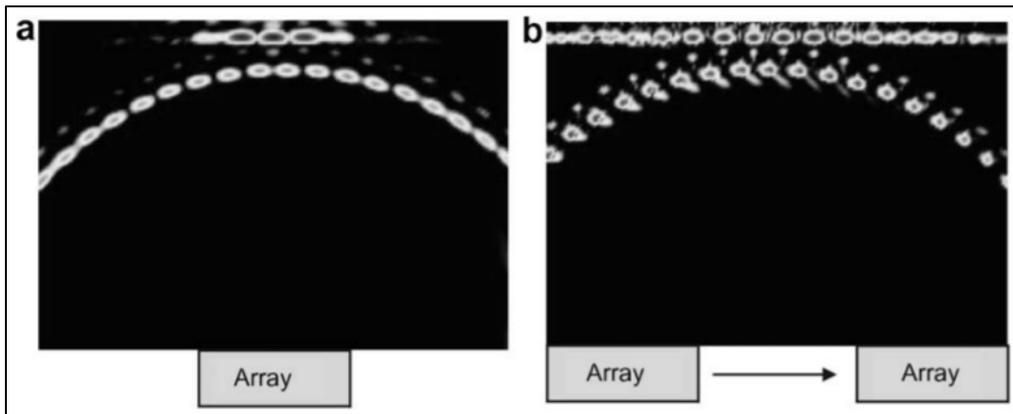


Figure 1.13 Imagerie TFM (échelle à 40 dB) d'un bloc d'acier utilisant une sonde 32 éléments. (a) Analyse fixe utilisant une normalisation de 16 et (b) un balayage de 100 mm le long de l'échantillon. Figure tirée de Holmes *et al* (2008)

Parallèlement, Wilcox *et al* (2007), analysèrent la performance de la méthode d'imagerie TFM pour la détection de défaut selon leur orientation et leur spécularité. L'étude a démontré la capacité de cette méthode d'imagerie à distinguer efficacement une fente d'un trou à fond plat, ainsi que d'identifier leur orientation. Hunter *et al* (2010) ainsi que Le jeune *et al* (2015), développèrent une méthode qui utilisait la TFM pour faire l'imagerie d'échantillon ayant une surface à la géométrie complexe. Cet algorithme utilise une boucle de raffinement où, dans un premier temps, il effectue un processus d'imagerie pour détecter la surface de l'échantillon, ensuite il calcule une loi de focalisation, et refait l'imagerie utilisant cette loi.

La figure 1.14, tirée de l'article de Hunter *et al* (2010), représente les performances de l'algorithme d'imagerie TFM prenant en compte une surface complexe de l'échantillon. En (a), on présente l'imagerie d'une pièce à surface plane contenant cinq défauts. On y repère facilement les défauts ainsi que l'écho de fond. L'image (b) représente l'imagerie TFM classique d'une pièce ayant une surface sinusoïdale. L'effet de la surface complexe brouille l'image et il devient difficile d'identifier les défauts puisque les indications qu'ils produisent sont confuses et troubles. L'image (c) représente l'objectif idéal. Elle est produite en imposant à l'algorithme d'imagerie TFM la surface comme étant une sinusoïde parfaite. On voit une nette amélioration de la précision de l'indication des défauts. Ces derniers sont situés aux bons

endroits, mais leur amplitude est similaire aux artefacts que contient l'image, ce qui pourrait nuire à leur interprétation. Finalement, en (d), l'algorithme utilise une première étape d'imagerie pour détecter la surface réelle et utilise ces données pour effectuer l'imagerie TFM de la pièce. Il est possible d'observer que, malgré un léger décalage, les informations des défauts sont précises et d'amplitude suffisante pour les distinguer des artefacts.

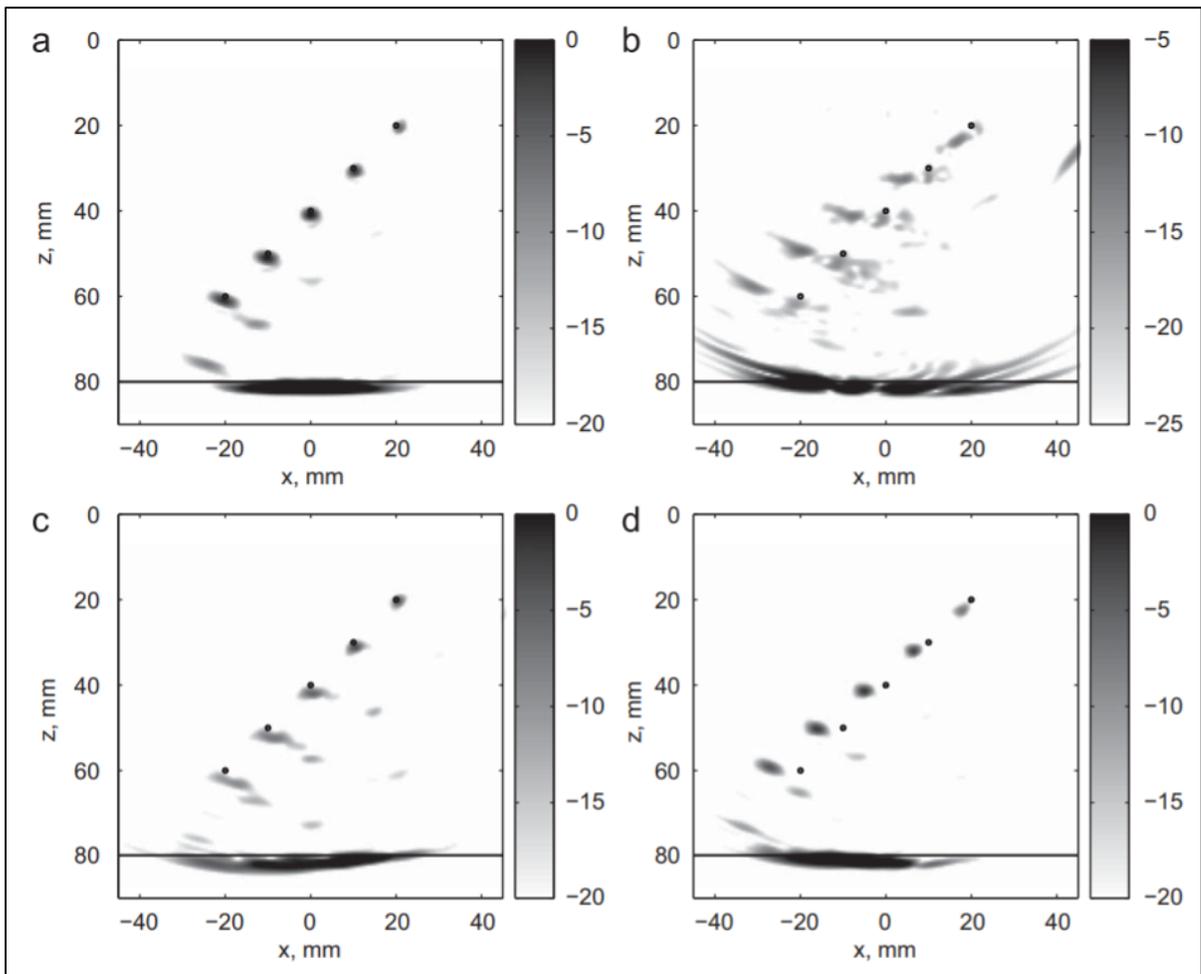


Figure 1.14 Imagerie TFM avec défauts et fond de la pièce identifiés. (a) L'imagerie de l'échantillon de référence à surface plane, ainsi que les imageries de l'échantillon à surface sinusoïdale (b) en assumant sa surface comme plane, (c) en assumant la vraie géométrie de la surface, et (d) avec le procédé autofocus. Figure tirée de Hunter *et al* (2010)

Ensuite, en 2013, Yan *et al* ainsi que Li *et al* ont appliqué la méthode de l'imagerie TFM à l'inspection des matériaux composites. La première étude (Yan *et al*) utilise l'imagerie TFM pour analyser 3 trous de côté dans un bloc de polymère renforcé à la fibre de carbone. Ils utilisent la loi de Snell-Descartes pour prédire le changement d'angle des faisceaux ultrasonores causé par les différentes couches contenues dans l'échantillon. Ils considèrent chaque couche comme étant indépendante, homogène et isotrope. Ils utilisent ensuite un point d'entrée et de sortie pour construire un modèle d'homogénéisation de la trajectoire. La figure 1.15, tirée de cet article, représente le procédé d'homogénéisation de la trajectoire d'une onde traversant différents milieux à l'impédance acoustique spécifique différente. Ce procédé calcule le point de sortie théorique à chaque changement de matériau et prédit le point de sortie finale (B) selon le point d'entrée initial (A).

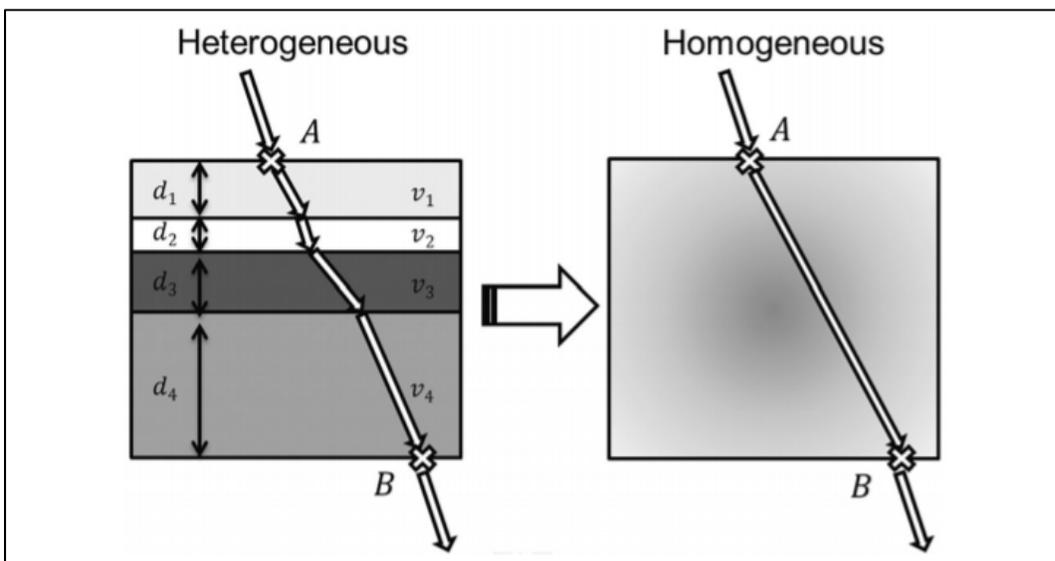


Figure 1.15 L'homogénéisation du trajet d'un faisceau ultrasonore traversant plusieurs couches de matériau. Figure tirée de Yan *et al* (2013)

La seconde étude (Li *et al*) modifie l'angle d'ouverture de la sonde et ajoute des filtres fréquentiels afin d'améliorer l'image. Ils améliorent l'image en optimisant ces deux paramètres et en prenant en compte l'anisotropie des vitesses de propagation à travers les couches du matériau composite. Lors des tests empiriques, les résultats démontrent une amélioration significative du ratio signal sur bruit de 15 à 20 dB.

En 2015, Matrone *et al*, développèrent un algorithme optimisant l'utilisation de la FMC. L'imagerie TFM utilise un algorithme de sommation et de délais (DAS), qui additionne les temps de vol en un indice de délai et additionne les amplitudes des différents A-scan. Dans le but d'augmenter le contraste et la résolution de l'image, Matrone *et al*, développèrent l'algorithme de sommation, multiplication et délai (DMAS). La figure 1.16 présente le procédé DAS et DMAS. Le procédé DMAS est schématisé comme une pyramide inversée où entre chaque étape de la sommation DAS (encerclé en rouge), on ajoute une étape de multiplication avec chaque image d'un événement chronologiquement supérieure.

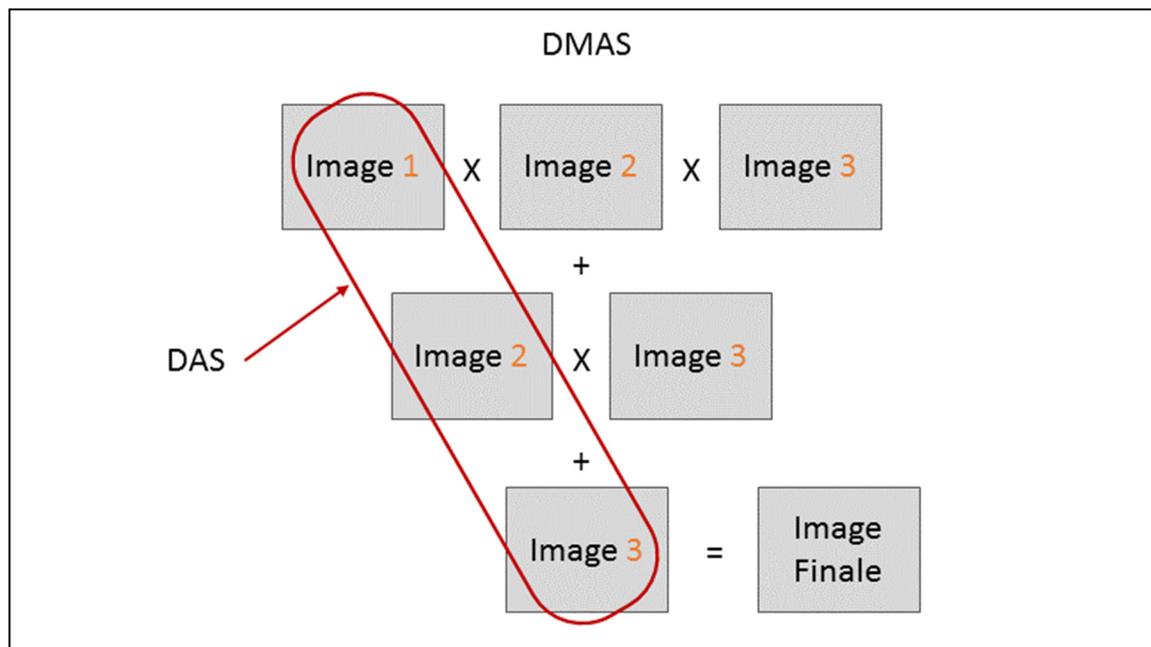


Figure 1.16 Représentation schématique de l'algorithme de sommation, multiplication et délai

Cette méthode amplifie les phénomènes d'interférence constructive et destructive, ce qui amplifie les informations se trouvant sur plusieurs images et diminue les informations non cohérentes. La figure 1.17, tirée de Matrone *et al* (2015), représente les résultats de l'imagerie TFM utilisant la technique DMAS. La précision du défaut est accrue, car dans les deux cas l'amplitude est similaire, mais la superficie des artefacts est nettement diminuée lors de l'utilisation du DMAS.

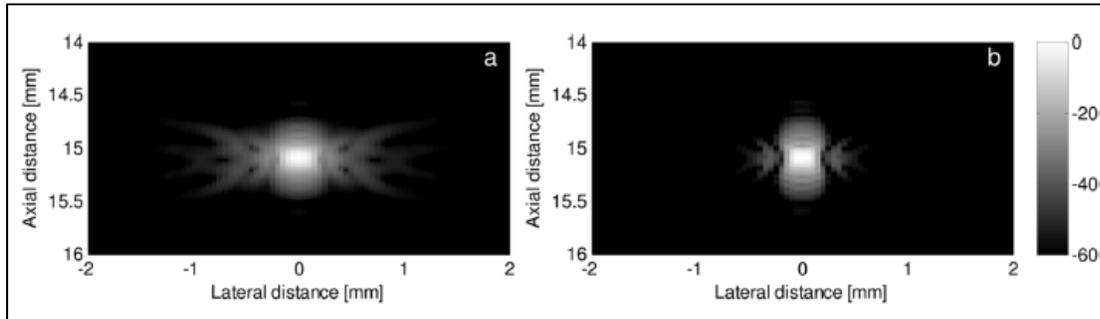


Figure 1.17 Résultats de l'imagerie TFM d'un trou de côté utilisant l'algorithme DAS (à gauche) et l'algorithme DMAS (à droite). Figure tirée de Matrone *et al*

1.7.3 Imagerie TFM multimodale

Zhang *et al* (2010) ont été dans les premiers à vouloir exploiter la conversion de mode en imagerie TFM. Selon le phénomène de conversion qui fût élaboré préalablement, il est possible de suivre des ondes différentes selon leur parcours. Lorsque la géométrie de la pièce est connue efficacement, plusieurs reconstructions TFM deviennent possibles. Ces reconstructions utilisent la même FMC, mais calculent les temps de vol différemment selon le parcours sélectionné. La figure 1.18 détaille quelques parcours possibles qui seront utilisés lors d'une reconstruction multimodale. À noter que plusieurs autres modes pourraient être pertinents à utiliser. Sur la figure, on identifie la sonde en jaune, le sabot en orange et l'échantillon en gris. L'onde ultrasonore longitudinale (flèches rouges) traverse le sabot et rencontre l'interface entre le sabot et la pièce. Suite à cette rencontre, une partie de l'onde pourra se convertir alors en mode transversale (flèches vertes). Suite à cette conversion, chacune de ces ondes peut prendre un parcours direct jusqu'au défaut, ou alors aller réfléchir sur le fond de la pièce avant de rencontrer le défaut. En rencontrant le défaut, une nouvelle conversion peut avoir lieu.

Toujours sur la figure 1.18, on identifie le parcours par ces conversions. Le parcours (L-L) n'est constitué d'aucune conversion, donc il est constitué du mode longitudinal jusqu'au défaut, il est par la suite réfléchi en conservant son mode vers la sonde. Le parcours (T-T), quant à lui, se convertit sur la surface, mais conserve son mode en rencontrant le défaut. Le mode (L-T) ne représente aucune conversion sur la surface, mais une conversion sur le défaut.

Ces trois parcours sont dits directs, puisqu'ils ne rencontrent jamais le fond de la pièce. À l'inverse des parcours directs, les parcours dits indirects rencontrent éventuellement le fond de la pièce. Par exemple, les parcours (LL-L) et (LL-T) représentent l'onde longitudinale allant réfléchir sur le fond de la pièce avant de rencontrer le défaut. Ensuite, elle est réfléchi vers la sonde en conservant un mode longitudinal (LL-L) ou en subissant une conversion (LL-T). D'une façon homologue, les parcours (TT-T) et (TT-L) vont se réfléchir sur le fond de la pièce après conversion sur la surface, et sont réfléchi par le défaut directement vers la sonde. Finalement, il est aussi possible de considérer que l'onde réfléchi par le défaut soit à nouveau réfléchi sur le fond de la pièce avant de revenir vers la sonde. Par exemple, les parcours (LL-LL), (LL-TT), (TT-LL) et (TT-TT) subissent cette double réflexion sur le fond.

Effectuer ces images devient un avantage lorsqu'on est à la recherche de défauts ayant une position et une géométrie inconnue. En fonction de sa position et de sa géométrie, un défaut peut être invisible selon un mode de reconstruction, mais peut apparaître très clairement selon un autre. Ce phénomène a été étudié par Iakovleva *et al* (2014) et ses travaux ont été repris par Sy *et al* (2018). Aussi, avec les différents parcours qui illuminent un défaut sous différents angles, il est possible d'en déduire précisément le type (Jin *et al*, 2018) ainsi que la position (YU *et al*, 2017) et même d'effectuer un dimensionnement. Un défaut de type circulaire par exemple, selon un parcours de type direct (L-L ou T-T), tracera sa face supérieure sur l'image TFM. Par contre, lorsqu'on fera l'imagerie du même défaut selon un mode indirect (LL-LL ou TT-TT), il sera possible de voir sa face inférieure. En combinant les deux images, il sera possible de reconstruire le trou avec le bon diamètre en prenant trois points sur l'image.

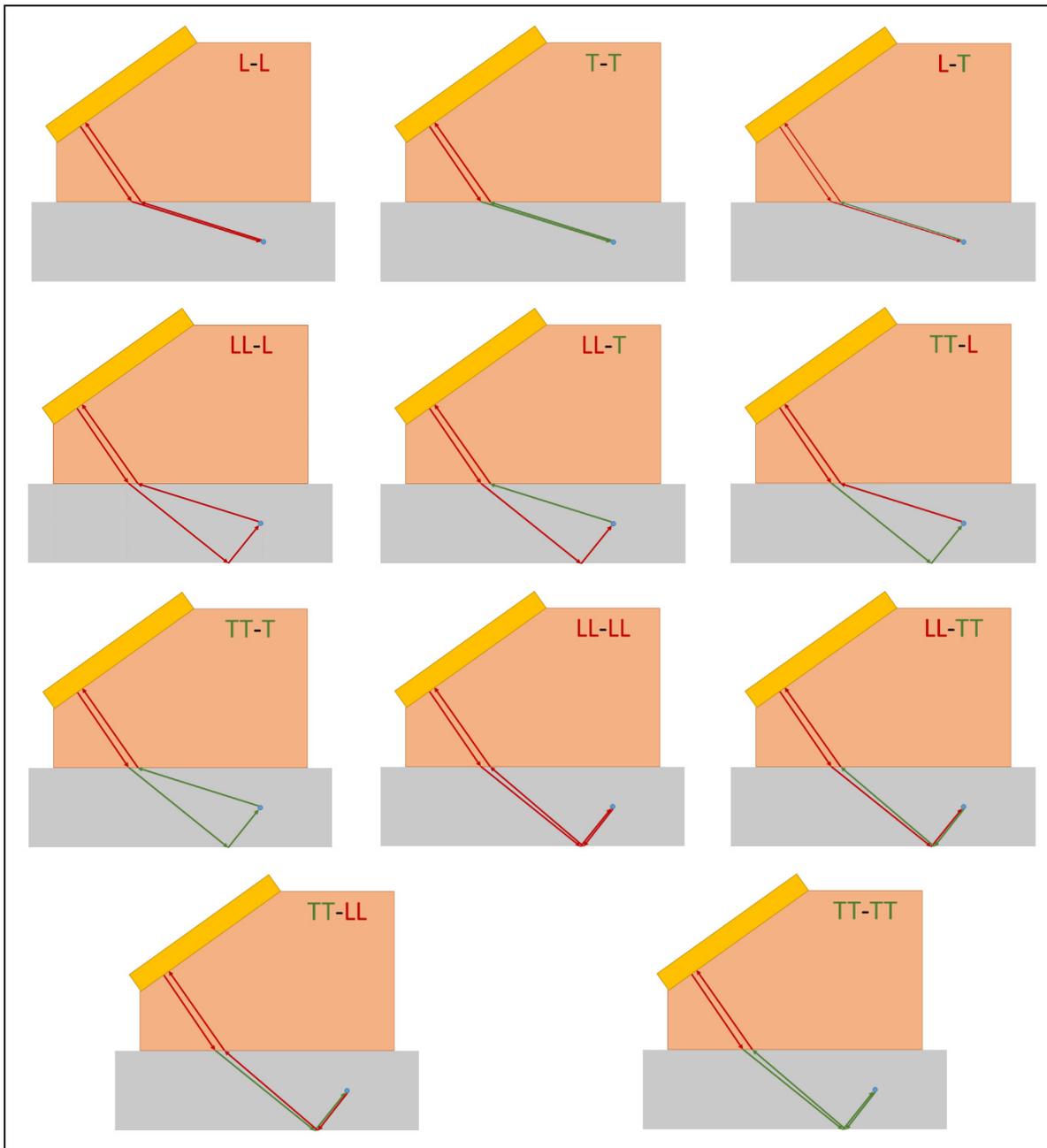


Figure 1.18 Différents parcours de reconstruction TFM, montrant la sonde (en jaune), le sabot (en orange), l'échantillon (en gris), un point focal (en bleu), ainsi que les différentes conversions des modes longitudinaux (en rouge) et transversaux (en vert)

1.8 Carte de sensibilité

Le procédé d'imagerie multimodale est intéressant puisqu'il permet de détecter et d'identifier efficacement un défaut en réduisant l'importance de sa géométrie ou de sa position. Par contre, les inconvénients de cette technique sont l'abondance des artéfacts de reconstruction ainsi que le nombre d'images à analyser simultanément. En 2019, Kombossé *et al* proposa un algorithme qui prédit le parcours de reconstruction idéal selon la géométrie de l'échantillon, celle du défaut et la position de ce dernier. Bien que cette méthode soit intéressante, pour simplifier l'utilisation de l'imagerie TFM multimodale, l'idéal serait de recombinaison l'information pertinente de toutes les images produites en une seule. La difficulté de cette manœuvre est que la somme simple des images TFM augmente le niveau de bruit et des artéfacts de reconstruction à un niveau indésirable.

Il existe actuellement deux solutions pour diminuer l'importance du bruit et amplifier l'importance des indications des éventuels défauts. Baiotto *et al* (2018) propose d'utiliser trois matrices, l'une avec des coefficients de cohérence, la seconde avec le signe et l'autre avec la phase du signal. L'autre méthode (Budyn *et al*, 2018) utilise une carte de sensibilité caractéristique au parcours de reconstruction utilisé pour chaque image. Cette carte de sensibilité calcule la quantité théorique d'énergie pouvant atteindre chaque pixel.

Effectivement, selon la figure 1.19, tirée de Cheeke (2012), le pourcentage de conversion de l'onde dépend principalement de l'angle d'incidence de l'onde. Pour créer les cartes de sensibilité, Budyn *et al* calculent, de manière analogue à la figure 1.19, le pourcentage d'énergie qui est réfléchi ou transmise selon l'angle d'incidence de l'onde frappant la surface de la pièce, le fond de la pièce et un défaut prédéterminé. Se faisant, il est possible de construire des filtres qui illuminent un défaut potentiel à l'endroit où théoriquement l'énergie serait présente, et diminuent l'amplitude des fausses informations dans les zones mortes. La figure 1.20 illustre un exemple de ces filtres avec les zones d'intérêt (en jaune) et les zones mortes (en bleu) pour un manque de fusion en milieu de soudure. En appliquant ces filtres aux images avant de les combiner, on voit le niveau de bruit et la quantité d'artéfacts grandement diminués,

rendant ainsi l'interprétation d'une image unique contenant l'information de plusieurs parcours de reconstruction possible. Le défaut des deux techniques susmentionnées est qu'il est absolument nécessaire de connaître le type et l'emplacement du défaut pour faire les matrices de cohérence ou les cartes de sensibilité.

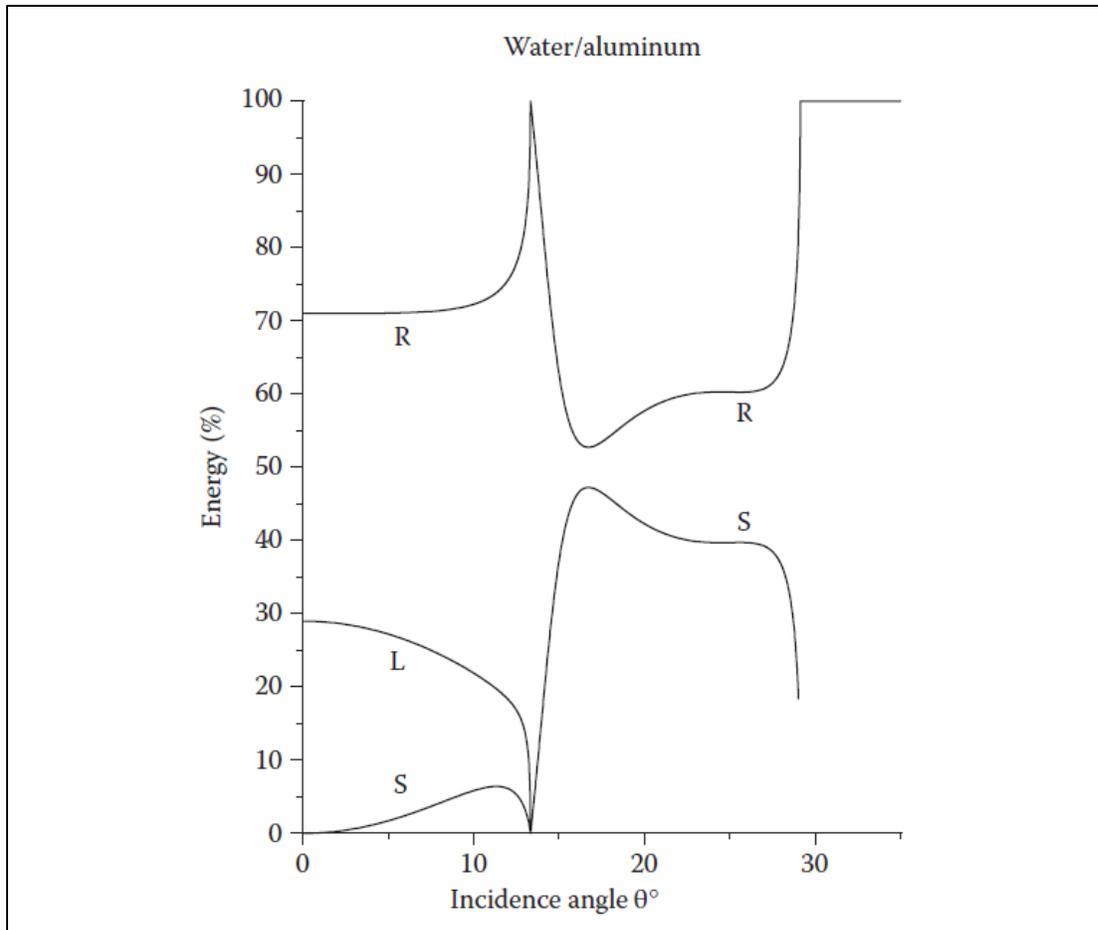


Figure 1.19 Exemple de distribution de l'énergie d'une onde rencontrant une interface selon l'angle d'incidence, avec l'énergie réfléchie (R), l'énergie transmise en onde longitudinale (L) ainsi que l'énergie transmise en onde de cisaillement (S). Figure tirée de Cheeke (2012)

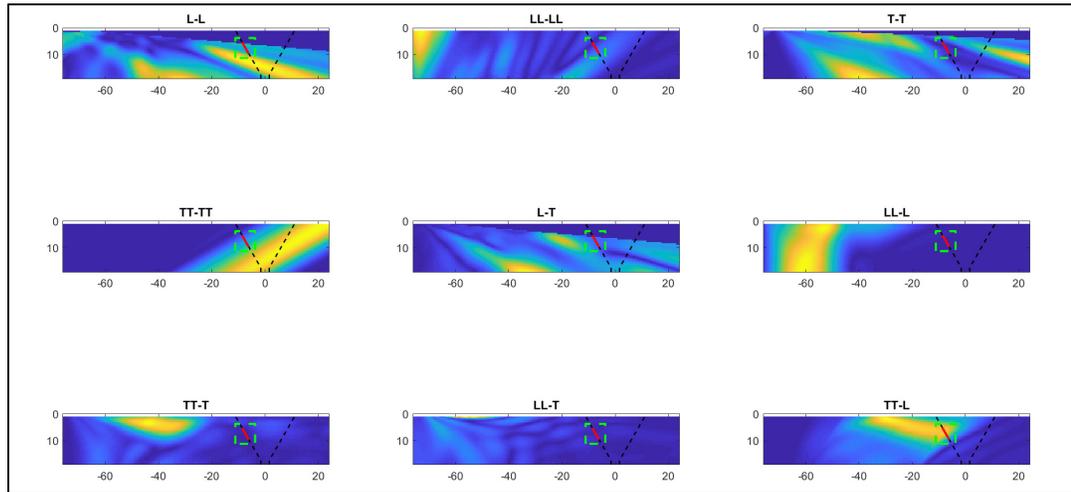


Figure 1.20 Exemple de carte de sensibilité produite à l'aide du code de l'Université de Bristol, Budyn *et al* (2018), pour un défaut de type manque de fusion situé sur la jonction entre le métal de base et la soudure

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Ce chapitre décrit les paramètres qui seront utilisés lors des simulations et des essais expérimentaux. Une simulation n'est efficace et utile que lorsqu'il est possible de valider ses résultats avec les résultats pratiques. Pour cela, il est primordial d'établir les équipements et paramètres qui seront utilisés lors des protocoles expérimentaux au préalable. C'est en calquant les variables de simulation sur la réalité qu'il sera possible d'obtenir une étude de faisabilité réaliste ainsi qu'une base de comparaison solide. Pour ce faire, cette section précise la pièce à inspecter ainsi que les équipements d'inspection.

2.1 Pièce à inspecter

L'échantillon à analyser consiste en deux plaques soudées de bout en bout. Ce choix est motivé premièrement par l'abondance de ce type d'assemblage dans l'industrie moderne ainsi que par l'efficacité des méthodes d'inspection ultrasonore actuelle. Effectivement, l'inspection ultrasonore de ce type de structure est bien connue, efficace et pratiquée depuis la deuxième Grande Guerre. Malgré tout, considérant que chaque type de défaut a sa propre approche de détection, il devient intéressant d'abrèger le temps d'inspection en développant une méthode plus universelle.

En Annexe 1 se retrouve l'échantillon utilisé lors des procédures expérimentales. Sommairement, ce dernier provient de chez Flawtech et consiste en deux plaques ayant 75 millimètres de largeur sur 300 millimètres de longueur ainsi que 19.05 mm d'épaisseur. Une préparation en « V » de 30° a été pratiquée sur leur longueur pour la soudure. L'échantillon est en acier A-36. Cet acier est amplement utilisé en industrie pour différentes applications comme les structures, les ponts et les pièces automobiles parce qu'il offre une grande résistance mécanique ainsi qu'une bonne rigidité pour un prix relativement bas. La figure 2.1 représente la plaque échantillon suivant ses vues de plan (en haut) et de profil (en bas). Il est possible d'identifier les deux plaques ainsi que le cordon de soudure les joignant.



Figure 2.1 Échantillon expérimental avec la vue de plan (en haut) et la vue de profil (en bas)

Les propriétés mécaniques de l'échantillon sont celles des aciers courants soit :

- Un module de Young de 200 GPa
- Une masse volumique de 7.85 g/cm^3
- Un coefficient de Poisson de 0.260

Ces plaques ont été soudées en plusieurs passes horizontales successives à l'électrode enrobée « ER7018 ». Quatre défauts distincts répartis sur la longueur ont été inclus volontairement pendant la procédure:

- 1) Un manque de fusion suivant la préparation de la première plaque
- 2) Un manque de pénétration
- 3) Une fissure débouchante à la surface de la soudure
- 4) Un réseau de porosité au centre de la soudure

Ces défauts représentent des exemples typiques de ceux se retrouvant dans les œuvres industrielles actuelles. De plus, chacun de ces défauts représente une méthode d'inspection différente pour une détection optimale.

2.2 Équipements d'inspection

Avoir la chance d'avoir Zetec.inc comme partenaire industriel représente un avantage certain au niveau de l'apprentissage de connaissance, mais aussi de l'utilisation de matériel de pointe en inspection ultrasonore. Effectivement, tous les appareils utilisés lors des processus expérimentaux ont été mis à disposition par la compagnie Zetec située à Québec. Premièrement, l'appareil d'inspection utilisé est le Topaz 64. L'utilisation de cet appareil permet de faire l'analyse TFM de la pièce soudée en temps réel, avec une résolution de 512 x 1024 pixels, avec une sonde de 64 éléments. Couplé au logiciel Ultravision, il est possible d'extraire les données brutes de la FMC afin de les utiliser dans les algorithmes de post-traitement plus avancés comme l'analyse multimodale par exemple.

Le choix de la sonde est justifié selon deux facteurs. Premièrement, la fréquence est déterminée selon la norme BS EN ISO 17640 : 2010, dans laquelle il est mentionné que pour inspecter des plaques soudées de faibles épaisseurs, une fréquence entre 2 MHz et 5 MHz doit être utilisée. La fréquence de la sonde est directement reliée à la résolution de l'inspection selon la formule qui décrit la vitesse du son dans un matériau :

$$v_w = f\lambda \quad (2.1)$$

Où v_w représente la vitesse du son, f la fréquence de l'onde et λ sa longueur d'onde.

Le seuil de détection du plus petit défaut à être dimensionné est directement lié à la longueur d'onde des ultrasons générés par la sonde. Fixant la vitesse du son dans l'acier comme constante, l'équation 2.1 nous indique que plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde sera courte, et donc il sera possible de dimensionner de plus petits défauts. Aussi, la sonde doit avoir le plus grand nombre d'éléments possible. Le nombre d'éléments influence directement la qualité de l'image de l'inspection, en amplifiant les phénomènes d'interférence constructive et destructive. Avec le matériel à disposition, une sonde LM-5MHz est choisie pour effectuer le protocole expérimental. Cette sonde semble idéale par son grand nombre d'éléments et la

plus haute fréquence centrale prescrite par la norme. Le tableau 2.1 ainsi que la figure 2.2 décrivent les paramètres de la sonde. Sur la figure, les éléments piézo-électriques sont schématisés par des prismes rectangulaires jaunes, où leur taille (w), leur pas (p) ainsi que leur largeur (l) sont identifiés.

Tableau 2.1 Paramètres de la sonde

Nomenclature :			LM-5MHz
Fréquence centrale :		MHz	5
Nombre d'éléments :	n		64
Taille des éléments :	w	mm	0.5
Pas des éléments :	p	mm	0.6
Largeur des éléments :	l	mm	10

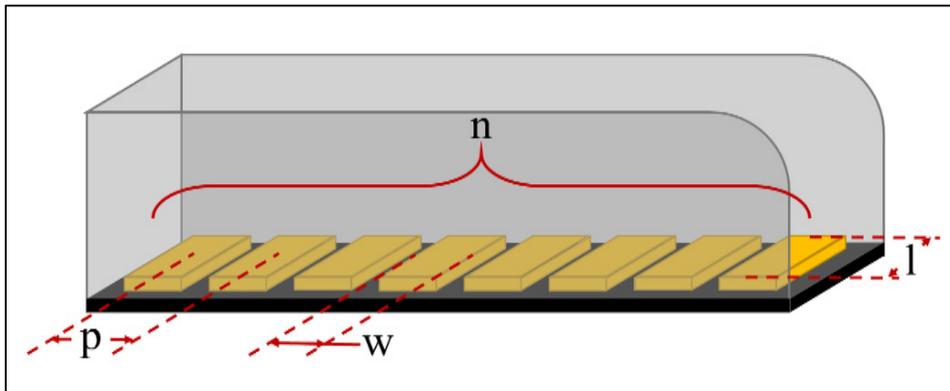


Figure 2.2 Exemple d'une sonde avec ses dimensions caractéristiques, le nombre des éléments (n), leur taille (w), leur pas (p) et leur largeur (l)

Finalement, si l'on suit la norme BS EN ISO 17640 : 2010, l'inspection d'une plaque soudée de faible épaisseur à l'aide d'ondes transversales se fait avec un angle d'incidence entre 35° et 70° . Le choix des sabots utilisés est motivé par les applications courantes observées en manufacture qui suivent la norme BS EN ISO 17640 : 2010. Deux procédures sont utilisées, l'une utilisant les ondes transversales avec un sabot de 36 degrés d'angle d'incidence et une autre utilisant les ondes longitudinales avec un sabot de 19 degrés. On désigne ces sabots

comme 55LW et 55SW dû à l'angle de 55 degrés formé dans l'acier après la première réfraction avec la surface. Le tableau 2.2 ainsi que la figure 2.3 décrivent les paramètres de ces deux sabots. Sur la figure 2.3, la sonde est représentée en jaune, le sabot est représenté en gris et ses paramètres caractéristiques y sont indiqués.

Tableau 2.2 Paramètres des sabots

Nomenclature :			LM-55LW	LM-55SW
Angle d'incidence :	θ_i	degrés	19	36
Vitesse du son :		m/s	2330	2330
Hauteur du premier élément :	he	mm	26.00	8.00
Décalage du premier élément	O	mm	3.40	2.91
Longueur du sabot :	L	mm	57.70	63.80
Largeur du sabot :	l	mm	28.00	28.00
Hauteur du sabot :	H	mm	40.00	34.20

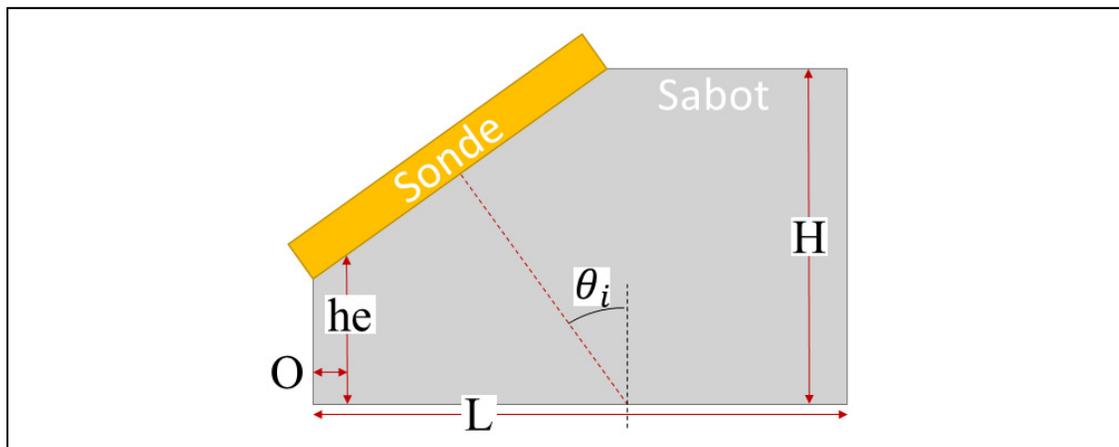


Figure 2.3 Exemple d'un sabot avec ses dimensions caractéristiques, la hauteur (H), la longueur (L), son angle d'incidence (θ_i), la hauteur (he) et le décalage (O) du premier élément de la sonde

2.3 Simulations

Dans le but de développer l'algorithme d'analyse TFM multimodale, il est intéressant d'avoir une série de données non bruitées que l'on peut utiliser comme étalon. Cette étape est aussi primordiale pour le développement des cartes de sensibilité. Cette série de données FMC est utilisée comme étape préparatoire à la procédure expérimentale ainsi que comme test de concept. Effectivement, les données produites lors de simulation ne sont pas entachées par les effets indésirables que peuvent contenir les données expérimentales comme l'atténuation et le bruit. Ce qui veut dire que si le concept ne fonctionne pas en utilisant cette série de données, il sera donc inefficace avec les séries de données expérimentales.

Cette étape a deux objectifs distincts. Premièrement, confirmer la validité de l'expérience en donnant un résultat simplifié sur lequel s'appuyer lors des analyses expérimentales, mais aussi à régler et valider les différents paramètres tels que l'utilisation des duos sonde et sabot ou régler la distance optimale du sabot par rapport à la soudure par exemple. Finalement, cette étape est aussi nécessaire dans l'élaboration de l'algorithme d'analyse TFM en fournissant des données fiables lors de la vérification de son bon fonctionnement.

Les simulations qui seront présentées proviennent du logiciel CIVA 2016. Le choix de ce logiciel est basé sur la précision des résultats et la rapidité d'exécution des simulations. En effet, l'analyse par la méthode des éléments finis que d'autres logiciels utilisent est très précise, mais peut s'avérer laborieuse et lente en fonction du type de simulation à effectuer. D'un autre côté, les formules analytiques telles que les lois de Kirchhoff ou les théories de diffraction géométrique ont l'avantage d'être rapides, mais parfois moins précises ou même impossibles à résoudre. Afin de donner un résultat précis et d'accélérer les procédures de simulation, CIVA utilise une formule hybride faisant intervenir à la fois des calculs analytiques et une procédure d'analyse par éléments finis. La validité de cette procédure est démontrée par (Calmon et al., 2006 ; Darmon et al. ; 2016).

Plusieurs simulations sont effectuées. Les éléments utilisés lors de ces simulations sont ceux décrits dans ce chapitre et seront utilisés aussi lors de la procédure expérimentale. Il est important que les paramètres utilisés lors des simulations soient le plus près possible de ceux qui seront utilisés lors du processus expérimental. Le but étant de pouvoir comparer les résultats des simulations avec ceux des essais expérimentaux obtenus ultérieurement.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS DES SIMULATIONS ET EXPÉRIMENTATIONS

Dans ce chapitre, les résultats des différentes analyses de trois défauts contenus dans la pièce seront présentés. Comme détaillé précédemment dans le chapitre traitant de la méthodologie, l'échantillon utilisé est une plaque d'acier de 19.05 millimètres d'épaisseur soudée sur la longueur avec une préparation en « V » ayant quelques défauts qui furent volontairement insérés lors de la soudure. Une sonde à éléments multiples (64 éléments) centrée à 5 MHz et deux sabots, un de 19 degrés et un de 36 degrés seront utilisés conjointement avec le Topaz 64 pour effectuer l'inspection.

L'étude comporte trois volets représentant les trois défauts qui seront analysés : le manque de fusion, le manque de pénétration ainsi que la fissure débouchante. Chacun des défauts susmentionnés sera analysé selon les imageries TFM multimodales, en simulations et en expérimentations et ce, pour chacun des sabots. L'objectif étant de valider l'algorithme de recombinaison des imageries multimodale en utilisant les cartes de sensibilité comme filtres ainsi que d'identifier si l'utilisation d'un sabot en particulier est préférable.

Les résultats seront tous présentés selon le même format. Premièrement, une imagerie TFM représentant ce qui est affiché sur les appareils d'inspection modernes tels que le Topaz 64 sert à la validation des données utilisées pour les algorithmes plus avancés. Sur la figure 3.1, il est possible d'identifier deux images. En haut, la représentation de la reconstruction longitudinale directe et indirecte. En bas, celle de l'onde transversale. Chacune de ces images reconstruit deux parcours distincts dans la pièce. Le trait horizontal pointillé sépare le parcours direct (en haut) du parcours indirect (en bas) qui sera reconstruit. Le trait est directement placé sur le fond théorique de la pièce et il est confirmé par l'emplacement de l'écho de fond (encerclé en noir). Selon la représentation schématique de gauche, comme l'angle de réflexion est identique à l'angle d'incidence, il est possible d'imager le parcours indirect comme étant le miroir du mode direct. Pour établir un repère, une représentation de la soudure (en pointillé) ainsi que

l'approximation de l'emplacement du défaut (en trait rouge) sont affichées. Selon la norme ASME article 4 portant sur les méthodes d'examen ultrasonore des joints soudés, selon l'alinéa T-471.4.1, il est recommandé de régler le seuil de sensibilité à 6 dB par rapport à l'amplitude maximal du défaut, ce qui motive le seuil de l'échelle réglé à cette valeur. Ce seuil de 6 dB servira de valeur plancher au calcul du ratio signal sur bruit (SNR) ainsi qu'à l'indicateur de la superficie des artéfacts (AAI). Les détails de ces deux métriques sont expliqués à la page 50 et 51.

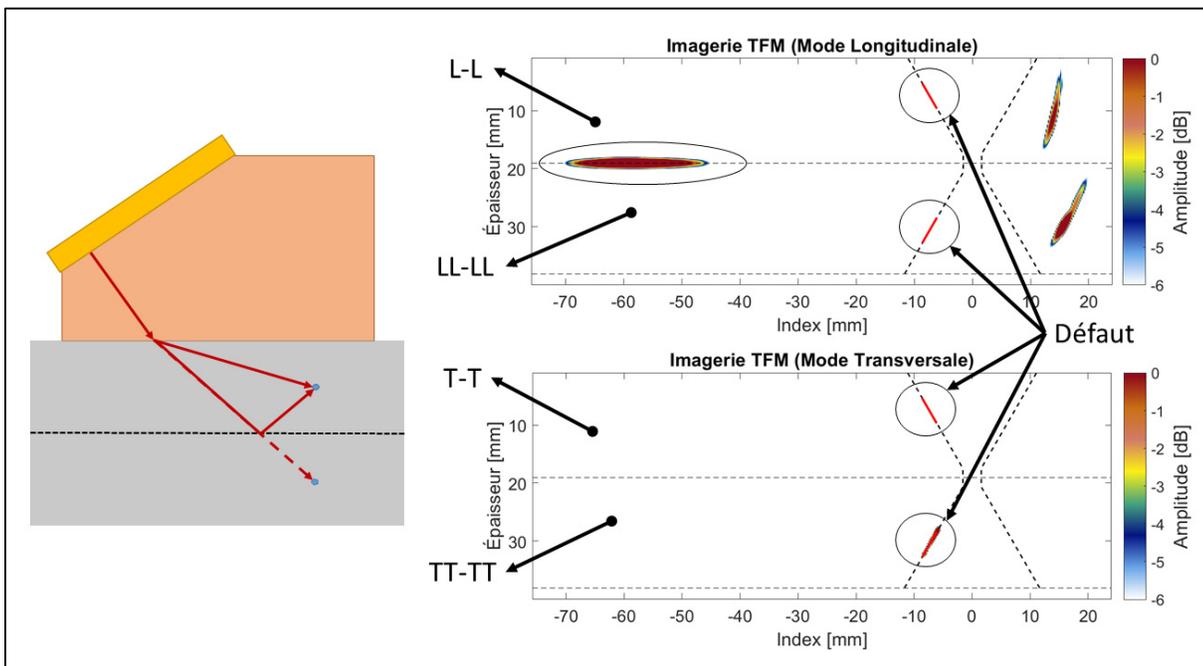


Figure 3.1 Détails des représentations TFM classiques

Ensuite suivront des figures comparatives des imageries TFM multimodales des simulations et des expérimentations. Pour produire les images TFM multimodales, la recombinaison des neuf parcours suivants : L-L, T-T, L-T, LL-L, LL-T, TT-L, TT-T, LL-LL et TT-TT seront effectuées. Les trois prochaines figures représentent chacun de ces parcours de reconstruction et les analyses des prochaines figures ne sont conformes qu'au cas illustré en exemple, soit au manque de fusion. La figure 3.2 représente l'ensemble des imageries TFM qui utilisent les parcours directs de reconstruction. En analysant ces images, on observe que le parcours L-L ne fournit qu'un artéfact majeur; à l'instar du parcours T-T qui lui, fournit l'information de

l'extrémité inférieure du manque de fusion. Finalement le parcours L-T fournit l'information des deux extrémités du défaut, mais contient lui aussi des artéfacts importants. À noter que toute information ne s'alignant pas sur la ligne rouge (la représentation théorique du défaut) est considérée comme étant des artéfacts.

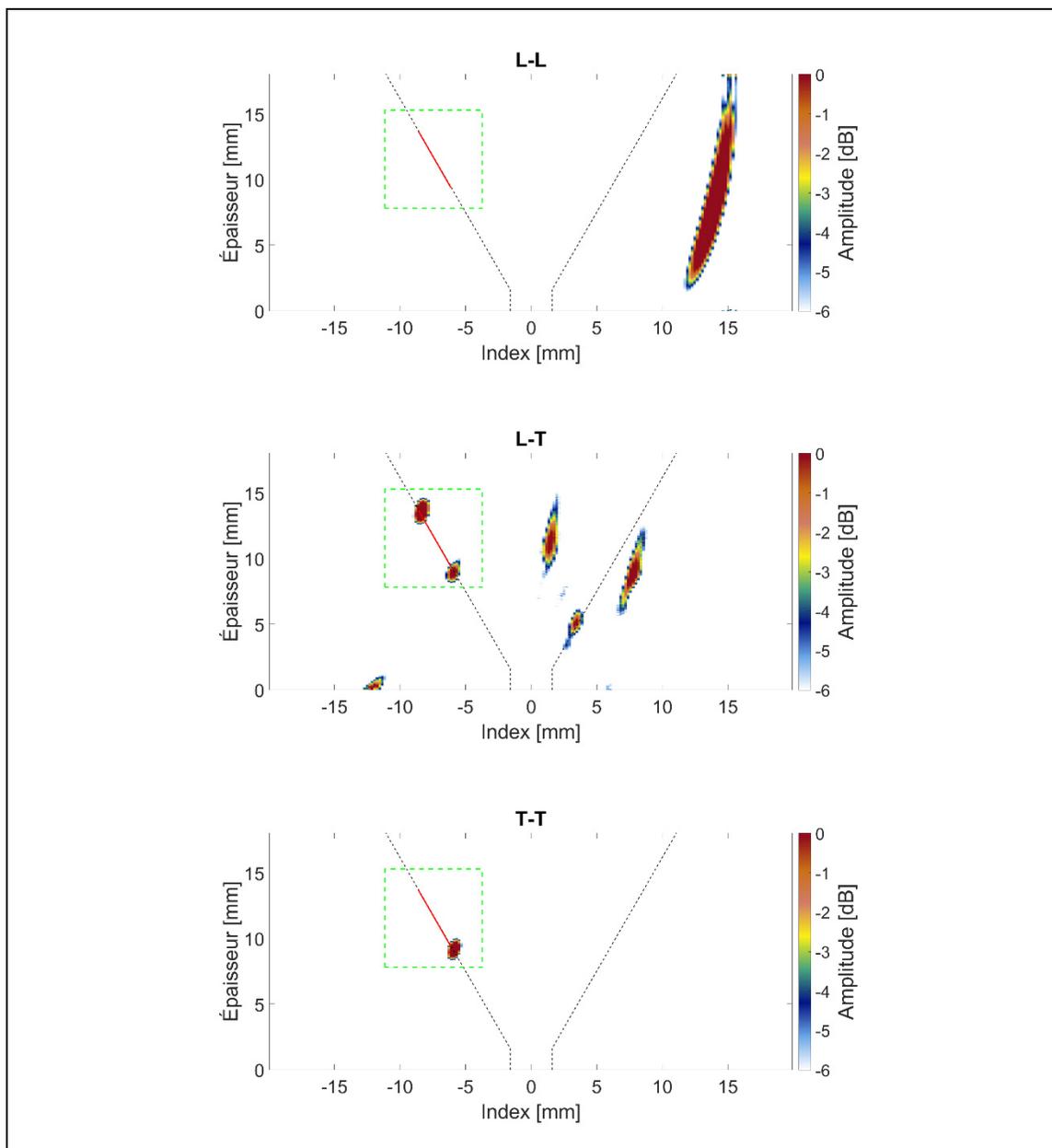


Figure 3.2 Imagerie TFM d'un manque de fusion en milieu de pièce utilisant les parcours directs de reconstruction : L-L (en haut), L-T (au milieu) et T-T (en bas)

La figure 3.3 représente l'ensemble des imageries TFM qui utilisent les parcours indirects de reconstruction. En analysant ces imageries, on observe que le parcours LL-LL ne fournit qu'un artéfact majeur; au contraire du parcours TT-TT qui fournit l'information de l'entièreté du manque de fusion. Cette image est la représentation parfaite du défaut, elle donnera donc beaucoup d'informations sur le défaut dans l'imagerie multimodale.

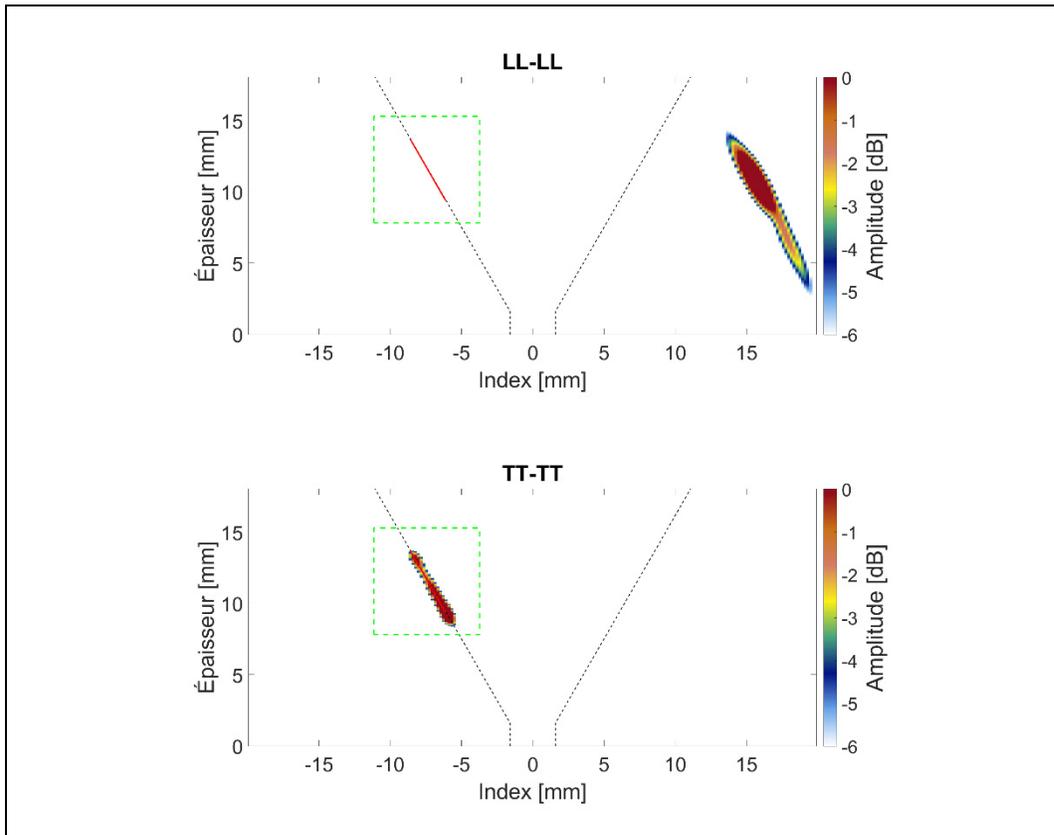


Figure 3.3 Imagerie TFM d'un manque de fusion en milieu de pièce utilisant les parcours indirects de reconstruction : LL-LL (en haut), TT-TT (en bas)

La figure 3.4 représente les quatre parcours de coins. Les parcours ayant une composante indirecte ainsi qu'une composante directe sont nommés parcours de coins. Comme il est possible de constater sur la figure 3.4, les deux parcours LL-L et LL-T contribueront à ajouter des artéfacts à la reconstruction finale, tandis que le parcours TT-L contribuera fortement aux informations pertinentes du défaut. Finalement, le parcours TT-T ajoutera à la fois de l'information sur les bouts du défaut ainsi que quelques artéfacts.

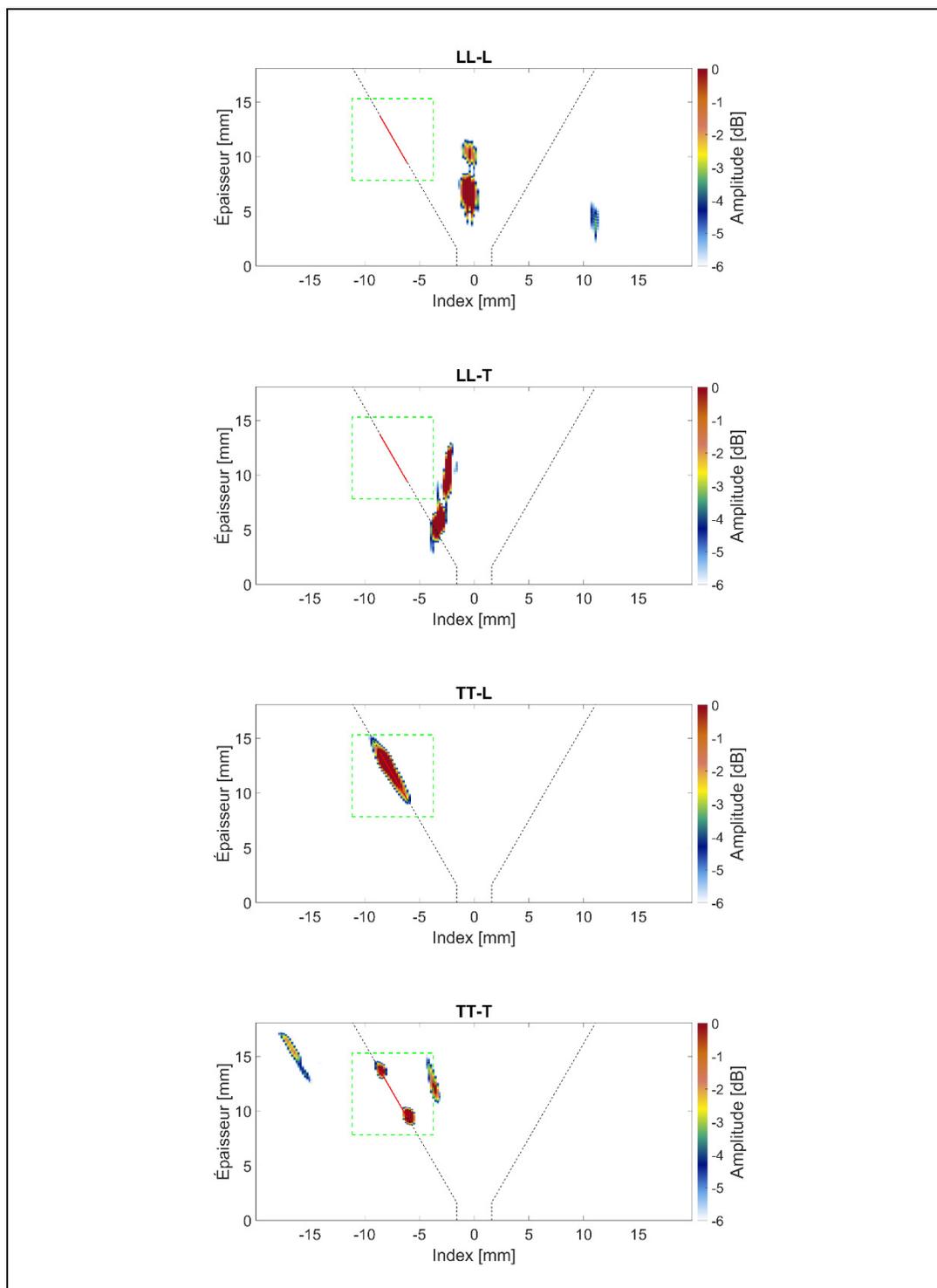


Figure 3.4 Imagerie TFM d'un manque de fusion en milieu de pièce utilisant les parcours de coins : LL-L (en premier), LL-T (en second), TT-L (en troisième) et TT-T (en quatrième)

La figure 3.5 représente les deux imageries TFM multimodales, la première sans utiliser les filtres à base des cartes de sensibilité et la seconde image représente la recombinaison de chacun de ces modes ayant préalablement été filtrés par sa propre carte de sensibilité selon l'algorithme mis en ligne par l'Université de Bristol (Budyn *et al*, 2018). Sur les deux images, de façon similaire à la figure précédente, on y retrouve une représentation de la soudure (en pointillé noir) et du défaut (en rouge).

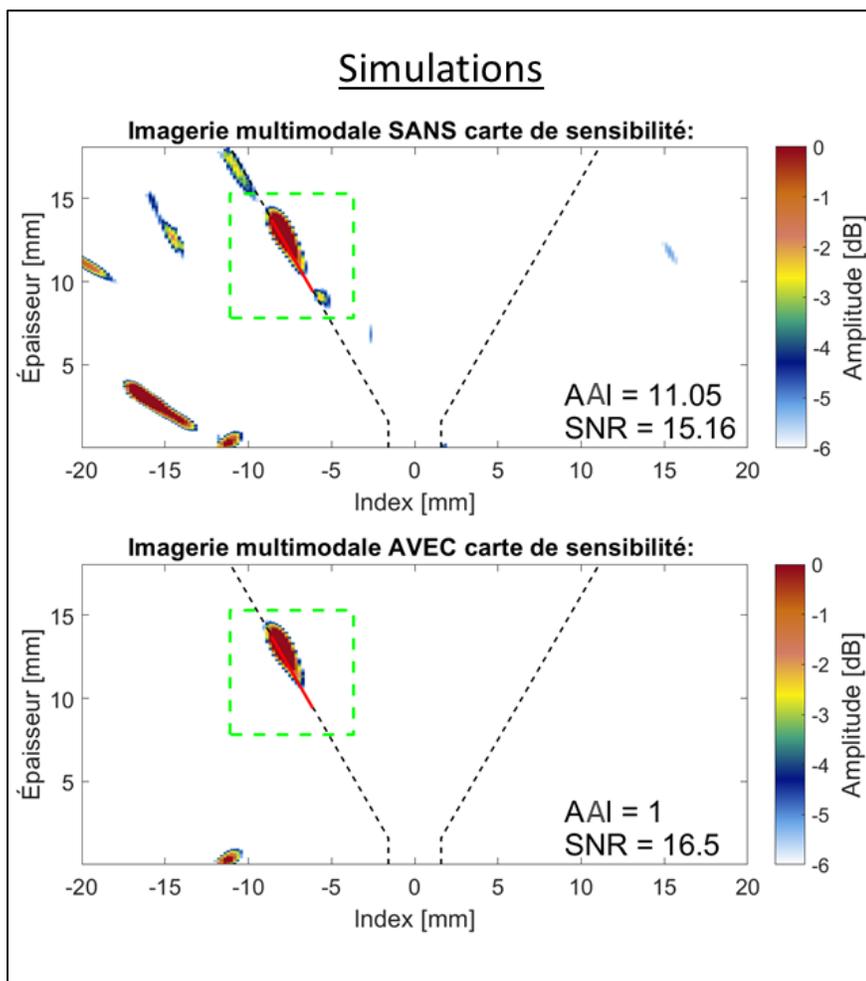


Figure 3.5 Détail des représentations TFM multimodales, avec l'imagerie sans filtres (en haut), et l'imagerie avec les filtres (en bas)

La boite (en pointillé vert) sera utilisée pour produire le ratio signal sur bruit (SNR), suivant la méthode utilisée par Villaverde *et al* (2017). Cette méthode consiste à recueillir dans un premier temps la valeur efficace en effectuant la moyenne quadratique des pixels sélectionnés dans une zone d'intérêt et dont la valeur est supérieure à un seuil prédéterminé. En effectuant le même processus pour les pixels dont l'amplitude est inférieure à ce même seuil, il est possible d'établir un ratio comparant les informations pertinentes par rapport au bruit.

$$SNR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{I_{signal}}{I_{bruit}} \right) \quad (3.1)$$

$$avec \quad I_{signal} = \sqrt{\frac{(\sum A_{>-6dB})^2}{n_{>-6dB}}} \quad et \quad I_{bruit} = \sqrt{\frac{(\sum A_{<-6dB})^2}{n_{<-6dB}}}$$

La formule 3.1 représente la méthode de calcul du SNR en décibel, avec I_{signal} représentant l'intensité du signal par rapport à I_{bruit} qui représente l'intensité du bruit. I_{signal} est calculée en fonction du carré de la somme de l'amplitude des pixels supérieure à -6 dB ($A_{>-6dB}$) et du nombre de ces pixels ($n_{>-6dB}$). À l'inverse, le I_{bruit} est calculé en fonction des pixels ayant une amplitude inférieure à -6 dB ($A_{<-6dB}$ et $n_{<-6dB}$).

Avec le SNR, il est possible d'établir une valeur indiquant l'importance relative des informations provenant du défaut par rapport au bruit. Cette valeur servira de comparatif pour l'évaluation des performances des différents algorithmes d'amélioration de l'image. Par exemple, un SNR de -6 dB représente que l'amplitude de l'indication est deux fois plus importante que l'amplitude du bruit.

En plus du SNR, un indicateur de la superficie des artéfacts inspiré de la méthode pour calculé la performance du réseau tel qu'élaboré par Holmes *et al* (2005) est établi. Cette valeur indique l'importance relative de toutes les indications dans l'image. Cette technique consiste à calculer le ratio entre l'aire de l'image ayant une amplitude supérieure à un certain seuil par rapport au carré de la longueur d'onde.

$$AAI = \frac{A B n_{>-6dB}}{L^2} \quad (3.2)$$

Le « Artefact Area Indicator » ou AAI est calculé selon l'équation 3.2, où A et B sont respectivement la largeur et l'épaisseur du pixel en deux dimensions, $n_{>-6dB}$, le nombre de pixels ayant une amplitude supérieure à -6 dB et λ , la longueur d'onde. Appliquée sur l'image entière excluant la zone du défaut (boîte verte), elle servira de métrique pour quantifier l'importance des artéfacts. L'AAI est une mesure comparative linéaire, un AAI qui double signifie directement une aire d'artéfact deux fois plus importante pour une même longueur d'onde. L'objectif pour avoir la meilleure image possible est de maximiser le SNR tout en minimisant l'AAI.

3.1 Étude du manque de fusion

Le premier défaut à être analysé sera le manque de fusion. Sur les deux figures suivantes, la figure 3.6 et la figure 3.7, il est possible de remarquer l'écho de surface et les échos de fond, les artéfacts ainsi que le défaut. En effectuant ces imageries, il est possible de constater que ce type de défaut doit être inspecté de manière indirecte en mode transversal. Effectivement, à l'instar de l'imagerie longitudinale, l'imagerie transversale offre une indication dans la zone du défaut. Dans les deux cas, l'imagerie comporte d'importants artéfacts pouvant être interprétés comme des défauts différents. Aussi, en analysant les deux configurations de sabot, il est possible de constater que celui de 36° semble plus efficace puisque l'information provenant du défaut est plus importante et le niveau des artéfacts est plus faible au niveau de la reconstruction transversale indirecte.

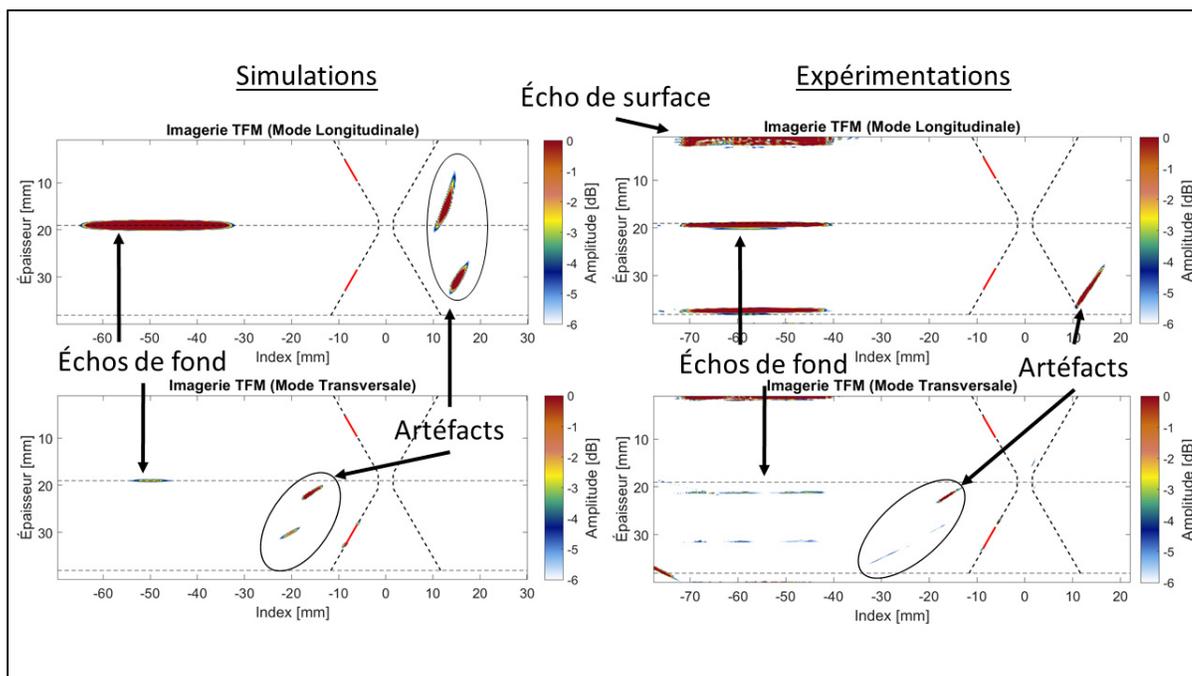


Figure 3.6 Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de fusion en utilisant un sabot de 19°

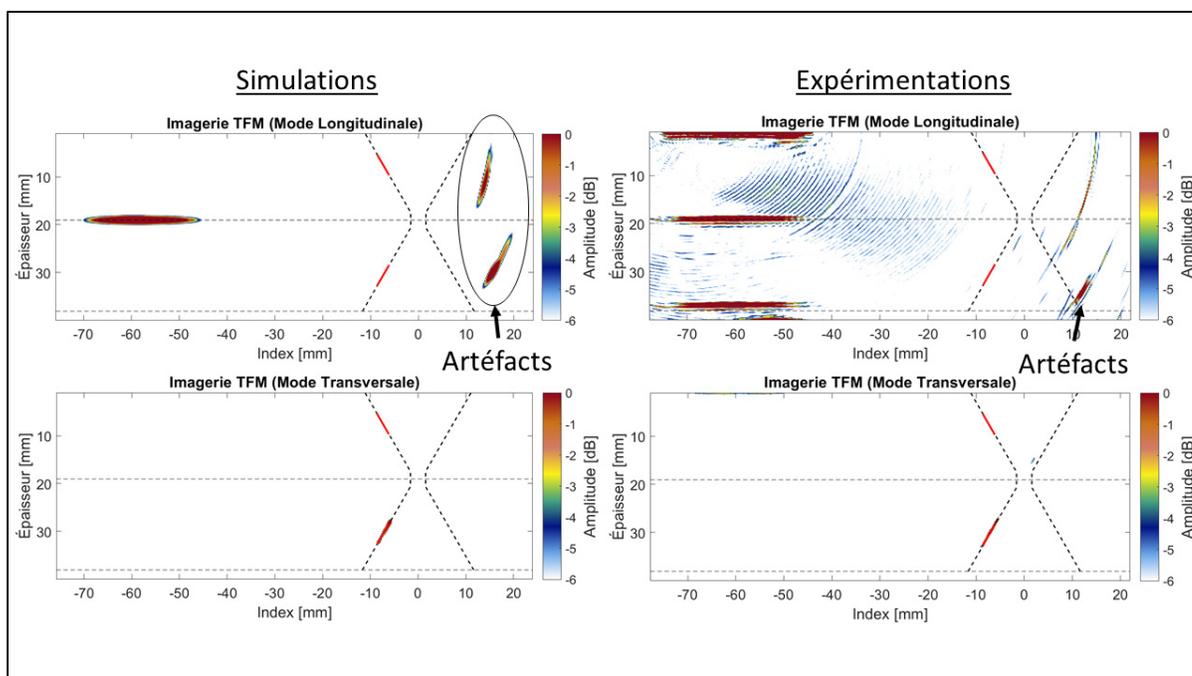


Figure 3.7 Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de fusion en utilisant un sabot de 36°

Suite à l'analyse des imageries TFM classiques, il est possible d'analyser l'imagerie TFM multimodale (figure 3.8 et figure 3.9). En observant le résultat de la simulation à 19° (figure 3.8), il est possible d'observer une légère augmentation d'environ 1 dB du SNR quand on applique les filtres à base de cartes de sensibilité. Cette légère augmentation s'explique par le fait que les filtres retirent davantage d'amplitude relative des zones ne contenant pas le défaut. En analysant l'AAI, on s'aperçoit rapidement que la recombinaison des différents parcours crée une multitude d'artéfacts (les indications hors de la boîte pointillée verte) en plus de l'information provenant du défaut (les indications dans la boîte pointillée verte). La présence importante des artéfacts nuit fortement à l'AAI (11.05). Les mêmes observations sont valides quant à l'imagerie multimodale sans filtres basée sur les résultats expérimentaux, ce qui donne un AAI aussi très élevé (7.71). En observant les images produites par l'imagerie TFM multimodale avec les cartes de sensibilités, on constate que l'application des filtres a fait disparaître les artéfacts très efficacement, ce qui se traduit en une amélioration marquée de l'AAI (1.00 en simulation et 1.72 en expérimentation).

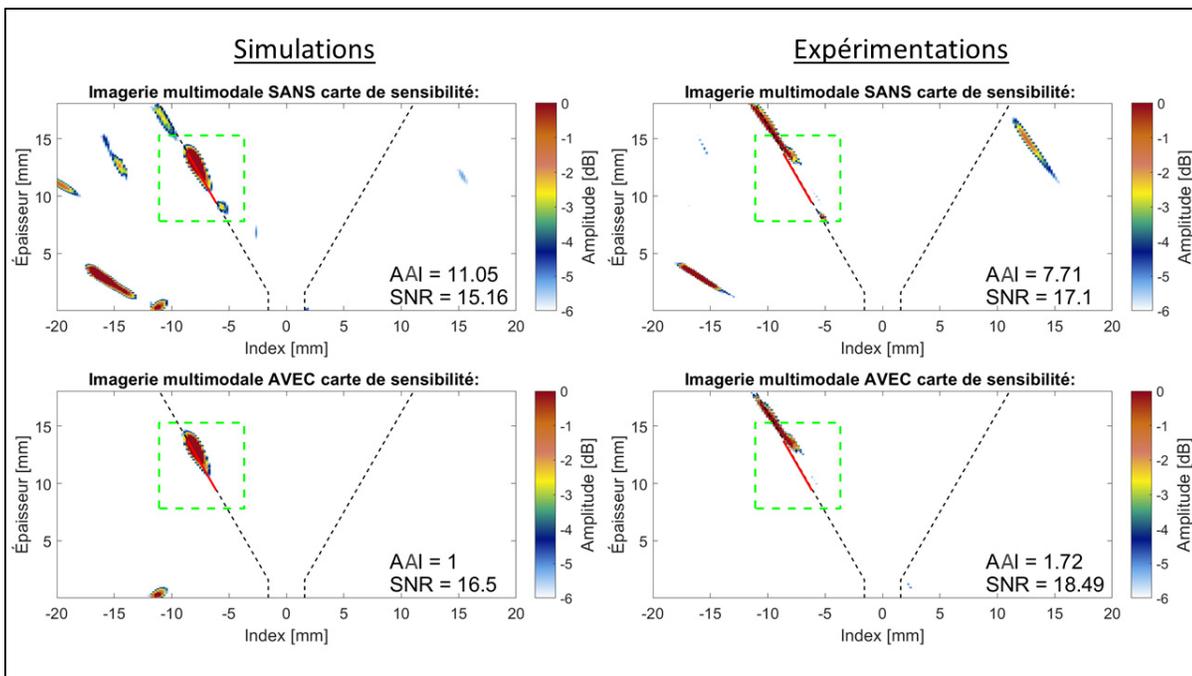


Figure 3.8 Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de fusion en utilisant un sabot de 19°

En analysant l'imagerie TFM multimodale du manque de fusion faite à l'aide du sabot de 36° (figure 3.9), il est possible de constater que d'une manière similaire au sabot de 19°, le SNR est suffisant pour produire une information de qualité en plus d'être plutôt uniforme pour toutes les reconstructions. En regardant l'AAI, on observe que plus l'information de base est puissante, plus l'algorithme est performant. En effet, sur la figure 3.7, on observe que l'information du défaut en mode transversal indirect est préminente. Cette indication produit une forte trace sur les imageries TFM multimodale. Par contre, l'amplitude des artéfacts reste suffisamment importante pour nuire à l'AAI (17.26 en simulation et 4.59 en expérimentation). Quand on applique l'algorithme à base de carte de sensibilité, les artéfacts à la fois des simulations et des expérimentations disparaissent complètement se traduisant en une importante diminution de l'AAI (0 en simulation et 0.5 en expérimentation). Ces résultats concordent avec les méthodes d'inspections actuelles basées sur la norme BS EN ISO 17640 : 2010, qui privilégie l'utilisation de sabot de 36° pour l'inspection de ce genre de soudure.

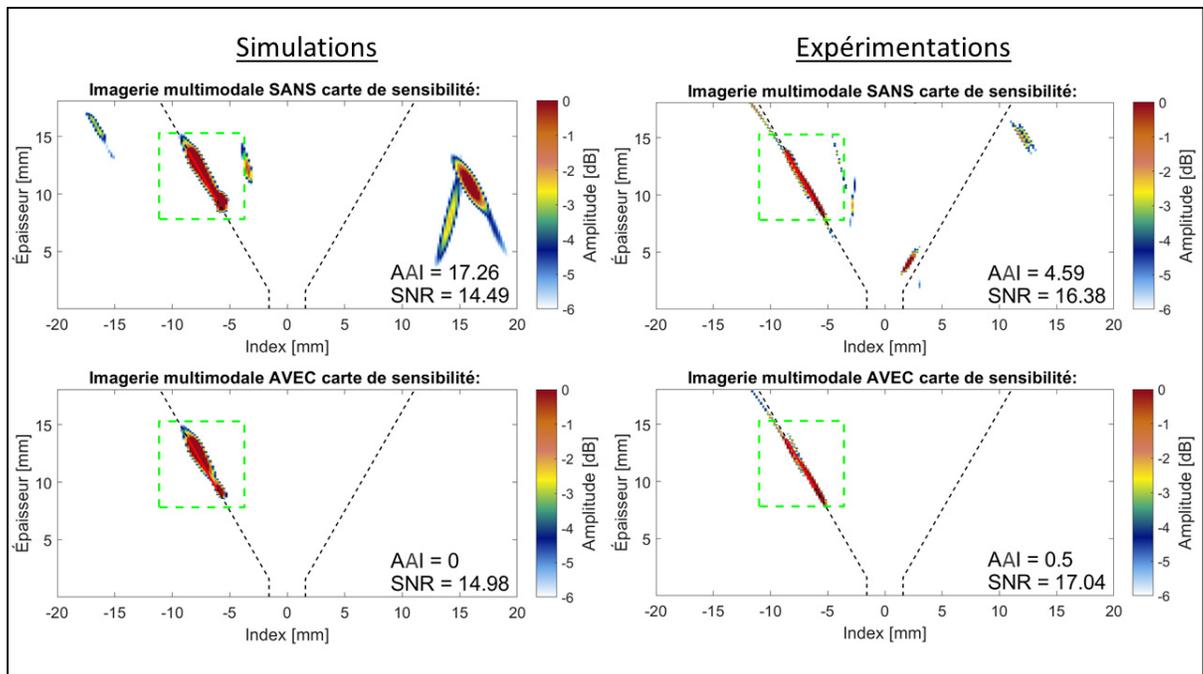


Figure 3.9 Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de fusion en utilisant un sabot de 36°

3.2 Étude du manque de pénétration

Le second défaut à être analysé sera le manque de pénétration. De façon similaire à l'étude sur le manque de fusion, sur les deux figures suivantes (figure 3.10 et 3.11), il est possible de remarquer les échos de surface et de fond, les artéfacts ainsi que le défaut. L'indication de l'emplacement théorique du manque de pénétration est indiquée en rouge. Cette dernière représente les deux parties des plaques où il manquerait de soudure en cas de manque de pénétration ainsi que la surface supérieure de la soudure. On peut constater que sur les simulations, l'indication du défaut s'affiche principalement en mode longitudinal de façon direct. Par contre, avec les indications de ces deux figures, il n'est pas possible de prévoir si un sabot de 36° donnera de meilleurs résultats qu'en utilisant un sabot de 19° . Il est aussi possible de constater que les informations et artéfacts sont nettement moins puissants du côté expérimental qu'en simulation. Ce phénomène portera forcément préjudice lors de l'imagerie multimodale des résultats expérimentaux.

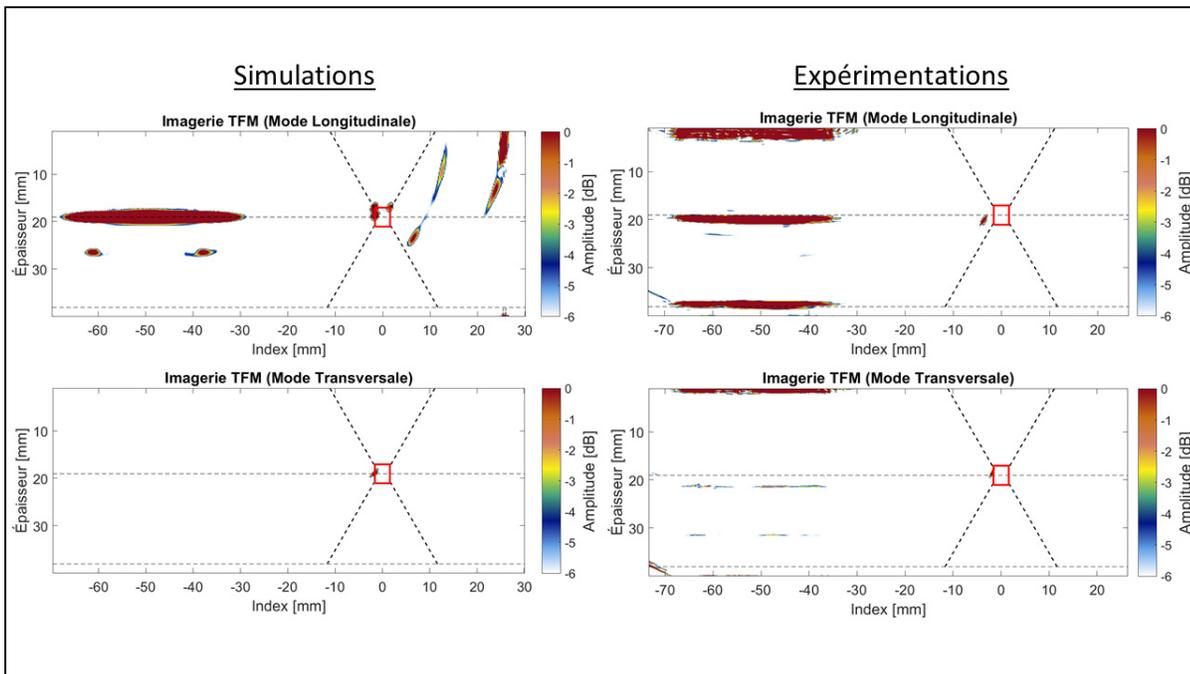


Figure 3.10 Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de pénétration en utilisant un sabot de 19°

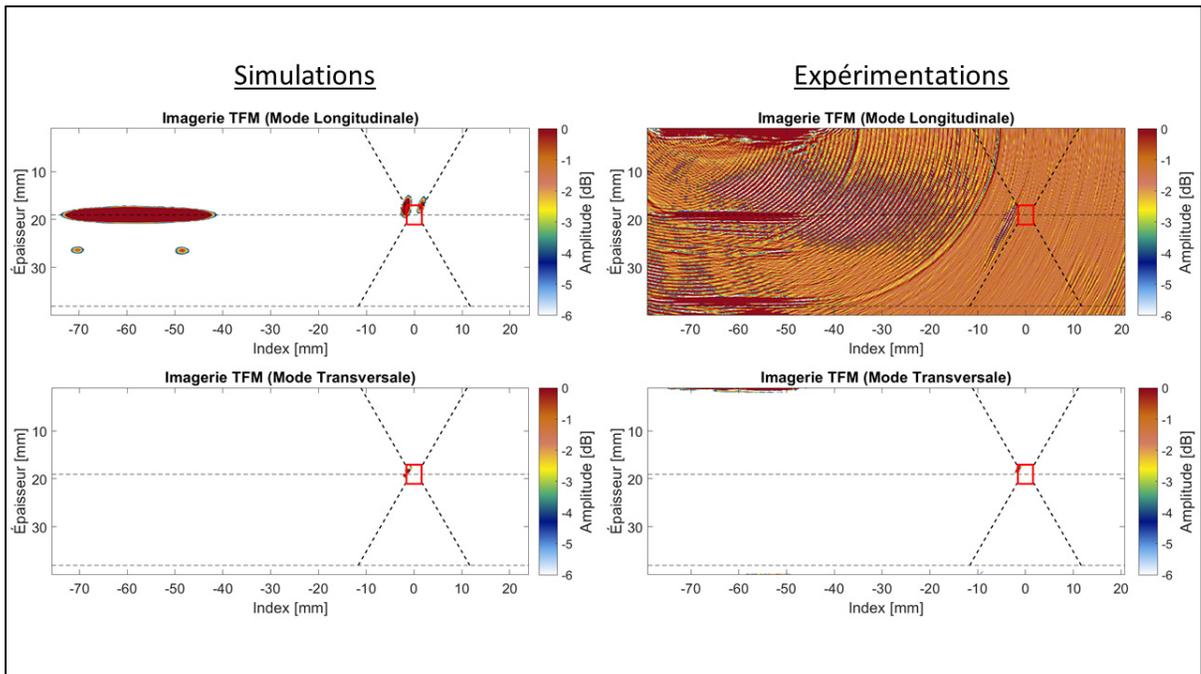


Figure 3.11 Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de pénétration en utilisant un sabot de 36°

En analysant la figure 3.12, représentant l'imagerie multimodale du manque de pénétration en utilisant un sabot de 19° , de manière similaire au manque de fusion, on observe une légère augmentation du SNR d'environ 1 dB quand on applique les filtres. Sur l'imagerie du manque de pénétration sans les filtres en simulation, un AAI plus qu'acceptable (0.82) est calculé. Cet AAI est dû à l'absence d'artéfacts dans les images TFM classiques. Seul un effet miroir en haut de l'image pourrait éventuellement nuire à l'interprétation en induisant une fissure débouchante en erreur. Malheureusement, l'algorithme de l'Université de Bristol, n'étant pas adapté spécifiquement à la surface ou au fond de la pièce, affiche le défaut clairement, mais ajoute un artéfact suffisamment important pour augmenter l'AAI à 2.18.

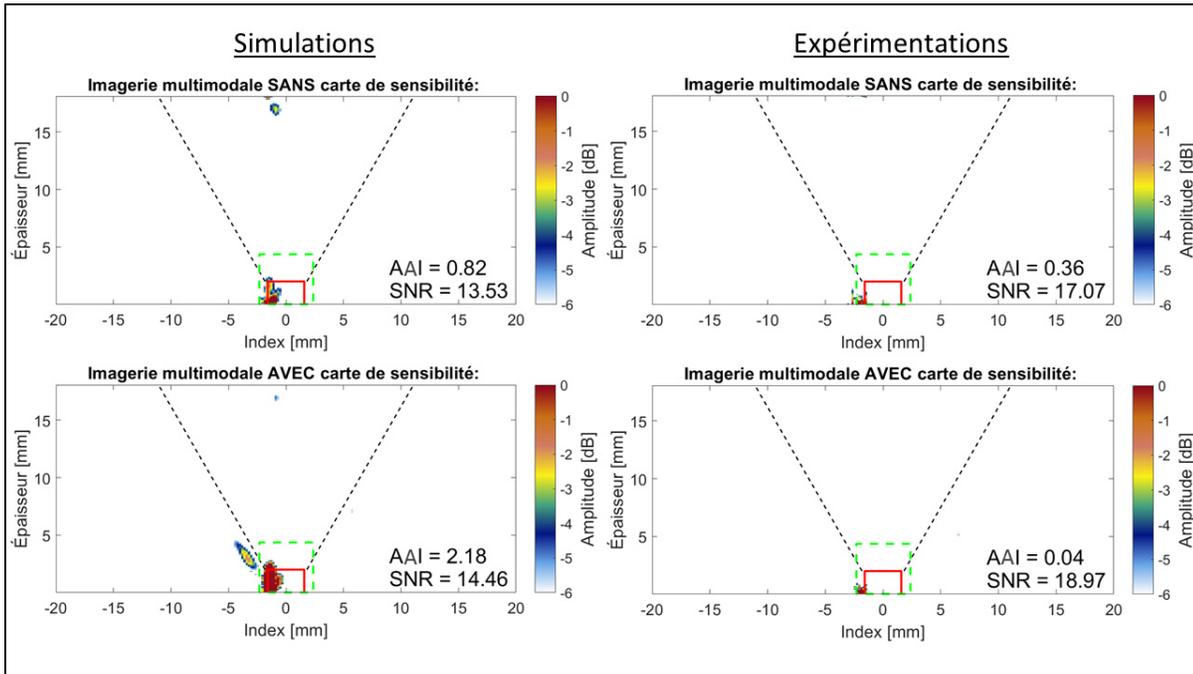


Figure 3.12 Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de pénétration en utilisant un sabot de 19°

En expérimentation, l'amplitude de l'indication est plus faible et plus petite qu'en simulation, ce qui nuit à son interprétation, mais l'artéfact présent lors de l'imagerie de la simulation n'a plus suffisamment d'amplitude pour apparaître, ce qui diminue l'AAI à 0.36. De même façon pour l'imagerie avec filtres de sensibilité, l'amplitude de l'artéfact accentuée par l'algorithme n'est pas suffisamment puissante pour s'afficher, ce qui améliore l'AAI (0.04). À noter que la taille de l'information du défaut reste plutôt faible et pourrait avoir de la difficulté à être détecté.

La figure 3.13 représente les résultats des imageries TFM multimodales du manque de pénétration, cette fois utilisant un sabot de 36° . Il est possible d'observer une baisse générale des SNR comparés aux résultats utilisant un sabot de 19° . Ce phénomène est dû à la position du défaut situé dans une zone où la quantité d'énergie qui s'y rend est plus faible avec un sabot de 36° qu'avec un sabot de 19° . Si on observe l'AAI en simulation, les résultats sont supérieurs à ceux obtenus grâce au sabot de 19° . L'image sans filtres affiche l'information provenant du défaut efficacement avec un artéfact similaire, mais avec moins d'amplitude que son

homologue (AAI de 0.69). En appliquant l'algorithme avec les filtres de sensibilité, l'artéfact disparaît ce qui fait diminuer l'AAI à 0.01.

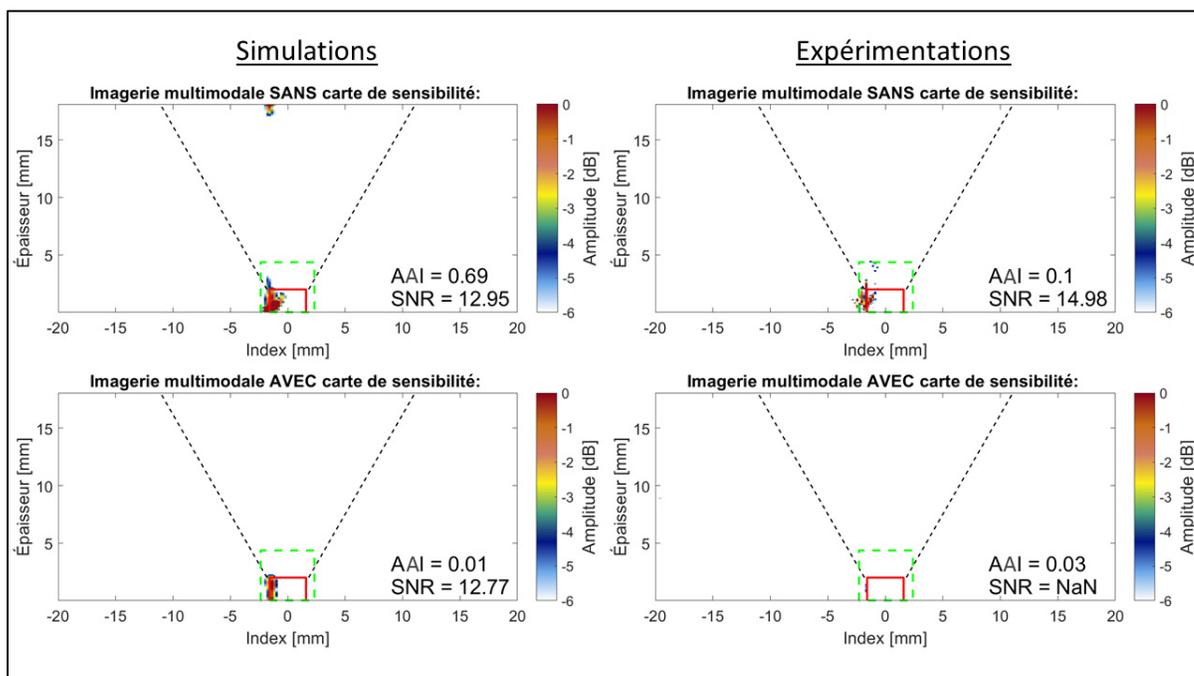


Figure 3.13 Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) du manque de pénétration en utilisant un sabot de 36°

L'image produite des résultats expérimentaux sans les filtres comporte un bon AAI (0.1) avec presque aucun artéfact visible. Contrairement aux images avec le sabot de 19°, l'algorithme avec les filtres de sensibilité n'améliore pas l'image, mais fait complètement disparaître l'information en réduisant le SNR à « NaN ». Un SNR de « NaN » indique qu'il n'y a aucun pixel avec une amplitude de plus de -6 dB, donc le SNR échoue. L'information sur l'image sans filtre est de faible amplitude et diffuse, ce qui nuit fortement à l'efficacité des filtres. D'autres essais, notamment en variant la distance entre le sabot et la soudure, seraient prometteurs afin d'améliorer la qualité des images.

3.3 Étude de la fissure débouchante

Le dernier défaut à être analysé sera la fissure débouchante. De façon similaire à l'étude sur le manque de fusion, sur les deux figures suivantes (figure 3.14 et 3.15), il est possible de remarquer les échos de surface et de fond, les artéfacts ainsi que le défaut. L'indication de l'emplacement théorique de la fissure est indiquée en rouge. Cette dernière représente une fissure qui se positionnerait sur la surface de la pièce au niveau de l'interface du joint soudé. On peut constater que l'indication du défaut s'affiche principalement en reconstruction directe des modes longitudinaux et transversaux. Selon la forte indication en mode longitudinale directe, on peut poser l'hypothèse que le sabot de 36° donnera de meilleurs résultats qu'en utilisant un sabot de 19°.

Par contre, en regardant les résultats expérimentaux, que ce soit en utilisant un sabot de 19° ou de 36°, on observe que le mode longitudinal est très bruité. Ce phénomène est causé par le manque d'information provenant du défaut ainsi que le manque d'artéfacts. Ces informations étant nécessaires pour créer un contraste avec le bruit pendant la normalisation, l'image devient difficile à lire. Sans ces informations, il est possible de prévoir que le mode longitudinal sera d'une utilité très limitée lors de la reconstruction multimodale, ce qui réduira grandement le SNR. Le mode transversal nous indique la pointe et le pied de la fissure, mais encore là, avec une amplitude très faible, ce qui nuira forcément aussi au SNR.

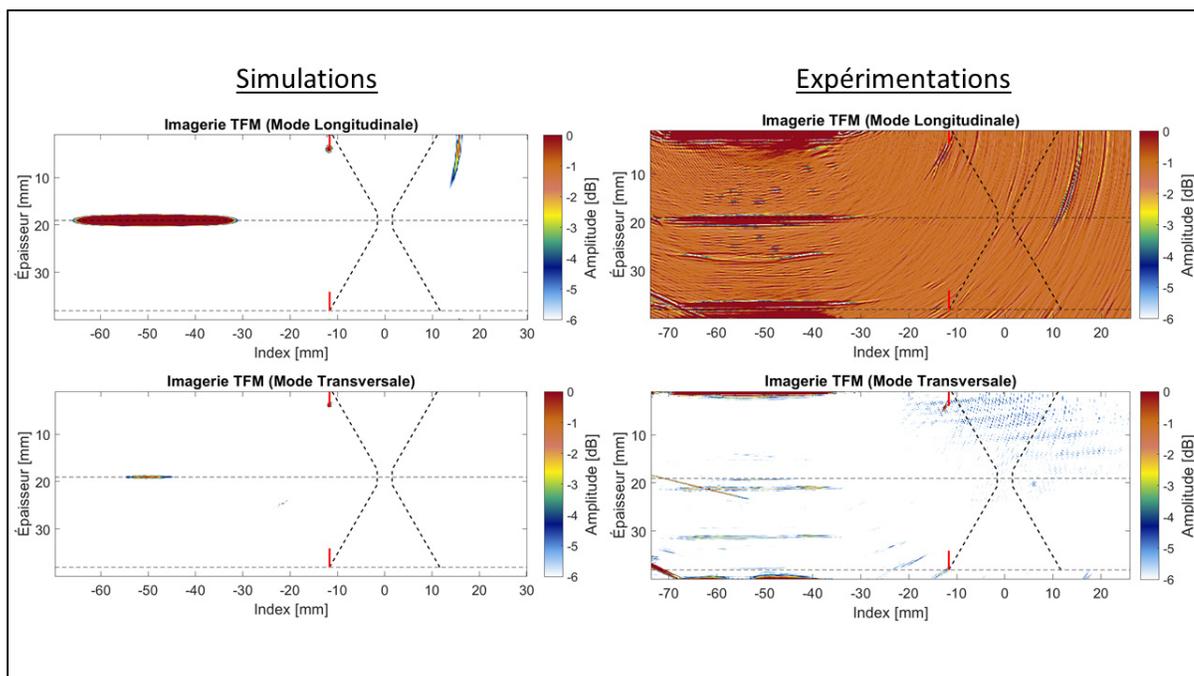


Figure 3.14 Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) de la fissure débouchante en utilisant un sabot de 19°

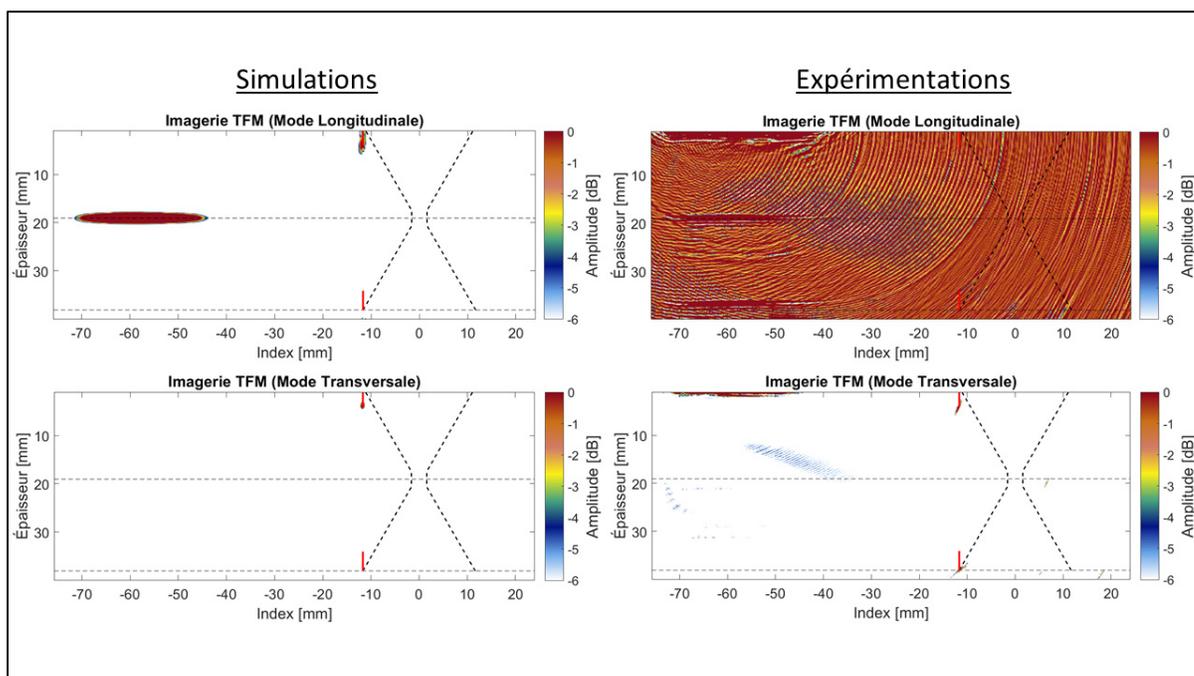


Figure 3.15 Imagerie TFM classique des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) de la fissure débouchante en utilisant un sabot de 36°

L'analyse de l'imagerie TFM multimodale sans filtres utilisant un sabot de 19° (figure 3.16) en simulation montre le défaut avec une amplitude convenable (SNR de 13.29), ainsi que deux artéfacts qui donnent un AAI de 2.95. En appliquant l'algorithme à base des filtres de sensibilité, l'image n'est pas améliorée. L'algorithme réduit l'amplitude de l'information jusqu'à la faire disparaître presque complètement (SNR de 11.6), et conserve quelques artéfacts (AAI de 0.33). En observant les résultats expérimentaux, on constate une très faible indication avec un bruit élevé (SNR de 10.52). Ce résultat est prévisible, car l'emploi d'un sabot de 19° est plus optimal lors d'inspection de fond que de surface. Ce dernier envoie très peu d'énergie à l'endroit prévu pour ce défaut. En se basant sur les résultats de la simulation en plus d'avoir une image de faible qualité, l'algorithme à base des filtres de sensibilité arrive à un SNR de 13.27, mais visuellement, l'image n'en est pas améliorée. L'AAI est améliorée en passant de 18.56 à 4.1. Ce résultat prouve que l'algorithme de filtre tend à retirer trop d'amplitude près de la surface de la pièce.

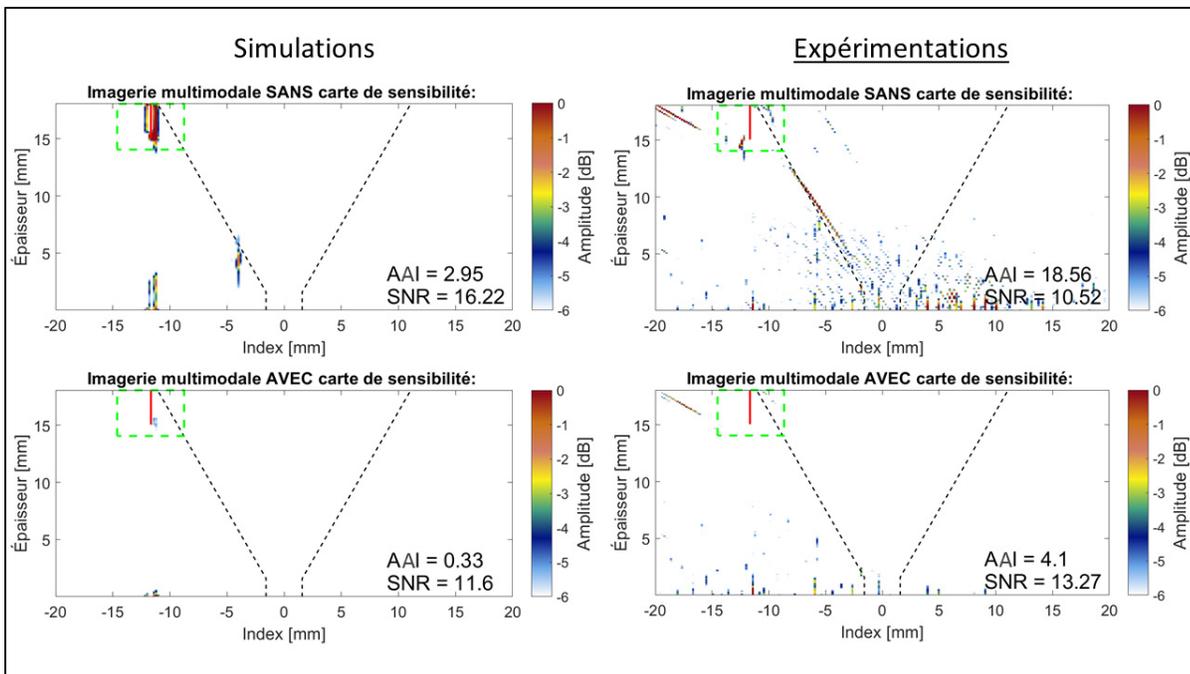


Figure 3.16 Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) de la fissure débouchante en utilisant un sabot de 19°

En utilisant un sabot de 36° (figure 3.17), on obtient des résultats similaires quant à l'imagerie TFM multimodale sans les filtres de la simulation avec celle du sabot de 19° . Il est possible de remarquer une augmentation du SNR (16.48) avec quelques artéfacts donnant un AAI de 4.44. En appliquant l'algorithme à base des filtres de sensibilité sur la simulation, on obtient un résultat prometteur, une disparition des artéfacts (AAI de 0.04) avec la conservation des informations provenant du défaut qui augmente légèrement le SNR à 17.99. L'aspect expérimental utilisant le sabot de 36° indique le défaut convenablement (SNR de 16.91) avec un faible niveau d'artéfact sur le fond de la pièce (AAI de 0.97). L'algorithme à base des filtres de sensibilité sur cette image retire la majorité des artéfacts, faisant passer l'AAI à 0.30 ainsi que le SNR à 20.33. Par contre, bien que la valeur numérique est supérieure, l'indication est plus mieux représentée visuellement avant l'application des filtres. Ce phénomène est dû à l'algorithme qui diminue l'amplitude du bruit sous le seuil de -6 dB, ce qui ne se voit pas visuellement. Donc, bien que numériquement améliorée, visuellement, l'application des filtres dans ce cas précis nuit à l'interprétation de l'image.

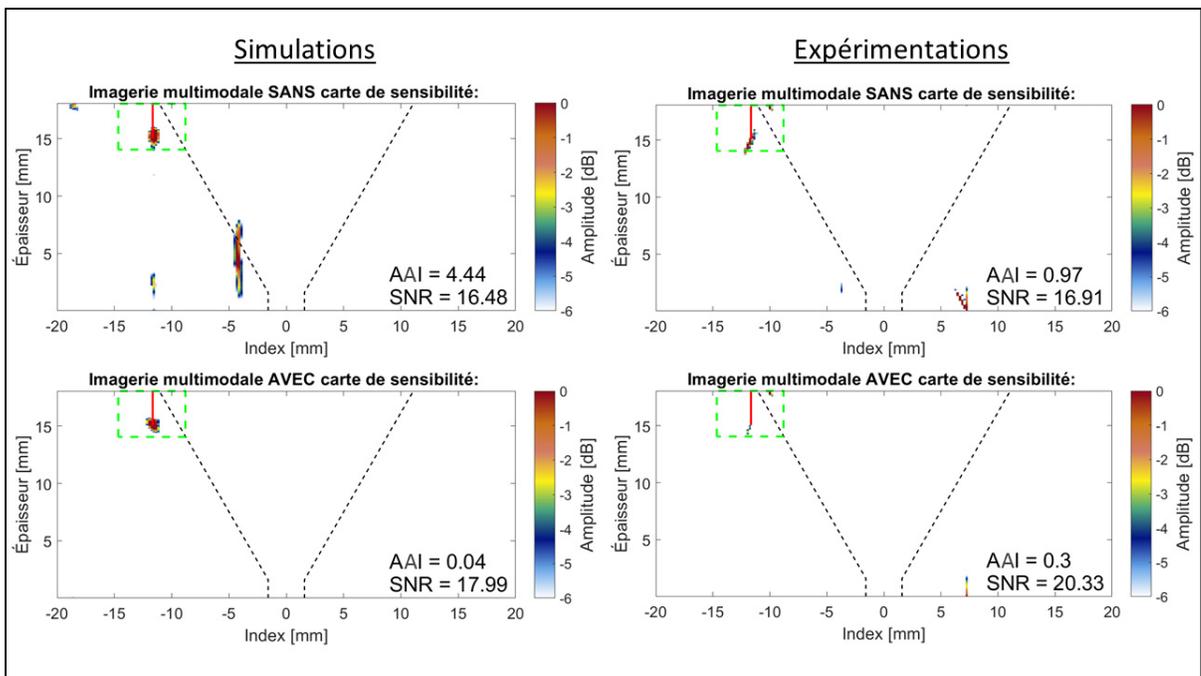


Figure 3.17 Imagerie TFM multimodale des simulations (à gauche) et des expérimentations (à droite) de la fissure débouchante en utilisant un sabot de 36°

3.4 Discussion des résultats

Le but de l'algorithme d'analyse TFM multimodale est de regrouper les indications de défauts éventuels provenant de plusieurs modes de propagation sur une seule image tout en diminuant l'apparence des artéfacts de reconstruction. En analysant les images TFM classiques, il est possible de voir les indications des différents défauts. Effectivement, le manque de fusion apparaît clairement selon une reconstruction transversale indirecte, le manque de pénétration selon une reconstruction longitudinale directe et la fissure débouchante selon une reconstruction directe. Par contre, les défauts ne sont pas facilement visibles selon la même reconstruction.

Ce qui rend l'imagerie multimodale intéressante, c'est que l'indication du défaut apparaît clairement avec une amplitude supérieure à -6 dB pour chacune des simulations en utilisant un sabot de 36°. Il est possible de remarquer que l'algorithme de l'Université de Bristol diminue généralement l'amplitude apparente du défaut, mais retire efficacement les artéfacts de reconstruction. De plus, un changement d'angle du sabot peut avoir une importance critique sur la détection des défauts. Comme il est possible de le remarquer en comparant les deux imageries TFM classiques du manque de fusion, ce dernier est difficilement identifiable en utilisant un sabot de 19°, mais très facilement identifiable avec un sabot de 36°. Par contre, en comparant leurs imageries multimodales, la différence est beaucoup moins marquée. L'indication dans les deux images, quoique différente, est présente à un même seuil d'amplitude. Cela démontre l'efficacité de l'algorithme à détecter un défaut avec un équipement qui ne serait pas particulièrement adapté à sa géométrie.

Les résultats expérimentaux concordent avec le résultat de leur simulation respective. Effectivement, malgré un niveau de bruit conséquent, pour la majorité des couples sabot et défaut, les analyses expérimentales fournissent des indications avec une amplitude suffisante pour être détectée par l'algorithme multimodal. Lorsque l'image TFM classique est efficace comme dans le cas du manque de fusion avec un sabot de 36°, l'algorithme multimodal réussit

à faire ressortir l'information avec une amplitude similaire tout en retirant les artéfacts de reconstruction qui pourrait mener à l'identification erronée d'autres défauts.

Dans le cas contraire, lorsque l'imagerie TFM classique ne contient pas d'information du défaut avec une amplitude significative, comme dans le cas de la fissure débouchante, l'imagerie multimodale n'est pas suffisamment efficace pour amplifier l'amplitude du défaut au point d'avoir une information précise sans artéfact. Cela est dû au fait qu'aucun mode considéré dans la reconstruction ne projette suffisamment d'énergie dans cette zone pour illuminer le défaut convenablement.

CHAPITRE 4

CARTES DE SENSIBILITÉ À BASE DE SIMULATIONS

L'imagerie TFM multimodale comporte des avantages certains, soit pour détecter un défaut en minimisant l'importance de sa géométrie ou de sa position, ou alors, offre la possibilité de faire une identification et un dimensionnement précis de ce dernier. Par contre, cette procédure comporte des désagréments. Pour obtenir un résultat, la méthode demande d'analyser plusieurs images produites avec des parcours d'onde différents. L'idéal serait d'avoir toute l'information contenue dans les différentes images, sur une seule. L'inconvénient principal est que chaque reconstruction comporte des artéfacts qui polluent grandement l'image et offre de fausses indications qui ne sont pas aisées d'identifier comme telles.

Afin de réduire l'importance des artéfacts de reconstruction, des cartes de sensibilité ont été produites lors de cette étude. Cette avenue est utilisée pour offrir une alternative à la procédure proposée par Budyn *et al* (2018) lorsque l'emplacement du défaut n'est pas connu. Cette procédure est élaborée à partir de multiples simulations effectuées à l'aide du logiciel CIVA.

La technique utilisée pour réduire l'importance des artéfacts est de délimiter des zones qui seront propices à l'apparition d'artéfacts. L'image unique de la TFM multimodale peut ainsi être améliorée en filtrant ces zones selon le parcours de reconstruction avant la recombinaison finale. Afin de déterminer ces zones problématiques, de multiples simulations ont été produites où l'emplacement du défaut est légèrement modifié. En produisant l'imagerie TFM de ces différentes simulations, il est possible de les combiner en une image sommative qui présente l'ensemble des informations et des artéfacts selon le parcours de reconstruction.

La figure 4.1 représente un exemple de l'imagerie TFM sommative d'un manque de fusion effectuée à l'aide d'un sabot de 19°. Cette image contient l'information du fond de la pièce ainsi que du défaut se situant vers le centre de la pièce. L'écho de fond est laissé afin de normaliser les différentes reconstructions sur un même pied. L'objectif est de délimiter précisément les zones qui contiennent les artéfacts sans y inclure des pixels qui pourraient contenir de l'information pertinente provenant du défaut. La zone supérieure identifiée comme artéfacts est laissée intacte parce qu'elle est très près de la zone contenant l'information pertinente. Par contre, la zone inférieure est éliminée parce qu'il est clair que ses informations sont des artéfacts.

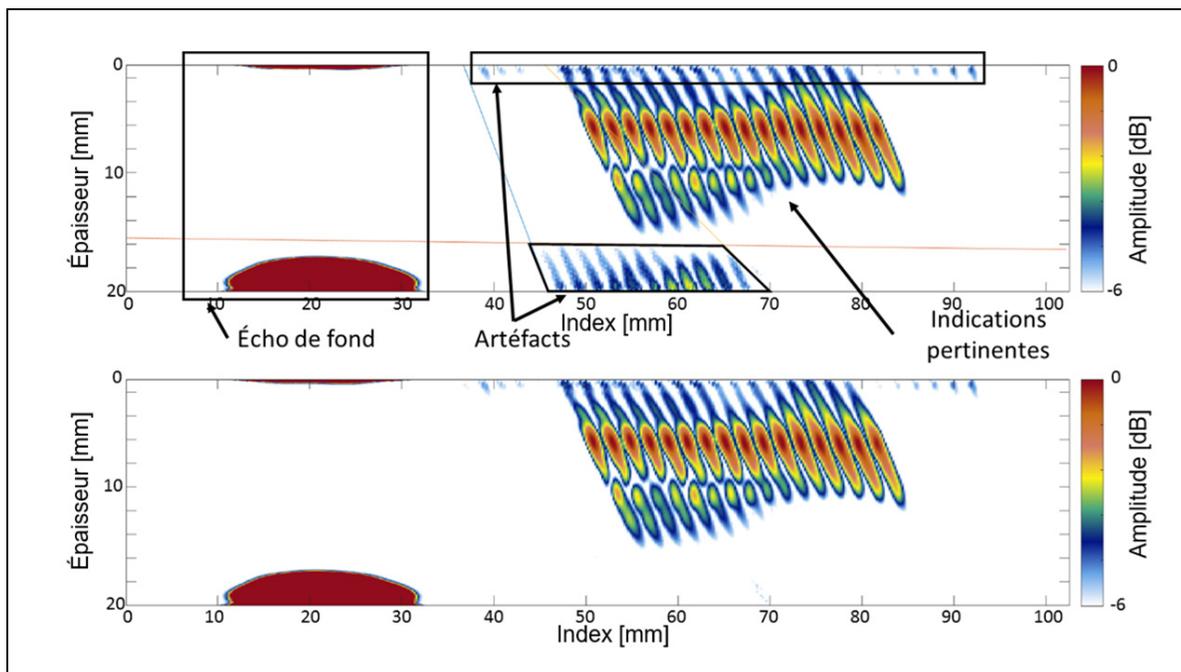


Figure 4.1 Imagerie TFM sommative pour le parcours « TT-L » d'un défaut de type manque de fusion qui est déplacée de 2 mm 16 fois, qui présente l'image brute (en haut) et l'image filtrée (en bas)

En analysant de cette façon les différentes images sommatives de chaque parcours inclus dans la reconstruction multimodale, il est possible de créer la série de filtres affichée à la figure 4.2. Ces filtres indiquent les pixels pouvant contenir de l'information pertinente en jaune, ainsi que les zones ayant une forte probabilité de contenir des artefacts, en bleu. Donc, pour construire un filtre, les matrices « FILTRE » auront les mêmes dimensions que les matrices « TFM », avec des 1 aux pixels jaunes et des 0 aux pixels bleus. En multipliant les matrices « TFM » par les matrices « FILTRE », cela aura pour effet de retirer d'éventuels artefacts.

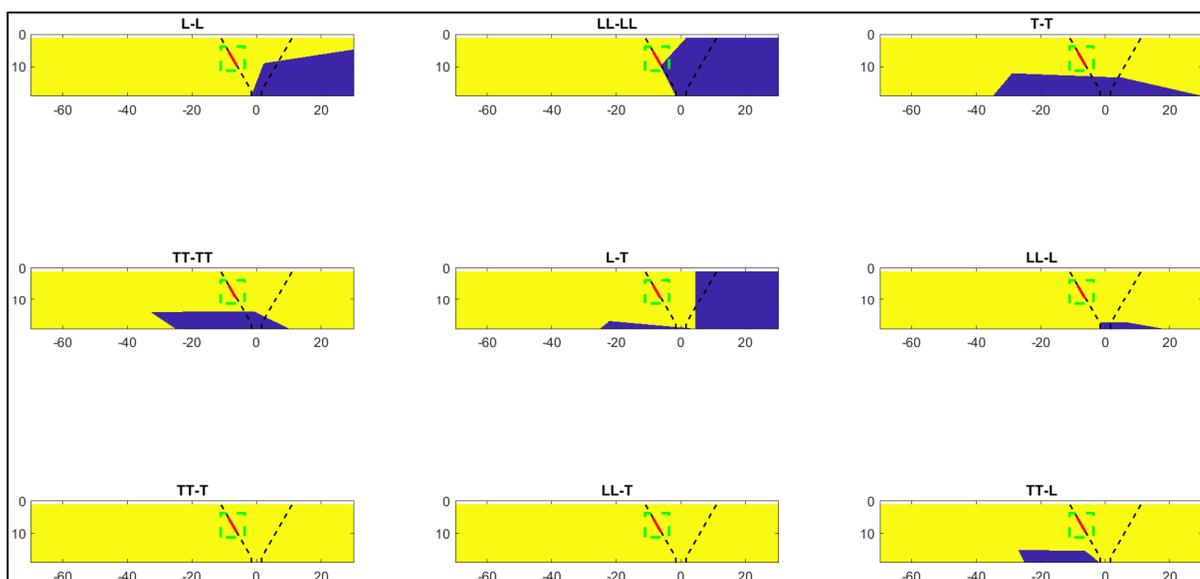


Figure 4.2 Exemple de la série de filtres établie avec la procédure pour un défaut de type manque de fusion en milieu de pièce. En jaune, les zones d'intérêts à conserver, en bleu, les zones à éliminer

4.1 Résultats de l'application des cartes de sensibilité basées sur les simulations

Deux situations ont été analysées :

- Cas #1 : l'inspection d'un manque de fusion en milieu de pièce,
- Cas #2 : l'inspection d'une fissure débouchante.

Pour les deux cas, la sonde à 64 éléments ainsi que le sabot de 19° et l'acier A-36 ont les mêmes propriétés que celles décrites dans la section méthodologie. La figure 4.3 donne les paramètres supplémentaires programmés dans le logiciel de simulations.

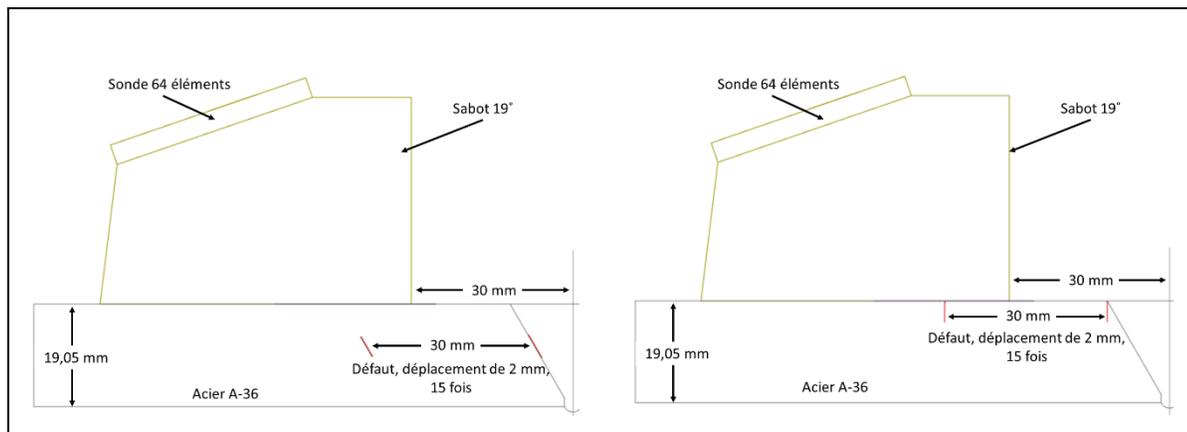


Figure 4.3 Paramètres des simulations du manque de fusion (à gauche) et de la fissure débouchante (à droite)

La figure 4.4 représente une recombinaison de toutes les images TFM produites avec les neuf parcours suivants : L-L, T-T, L-T, LL-L, LL-T, TT-L, TT-T, LL-LL et TT-TT. L'image affichée est la partie réelle de sa transformé d'Hilbert en échelle décibel normalisé sur son maximum. Comme prévu dans les hypothèses initiales, l'information du défaut est présente, mais les nombreux artéfacts de reconstruction rendent son identification difficile. Seulement avec cette image, il est impossible d'identifier les fausses informations (artéfacts) des informations provenant du défaut.

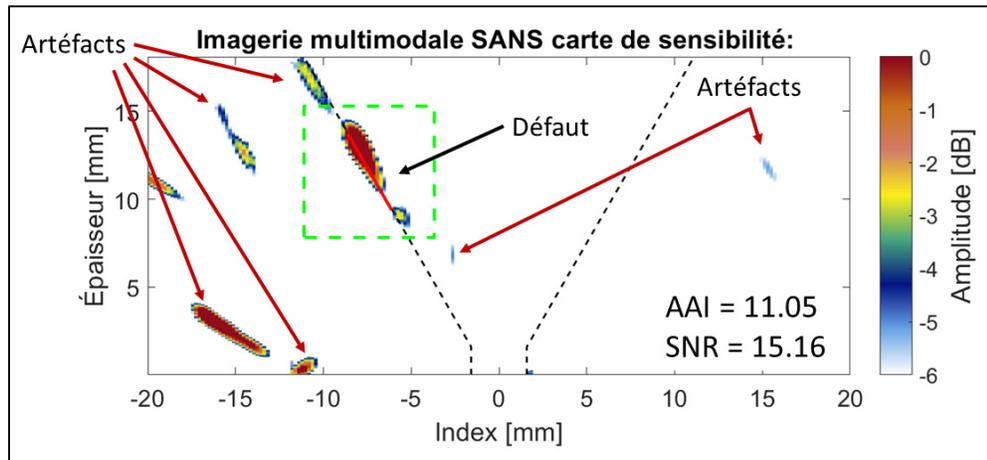


Figure 4.4 Imagerie TFM multimodale d'un manque de fusion produite par simulation

Les figures 4.5 et 4.6 représentent l'imagerie TFM multimodale du manque de fusion avec les filtres à base des cartes de sensibilité produite par les deux méthodes. Ces deux images sont produites avec la même FMC et la même méthode TFM que la figure 4.4 avec pour particularité d'y avoir appliqué les filtres avant la recombinaison finale. La figure 4.5 est produite en appliquant les filtres à base des cartes de sensibilité produites avec les simulations démontrées à la figure 4.2.

Premièrement, en comparant la figure 4.5 à la figure 4.4, il est possible de remarquer que les artéfacts se situant loin de la zone du défaut ont totalement disparu. Cependant, comme mentionnés précédemment, ces filtres doivent préserver l'information du défaut, où qu'il se trouve sur l'abscisse. Cette propriété fait en sorte que certains artéfacts qui se trouvent dans une zone où pourrait se trouver le défaut ne peuvent être éliminés. En matière d'amélioration, la figure 4.5 comporte un SNR de 15.17, ce qui est très similaire au SNR de 15.16 de la figure sans filtres. Par contre, bien que certains artéfacts sont retirés, avec un AAI de près de la moitié de celui de la figure 4.5, ainsi que la qualité de l'image s'est améliorée, le risque d'une mauvaise interprétation du défaut reste conséquent.

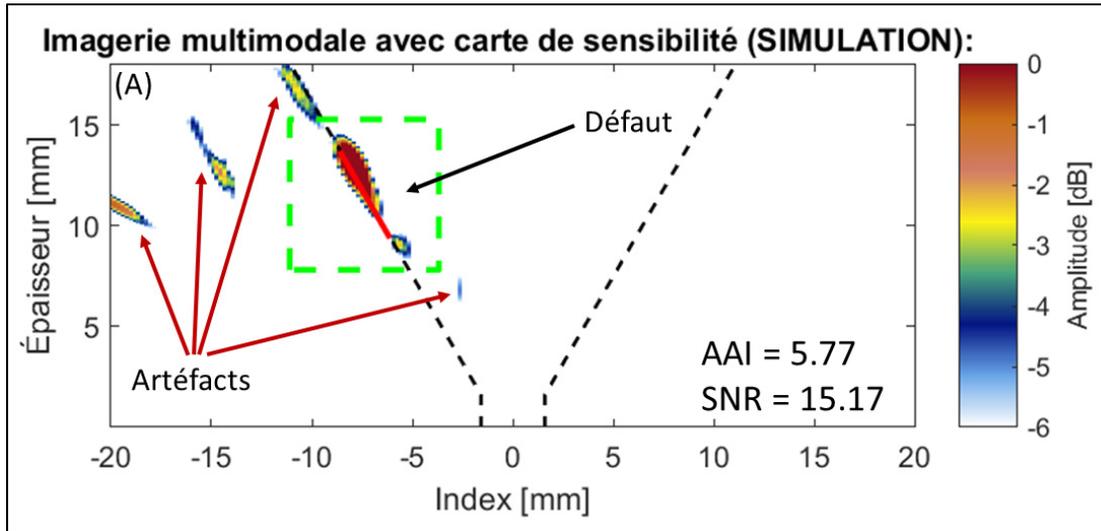


Figure 4.5 Imagerie TFM multimodale d'un manque de fusion simulé avec filtre à base de carte de sensibilité par la méthode de simulation successive (en bas)

La figure 4.6 est produite en appliquant les filtres à base des cartes de sensibilité produites avec l'algorithme de l'Université de Bristol. En comparant les résultats de l'imagerie TFM multimodale filtrée avec les cartes de sensibilités produites avec les simulations (imagerie A) et celles filtrées avec celles produites par l'algorithme de l'Université de Bristol (imagerie B), il est possible de constater que l'imagerie B comporte une légère amélioration du SNR, en passant de 15.17 à 16.50. Par contre, malgré un SNR légèrement plus faible, l'information de l'imagerie A est plus intéressante du fait qu'elle fournit une information sur les deux extrémités du manque de fusion, ce qui sera nécessaire pour le dimensionnement. Par contre, on observe que l'algorithme utilisé pour l'imagerie B est beaucoup plus efficace pour retirer les artéfacts. En effet, avec un AAI de 1.00, l'imagerie B conserve beaucoup moins d'artéfacts que l'imagerie A, avec un AAI de 5.77.

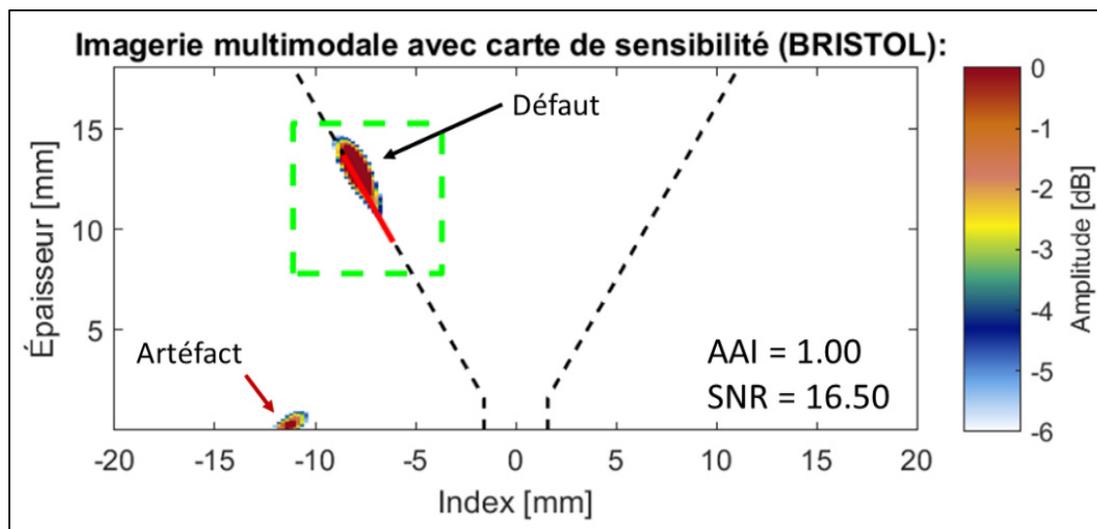


Figure 4.6 Imagerie TFM multimodale d'un manque de fusion simulé avec filtre à base de carte de sensibilité produite par l'algorithme de l'Université de Bristol

La figure 4.7 regroupe les trois imageries TFM multimodales du manque de fusion faites avec les données recueillies expérimentalement. En analysant de façon similaire aux résultats obtenus avec les simulations, on remarque qu'en appliquant l'algorithme développé à l'Université de Bristol, on améliore légèrement le SNR (de 17.85 à 19.49), mais le plus important, les filtres diminuent l'AAI drastiquement (de 7.71 à 1.72). En observant l'image, il est possible de remarquer l'absence totale d'artéfact, l'AAI étant dû à l'information de l'extrémité du défaut qui dépasse de la boîte d'intérêt (boîte verte). On remarque une amélioration très similaire en utilisant les filtres à base de simulation. En effet, le SNR est augmenté de 2 dB (de 17.85 à 19.94), ainsi que l'AAI qui est réduit jusqu'à 2.52. Bien que l'algorithme à base de simulation est moins performant que celui de l'Université de Bristol, les imageries TFM du manque de fusion démontrent que ces algorithmes sont très efficaces pour améliorer les images produites lors de l'analyse de ce genre de défaut.

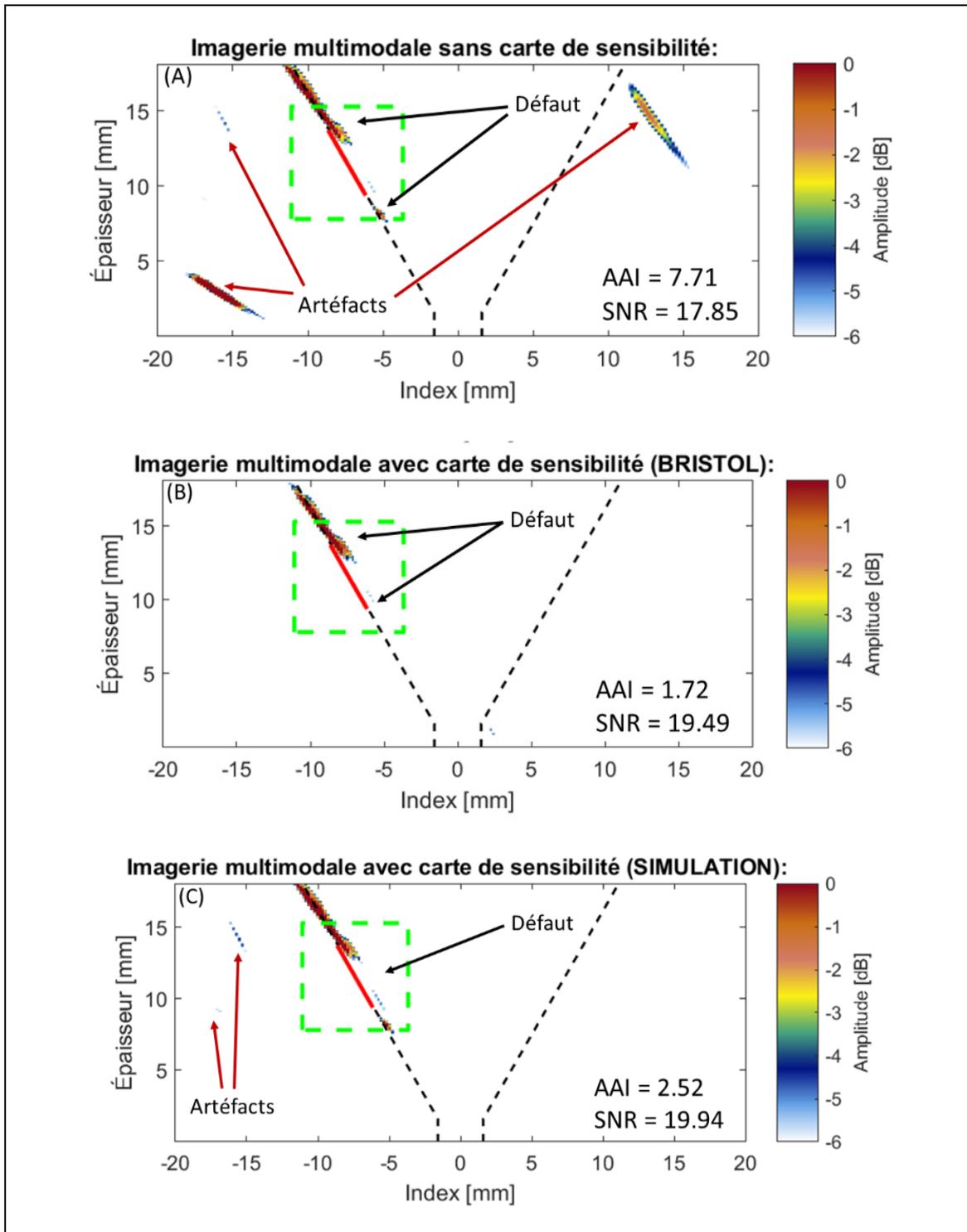


Figure 4.7 Imagerie TFM multimodale du manque de fusion expérimentale avec la représentation sans filtres (A), la représentation avec filtres de l'université de Bristol (B) et la représentation avec filtres basés sur les simulations (C)

La figure 4.8 regroupe les trois imageries TFM multimodales de la fissure débouchante. L'image (A) est produite sans utiliser des filtres, la (B) est produite utilisant l'algorithme de l'Université de Bristol et finalement, la (C) est produite utilisant les filtres basés sur les cartes de sensibilité provenant des simulations. En analysant les résultats de la fissure débouchante, il est possible de constater que les artéfacts ont complètement été éliminés en utilisant les deux méthodes de production des filtres. En comparant l'image (A) et l'image (B), on peut constater une perte significative de SNR (13.29 en A par rapport à 11.60 en B). Cela se traduit sur l'image avec une perte majeure de l'amplitude du défaut. Bien que l'AAI diminue considérablement, passant de 2.95 à 0.33, une telle diminution des informations utiles n'est pas souhaitable. En comparant l'image (A) et (C), on note une augmentation du SNR de 3 DB, ainsi qu'une diminution de l'AAI jusqu'à 0.10. Ceci est dû au fait que les artéfacts présents dans l'image (A) étaient loin de la zone probable de localisation d'un défaut de ce type, soit une fissure débouchante à la surface de la pièce.

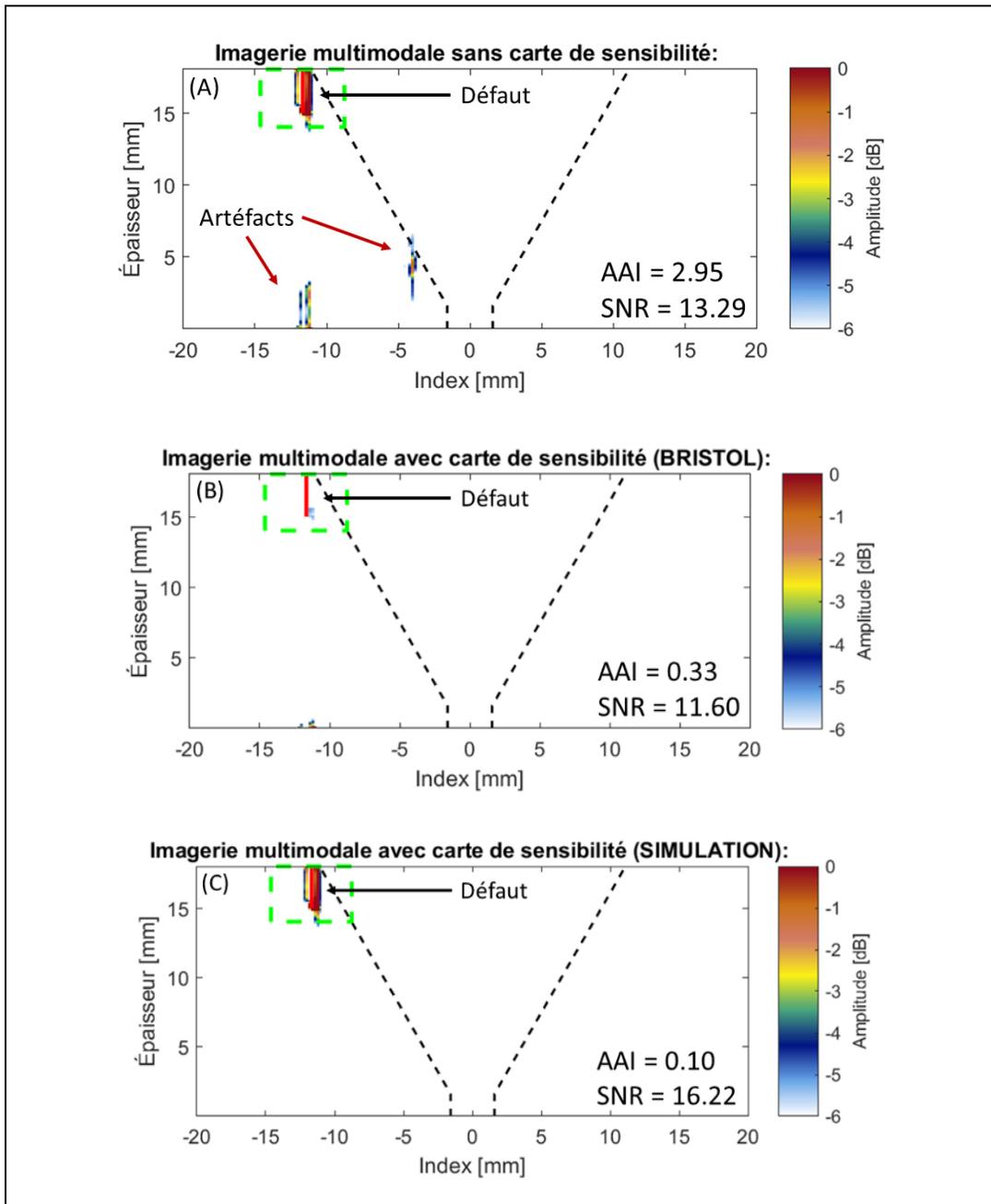


Figure 4.8 Imagerie TFM multimodale de la fissure débouchante simulée avec la représentation sans filtres (A), la représentation avec filtres de l'université de Bristol (B) et la représentation avec filtres basés sur les simulations (C)

La figure 4.9 regroupe les trois imageries TFM multimodales de la fissure débouchante faites avec les données recueillies expérimentalement. En analysant de façon similaire aux résultats obtenus avec les simulations, on remarque qu'en appliquant l'algorithme développé à l'Université de Bristol, on améliore légèrement le SNR (de 10.52 à 13.27). Par contre, en regardant l'image, il n'existe plus de trace de l'extrémité de la fissure. Le bruit étant si important dans l'image non filtrée, que l'algorithme, en le diminuant fortement, fausse l'indication en faisant aussi disparaître l'information de la fissure. De façon similaire, les filtres diminuent l'AAI drastiquement (de 18.56 à 4.10), mais comme il ne subsiste plus vraiment d'information pertinente dans l'image, c'est problématique. On remarque qu'en utilisant les filtres à base de simulation, on réussit à conserver l'information de l'extrémité de la fissure, tout en augmentant le SNR à 14.72, ainsi que réduire l'AAI à 10.05. En observant les trois images, il est possible de voir que l'image d'origine est très bruitée et que l'algorithme de l'Université de Bristol diminue grandement le bruit, mais il efface de l'information pertinente par le fait même. Bien que moins performants, les filtres à base de cartes de sensibilité simulées réussissent à conserver l'information provenant du défaut, mais ne retirent pas suffisamment de bruit pour donner un résultat intéressant.

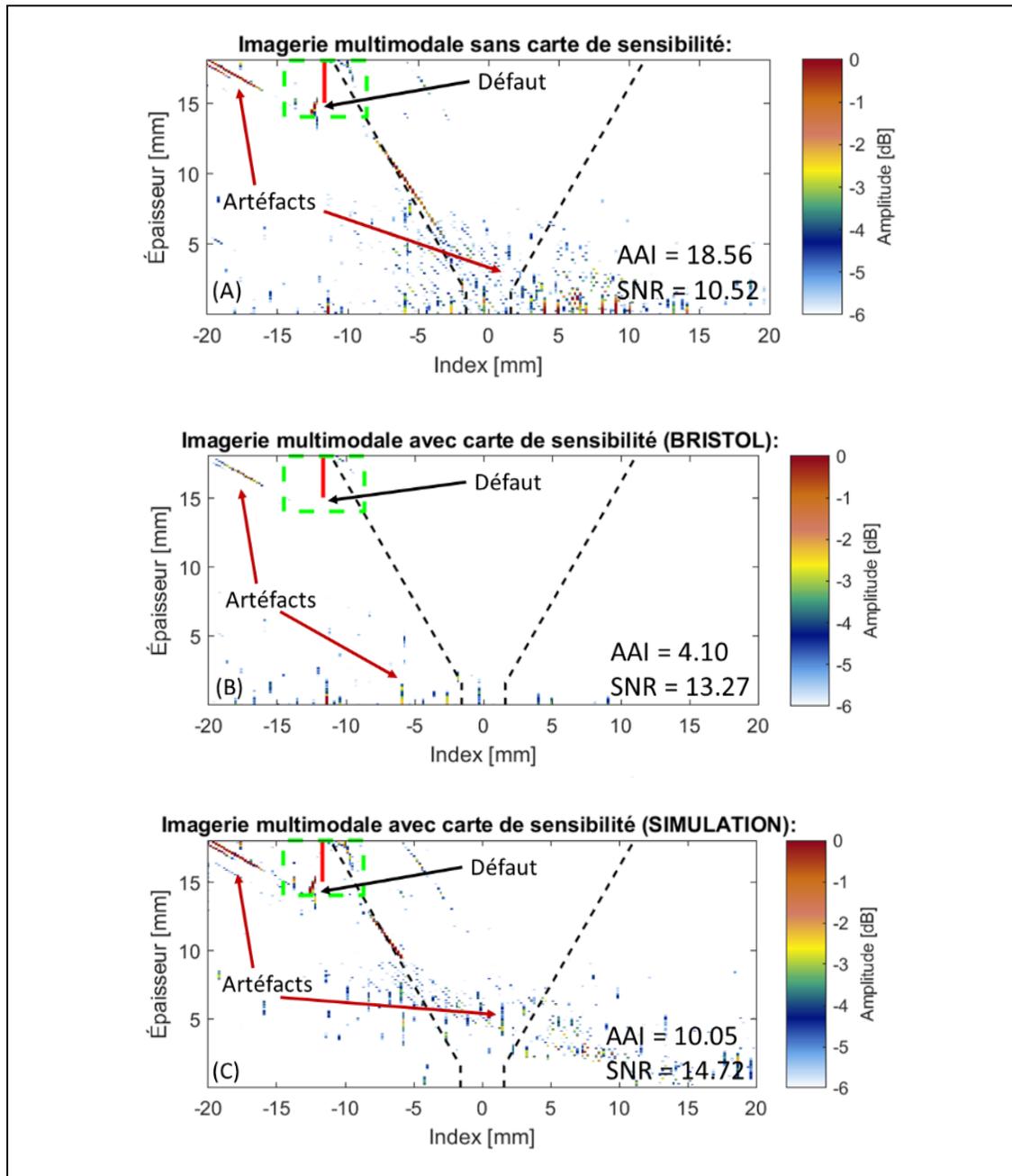


Figure 4.9 Imagerie TFM multimodale de la fissure débouchante expérimentale avec la représentation sans filtres (A), la représentation avec filtres de l'université de Bristol (B) et la représentation avec filtres basés sur les simulations (C)

Le principal objectif de l'implémentation de filtres basés sur les cartes de sensibilité est de diminuer l'importance des informations nuisibles, c.-à-d. les artéfacts, contenu dans les imageries TFM produites à partir des différents parcours de reconstruction. Ces informations

sont nuisibles parce qu'elles peuvent mener à l'interprétation de défauts qui ne sont pas réels ou alors une identification ou un dimensionnement trompeur. L'élaboration de cartes de sensibilité faite à partir de multiples simulations CIVA s'est montrée prometteuse en éliminant les artéfacts se trouvant relativement loin de l'emplacement du défaut, ainsi qu'en augmentant le SNR et diminuant l'AAI significativement. Par contre, bien que ces cartes s'appliquent à un défaut dont l'emplacement en abscisse est variable, les filtres ne sont valides que pour une combinaison de sonde, sabot, plaque et type de défaut établi. Si l'un de ces éléments est modifié, il faut produire une série de filtres qui seront adaptés à la nouvelle situation. Pour cette raison, cette technique serait bien adaptée lors d'inspections fréquentes de matériel produit en série par exemple.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le principal objectif de cette étude est de simplifier l'utilisation de l'imagerie multimodale en développant un algorithme regroupant l'information des différentes images TFM produites avec divers modes sur une image unique et simple à interpréter. Cette étude comporte un intérêt marqué pour une industrie qui compte réduire ses délais d'inspection tout en assurant une qualité de produit optimal.

La revue de littérature rassemble les connaissances amassées au long de la recherche et elle établit les fondements de l'algorithme TFM multimodal. Premièrement, afin de bien interpréter les indications fournies par l'imagerie, il est primordial d'avoir des connaissances solides sur le matériau de la pièce à inspecter ainsi que sur les différents défauts pouvant si développer. Suite à cela, il existe plusieurs techniques pouvant accomplir l'inspection, chacune ayant ses avantages et inconvénients. Finalement, l'analyse ultrasonore est approfondie afin de comprendre les concepts qui ont abouti à produire l'algorithme d'imagerie TFM multimodal.

L'algorithme se déroule en deux étapes. Premièrement, pour une sélection de neuf modes, la reconstruction TFM est effectuée. Cette reconstruction donne une image représentant l'interaction de l'onde ultrasonore avec son milieu suivant un parcours précis. Ces neuf parcours étant différents, chacun donne une information pertinente à différents endroits et selon différentes configurations de défaut. Effectivement, selon le type de défaut et sa position, quelques modes donneront une information cohérente tandis que d'autre non, ou pire encore, créeront de fausses informations que l'on appelle artéfacts de reconstruction. C'est là que la deuxième partie de l'algorithme entre en jeu. Cette dernière produit, pour chaque mode, une carte signifiant sa zone d'intérêt. Cette zone est celle où le mode produit une indication utile à l'interprétation de l'image. Avec cette carte, un filtre est produit qui réduira considérablement l'amplitude des informations ne se trouvant pas dans la zone d'intérêt des modes. En joignant les différentes images préalablement filtrées, on obtient une image qui contient l'information de tous les modes sans la pollution des artéfacts de reconstruction.

Cet algorithme est mis à l'épreuve lors de simulation. L'étape préliminaire de simulation est justifiée pour régler les différents paramètres de la sonde, du sabot et de l'échantillon. Cette étape est aussi nécessaire afin de vérifier la faisabilité et les résultats de l'étude expérimentale. Effectivement, on vérifie la faisabilité, car l'environnement de simulation offre une réponse idéale à la propagation ultrasonore en n'incluant pas le bruit et les imperfections présentes lors du processus expérimental. Dans la plupart des simulations, les résultats sont suffisamment intéressants pour espérer une détection dans les normes et fournissent une mesure de comparaison pour les résultats expérimentaux.

Suite aux simulations, l'étude expérimentale démontre l'efficacité de l'algorithme. Effectivement, les résultats démontrent que cet algorithme détecte les manques de fusion et les manques de pénétration contenus dans une plaque d'acier soudée. Il est aussi intéressant de constater que bien que le sabot de 36° offre une performance supérieure dans la majorité des situations, l'algorithme arrive à détecter certains défauts avec une performance comparable en utilisant le sabot à 19°.

Les contributions apportées sont :

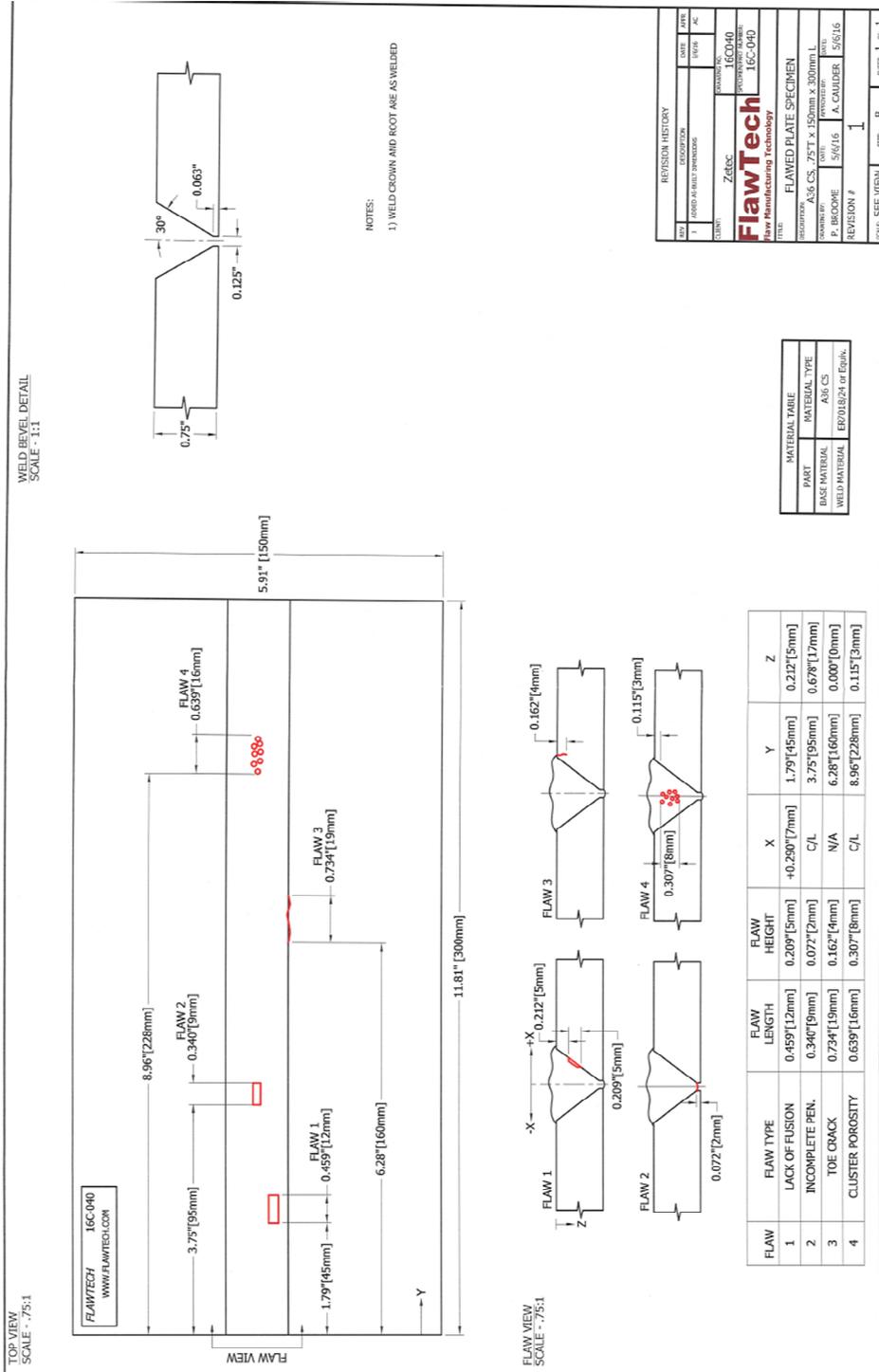
- Un état de l'art actuel sur l'inspection de plaques soudées et l'utilisation des algorithmes TFM multimodaux
- Un algorithme d'imagerie combinant plusieurs modes afin de produire une image simple à interpréter
- Une analyse de performance de l'algorithme en simulation
- Une preuve expérimentale de performance de l'algorithme

La poursuite de cette étude serait :

- Ajuster les paramètres afin d'améliorer la détection des fissures débouchantes
- Produire une étude comparative avec plusieurs sabots à angles différents afin de trouver l'équipement optimal pour l'imagerie multimodale
- Intégrer l'algorithme dans un logiciel d'imagerie comme Ultravision par exemple.

ANNEXE I

PARAMÈTRE DE LA PLAQUE D'ACIER SOUDÉE



BIBLIOGRAPHIE

- Arakawa, T., Hirose, S., & Senda, T. (1985). The detection of weld cracks using ultrasonic testing. *NDT International*, 18(1), 9–16. doi:10.1016/0308-9126(85)90037-9 .
- Ashton, R. F., Wesley, R. P., & Dixon, C. R. (1975). The effect of porosity on 5086-H116 aluminum alloy welds. *Welding journal*, 54(3), 96-98.
- Baiotto, R., Knight-Gregson, B., Nageswaran, C., & Clarke, T. (2018). Coherence weighting applied to FMC/TFM data from austenitic CRA clad lined pipes. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(3), 49.
- Baskaran, G., Balasubramaniam, K., Krishnamurthy, C.V., Lakshmana Rao, C. (2004) Ultrasonic TOFD flaw sizing and imaging in thin plates using embedded signal identification technique (ESIT). *Insight Vol 46 No 9 September 2004*. DOI: 10.1784/insi.46.9.537.40838.
- Baughurst, L. (2011) *Welding Defects, Causes & Correction*. ASPEC Engineering Technical Article, October 2011.
- Blitz, J. (2012). *Electrical and magnetic methods of non-destructive testing (Vol. 3)*. Springer Science & Business Media.
- Bowman, M. D., Munse, W. H., & Will, W. (1984). Fatigue Behavior of Butt Welds with Slag Inclusions. *Journal of Structural Engineering*, 110(12), 2825–2842. doi:10.1061/(asce)0733-9445(1984)110:12(2825).
- Broberg, P., Sjö Dahl, M., & Runnemalm, A. (2015). Comparison of NDT–methods for automatic inspection of weld defects. *International Journal of Materials and Product Technology*, 50(1), 1-21.
- Budyn, N., Rhodri, L., Bevan, T., Zhang, J., Croxford, A.J., Wilcox, P.D. (2019) A Model for Multiview Ultrasonic Array Inspection of Small Two-Dimensional Defects. *IEEE transaction on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 66, no. 6.
- Budyn, N., Bevan, R., Croxford, A. J., Zhang, J., Wilcox, P. D., Kashubin, A., & Cawley, P. (2018). Sensitivity images for multi-view ultrasonic array inspection. 080001. <https://doi.org/10.1063/1.5031558>.
- Calmon, P., S. Mahaut, S. Chatillon et R. Raillon. (2006). CIVA: An expertise platform for simulation and processing NDT data. *Ultrasonics*, vol. 44, p. e975-e979. <<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.218>>.

- Carlucci, A., Bonora, N., Ruggiero, A., Iannitti, G., & Testa, G. (2014). Crack Initiation and Propagation Clad Pipe Girth Weld Flaws. Volume 3: Design and Analysis. doi:10.1115/pvp2014-28017.
- Charlesworth, J. P. and J. A. G. Temple (2001). Engineering applications of ultrasonic time-of-flight diffraction. Baldock, Hertfordshire, England ; Philadelphia, Pa., Research Studies Press.
- Cheeke, J. D. N. (2012). Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12260>.
- Coffey, J. M. and R. K. Chapman (1983). "Application of elastic scattering theory for smooth flat cracks to the quantitative prediction of ultrasonic defect detection and sizing." Nucl Energy 22(5): 319-333.
- De Schiara, L. S., & de Ribeiro, G. O. (2016). Finite element mesh generation for fracture mechanics in 3D coupled with ansys®: elliptical cracks and lack of fusion in nozzle welds. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 38(1), 253-263.
- Dijkstra, F. (2006) The history of AUT. ECNDT – Tu.2.5.1. www.ndt.net visionné en 2020.
- Ditchburn, R. J., Burke, S. K. et Scala, C.M. (1996) NDT of welds : state of the art. NDT&E International, Vol. 29, No. 2, pp. 111-117. PII: SO963-8695(96)00010-2.
- Dupont-Marilla, F. (2018). Inspection de blocs d'acier forgé de grand volume par ultrasons multi-éléments [Phd, École de technologie supérieure]. <http://espace.etsmtl.ca/2158/>.
- Endramawan, T., & Sifa, A. (2018). Non Destructive Test Dye Penetrant and Ultrasonic on Welding SMAW Butt Joint with Acceptance Criteria ASME Standard. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 306, 012122. doi:10.1088/1757-899x/306/1/012122.
- Gayer, A., Saya, A., & Shiloh, A. (1990). Automatic recognition of welding defects in real-time radiography. NDT International, 23(3), 131–136. doi:10.1016/0308-9126(90)90109-2.
- Gazanhes, C., & Jessel, M. (1976, June 10). Ultrasons.
- Grotenhuis, R., Chen, A., Hong, A., Verma, Y. (2016) Application of a FMC/TFM Ultrasonic System to Inspection of Austenitic Welds. 19th World Conference on Non-Destructive Testing.
- Hardt, D. E., & Katz, J. M. (1984). Ultrasonic measurement of weld penetration. Welding Journal, 63(9), 273s-281s.

- Hocker, R. G., & Wilson, K. R. (1971). Dye Penetrant Indications Caused by Superficial Surface Defects in 2014 Aluminum Alloy Welds. *Weld. J*, 50-11.
- Holmes, C., Drinkwater, B. W., & Wilcox, P. D. (2008). Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays : Application to defect detection and classification in non-destructive evaluation. *Ultrasonics*, 48(6-7), 636-642. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.07.019>.
- 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. doi:10.1016/j.ndteint.2005.04.002.
- Holmes, C., Drinkwater, B., & Wilcox, P. (2004). The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 46(11), 677–680. doi:10.1784/insi.46.11.677.52285.
- 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. doi:10.1016/j.ndteint.2009.09.001.
- Iakovleva, E., Chatillon, S., Bredif, P., & Mahaut, S. (2014). Multi-mode TFM imaging with artifacts filtering using CIVA UT forwards models. doi:10.1063/1.4864804.
- Jin, S., Wang, C., Liu, S., & Lin, L. (2018, July). Simulation on qualitative detection of defects with multi-mode total focusing method. In *2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)* (pp. 127-131). IEEE.
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (1999). *Fundamentals of acoustics* (p. 560).
- Kombossé, S. Y., & Roy, O. (2019). Prediction of TFM mode for realistic defect imaging. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*.
- Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H. (1990). *Ultrasonic Testing of Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Le Jeune, L., Robert, S., Dumas, P., Membre, A., & Prada, C. (2015). Adaptive ultrasonic imaging with the total focusing method for inspection of complex components immersed in water. doi:10.1063/1.4914712.
- Li, C., Pain, D., Wilcox, P. D., & Drinkwater, B. W. (2013). Imaging composite material using ultrasonic arrays. *NDT & E International*, 53, 8–17. doi:10.1016/j.ndteint.2012.07.006.
- Matrone, G., Savoia, A. S., Caliano, G., & Magenes, G. (2015). The Delay Multiply and Sum Beamforming Algorithm in Ultrasound B-Mode Medical Imaging. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 34(4), 940–949. doi:10.1109/tmi.2014.2371235.

- Moyer, M. W. (1975). Ultrasonic inspection for lack of penetration and porosity in a tungsten inert gas weld with a step geometry (No. Y-1983). Oak Ridge Y-12 Plant, Tenn.(USA).
- Nanekar, P., Kumar, A., & Jayakumar, T. (2015). SAFT-assisted sound beam focusing using phased arrays (PA-SAFT) for non-destructive evaluation. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 30(2), 105–123. doi:10.1080/10589759.2014.1002837.
- Non-destructive testing of welds - ultrasonic testing - techniques, testing levels, and assessment (ISO 17640 : 2010). (2011). . BSI Standards.
- Ogilvy, J. A. and J. A. G. Temple (1983). "Diffraction of elastic waves by cracks: application to time-of-flight inspection." *Ultrasonics* 21(6): 259-269.
- Silk, M. G. (1987). "Changes in ultrasonic defect location and sizing." *NDT International* 20(1): 9-14.
- Sy, K., Bredif, P., Iakovleva, E., Roy, O., Lesselier, D. (2018) Development of methods for the analysis of multi-mode TFM images. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1017 012005. doi :10.1088/1742-6596/1017/1/012005.
- Sy, K. (2018) Étude et développement de méthodes de caractérisation de défauts basées sur les reconstructions ultrasonores TFM. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Paris-Saclay, 2018. Français. NNT : 2018SACLS040. tel-01762654.
- Sy, K., Brédif, P., Iakovleva, E., Roy, O., & Lesselier, D. (2018). Development of the specular echoes estimator to predict relevant modes for Total Focusing Method imaging. *NDT & E International*, 99, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.07.005>.
- Shull, P. J. (2012). *Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications*. CRC Press.
- Thompson, R. B. (1983). "Quantitative Ultrasonic Nondestructive Evaluation Methods." *Journal of Applied Mechanics* 50(4b): 1191-1201.
- Villaverde, E. L., Robert, S., & Prada, C. (2017). High-frequency Total Focusing Method (TFM) imaging in strongly attenuating materials with the decomposition of the time reversal operator associated with orthogonal coded excitations. doi:10.1063/1.4974589.
- Wilcox, P., Holmes, C., & Drinkwater, B. (2007). Advanced Reflector Characterization with Ultrasonic Phased Arrays in NDE Applications. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 54(8), 1541–1550. doi:10.1109/tuffc.2007.424.
- Yan, D., Sutcliffe, M., Wright, B., & Cooper, I. (2013). Ultrasonic imaging of full matrix capture acquired data for carbon fibre-reinforced polymer. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 55(9), 477–481. doi:10.1784/insi.2012.55.9.477.

- YU, P., & Gang, T. (2017). The Use of Multi-Mode TFM to Measure the Depth of Small Surface-Break Cracks in Welds. 2017 Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). doi:10.1109/fendt.2017.8584593.
- Zhang, J., Drinkwater, B. W., Wilcox, P. D., & Hunter, A. J. (2010). Defect detection using ultrasonic arrays : The multi-mode total focusing method. *NDT & E International*, 43(2), 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.10.001>.
- Zhang, J., Barber, T., Nixon, A., & Wilcox, P. (2017). Investigation into distinguishing between small volumetric and crack-like defects using multi-view total focusing method images. 040003. <https://doi.org/10.1063/1.4974590>.

