



**HAL**  
open science

# Étude et développement de méthodes de caractérisation de défauts basées sur les reconstructions ultrasonores TFM

Kombossé Sy

► **To cite this version:**

Kombossé Sy. 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 (COmUE), 2018. Français. NNT : 2018SACLS040 . tel-01762654

**HAL Id: tel-01762654**

**<https://theses.hal.science/tel-01762654>**

Submitted on 10 Apr 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Étude et développement de méthodes de caractérisation de défauts basées sur les reconstructions ultrasonores TFM

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay  
préparée à l'Université Paris-Sud

École doctorale n°580 Sciences et Technologies de l'Information  
et de la Communication (STIC)  
Spécialité de doctorat : Traitement du Signal et des Images

Thèse présentée et soutenue à Gif-sur-Yvette, le 15 février 2018, par

**Kombossé Sy**

Composition du Jury :

Mourad Bentahar Maître de Conférences, Université du Maine	Rapporteur
Sébastien Grondel Professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis	Rapporteur
Christophe Aristégui Professeur, Université de Bordeaux	Président du jury
Ludovic Moreau Maître de conférences, Université de Grenoble	Examineur
Thomas Rodet Professeur, Ecole Normale Supérieure - Saclay	Examineur
Dominique Lesselier Directeur de Recherche CNRS, L2S UMR 8506	Directeur de thèse
Philippe Brédif Ingénieur recherche CEA	Co-encadrant
Ekaterina Iakovleva Ingénieur recherche CEA	Co-encadrant, invité
Olivier Roy Directeur Technique, M2M	Co-encadrant, invité



# Remerciements

Ces travaux sont le résultat d'une collaboration entre la société M2M, l'institut CEA-List et le Laboratoire des Signaux et Systèmes (LSS). Ils ont été principalement réalisés au sein du Laboratoire des Méthodes de Contrôle (LMC) du Département Imagerie et Simulation pour le Contrôle (DISC) du centre CEA Saclay. Je tiens à remercier les personnes que j'ai été amenées à côtoyer au cours de ces trois années.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à Monsieur Philippe Benoist, Président de la société M2M et à Madame Clarisse Poidevin, Chef de département du DISC, pour m'avoir accueillie en tant que doctorante et pour avoir mis à ma disposition tous les éléments nécessaires au bon déroulement de cette thèse.

Je tiens à remercier chaleureusement Dominique Lesselier, mon directeur de thèse, pour sa présence et son accompagnement tout au long de cette thèse. C'est une personne exceptionnelle que j'estime beaucoup qui a su me remonter le moral dans les moments difficiles.

J'adresse également mes plus sincères remerciements à Olivier ROY, directeur technique de la société M2M, qui a été mon encadrant côté entreprise. Il a su apporter une vision technique et industrielle nécessaire dans un cadre de thèse CIFRE. Son souci de mon confort professionnel et de ma personne en ont fait une personne que j'apprécie particulièrement et avec qui j'ai beaucoup aimé travailler.

Un grand merci à mes deux encadrants CEA Philippe Brédif et Ekaterina Iakovleva (Katia) qui m'ont suivi au jour le jour et sans qui cette thèse n'aurait certainement pas été ce qu'elle l'est. Votre expertise scientifique et technique a été plus qu'utile pour faire de cette thèse ce qu'elle est. Vous avez su me guider et canaliser mon esprit parfois éparés. J'ai beaucoup appris auprès de vous. Katia, de par sa rigueur, m'a beaucoup aidée à mieux formuler mes idées et à aller au delà de mes capacités. Philippe m'a beaucoup aidée dans la manière de communiquer. Son souci du détail et sa pédagogie m'ont permis de rédiger de manière rigoureuse ce manuscrit. Mais outre l'aspect professionnel, j'ai beaucoup apprécié les relations humaines que nous avons tissées et j'ai beaucoup aimé travailler avec vous.

Spécial dédicace à l'équipe des thésards-stagiaires-prestataires avec qui les nombreux échanges durant les pauses café et midi ont souvent été des sources de nouvelles idées mais aussi des moments de détente et de fous rires. J'ai passé de très bons moments avec vous. Je n'oublie pas l'ensemble des permanents du département avec qui j'ai eu à échanger à propos de mes travaux mais aussi dans des situations plus détendues (pause-café, foot, course à pied le midi. . .). Je remercie aussi l'équipe d'M2M que j'ai côtoyée surtout durant les fermetures du CEA. J'ai beaucoup apprécié les moments que j'y ai passés.

Enfin, je ne puis terminer sans remercier ma famille : ma maman Sokhna tout d'abord pour son soutien et son amour indéfectibles, mes frères et sœurs pour leurs encouragements, ma tante Mariama qui n'est pas vraiment une tante mais une véritable maman pour avoir été toujours présente depuis mon arrivée en France. J'ai aussi une pensée pour tous mes amis en France et au Sénégal qui n'ont eu de cesse de me pousser à me surpasser et qui ont été les épaules sur lesquelles j'ai pu m'épancher dans les moments difficiles.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Généralités sur l'imagerie ultrasonore</b>	<b>13</b>
1.1	Contrôle non destructif par ultrasons	14
1.2	Traducteurs multiéléments	15
1.3	Représentation des données	15
1.4	Imagerie avancée	16
1.5	Comparaison entre une méthode conventionnelle (S-Scan) et une méthode avancée(TFM)	17
<b>2</b>	<b>Imagerie TFM multimodes</b>	<b>21</b>
2.1	Principe de l'imagerie TFM	22
2.1.1	Principe de l'acquisition FMC	23
2.1.2	Algorithme TFM	24
2.1.3	Calcul des temps de vol	24
2.1.4	Discretisation de la ROI	25
2.1.5	Modes de reconstruction	26
2.1.6	Redondance de modes de reconstruction de la convention CIVA	28
2.1.7	Définition d'une nouvelle convention	31
2.2	Analyse de la construction des images TFM	33
2.3	Nature des indications reconstruites	35
2.3.1	Indications de diffraction	36
2.3.2	Indications spéculaires	36
2.3.3	Artefacts de reconstruction	37
2.4	Sensibilité des modes de reconstruction	39
2.4.1	Pièce à faces parallèles, défaut vertical	40
2.4.2	Pièce avec délardage, défaut vertical	42
2.4.3	Résumé des résultats expérimentaux	44
2.5	Conclusion	44
<b>3</b>	<b>Prédiction des modes</b>	<b>47</b>
3.1	Contexte et objectifs de la prédiction	48
3.2	Rappel du compteur de réflexions	49
3.2.1	Algorithme de calcul	49
3.2.2	Cartographie du compteur de réflexions	51

3.2.3	Analyse de la cohérence entre le compteur de réflexions et l'imagerie TFM . . . . .	51
3.2.4	Discussions sur le compteur de réflexions . . . . .	55
3.3	Estimateur d'Echos Spéculaires (SEE) . . . . .	55
3.3.1	Hypothèses . . . . .	55
3.3.2	Vecteur déplacement d'une onde plane . . . . .	56
3.3.3	Algorithme de calcul de l'estimateur SEE . . . . .	57
3.3.4	Calcul numérique . . . . .	57
3.3.5	Cartographie spatiale SEE . . . . .	58
3.3.6	Analyse de la cohérence entre les cartographies spatiales SEE et les images TFM . . . . .	59
3.3.7	Comparaison quantitative de l'amplitude TFM vs SEE . . . . .	61
3.3.8	Amplitude minimale de détection . . . . .	63
3.3.9	Cartographie angulaire SEE . . . . .	64
3.3.10	Discussions sur l'estimateur SEE . . . . .	66
3.4	Sélection des modes de reconstruction pertinents . . . . .	66
3.4.1	Maximisation de l'amplitude SEE . . . . .	66
3.4.2	Maximisation du nombre de modes . . . . .	67
3.4.3	Minimisation du nombre de modes . . . . .	68
3.4.4	Application à la cartographie angulaire SEE . . . . .	69
3.4.5	Discussions sur les critères de sélection . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Fusion des images et filtrage des artefacts</b>	<b>71</b>
4.1	Fusion d'images TFM . . . . .	72
4.1.1	Configurations d'inspection considérées . . . . .	73
4.1.2	Fusion des indications spéculaires . . . . .	74
4.1.3	Fusion des indications de diffraction . . . . .	87
4.1.4	Fusion des indications de diffraction et spéculaires . . . . .	89
4.1.5	Conclusions sur les méthodes de fusion . . . . .	90
4.2	Filtrage des artefacts . . . . .	91
4.2.1	La méthode MTE . . . . .	91
4.2.2	Développement d'une procédure de filtrage des artefacts . . . . .	94
4.3	Conclusion . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Caractérisation des défauts plans</b>	<b>103</b>
5.1	Détermination de la résolution des images TFM . . . . .	105
5.2	Estimation de l'orientation des défauts plans . . . . .	105
5.2.1	Estimation de l'orientation d'un défaut à partir des signaux FMC : histogramme d'orientation . . . . .	106
5.2.2	Estimation de l'orientation d'un défaut à partir de méthodes de traitement d'images . . . . .	107
5.2.3	Étude comparative des différentes méthodes sur des données simulées	109
5.3	Dimensionnement des défauts plans . . . . .	110

5.3.1	Dimensionnement des défauts plans à partir des échos de diffraction	111
5.3.2	Dimensionnement des défauts plans à partir de l'écho spéculaire : état de l'art . . . . .	116
5.3.3	IAC-sizing . . . . .	117
5.4	Application sur des données expérimentales . . . . .	121
5.4.1	Dimensionnement via la diffraction . . . . .	121
5.4.2	Dimensionnement via la réflexion spéculaire . . . . .	122
5.4.3	Discussion . . . . .	123
<b>6</b>	<b>Validation</b>	<b>125</b>
6.1	Procédé de contrôle . . . . .	126
6.2	Pièce avec une pente de délardage de 14° . . . . .	127
6.2.1	Défaut vertical de 10mm de hauteur . . . . .	127
6.2.2	Défaut vertical de 3mm de hauteur . . . . .	131
6.2.3	Défaut incliné de 10mm de hauteur . . . . .	135
6.2.4	Défaut incliné de 3mm de hauteur . . . . .	140
6.3	Pièce à faces planes . . . . .	144
6.3.1	Défaut vertical de 10mm de hauteur . . . . .	144
6.3.2	Défaut vertical de 3mm de hauteur . . . . .	151
6.3.3	Défaut de 10mm de hauteur incliné . . . . .	154
6.3.4	Défaut de 3mm de hauteur incliné . . . . .	159
6.4	Tableaux récapitulatifs . . . . .	162
	<b>Bibliographie</b>	<b>167</b>
<b>A</b>	<b>Suppression des isochrones pour la TFM dans l'eau</b>	<b>173</b>
A.1	Influence et optimisation de la divergence des éléments . . . . .	174
A.2	Influence et optimisation de la hauteur d'eau pour un contrôle en immersion	174
A.3	Influence et optimisation de l'échantillonnage du traducteur . . . . .	176
<b>B</b>	<b>Formation d'un artefact intra-mode</b>	<b>179</b>
<b>C</b>	<b>Formation d'un artefact inter-modes</b>	<b>181</b>
<b>D</b>	<b>Algorithme d'atténuation de la diffraction</b>	<b>183</b>



# Introduction générale

Le contrôle non destructif est le contrôle de l'intégrité des matériaux sans altération de leurs propriétés mécaniques. Il est pratiqué dans les domaines tels que la pétrochimie, le nucléaire, l'aéronautique etc... Les contrôles sont réalisés durant les phases de fabrication des composants, pendant et/ou après les phases de soudage pour l'assemblage de différents composants, ou encore pendant la phase de service pour détecter toutes imperfections pouvant porter atteinte à l'intégrité des composants. En effet ces matériaux sont généralement soumis à de fortes contraintes de température, de pression ou chimiques qui peuvent conduire à la génération de défauts de surface tels que des criques, des trous, des fissures ou encore des piqûres et des défauts internes tels que des porosités, des soufflures, des inclusions, des fissurations non débouchantes et des variations d'épaisseur dues à l'usure ou à la corrosion.

Pour détecter et caractériser ces défauts, différentes techniques de contrôle non destructif sont possibles. On distingue notamment l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, la radiographie et les ultrasons.

L'examen visuel est la plus simple et permet de détecter les défauts superficiels et locaux dans la limite du pouvoir de résolution de l'œil. Le ressuage permet de mettre en évidence par capillarité des défauts débouchants à la surface de la pièce. La magnétoscopie est utilisée sur des matériaux ferromagnétiques et permet la détection par accumulation de poudre magnétique de défauts débouchants en paroi externe. Les courants de Foucault [1] permettent de détecter des défauts surfaciques ou sub-surfaciques par la mesure des perturbations d'un courant électromagnétique sur des pièces conductrices. Les ultrasons quant à eux permettent de mettre en évidence des défauts par mesure des perturbations du signal ultrasonore se propageant dans la pièce.

Cette dernière technique est celle qui nous intéresse dans ces travaux de thèse. Elle consiste à émettre et propager une onde ultrasonore dans une pièce, puis à recueillir et analyser l'onde à l'issue de l'interaction avec le matériau. Sur la base de ce principe très général, il existe de nombreuses techniques spécifiques, selon que le contrôle soit effectué en transmission ou bien en réflexion, suivant que les dispositifs en émission et en réception soient confondus ou non, suivant la nature et l'angle de réfraction des ondes ultrasonores utilisées, etc...

La modalité de contrôle la plus répandue, dite en réflexion, (« pulse echo » en anglais), est comparable à l'échographie médicale. L'émetteur et le récepteur (confondus ou non) sont positionnés du même côté de la pièce. Le récepteur recueille les échos engendrés par la réflexion ou la diffraction de l'onde sur les obstacles rencontrés, tels que les défauts et

les interfaces de la pièce.

Les dispositifs émetteurs et récepteurs, dits « traducteurs ultrasonores », sont en général basés sur l'effet piézo-électrique. L'élément principal, le transducteur, est constitué d'une pastille piézo-électrique convertissant un signal électrique en vibration mécanique et inversement.

Une évolution majeure dans le domaine des contrôles par ultrasons a été la progression des techniques multiéléments utilisant des réseaux de traducteurs piézo-électriques pilotés électroniquement à la réception ou à l'émission. Leurs avantages comparés aux techniques traditionnelles utilisant les monoéléments sont nombreux, tels l'accélération des contrôles, la flexibilité et l'utilisation possible d'une même sonde pour contrôler différentes régions d'une pièce, l'adaptabilité à des surfaces complexes. Elles permettent également une amélioration des performances en termes de caractérisation des défauts en fournissant des images permettant de représenter de mieux en mieux une vue en coupe de la pièce inspectée.

Dans la perspective de l'amélioration des images de défauts mais également dans le but de rendre leur interprétation plus simple par des opérateurs non spécialisés, de nouvelles méthodes d'imagerie ultrasonore telle que l'imagerie TFM (Total Focusing Method) apparaissent de plus en plus comme une alternative aux méthodes d'imageries conventionnelles. Elles offrent des images réalistes des défauts et permettent à partir d'une même acquisition de recueillir un nombre important d'images, chacune pouvant porter des informations différentes et complémentaires sur les caractéristiques d'un même défaut. Lorsqu'elles sont correctement sélectionnées, ces images sont plus faciles à analyser, elles présentent moins de risques de mauvaise interprétation, et elles permettent d'envisager des caractérisations de défauts plus rapides par des opérateurs moins spécialisés.

Pour une exploitation industrielle, il reste cependant nécessaire de renforcer la robustesse et la facilité de mise en œuvre de ces techniques d'imagerie. L'objectif de la thèse est de développer de nouveaux outils permettant d'améliorer la caractérisation des défauts par les techniques d'imagerie TFM en termes de nature (volumique ou plane), de position et de dimensionnement.

Dans le premier chapitre, nous rappellerons des notions élémentaires sur les ultrasons ainsi que des éléments généraux liés aux traducteurs multi-éléments. Nous rappellerons également les techniques de représentations des données ultrasonores avant d'aborder des méthodes d'imagerie plus avancées.

Dans le deuxième chapitre, l'imagerie TFM sera présentée avec une description des notions de base telles que le principe d'acquisition de données FMC (Full Matrix Capture) et le fonctionnement de l'algorithme. Nous montrerons également via la réciprocité des signaux que la convention définie dans le logiciel CIVA, qui est notre logiciel de référence, conduit à la génération d'un grand nombre d'images, dont la plupart sont en réalité dupliquées. Nous définirons alors une nouvelle convention qui permettra de réduire le nombre de modes de reconstruction. Par ailleurs, à partir de l'analyse des images TFM, nous montrerons la difficulté liée à l'interprétation des images sans une sélection des modes en amont.

Le troisième chapitre sera consacré au développement d'une méthode de prédiction des modes de reconstruction pertinents. Cet outil permettra de prédire la reconstruction du profil d'un défaut plan pour un mode de reconstruction donné. A partir de cet outil, pourront être sélectionnés certains modes de reconstruction suivant différents critères qui seront définis. Les images obtenues pourront alors être analysées séparément, ou de manière simultanée via des méthodes de fusion d'images.

Dans le quatrième chapitre, nous proposerons des méthodes de fusion des images afin de réunir l'ensemble des informations liées au défaut sur une même image. Ces images pouvant présenter des indications parasites appelées artefacts de reconstruction, nous proposerons des méthodes de filtrage de ces derniers. L'image du défaut résultante pourra alors être exploitée à des fins de caractérisation.

Le cinquième chapitre fera l'objet de la caractérisation des défauts plans en termes d'estimation de l'orientation et de dimensionnement. Dans le premier cas, des méthodes basées sur l'exploitation des signaux et des méthodes de traitement d'images seront proposées et leur robustesse sera étudiée sur des données simulées. Nous ferons ensuite un état de l'art des méthodes de dimensionnement existantes avant de proposer une nouvelle méthode basée sur le principe de chute d'amplitude.

Dans le dernier chapitre, nous effectuerons une validation expérimentale et simulée des méthodes développées, de la prédiction des modes pertinents au dimensionnement.

Une brève conclusion suivra, associée à une mise en perspective de travaux utiles à mener.



# Chapitre 1

## Généralités sur l'imagerie ultrasonore

### Contents

---

1.1	Contrôle non destructif par ultrasons . . . . .	14
1.2	Transducteurs multiéléments . . . . .	15
1.3	Représentation des données . . . . .	15
1.4	Imagerie avancée . . . . .	16
1.5	Comparaison entre une méthode conventionnelle (S-Scan) et une méthode avancée(TFM) . . . . .	17

---

## Introduction

Dans ce chapitre nous allons rappeler le principe du contrôle non destructif par ultrasons. Nous aborderons ensuite les techniques multiéléments pour lesquelles la description des capteurs sera donnée ainsi que les méthodes de représentations des signaux. Enfin nous ferons un état de l'art des méthodes d'imagerie avancées développées historiquement dans le domaine de la géophysique et du médical avant de présenter une comparaison entre deux méthodes d'imagerie sur des données simulées.

### 1.1 Contrôle non destructif par ultrasons

Le principe général du contrôle non destructif par ultrasons consiste à émettre, à l'aide d'émetteurs appropriés, des ondes ultrasonores qui se propagent ensuite dans le milieu étudié et qui interagissent avec les réflecteurs présents. Ceux-ci se comportent alors comme des sources secondaires en réémettant des ondes qui peuvent être reçues à la surface de la pièce par des récepteurs eux aussi appropriés à cette fin. L'objectif du contrôle non destructif est alors de remonter à partir des signaux enregistrés aux caractéristiques des réflecteurs.

Les ultrasons sont des ondes sonores de fréquence supérieure à 20KHz qui sont généralement émis à l'aide de capteurs piézoélectriques. De manière très schématique, les traducteurs exploitent la propriété piézoélectrique [2] de certains matériaux qui se déforment lorsqu'ils sont soumis à une tension électrique et inversement. La déformation génère une onde ultrasonore qui peut alors se propager dans le milieu.

Différents types d'ondes peuvent être générés par ces capteurs. On distingue les ondes de volume [3], les ondes de surface telles que les ondes Rayleigh [4] et les ondes guidées telles que les ondes de Lamb [5]. Dans le cadre de cette thèse, nous ne nous intéresserons qu'aux ondes de volume pour lesquels deux types de polarisation sont possibles : les ondes longitudinales dont la direction de propagation est parallèle à la déformation du milieu et les ondes transversales dont la direction de propagation est perpendiculaire à la déformation du milieu.

Dans les solides, la vitesse des ondes longitudinales est généralement deux fois plus grande que la vitesse des ondes transversales. Par conséquent, la longueur d'onde des ondes transversales est deux fois plus petite que celle des ondes longitudinales, la longueur d'onde étant le rapport entre la vitesse de propagation des ondes et la fréquence.

La gamme de fréquences utilisée en CND est très vaste, entre 100 kHz et 100 MHz, le choix de la fréquence est alors un compromis entre la résolution spatiale (de l'ordre de quelques longueurs d'onde) et le pouvoir de pénétration. En effet, plus la fréquence augmente, plus la résolution sera fine, mais plus l'atténuation dans le matériau sera forte. Dans les applications les plus courantes, et en particulier pour le contrôle des aciers, les fréquences typiques sont de l'ordre du MHz, ce qui correspond à des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre. C'est dans cette gamme de fréquences que nous nous placerons au cours de

cette thèse.

## 1.2 Traducteurs multiéléments

En contrôle non destructif, les traducteurs utilisés pour l'émission et la réception des signaux sont traditionnellement des capteurs dits mono-élément qui, comme leur nom l'indique, ne sont constitués que d'un unique élément actif. Cependant, depuis plusieurs années, des capteurs dits multiéléments [6–8] ont connu un grand essor du fait de leur grande flexibilité. Ils sont disponibles dans le commerce sous différentes géométries (linéaire, matricielle, annulaire, circulaire...). Ils sont composés de plusieurs éléments individuels, généralement entre 16 et 256, pouvant chacun être pilotés indépendamment. Lorsque les éléments sont régulièrement espacés, l'échantillonnage spatial doit respecter le critère de Shannon qui impose une distance d'une demi-longueur d'onde centre à centre entre deux éléments consécutifs. Pour le type de capteur que nous utiliserons, le pas inter-éléments est calculé à partir de la fréquence centrale et de la vitesse d'un matériau de référence, qui est généralement l'acier.

Ces capteurs sont connectés à des électroniques de pilotage adaptées permettant d'émettre et de recevoir indépendamment et simultanément sur chacune des voies. Un des principaux avantages des capteurs multiéléments est la possibilité d'appliquer à l'émission et à la réception des retards électroniques différents pour chaque voie permettant de réaliser différents contrôles à partir d'un même capteur. A titre d'exemple, il y a le balayage électronique qui consiste à déplacer spatialement le faisceau en activant séquentiellement différentes ouvertures constituées chacune de plusieurs éléments permettant de remplacer électroniquement un balayage mécanique. Il y a également la focalisation électronique qui permet de focaliser l'énergie à différentes profondeurs comme le ferait une lentille de focalisation, ou encore la déflexion électronique qui consiste à focaliser l'énergie selon un angle d'incidence. Ces différentes possibilités rendent les techniques multiéléments très avantageuses comparées aux techniques traditionnelles utilisant des mono-éléments en termes d'accélération des contrôles, de flexibilité, d'utilisation possible d'une même sonde pour contrôler différentes régions de la pièce, d'adaptabilité à des configurations complexes et de performance accrue en détection mais aussi de nouvelles possibilités dans le domaine de l'imagerie comme nous le verrons par la suite.

## 1.3 Représentation des données

Lors d'une inspection, deux paramètres liés à un écho sont enregistrés : son amplitude et son temps de vol, ce dernier est le temps nécessaire à l'onde pour parcourir la distance entre l'émetteur et le réflecteur à l'origine de l'écho. L'ensemble de signaux enregistrés peut alors être représenté sous différentes formes :

Le A-Scan : C'est la représentation de base des données d'une onde ultrasonore. Elle montre l'amplitude de l'écho et le temps de vol entre l'émission et la génération de l'écho

sur une grille simple dont l'axe vertical représente l'amplitude de l'onde et l'axe horizontal représente le temps. Les A-Scans de plusieurs éléments peuvent être sommés, et on parle alors de A-Scan "somme".

Le B-Scan : C'est un cumul de A-Scans enregistrés en différentes positions d'un balayage mécanique ou électronique. Il est représenté suivant deux axes : la position des récepteurs et le temps. Lorsque la vitesse dans la pièce est connue, la représentation peut aussi se faire suivant l'axe de balayage et la profondeur. L'amplitude du signal est, quant à elle, définie par un code couleur.

S-Scan : C'est un cumul de A-Scans "sommés" enregistrés pour une seule position du capteur et plusieurs angles de déflexion. Il est affiché suivant l'axe d'inclinaison des tirs et suivant le temps ou la profondeur.

Courbe échodynamique : C'est une courbe d'amplitude pour laquelle chaque point est obtenu en extrayant l'amplitude maximale le long d'une colonne ou d'une ligne d'une image.

L'interprétation de ces représentations n'est cependant pas toujours triviale et nécessite parfois l'intervention d'un expert. Dans la perspective de faciliter l'interprétation des données ultrasonores de nouvelles méthodes d'imagerie, dites avancées, se développent de plus en plus. Elles présentent l'avantage de fournir des images plus réalistes et plus faciles d'interprétation.

## 1.4 Imagerie avancée

On désigne par imagerie avancée les méthodes permettant de relocaliser spatialement les signaux aux points où ils ont été générés. La plupart des méthodes d'imagerie ultrasonores ont été historiquement développées dans le domaine de la géophysique et du médical. Ces domaines ayant connu un essor plus rapide, leurs avancées profitent aujourd'hui au contrôle non destructif.

Dans le domaine de la géophysique, l'objectif de l'imagerie est d'exploiter les données sismiques afin de retrouver les zones de réflectivité, c'est-à-dire les zones où il existe un changement d'impédance en refocalisant les signaux aux points où ils ont été générés. L'algorithme d'imagerie est donc en fait une résolution de l'équation des ondes où les conditions limites sont données par le champ mesuré à la surface. Pour résoudre ce problème, Claerbout [9] a développé une méthode de résolution par différences finies qui a révolutionné la qualité et l'interprétation des images des cartographies des sous-sols. L'importance des temps de calcul a cependant rendu la méthode peu pratique et a conduit aux développements de nouvelles méthodes basées sur la résolution de l'équation des ondes par transformée de Fourier. Stolt [11] a ainsi développé la *FK-migration*, également appelée la méthode de Stolt, qui est la méthode la plus rapide connue en terme de temps de calcul.

Cette méthode ne permet cependant pas de prendre en compte des variations de vitesse. Cette limitation a conduit au développement d'autres méthodes, plus lentes mais plus flexibles, comme la *phase-shift migration* développée par Gazdag [12] qui est une méthode récursive prenant en compte la variation de la vitesse avec la profondeur. Elle calcule par extrapolation le champ en un point de profondeur  $z + dz$  à partir du champ déterminé en  $z$ . Le champ mesuré en  $z + dz$  est égal au champ mesuré en  $z$  mais déphasé, d'où l'appellation de la méthode. Cependant la précision de la méthode diminue avec la profondeur. D'autres méthodes telles que l'*inverse wavefield extrapolation* [13] basée sur la résolution de l'intégrale de Kirchhoff ont permis de prendre en compte des variations latérales de la vitesse. Du fait de la rapidité de menée des calculs, les méthodes fréquentielles présentent un grand intérêt pour l'imagerie tridimensionnelle.

Par ailleurs, des méthodes de résolution dans le domaine temporel ont également été développées. Ces méthodes sont plus flexibles et elles sont peu coûteuses en mémoire. Une des plus connues est la méthode de Kirchhoff [14] [15], qui est basée sur la résolution de l'intégrale de Kirchhoff dans le domaine temporel.

En parallèle, l'imagerie s'est également beaucoup développée dans le domaine médical où outre la qualité des images, une haute cadence est requise. On peut citer la méthode de Lu [16], la méthode de Stolt étendue à une émission par onde plane [17], ou encore la Plane Wave Imaging [18, 19].

Plusieurs de ces méthodes sont aujourd'hui exploitées en contrôle non destructif. On distingue ainsi l'IWEX [20] [22] qui est une méthode de résolution de l'intégrale de Kirchhoff dans le domaine fréquentiel, la méthode Kirchhoff [23] résolue dans le domaine temporel, la *Total Focusing Method* [24–26] qui est un cas particulier de la méthode de Kirchhoff, ou encore la méthode PWI (Plane Wave Imaging) [27], qui fait intervenir des ondes planes à l'émission.

Dans le cadre de cette thèse, nous ne nous intéresserons qu'à la méthode d'imagerie TFM pour les milieux isotropes et homogènes. Cette méthode est intégrée dans les systèmes M2M. C'est une méthode flexible, facile de mise en œuvre et permettant de prendre en compte des conversions de modes de propagation des ondes.

## 1.5 Comparaison entre une méthode conventionnelle (S-Scan) et une méthode avancée(TFM)

L'idée est de visualiser le résultat de ces deux méthodes d'imagerie en présence de deux défauts volumiques et d'un défaut plan. Nous allons observer les images S-Scan et les images TFM obtenues pour ces différentes situations.

Nous avons simulé deux configurations d'inspection, la première avec un défaut plan vertical de 10mm de hauteur situé à 5mm du fond de la pièce et la seconde avec deux trous génératrices distants de 10mm dont le plus profond est à 5mm du fond de la pièce.

Le capteur utilisé pour l'acquisition des données est un traducteur multiéléments de 64

éléments émettant à une fréquence centrale de 5MHz. Il est posé sur un sabot permettant de réfracter des ondes transversales à  $45^\circ$  dans la pièce en acier. Pour chaque configuration, deux images vont être reconstruites, un S-Scan et une image TFM.

Le S-Scan est réalisé pour une déflexion angulaire entre  $45^\circ$  et  $75^\circ$  avec un pas d'un demi degré combinée avec une focalisation à 25mm de profondeur des ondes transverses après rebond. L'image TFM est quant à elle réalisée pour un parcours avec rebond en ondes transversales, soit le mode de reconstruction TTT, la focalisation se fait en tout point de la région.

### Défauts volumiques

Nous considérerons ici le cas où deux défauts volumiques sont simulés dans la pièce.

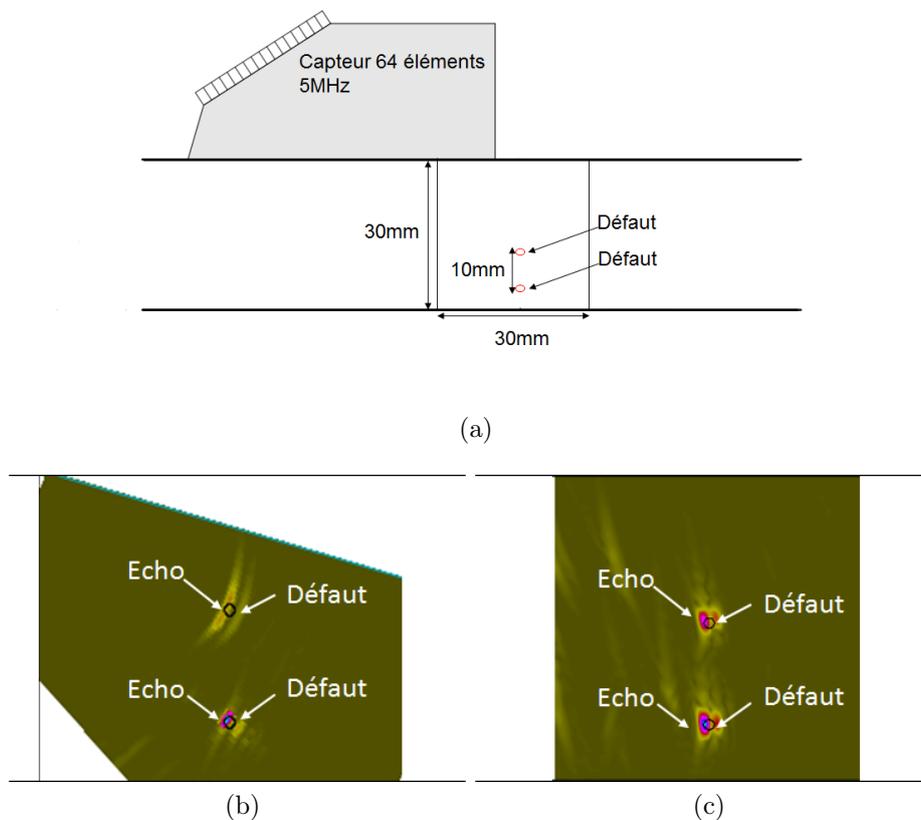


Fig 1.1 – (a) Configuration d'inspection pour deux défauts volumiques (b) Image S-Scan (c) Image TFM en mode TTT

Les images reconstruites selon la méthode S-Scan et selon la méthode TFM sont sensiblement identiques. L'écho de chaque trou est reconstruit. On constate cependant que la résolution est meilleure pour l'image TFM, notamment pour le trou supérieur. Cela s'explique par une focalisation en tout point de l'imagerie TFM contre une focalisation à 25mm de profondeur pour le S-Scan.

### Défaut plan

Nous allons maintenant considérer un défaut plan dans la pièce.

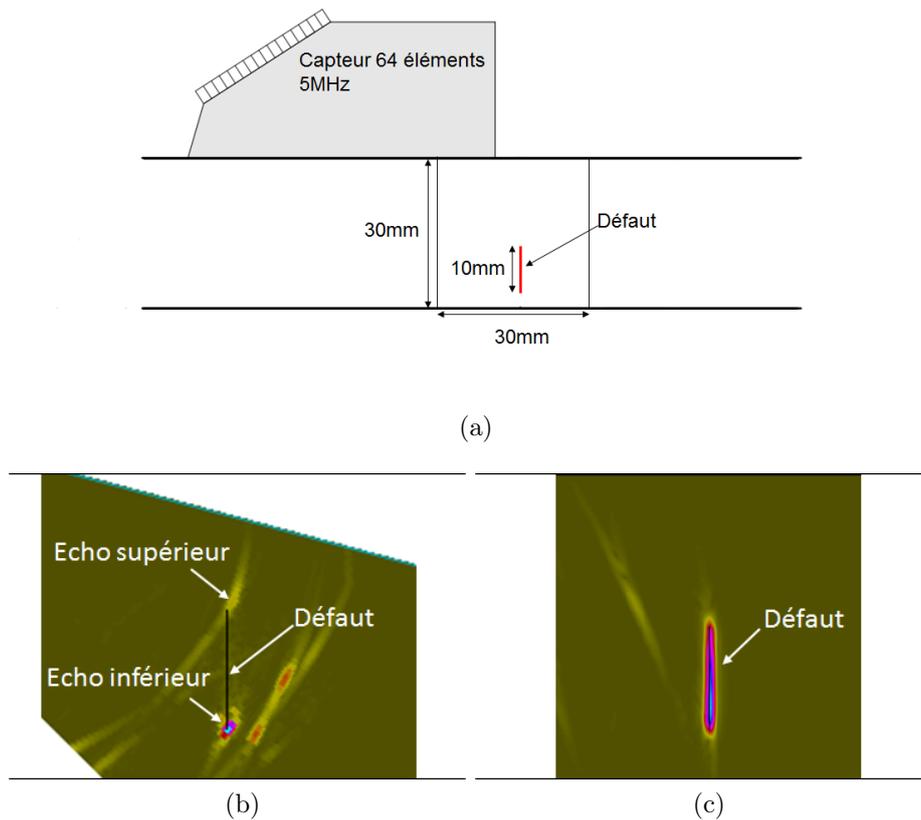


Fig 1.2 – (a) Configuration d'inspection pour un défaut plan (b) Image Sscan (c) Image TFM en mode TTT

L'image obtenue avec le S-Scan présente deux échos de diffraction aux extrémités du défaut alors que l'image TFM présente une reconstruction complète du profil du défaut.

Ainsi, les images S-Scan obtenues pour les défauts volumiques sont très proches de l'image obtenue pour le défaut plan, alors que l'imagerie TFM conduit à des images très différentes permettant de conclure quant à la nature plane ou volumique d'un défaut.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé brièvement les concepts de base du contrôle non destructif par ultrasons. Nous avons également présenté quelques techniques classiques de représentation des données ultrasonores avant de faire un état de l'art non exhaustif des méthodes d'imagerie avancées développées dans le domaine de la géophysique et du médical avant d'être transposées au contrôle non destructif.

Deux méthodes d'imagerie que sont la représentation S-Scan et l'imagerie TFM ont ensuite été comparées sur des données simulées. L'analyse des images reconstruites dans le cas de défauts volumiques et dans le cas d'un défaut plan a montré l'avantage de l'imagerie TFM en terme de résolution mais aussi sa capacité à conclure sur la nature volumique ou plane des défauts. Le principe et les limites de cette méthode feront l'objet du chapitre suivant.



# Chapitre 2

## Imagerie TFM multimodes

### Contents

---

<b>2.1</b>	<b>Principe de l'imagerie TFM</b>	<b>22</b>
2.1.1	Principe de l'acquisition FMC	23
2.1.2	Algorithme TFM	24
2.1.3	Calcul des temps de vol	24
2.1.4	Discrétisation de la ROI	25
2.1.5	Modes de reconstruction	26
2.1.6	Redondance de modes de reconstruction de la convention CIVA	28
2.1.7	Définition d'une nouvelle convention	31
<b>2.2</b>	<b>Analyse de la construction des images TFM</b>	<b>33</b>
<b>2.3</b>	<b>Nature des indications reconstruites</b>	<b>35</b>
2.3.1	Indications de diffraction	36
2.3.2	Indications spéculaires	36
2.3.3	Artefacts de reconstruction	37
<b>2.4</b>	<b>Sensibilité des modes de reconstruction</b>	<b>39</b>
2.4.1	Pièce à faces parallèles, défaut vertical	40
2.4.2	Pièce avec délardage, défaut vertical	42
2.4.3	Résumé des résultats expérimentaux	44
<b>2.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>44</b>

---

## Introduction

L'algorithme TFM est un cas particulier de la méthode de Kirchhoff introduite au chapitre précédent. On peut également faire l'analogie avec la Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)[28] [29] utilisée en contrôle conventionnel par balayage mécanique d'un transducteur mono-élément. Celle-ci consiste à sommer de manière cohérente les signaux reçus à différentes positions pour focaliser en réception l'énergie. Cette approche a pu aisément être transposée aux acquisitions multi-éléments pour devenir la méthode de Focalisation en Tout Point (FTP) qu'on retrouve également dans la littérature sous l'acronyme TFM (Total Focusing Method). Cet acronyme sera utilisé par la suite.

De nombreux travaux réalisés sur cette thématique au cours de ces dernières années en ont fait une des méthodes phares et des plus prometteuses en contrôle non destructif par ultrasons et ses applications industrielles se développent de plus en plus. De nombreuses études ont montré que les images TFM présentent des résolutions optimales comparées aux méthodes classiques basées sur le principe de *delay and sum*. Dans [30], il a été montré que la TFM présente une meilleure résolution et un meilleur RSB comparée aux méthodes classiques de type B-Scan ou S-Scan. Dans [31], l'imagerie TFM comparée à l'imagerie MUSIC [32], réputée pour sa grande résolution, a montré que l'imagerie TFM est beaucoup moins sensible au bruit et présente une meilleure résolution.

Par ailleurs, des études ont également été menées afin d'améliorer la qualité des images TFM en terme de rapport signal à bruit [33], mais également pour exploiter tout le potentiel de cette technique. L'exploitation multimodes de la TFM [34] [35] a ainsi montré qu'elle pouvait fournir des images de défauts très réalistes comparées aux méthodes standards, facilitant ainsi la caractérisation des défauts en termes de nature et de dimensionnement. Cependant, ces différentes études ont également mis en avant les difficultés liées à l'utilisation de l'imagerie TFM.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord rappeler le principe de l'algorithme d'imagerie TFM basée sur l'acquisition Full Matrix Capture (FMC) et nous décrirons le choix des différents paramètres nécessaires au calcul. Nous analyserons ensuite à travers différentes images TFM les types d'indications reconstruites avant de rappeler le principe général des phénomènes physiques qui en sont à l'origine. Enfin, nous montrerons la variabilité des images TFM pour différentes configurations d'inspection expérimentales. L'analyse des résultats permettra de poser la principale problématique de cette thèse.

### 2.1 Principe de l'imagerie TFM

L'imagerie TFM est une méthode de focalisation synthétique qui consiste à focaliser les signaux en chaque point d'une région définie. Elle s'applique sur un type d'acquisition particulier, la Full Matrix Capture FMC [30] [36].

### 2.1.1 Principe de l'acquisition FMC

L'acquisition FMC consiste en une succession de séquences de tirs ultrasonores, chacune se composant d'une émission par un élément et de la réception de signaux par tous les éléments du capteur.

L'onde générée se propage dans le milieu où elle peut être diffractée et/ou réfléchi par les obstacles (parois de pièce, défaut...) avant d'être rétrodiffusée totalement ou partiellement vers le capteur où elle est reçue par les différents éléments. La même séquence se reproduit ensuite à partir de l'élément voisin, et ainsi de suite jusqu'au dernier élément du capteur.

Ce séquençage élémentaire est particulièrement favorable à l'imagerie TFM. En effet comme nous le verrons dans la section 2.2, c'est une méthode basée sur l'interférence des signaux et son efficacité sera d'autant plus importante que les éléments auront un champ de sensibilité divergent, laquelle sensibilité est inversement proportionnelle à la taille de la source, soit d'un élément, pour une longueur d'onde donnée [8]. Cependant, le grand nombre de tirs peut limiter la cadence d'imagerie dans le cas d'une application en temps réel. Des travaux [37] [38] ont ainsi été menés afin de retrouver des images de qualité équivalente avec un nombre de tirs réduit. Toutefois, dans le cadre de cette thèse, nous ne nous intéresserons qu'à l'acquisition FMC.

A partir d'un capteur multi-éléments constitué de  $N$  éléments, l'acquisition FMC permet de stocker  $N \times N$  signaux temporels qui constitue la matrice inter-éléments  $S$  dont les composantes sont données dans le tableau 2.1.

$$\begin{array}{ccccc}
 S_{11}(t) & S_{12}(t) & S_{13}(t) & \dots & S_{1N}(t) \\
 S_{21}(t) & S_{22}(t) & S_{23}(t) & \dots & S_{2N}(t) \\
 S_{31}(t) & S_{32}(t) & S_{33}(t) & \dots & S_{3N}(t) \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 S_{N1}(t) & S_{N2}(t) & S_{N3}(t) & \dots & S_{NN}(t)
 \end{array}$$

Tableau 2.1 – Matrice inter-éléments  $S$

où  $S_{ij}(t)$  est le signal temporel émis par l'élément  $i$  et reçu par l'élément  $j$ ,  $i$  et  $j$  variant chacun de 1 à  $N$ . Chaque signal  $S_{ij}(t)$  contient alors un ensemble d'échos issus des différents parcours ultrasonores possibles. En effet les ondes ultrasonores réfractées dans une pièce prennent différents chemins en fonction de leur angle de réfraction et de la présence de réflecteurs dans le matériau inspecté tels que les parois de la pièce ou un défaut potentiel. Nous verrons que ce grand nombre de parcours peut être un avantage mais aussi un inconvénient pour l'interprétation des images TFM.

### 2.1.2 Algorithme TFM

L'algorithme TFM s'applique sur une région d'intérêt ou ROI (Region Of Interest) définie par l'opérateur. Dans cette ROI discrétisée, l'algorithme consiste à appliquer des lois de retards à posteriori sur les différents signaux de la matrice inter-éléments  $S$  afin de focaliser l'énergie en chaque point de la ROI. Chaque image TFM est associée à un mode de reconstruction qui est défini pour un type de parcours des ondes donné et par la nature des ondes considérées lors du parcours.

A partir de la matrice inter-éléments  $S$  issue de l'acquisition FMC, l'amplitude TFM  $I^m(P)$  en un point  $P$  de la ROI, calculée suivant un mode de reconstruction  $m$ , est donnée par la relation suivante :

$$I^m(P) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N S_{ij}(t_{ij}^{m,P}) \quad (2.1)$$

$t_{ij}^{m,P}$  est le temps de vol nécessaire pour effectuer le parcours entre l'émetteur  $i$  et le récepteur  $j$  en passant par le point  $P$  suivant le parcours associé au mode de reconstruction  $m$ .

Dans le cas où l'enveloppe de l'image est recherchée, l'algorithme TFM peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$I^m(P) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N K_{ij}(t_{ij}^{m,P}) \right| \quad (2.2)$$

où  $K_{ij}(t) = S_{ij}(t) + jH_{ij}(t)$ ,  $H$  étant la transformée de Hilbert de la matrice inter-éléments  $S$ . C'est l'expression (2.2) qui sera utilisée par la suite.

Le choix des différents paramètres de calcul tels que le calcul des temps de vol, la discrétisation de la ROI et la définition des modes de reconstruction sont décrits dans les paragraphes suivants.

### 2.1.3 Calcul des temps de vol

Le calcul des temps de vol repose de manière classique sur des hypothèses simples, comme la propagation sphérique des ondes due à une source « ponctuelle ». Pour chaque élément, le temps de vol est calculé à partir du centre de l'élément jusqu'au point de calcul suivant le principe de Fermat.

Pour un couple d'éléments  $ij$ , le temps de vol calculé pour un parcours associé à un mode de reconstruction  $m$  est donné par la relation suivante :

$$t_{ij}^{m,P} = t_{iP} + t_{jP} \quad (2.3)$$

où  $t_{iP}$  est le temps de vol à l'émission et  $t_{jP}$  est le temps de vol à la réception.

Ces temps de vol sont calculés pour tous les couples d'éléments et pour tous les points de la ROI discrétisée.

### 2.1.4 Discrétisation de la ROI

Le pas de discrétisation spatiale doit respecter certaines conditions pour une reconstruction TFM optimale. Le choix de ce pas est tel que l'écart de temps de vol  $\delta t$  entre deux pixels voisins doit respecter le critère d'échantillonnage de Shannon.  $\delta t$  doit donc respecter la relation suivante :

$$\delta t \leq \frac{1}{2f_{max}} \quad (2.4)$$

où  $f_{max}$  est la fréquence maximale de la bande passante du capteur.

Pour deux points voisins  $P$  et  $P'$  (cf. Fig 2.1), on a donc la relation suivante :

$$\left| \frac{d_1 - d'_1}{v_1} \right| + \left| \frac{d_2 - d'_2}{v_2} \right| \leq \frac{1}{2f_{max}} \quad (2.5)$$

où  $d_1$  ( $d'_1$ ) est la distance entre l'émetteur et le point  $P$  (le point  $P'$ ) et  $d_2$  ( $d'_2$ ) est la distance entre le récepteur et le point  $P$  (le point  $P'$ ).

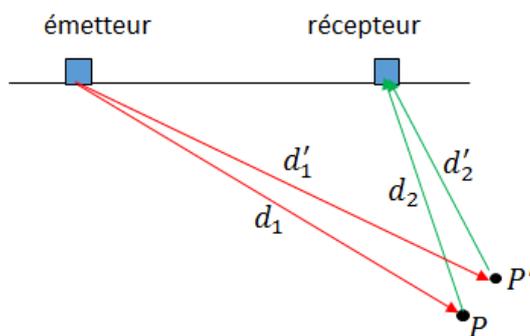


Fig 2.1 – Détermination de l'écart de temps de vol entre deux points voisins

Cette inéquation est résolue en maximisant l'écart de temps de vol  $\delta t$ . Ceci revient à :  
– minimiser la vitesse.

La minimisation de la vitesse consiste à prendre la vitesse minimale  $v$  lors de la propagation telle que  $v = \min(v_1, v_2)$ .

– et maximiser l'écart de distance parcourue.

La maximisation de l'écart de distance parcourue consiste à choisir à l'aller et au retour le même trajet, c'est à dire à considérer un parcours en émission-réception confondu, soit  $|d_1 - d'_1| = |d_2 - d'_2|$ .

Soit  $\delta d$  l'écart de distance parcourue entre l'émetteur et le point  $P$  et entre l'émetteur et le point  $P'$ , la relation (2.5) devient :

$$2 \frac{\delta d}{v} \leq \frac{1}{2f_{max}} \quad (2.6)$$

$\delta d$  doit donc respecter la relation suivante :

$$\delta d \leq \frac{\lambda_{min}}{4} \quad (2.7)$$

où  $\lambda_{min}$  est la longueur d'onde minimale donnée par :

$$\lambda_{min} = \frac{v}{f_{max}} \quad (2.8)$$

Si l'on considère un maillage suivant un axe vertical  $z$  avec un pas  $\delta z$  et un axe horizontal  $x$  avec un pas  $\delta x$ , on a

$$\delta d = \sqrt{\delta x^2 + \delta z^2} \quad (2.9)$$

Dans le cas d'un maillage carré  $\delta z = \delta x$ , la relation (2.7) devient donc

$$\delta x \leq \frac{\lambda_{min}}{4\sqrt{2}} \quad (2.10)$$

Ce critère sera respecté pour toutes les images reconstruites par la suite.

## 2.1.5 Modes de reconstruction

Les modes de reconstruction sont définis par le type de parcours ultrasonore des ondes et par leur nature. C'est donc une combinaison d'ondes longitudinales (L) et d'ondes transversales (T) générées par réfraction dans la pièce et/ou lors des conversions au contact d'un réflecteur.

Avec la convention définie dans le logiciel CIVA, trois familles de modes de reconstruction sont usuellement considérées : les modes de reconstruction directs, écho de coin et indirects.

### 2.1.5.1 Modes de reconstruction directs

Les trajets ultrasonores considérés dans un mode de reconstruction direct ne comprennent pas de rebond aux interfaces. A l'émission comme à la réception, la seule interface rencontrée est la surface de la pièce vue par la sonde (cf. Fig 2.2). La combinaison des ondes longitudinales et transversales conduit alors à quatre modes de reconstruction :

Mode  $L_P L$  : Les trajets à l'émission et à la réception se font en considérant des ondes longitudinales L, l'indice  $P$  désignant le passage au point de focalisation  $P$ .

Mode  $T_P T$  : Les trajets à l'émission et à la réception se font en considérant des ondes transversales.

Mode  $L_P T$  : Le trajet à l'émission se fait en considérant des ondes longitudinales et le trajet à la réception se fait en considérant des ondes transversales.

Mode  $T_P L$  : Le trajet à l'émission se fait en considérant des ondes transversales et le trajet à la réception se fait en considérant des ondes longitudinales.

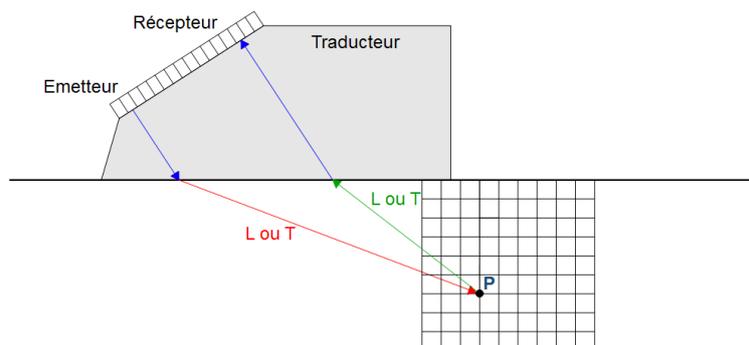


Fig 2.2 – Modes directs. En rouge, le trajet à l'émission, en vert le trajet à la réception

### 2.1.5.2 Modes de reconstruction écho de coin

Pour les modes de reconstruction écho de coin, le trajet à l'émission comporte un rebond sur le fond avant le passage par le point de focalisation  $P$  tandis que le trajet à la réception est direct (cf. Fig 2.3). Le mode de reconstruction est alors désigné par les trois modes de propagation possibles lors du parcours ultrasonore : émetteur-fond, fond- $P$  et  $P$ -récepteur.

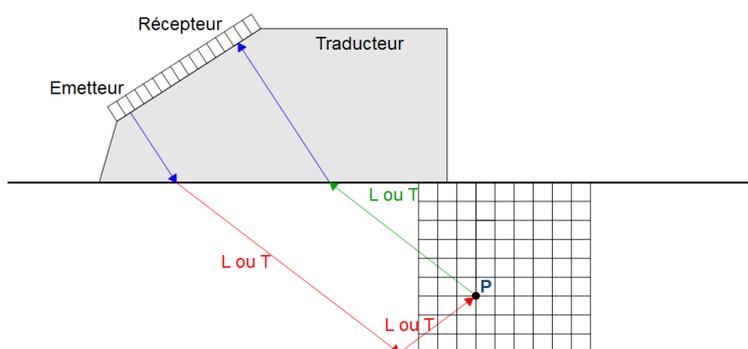


Fig 2.3 – Modes écho de coin. En rouge, le trajet à l'émission, en vert le trajet à la réception

Il est également possible de considérer un trajet direct à l'émission et un trajet avec rebond à la réception.

Pour faire la distinction entre les différents formalismes, on introduit les notations  $X_r X_P X$  et  $X_P X_r X$  ( $X$  pour L ou T,  $r$  pour rebond sur le fond et  $P$  pour le point de focalisation).

On a ainsi huit modes de reconstruction lorsque le rebond se fait avant le passage par le point de focalisation ( $L_r L_P L$ ,  $L_r L_P T$ ,  $L_r T_P L$ ,  $T_r L_P L$ ,  $L_r T_P T$ ,  $T_r L_P T$ ,  $T_r T_P L$ ,  $T_r T_P T$ ) et huit autres lorsqu'il se fait après ( $L_P L_r L$ ,  $L_P L_r T...$ ), soit seize modes de reconstruction écho de coin possibles.

### 2.1.5.3 Modes de reconstruction indirects

Pour cette famille de modes de reconstruction, on considère un rebond sur le fond avant et après le passage par le point de focalisation (cf. Fig 2.4), soit un total de seize modes de reconstruction indirects ( $L_r L_P L_r L$ ,  $L_r L_P L_r T$ ,  $L_r L_P T_r L \dots$ ).

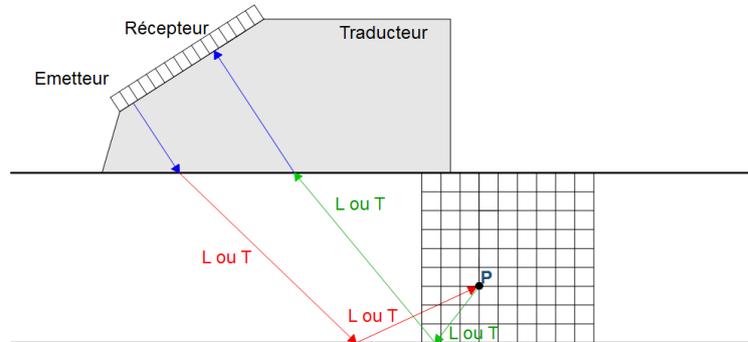


Fig 2.4 – Modes indirects. En rouge, le trajet à l'émission, en vert le trajet à la réception

Ainsi, avec ces trois familles de modes, la convention CIVA conduit à trente-six images TFM. Il est possible d'avoir un plus grand nombre de modes de reconstruction, en considérant plusieurs rebonds successifs sur les parois de la pièce. L'analyse d'autant d'images TFM peut alors se révéler difficile.

Ce nombre de modes de reconstruction peut être réduit en choisissant une nouvelle convention qui exploite la réciprocité des trajets ultrasonores. Avant d'introduire cette nouvelle convention, nous allons montrer la redondance des modes de reconstruction dans la convention CIVA.

### 2.1.6 Redondance de modes de reconstruction de la convention CIVA

La convention CIVA conduit à des images similaires du fait de l'existence d'une réciprocité des signaux contenus dans la matrice inter-éléments (FMC) qui, nous allons le voir, conduit à une réciprocité des modes de reconstruction.

Pour comprendre l'origine de cette similarité, nous avons étudié les contributions élémentaires apportées par les deux modes de reconstruction  $L_r L_P T$  et  $T_P L_r L$ . La figure Fig 2.5 montre les trajets considérés pour chaque mode.

Pour chaque couple d'éléments  $ij$ , deux trajets différents sont considérés, un lorsque  $i$  est l'élément émetteur (trajet en trait plein) et un autre lorsque  $j$  est l'élément émetteur (trajet en pointillé). Pour chacun, le trajet à l'émission est en rouge ( $L_r L_P$  pour le mode  $L_r L_P T$  et  $T$  pour le mode  $T_P L_r L$ ) et le trajet à la réception en vert ( $T$  pour le mode  $L_r L_P T$  et  $L_r L$  pour le mode  $T_P L_r L$ ).

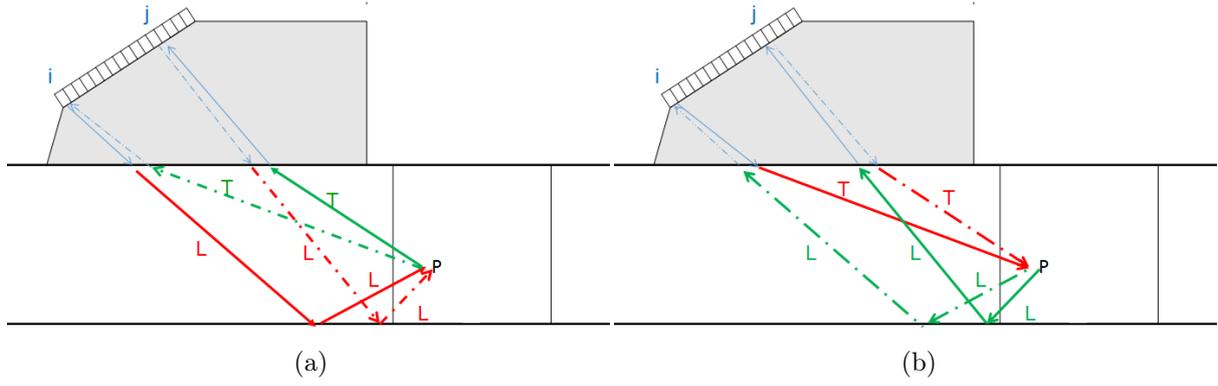


Fig 2.5 – Trajets calculés pour le couple  $ij$  suivant les modes (a)  $L_rL_pT$ (b)  $T_pL_rL$ .

On remarque alors que le parcours  $i \rightarrow P \rightarrow j$  calculé pour le mode de reconstruction  $L_rL_pT$  est le parcours inverse au trajet  $j \rightarrow P \rightarrow i$  calculé pour le mode de reconstruction  $T_pL_rL$ , et le parcours  $j \rightarrow P \rightarrow i$  du mode  $L_rL_pT$  est celui inverse de celui  $i \rightarrow P \rightarrow j$  calculé pour le mode  $T_pL_rL$ .

La Fig 2.5 montre donc que ce sont les mêmes parcours qui sont considérés pour les modes  $L_rL_pT$  et  $T_pL_rL$ .

Nous allons maintenant étudier les contributions associées à chaque trajet et pour chaque mode de reconstruction dans l'algorithme TFM avec l'expression (2.2). Pour un couple d'éléments  $ij$ , la contribution élémentaire est donnée pour le mode  $L_rL_pT$  par l'expression suivante :

$$I_{ij}^{L_rL_pT} + I_{ji}^{L_rL_pT} = K_{ij}(t_{iP}^{LL} + t_{jP}^T) + K_{ji}(t_{jP}^{LL} + t_{iP}^T) \quad (2.11)$$

Et pour le mode  $T_pL_rL$ , elle est donnée par l'expression suivante :

$$I_{ij}^{T_pL_rL} + I_{ji}^{T_pL_rL} = K_{ij}(t_{iP}^T + t_{jP}^{LL}) + K_{ji}(t_{jP}^T + t_{iP}^{LL}) \quad (2.12)$$

Après un réarrangement des termes, on obtient :

$$I_{ij}^{T_pL_rL} + I_{ji}^{T_pL_rL} = K_{ji}(t_{iP}^{LL} + t_{jP}^T) + K_{ij}(t_{jP}^{LL} + t_{iP}^T) \quad (2.13)$$

Étant donné la réciprocité des signaux dans une acquisition FMC, c'est-à-dire  $K_{ij}(t)$  est la réciproque de  $K_{ji}(t)$ , alors les contributions associées aux modes de reconstruction  $L_rL_pT$  et  $T_pL_rL$  seront d'amplitudes très proches voire identiques, avec des temps de vol associés également identiques, ce qui va alors conduire à des images similaires.

La Fig 2.6 montre les images TFM des modes  $L_rL_pT$  et  $T_pL_rL$  calculées à partir de données expérimentales.

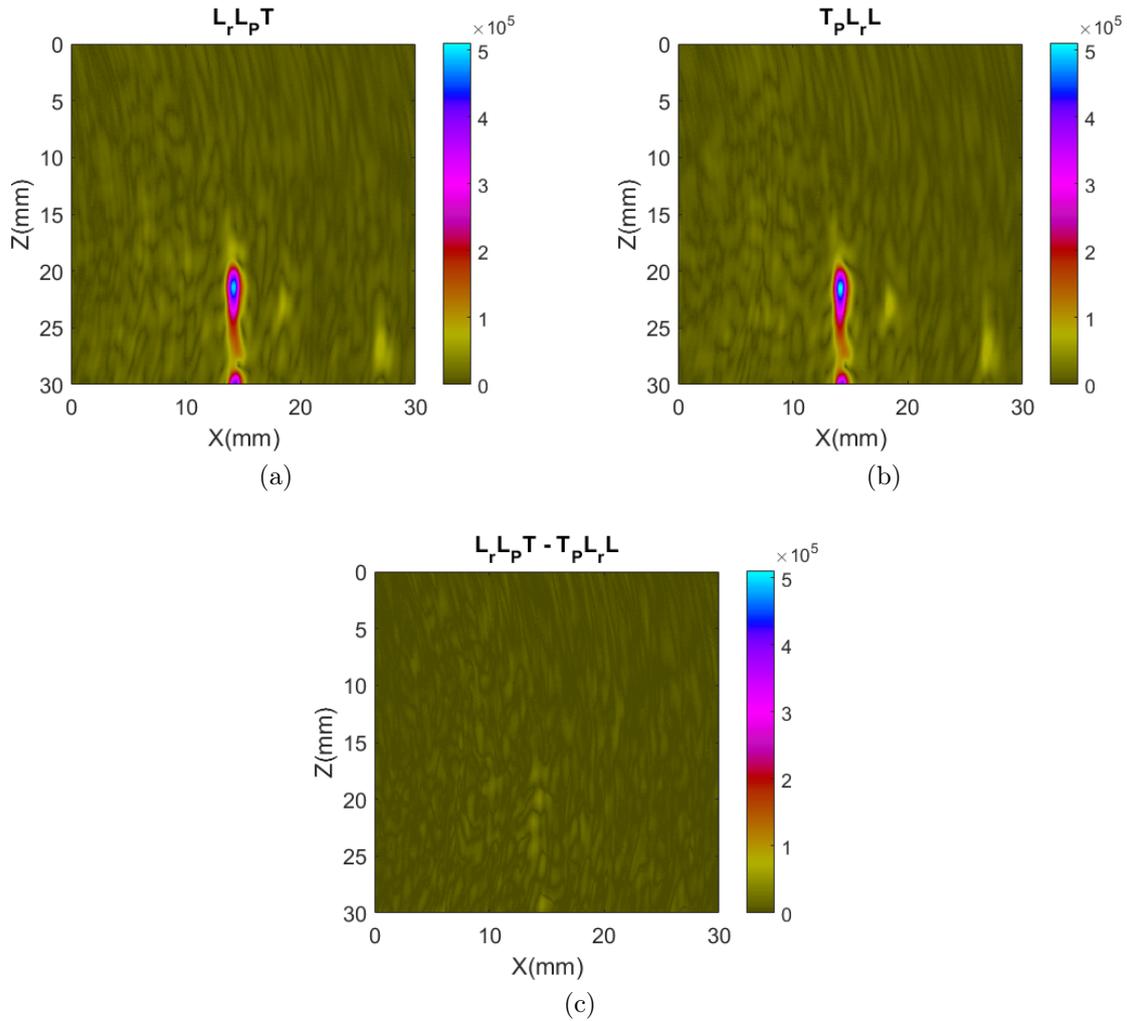


Fig 2.6 – Image TFM reconstruite en mode (a)  $L_r L_P T$ , (b)  $T_P L_r L$  et (c) Soustraction des images (a) et (b)

L'observation des images TFM montre que les indications reconstruites sont similaires. L'écart d'amplitude (30dB) mesurée entre l'image issue de la soustraction des deux images (cf. Fig 2.6 (c)) et l'image  $T_r T_P L$  ou encore l'image  $L_P T_r T$ , montre que ces dernières ont la même amplitude. Les deux modes de reconstruction  $L_P T_r T$  et  $T_r T_P L$  sont donc identiques au bruit près.

De la même façon, cette réciprocité existe pour les modes de reconstruction suivants :

$$\begin{aligned}
 &L_r L_P L \text{ et } L_P L_r L, \\
 &L_r L_P T \text{ et } T_P L_r L, \\
 &L_r T_P L \text{ et } L_P T_r L, \\
 &T_r L_P L \text{ et } L_P L_r T, \\
 &L_r T_P T \text{ et } T_P T_r L, \\
 &T_r L_P T \text{ et } T_P L_r T, \\
 &T_r T_P L \text{ et } L_P T_r T, \\
 &T_r T_P T \text{ et } T_P T_r T
 \end{aligned}$$

Étant donné que chaque mode et son réciproque fournissent la même image, nous

avons défini une nouvelle convention et un nouvel algorithme TFM où chaque parcours et son réciproque sont exploités dans la même image.

### 2.1.7 Définition d'une nouvelle convention

Nous avons défini une nouvelle convention qui, pour un couple d'éléments, conduit à exploiter quatre contributions issues de quatre parcours différents et réciproques deux à deux.

La Fig 2.7 montre les types de parcours définis en mode écho de coin.

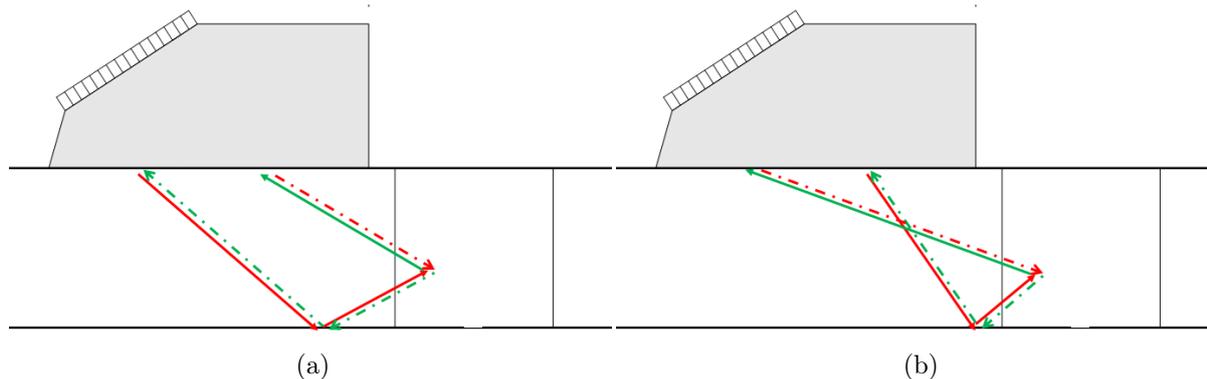


Fig 2.7 – Un couple d'éléments est associé à deux trajets différents. (a) lorsque l'émetteur est situé avant le récepteur, (b) lorsque l'émetteur est situé après le récepteur. A chaque parcours est associé un parcours inverse

Alors, pour un émetteur  $i$  et un récepteur  $j$ , en un point  $P$  donné, deux contributions peuvent être simultanément exploitées en modifiant l'algorithme de la manière suivante :

$$I^m(P) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N K_{ij}(t_{ij}^{m,P}) + K_{ji}(t_{ij}^{m,P}) \right| \quad (2.14)$$

Avec ce nouvel algorithme, les deux modes de reconstruction similaires de la convention précédente ne sont plus dissociés mais sommés, ce qui conduit à huit modes écho de coin au lieu de seize. Ces modes de reconstruction sont définis tels que :

$$\begin{aligned} LLL &= L_r L_P L + L_P L_r L, \\ LLT &= L_r L_P T + T_P L_r L, \\ LTL &= L_r T_P L + L_P T_r L, \\ TLL &= T_r L_P L + L_P L_r T, \\ LTT &= L_r T_P T + T_P T_r L, \\ TLT &= T_r L_P T + T_P L_r T, \\ TTL &= T_r T_P L + L_P T_r T, \\ TTT &= T_r T_P T + T_P T_r T \end{aligned}$$

A titre d'exemple nous avons calculé l'image TFM  $LLT$  qui est la somme des images de la Fig 2.6. Le résultat est donné en Fig 2.8.

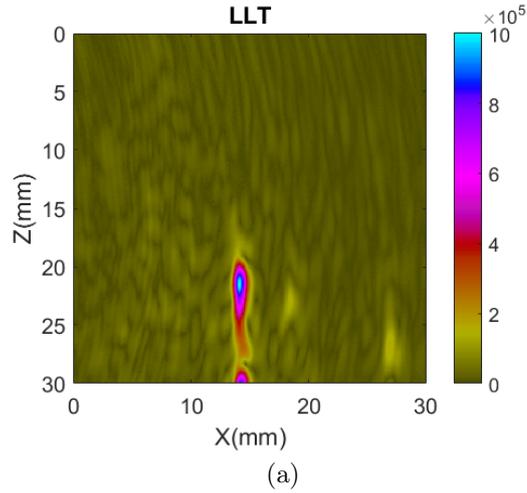


Fig 2.8 – Image TFM en mode LLT

L'allure du défaut reconstruit n'a pas changé mais la sensibilité est doublée avec une amplitude TFM maximale qui passe de  $5 \cdot 10^5$  à  $10 \cdot 10^5$ .

Avec le même raisonnement qu'en mode écho de coin, la nouvelle convention fournit trois modes directs au lieu de quatre tels que :

$$LT = TL = T_P L + L_P T,$$

$$TT = 2 \times T_P T,$$

$$LL = 2 \times L_P L$$

Et dix modes indirects au lieu de seize tels que :

$$LLLL = 2 \times L_r L_P L_r L,$$

$$LLLLT = TLLLL = L_r L_P L_r T + T_r L_P L_r L,$$

$$LLTL = LTL = L_r L_P T_r L + L_r T_P L_r L,$$

$$LLTT = TTL = L_r L_P T_r T + T_r T_P L_r L,$$

$$LTTL = 2 \times L_r T_P T_r L,$$

$$TLLT = 2 \times T_r L_P L_r T,$$

$$LTLT = TLLT = L_r T_P L_r T + T_r L_P T_r L,$$

$$LTTT = TTTL = L_r T_P T_r T + T_r T_P T_r L,$$

$$TLLT = TLLT = T_r L_P T_r T + T_r T_P L_r T,$$

$$TTTT = 2 \times T_r T_P T_r T$$

Pour les trois familles de modes de reconstruction, la nouvelle convention fait passer le nombre de modes de trente-six à vingt-et-un. Cette convention sera donc utilisée par la suite. Notons que l'allure des images ne sera pas modifiée, mais on observera une augmentation de la sensibilité, l'amplitude TFM étant doublée avec l'exploitation de la réciprocité des signaux.

Par ailleurs, la réciprocité des signaux peut permettre de réduire le nombre de tirs lors de l'acquisition FMC de moitié en n'exploitant que la diagonale inférieure ou la diagonale supérieure de la matrice FMC. Ce qui permettrait d'augmenter la cadence d'imagerie pour les méthodes en temps réel tout en conservant des images similaires.

Nous allons nous intéresser maintenant à la compréhension de la formation des images TFM.

## 2.2 Analyse de la construction des images TFM

L'algorithme de calcul de l'imagerie TFM est basé sur un calcul de temps de vol. Pour un couple d'éléments donné, un même temps de vol est associé à différents points de la ROI, on parle de non-unicité des temps de vol. L'ensemble des points associés à un même temps de vol forme alors une courbe dite isochrone pour laquelle la somme du temps de vol à l'émission et celui à la réception est égale. L'isochrone reconstruite est alors une ellipse dont les foyers sont liés à la position des éléments émetteur et récepteur et au mode de reconstruction considéré.

La Fig 2.9 montre le tracé d'une isochrone pour un couple d'éléments donné en mode direct.

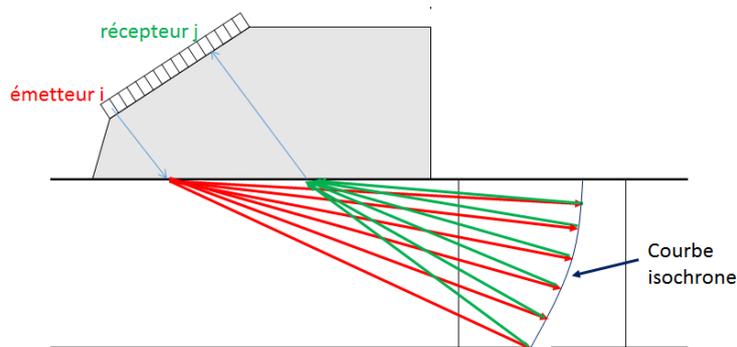


Fig 2.9 – Courbe isochrone en mode direct pour un couple d'éléments. En rouge le trajet à l'émission, en vert le trajet à la réception. La somme du temps de parcours en rouge (émission) et celui en vert (réception) est égale pour tous les points appartenant la courbe isochrone.

Ces isochrones sont visibles lors de la formation progressive des images TFM. Pour les observer, nous avons réalisé une acquisition FMC expérimentale avec un capteur linéaire dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2.2.

Découpe du transducteur	Linéaire
Nombre d'éléments	64
Fréquence	5MHz
Pas inter-éléments	0.6mm
Sabot	T55

Tableau 2.2 – Caractéristiques du transducteur

La pièce considérée est une pièce en acier, à faces parallèles, de 30mm d'épaisseur. Le défaut considéré est plan vertical de type entaille électro-érodée, de 10mm de hauteur et débouchant en paroi interne (cf. Fig 2.10).

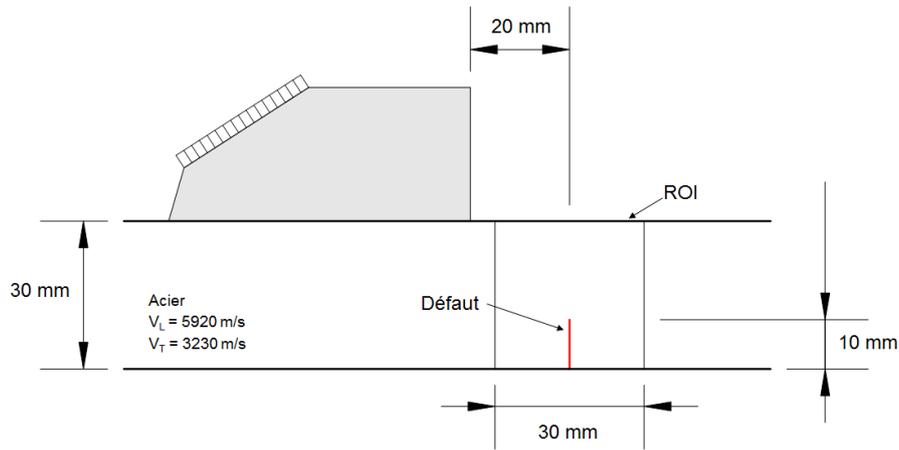


Fig 2.10 – Configuration d’inspection

On réalise deux images TFM ne faisant intervenir qu’un couple d’éléments par image, le couple 1 – 1 et le couple 64 – 64, par image (Fig 2.11)

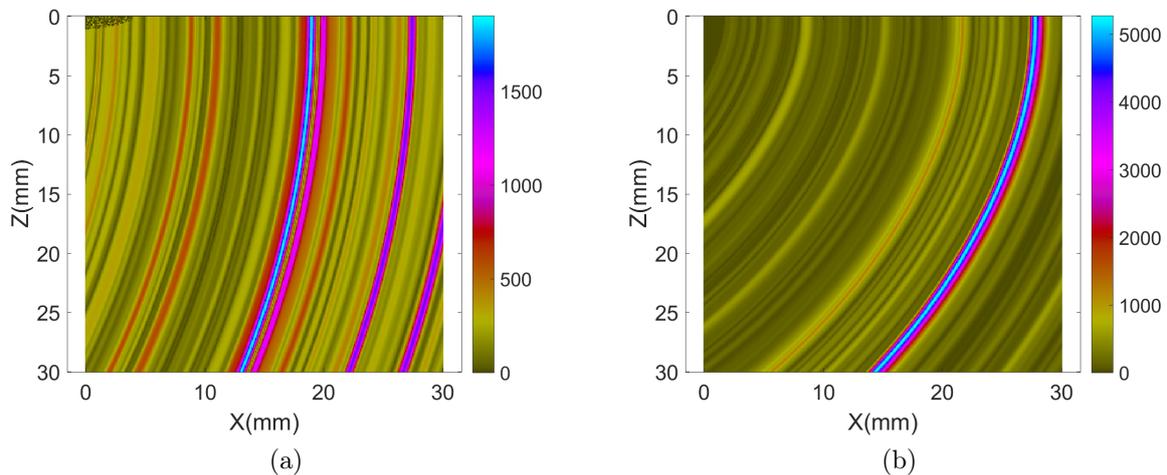


Fig 2.11 – Image TFM réalisée pour le couple d’élément (a)1-1, (b) 64-64

Sur chaque image élémentaire, on observe une multitude de courbes isochrones, chacune associée à une amplitude différente. On peut remarquer que la courbure des isochrones est différente entre les deux couples d’éléments, les foyers des ellipses étant liés à la position des éléments. Par la suite, les différentes images élémentaires obtenues par la combinaison des  $N$  émetteurs et des  $N$  récepteurs seront sommées pour fournir l’image finale.

Pour observer la formation progressive des images TFM, nous avons réalisé des images intermédiaires avec 3 couples, 10 couples, 100 couples avant de construire l’image finale avec les 4096 couples ( $N=64$ ) (cf. Fig 2.12).

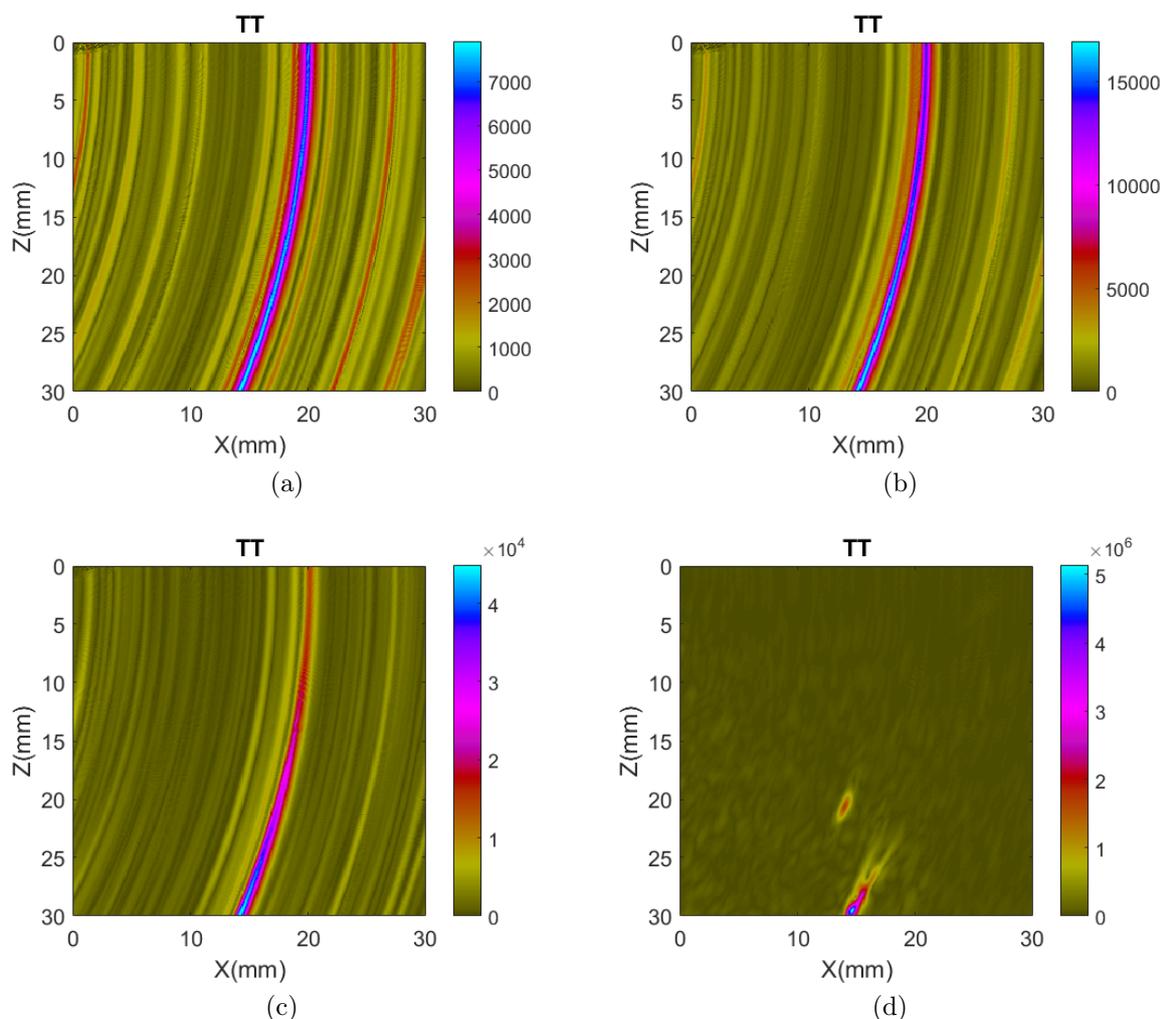


Fig 2.12 – Différentes étapes de la formation des images TFM. (a) 3 couples d'éléments, (b) 10 couples d'éléments, (c) 100 couples d'éléments, (d) 4096 soit  $N \times N$  couples d'éléments

Par sommation, les isochrones disparaissent progressivement pour faire apparaître des indications de forte amplitude correspondant aux extrémités du défaut.

Une image TFM est donc formée d'une multitude de courbes isochrones qui interfèrent quand elles s'intersectent. Si un point de focalisation appartient à un réflecteur présent dans la zone d'inspection, les interférences seront constructives et l'amplitude amplifiée. Dans le cas contraire, les interférences seront destructives et l'amplitude atténuée. En fonction de l'interaction entre le réflecteur et les ondes, différentes indications peuvent alors être reconstruites.

## 2.3 Nature des indications reconstruites

Les différentes indications reconstruites dépendent de la nature de l'interaction entre les ondes et les réflecteurs. Dans le cas des défauts plans, la diffraction de l'onde aux arêtes du défaut et la réflexion spéculaire le long de la face du défaut sont les deux principales interactions. Lorsque les modes de reconstruction choisis sont adaptés, la diffraction est localisée aux extrémités du défaut et la réflexion est spéculaire sur le profil du défaut. Si par contre les modes de reconstruction ne sont pas adaptés, il est possible que des

indications soient reconstruites à des positions où il n'existe pas de réflecteur, on parle alors d'artefacts de reconstruction.

### 2.3.1 Indications de diffraction

La diffraction [39] [40] se traduit par une décomposition omnidirectionnelle de l'onde ultrasonore qui survient lors de l'interaction entre celle-ci et un obstacle de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde (grains, extrémités d'un défaut plan, inclusions...). L'obstacle se comporte alors comme une multitude de sources ponctuelles.

Cependant la dispersion de l'onde dans toutes les directions réduit fortement son amplitude dans une direction donnée, ceci étant une conséquence de la conservation de l'énergie. Ainsi l'amplitude des ondes reçues par le capteur peut être faible et les échos de diffraction peuvent alors rapidement être noyés dans le bruit.

Dans le cas d'un défaut plan, la diffraction apparait au niveau des extrémités inférieure et supérieure. On peut également la retrouver à tous les points diffractants lorsque le défaut présente des ramifications par exemple.

Les modes directs sont généralement utilisés pour retrouver cette diffraction, mais celle-ci peut être retrouvée avec tous les modes de reconstruction.

La Fig 2.13 montre les images TFM TT et TLT calculées pour la configuration précédente. Des indications de diffraction sont bien retrouvées.

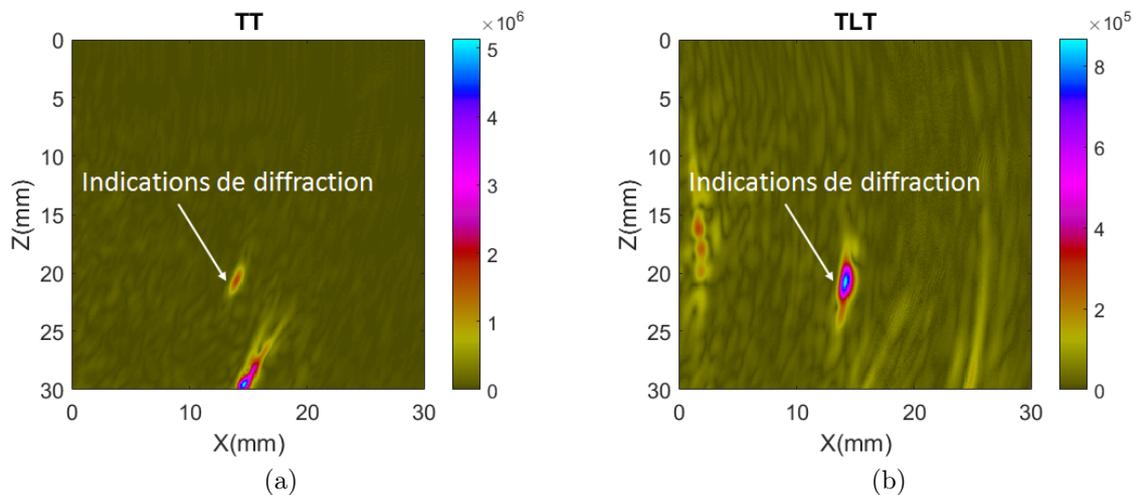


Fig 2.13 – Indication de diffraction reconstruite suivant les modes (a) TT et (b) TLT

Chaque image possède sa propre dynamique allant de 0 à l'amplitude maximale sur l'image. Les deux extrémités du défaut sont reconstruites par le mode TT et l'extrémité supérieure seule est reconstruite par le mode TLT.

### 2.3.2 Indications spéculaires

Les échos spéculaires se propagent selon une direction privilégiée, ils sont de fait généralement plus énergétiques que les échos de diffraction. L'onde incidente est réfléchi

dans une direction respectant la loi de Snell-Descartes, laquelle loi est fonction de la direction d'incidence et de l'orientation du défaut. Il faut alors que l'élément récepteur soit favorablement positionné pour détecter l'écho réfléchi par le défaut, où que le mode de reconstruction considéré comporte des trajets spéculaires.

Lorsqu'un mode adapté est choisi, l'indication spéculaire est repositionnée le long du profil du défaut dans le cas des défauts plans (Fig 2.14). Cette signature est un des principaux avantages de l'imagerie TFM, qui fournit alors une image réaliste du défaut permettant de conclure quant à la nature plane d'un défaut.

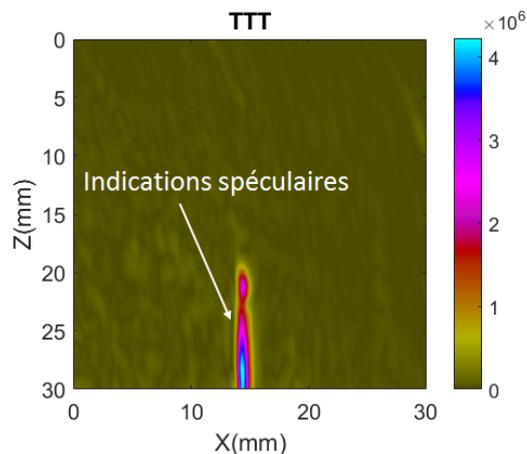


Fig 2.14 – Indication spéculaire reconstruite suivant le mode TTT

Ainsi, dès lors que des modes de reconstruction adaptés sont choisis, les échos spéculaires et les échos de diffraction apportent des informations pertinentes et complémentaires sur le défaut. Dans le cas contraire, ils peuvent former des artefacts de reconstruction.

### 2.3.3 Artefacts de reconstruction

On appelle artefact de reconstruction toute indication présente sur une image TFM dont l'amplitude est supérieure à celle du bruit et qui est située à une position où il n'existe pas de réflecteur. La formation de ces artefacts est liée de manière intrinsèque à l'algorithme d'imagerie TFM. Elle est une conséquence de la non-unicité des temps de vol introduite au paragraphe 2.2.

Une coïncidence de temps de vol peut se produire au sein d'un même mode ou entre deux modes différents. Nous avons donc distingué deux types d'artefacts : les artefacts intra-mode et les artefacts inter-modes.

#### 2.3.3.1 Artefacts intra-modes

On parle d'artefact intra-mode lorsqu'une indication correctement reconstruite suivant un mode donné conduit à la formation d'un artefact au sein du même mode.

Au sein des artefacts intra-modes, nous pouvons encore distinguer deux types d'artefacts. Les premiers sont appelés isochrones résiduelles. Ils sont dus à des interférences

destructives insuffisantes. En effet, alors que dans le cas idéal les isochrones issues des différents couples d'éléments se détruisent en dehors de la position du réflecteur, dans certains cas, il subsiste des isochrones résiduelles sur l'image finale. Elles se traduisent alors par des échos parasites dégradant la qualité des reconstructions. Ce type d'artefacts apparaît souvent dans le cas de reconstruction TFM dans l'eau [41]. L'explication du phénomène et une méthode d'atténuation et de filtrage de ce type d'artefact sont donnés en annexe A.

D'autres artefacts intra-modes sont observés lorsqu'il existe une coïncidence de temps de vol pour un ensemble de couples telle que :

$$t_{ij}^{P_1,m} = t_{ji}^{P_2,m} \quad (2.15)$$

Les signaux  $K_{ij}(t)$  et  $K_{ji}(t)$  étant réciproques, des contributions équivalentes sont associées aux points  $P_1$  et  $P_2$ . Alors une même indication est reconstruite en des positions différentes au sein d'un même mode de reconstruction.

Les deux types d'artefacts intra-modes sont observables sur l'image TFM TLL de la configuration en Fig 2.10.

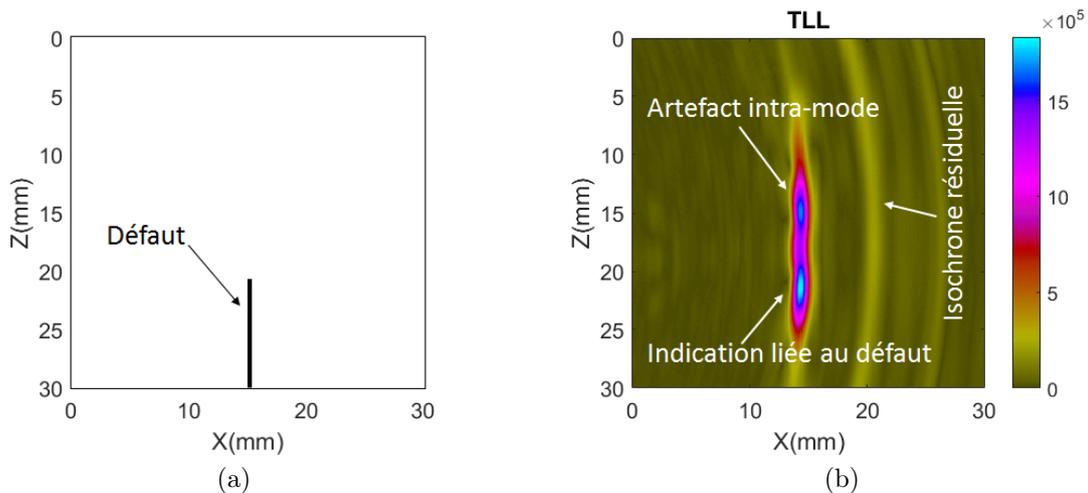


Fig 2.15 – (a) Position du défaut dans la ROI, (b) Reconstruction TFM suivant le mode TLL

L'indication reconstruite sur l'image de la Fig 2.15 (b) est constituée d'une indication spéculaire de la partie haute du défaut et d'un artefact qui apparaît dans la continuité du défaut. On montrera en annexe B comment cet artefact est formé. Une autre indication d'amplitude plus faible apparaît à droite du défaut, il s'agit d'une isochrone résiduelle.

### 2.3.3.2 Artefacts inter-modes

Pour deux modes différents, il peut y avoir une coïncidence de temps de vol pour un ensemble de couples d'éléments. Dans ce cas, une indication correctement reconstruite pour un mode devient un artefact suivant un autre mode de reconstruction. On parle d'artefact inter-modes.

C'est le cas du mode LTT (Fig 2.16 (a)) qui présente un artefact qui, nous le montrons en annexe C, est associé à l'écho issu du mode LLT (Fig 2.16 (b)) pour la configuration étudiée.

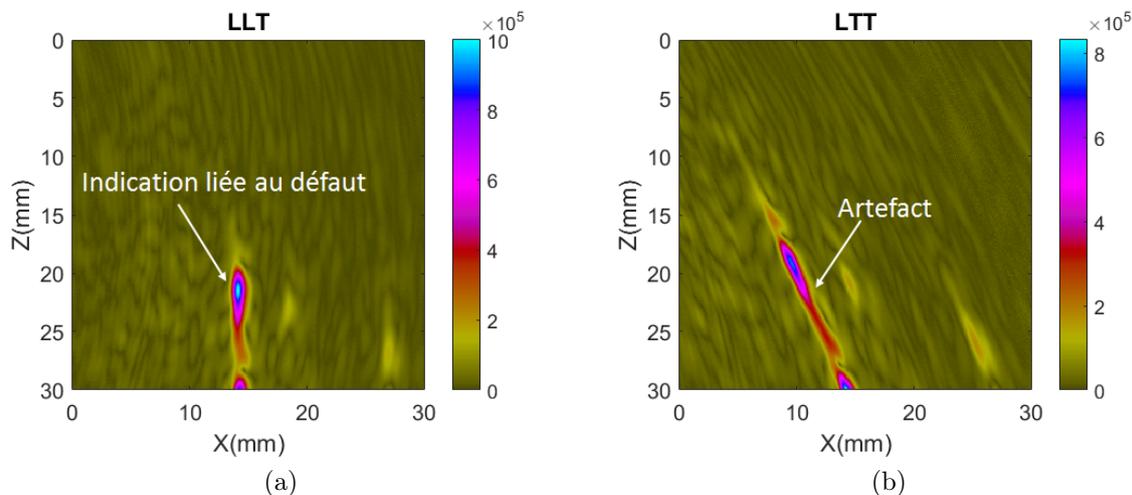


Fig 2.16 – Reconstructions TFM suivant les modes (a) LLT et (b) LTT

Dans tous les cas, ces différents types d'artefacts peuvent conduire à une mauvaise interprétation des images, l'artefact ayant un aspect et une amplitude proches de celui d'un défaut.

### 2.3.3.3 Discussions sur les indications reconstruites

L'analyse des différentes images a montré que l'imagerie TFM peut conduire à la formation de trois types d'indications dans le cas d'un défaut plan. La diffraction permet de retrouver les limites du défaut tandis que les indications spéculaires, généralement d'amplitude plus forte, permettent de reconstruire le profil du défaut. Ce type d'indication est particulièrement intéressant car il fournit une image réaliste du défaut permettant de connaître sa nature plane ou volumique. Mais les artefacts peuvent rendre difficile l'analyse des images. Ces différentes indications peuvent apparaître simultanément ou séparément pour les différents modes de reconstruction. En fonction de la configuration d'inspection et des caractéristiques du défaut, nous verrons ci-après que ce ne sont pas les mêmes modes de reconstruction qui sont toujours pertinents.

## 2.4 Sensibilité des modes de reconstruction

Pour mettre en évidence la sensibilité des modes de reconstruction en fonction de la géométrie de la pièce et de l'orientation du défaut, nous avons réalisé différentes acquisitions FMC sur des pièces de différentes géométries. Les configurations choisies, représentatives des cas à considérer dans l'industrie (notamment pour M2M), permettent de mettre en évidence et d'appréhender les avantages et les difficultés de l'imagerie TFM.

Trois pièces sont étudiées, chacune présentant un défaut vertical et un défaut incliné. Dans ce chapitre, ne sont présentées que les images pour deux défauts différents appartenant à deux pièces différentes. Pour observer les écarts d'amplitude entre les images reconstruites, nous avons pris pour chaque configuration une dynamique comprise entre 0 et l'amplitude maximale du mode le plus énergétique. Nous nous sommes essentiellement intéressés aux modes écho de coin qui sont particulièrement adaptés pour reconstruire le profil du type de défauts considérés.

### 2.4.1 Pièce à faces parallèles, défaut vertical

La pièce considérée est une pièce homogène et isotrope en acier à faces parallèles de 30mm d'épaisseur, le défaut est un défaut plan débouchant en paroi interne de 10mm de hauteur.

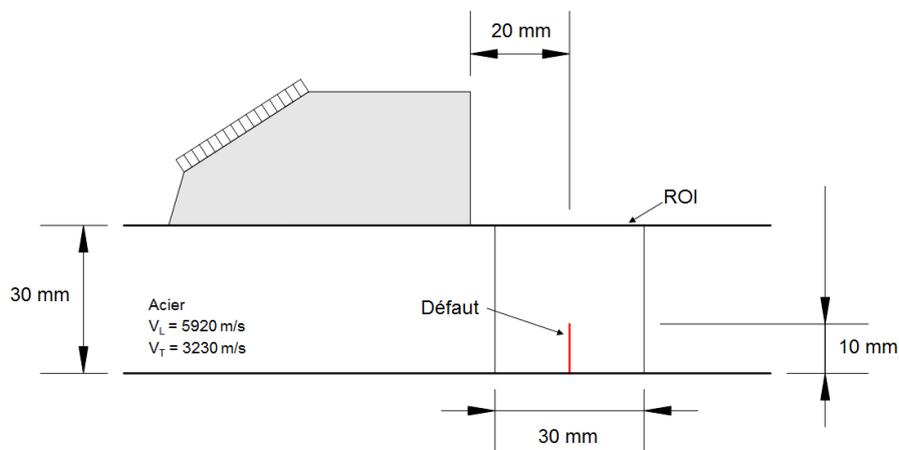
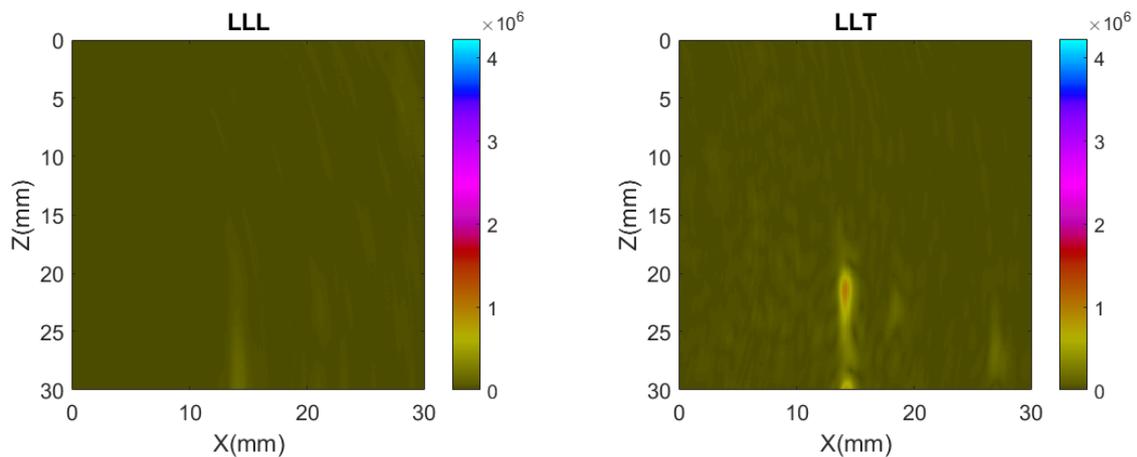


Fig 2.17 – Configuration d'inspection

La Fig 2.18 montre les images TFM reconstruites en mode écho de coin.



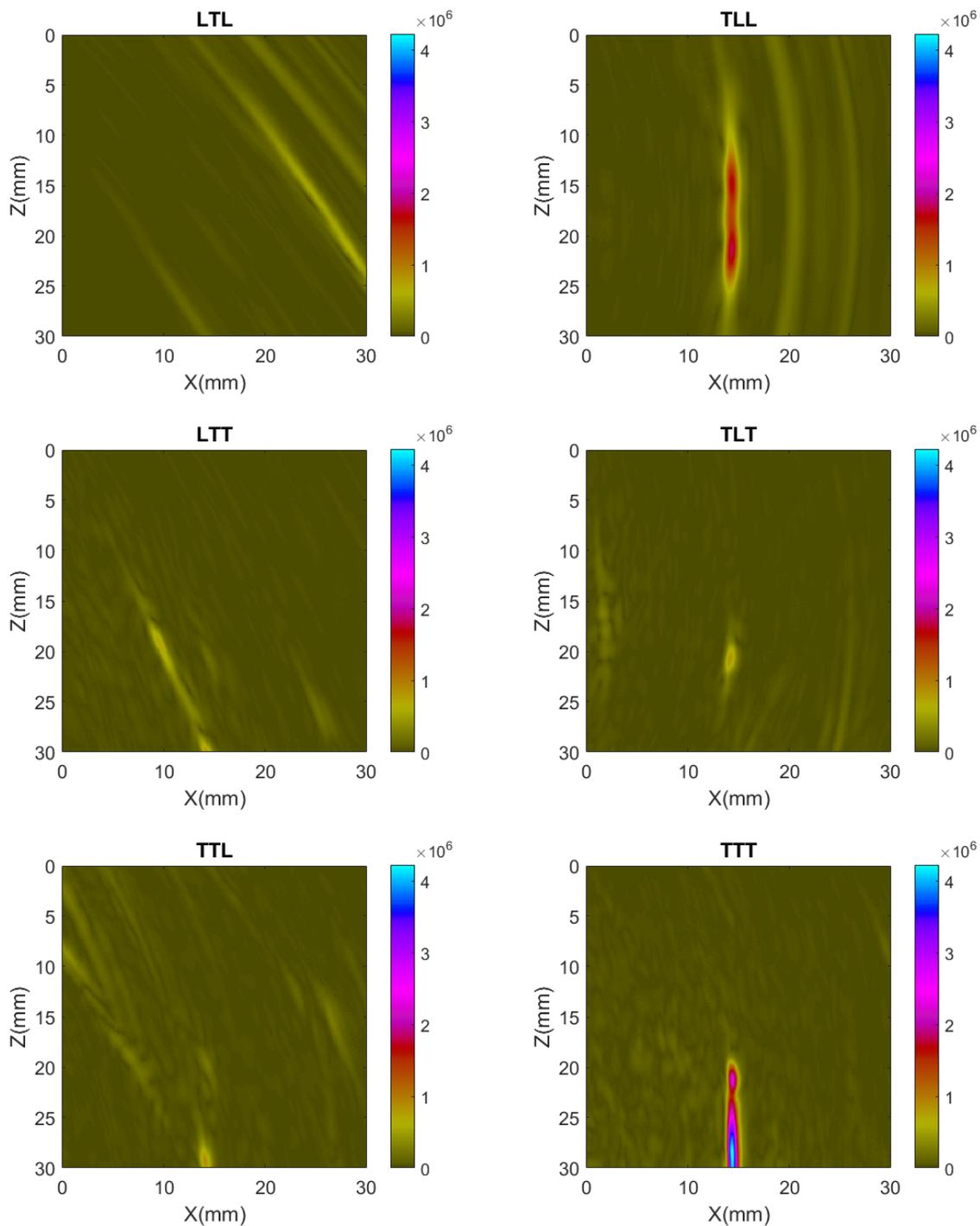


Fig 2.18 – Images TFM reconstruites suivant les huit modes écho de coin.

On note trois catégories d'indications sur les différentes images :

- Le profil du défaut est totalement reconstruit par réflexion spéculaire suivant le mode TTT avec l'amplitude la plus forte.

- Une ou deux extrémités du défaut sont reconstruites par diffraction suivant les modes LLT, TLT, TTL et LTT. L'amplitude associée à ces modes reste cependant faible comparée à l'indication spéculaire du mode TTT. L'écart minimal d'amplitude entre les indications de diffraction et l'indication spéculaire du mode TTT est mesuré à 14dB.

– Des artefacts sont reconstruits suivant les modes LTL, TLL, LTT, TLT et TTL. L'écart minimal d'amplitude est de 7dB par rapport au mode de reconstruction TTT.

### 2.4.2 Pièce avec délardage, défaut vertical

Pour cette configuration, le fond de la pièce présente une pente de délardage inclinée de  $14^\circ$  par rapport à l'horizontale. Ce type de géométrie est fréquemment observé en bordure de soudure. Le défaut que l'on cherche à reconstruire est un défaut vertical de 10mm de hauteur. Tous les autres paramètres du contrôle sont identiques au cas précédent.

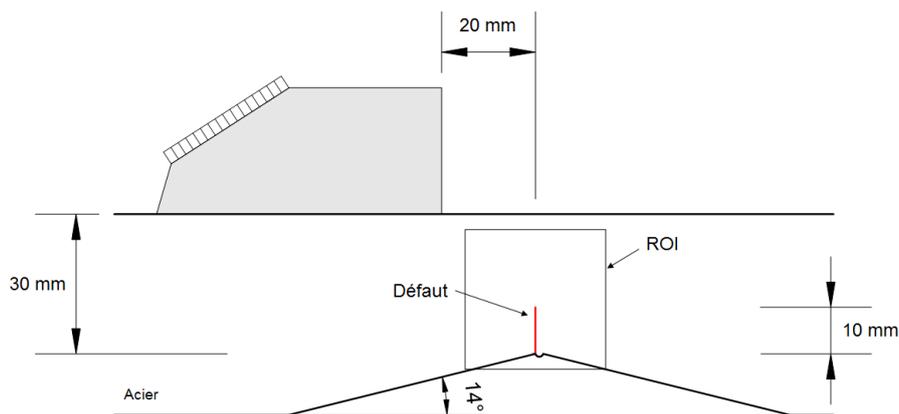
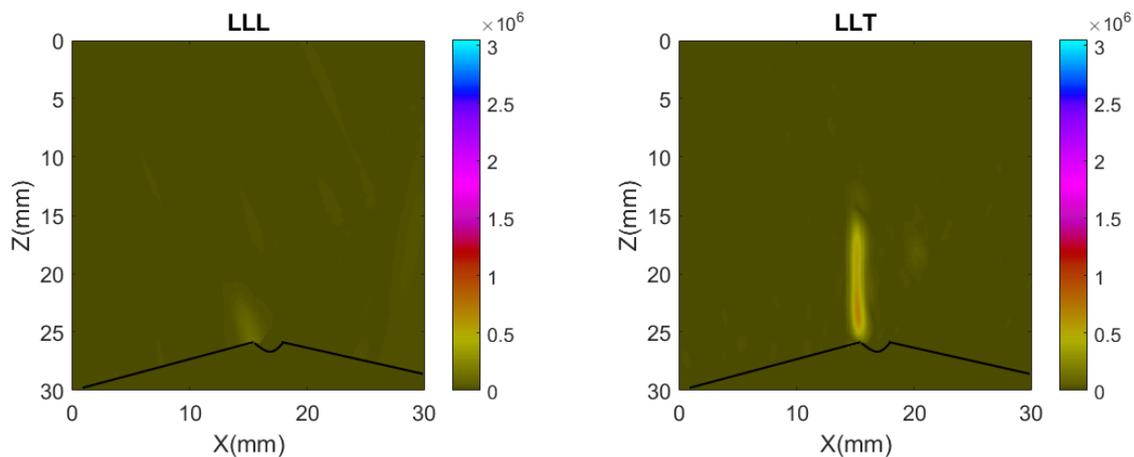


Fig 2.19 – Configuration d'inspection

L'algorithme TFM appliqué sur les données FMC a fourni les images TFM de la Fig 2.20.



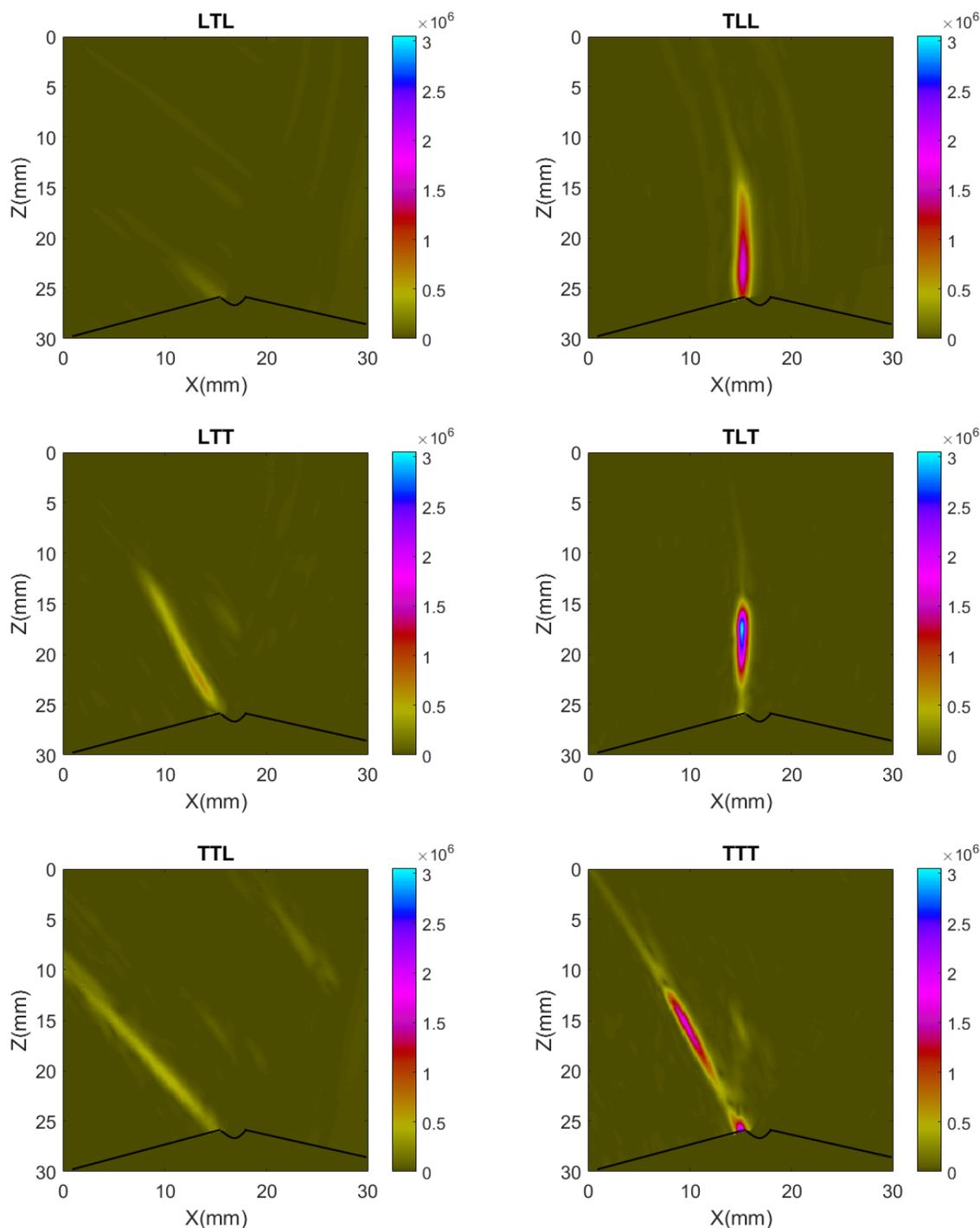


Fig 2.20 – Images TFM reconstruites suivant les huit modes écho de coin.

– Le profil du défaut est reconstruit suivant les modes LLT et TLL, et partiellement reconstruit suivant le mode TLT. Ce dernier permet de reconstruire la moitié supérieure du défaut avec une amplitude maximale. Le mode LLT permet lui de reconstruire entièrement le défaut, mais l'amplitude associée est très faible comparée à celle associée au mode TLT (écart de 12dB).

– Tous les autres modes n'apportent que des artefacts de reconstruction. On peut noter que l'artefact du mode TTT est d'amplitude plus forte que l'indication pertinente du mode LLT (écart de 8dB) qui a elle-même une amplitude du même ordre de grandeur que l'artefact reconstruit suivant le mode LTT, d'où la difficulté de faire la distinction

entre l'indication pertinente et l'artefact.

### 2.4.3 Résumé des résultats expérimentaux

A travers les différentes reconstructions réalisées, il apparaît qu'en mode écho de coin :

- l'indication liée au profil du défaut est généralement d'amplitude plus forte que les indications résultant de la diffraction des ondes ;

- tous les modes de reconstruction ne sont pas pertinents : certains permettent de reconstruire les extrémités du défaut, d'autres son profil, alors que certains n'amènent à aucune information pertinente ou présentent des artefacts de reconstruction.

Pour analyser l'aptitude des modes à reconstruire le profil du défaut, nous avons résumé les résultats pour les trois pièces étudiées dans le tableau 2.3. La géométrie considérée est celle de la pièce et l'orientation est celle du défaut par rapport à la verticale.

Orientation Géométrie	0°	-20°	-14°	-30°
Plane	TTT	LTT, TTL	×	×
Délardage de 14°	TLT, TLL, LLT	×	TTT	×
Délardage de 30°	TLT	×	×	TTT

Tableau 2.3 – Modes pertinents pour la reconstruction du profil en fonction de la géométrie de la pièce et de l'orientation du défaut

*Remarque : Les symboles × correspondent aux cas qui n'ont pas été traités.*

On constate que la pertinence des modes varie d'une configuration à une autre. Ainsi, pour une configuration d'inspection donnée (type de capteur, angle de réfraction du sabot...), la capacité d'un mode à reconstruire le profil d'un défaut plan dépend de la géométrie de la pièce et de l'orientation du défaut.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons reconsidéré les bases de l'imagerie TFM en rappelant la méthode d'acquisition de données ainsi que les paramètres nécessaires au calcul de l'algorithme TFM. Au vu de la redondance des modes de reconstruction calculés via le logiciel CIVA, nous avons introduit une nouvelle convention pour la construction des modes de reconstruction et modifié l'algorithme TFM. Cette nouvelle convention a permis de réduire de manière significative le nombre de modes. L'analyse de la réciprocité des signaux FMC a également permis de relever la possibilité d'une imagerie TFM avec la moitié de la matrice inter-éléments, ce qui permet de réduire le nombre de tirs de moitié pour une acquisition FMC.

Nous avons également analysé les images reconstruites à partir des modes de reconstruction et nous avons observé la reconstruction de trois types d'indications dans le cas des défauts plans, dont deux qui apportent des informations pertinentes et complémentaires et une troisième qui est un artefact de reconstruction pouvant conduire à une mauvaise interprétation des images. En outre, la capacité de reconstruction d'une indication pertinente varie avec les caractéristiques du défaut et de la pièce.

Toutes ces contraintes rendent l'exploitation de l'imagerie TFM compliquée dans un cadre industriel. Il nous faut donc déterminer en amont du contrôle les modes susceptibles de reconstruire le défaut et filtrer les artefacts de reconstruction. Le développement d'un outil de prédiction des modes pertinents fera l'objet du chapitre suivant.



# Chapitre 3

## Prédiction des modes de reconstruction pertinents pour un défaut plan

### Contents

---

<b>3.1</b>	<b>Contexte et objectifs de la prédiction</b>	<b>48</b>
<b>3.2</b>	<b>Rappel du compteur de réflexions</b>	<b>49</b>
3.2.1	Algorithme de calcul	49
3.2.2	Cartographie du compteur de réflexions	51
3.2.3	Analyse de la cohérence entre le compteur de réflexions et l'imagerie TFM	51
3.2.4	Discussions sur le compteur de réflexions	55
<b>3.3</b>	<b>Estimateur d'Echos Spéculaires (SEE)</b>	<b>55</b>
3.3.1	Hypothèses	55
3.3.2	Vecteur déplacement d'une onde plane	56
3.3.3	Algorithme de calcul de l'estimateur SEE	57
3.3.4	Calcul numérique	57
3.3.5	Cartographie spatiale SEE	58
3.3.6	Analyse de la cohérence entre les cartographies spatiales SEE et les images TFM	59
3.3.7	Comparaison quantitative de l'amplitude TFM vs SEE	61
3.3.8	Amplitude minimale de détection	63
3.3.9	Cartographie angulaire SEE	64
3.3.10	Discussions sur l'estimateur SEE	66
<b>3.4</b>	<b>Sélection des modes de reconstruction pertinents</b>	<b>66</b>
3.4.1	Maximisation de l'amplitude SEE	66
3.4.2	Maximisation du nombre de modes	67
3.4.3	Minimisation du nombre de modes	68
3.4.4	Application à la cartographie angulaire SEE	69
3.4.5	Discussions sur les critères de sélection	69

---

## Introduction

Dans le chapitre 2, nous avons montré la capacité de l'imagerie TFM à fournir des images réalistes par le repositionnement des échos spéculaires le long du profil d'un défaut plan et des échos de diffraction au niveau des extrémités. L'aptitude d'un mode à reconstruire le profil d'un défaut varie cependant avec la géométrie de la pièce et avec les caractéristiques du défaut ce qui rend difficile l'exploitation des images TFM.

En fait, pour que les indications soient correctement repositionnées, il faut choisir les modes de reconstruction appropriés. Ceux-ci sont les modes de reconstruction dont les trajets sont à l'origine des échos. Or, ces trajets sont sensibles à la présence de réflecteurs tels que les parois de la pièce ou un potentiel défaut.

Étant donné le grand nombre de modes possibles, il est nécessaire de prédire en amont, les modes de reconstruction pertinents. Il n'existe cependant pas dans la littérature un outil de prédiction de ces modes. L'objectif dans ce chapitre est donc le développement de cet outil de prédiction.

Dans un premier temps, nous allons définir le contexte et préciser les objectifs de la prédiction. Nous proposerons ensuite un nouvel outil de prédiction. La pertinence de ce dernier sera évaluée avec l'analyse d'images TFM. Enfin, nous définirons des critères de sélection des modes les plus adaptés pour la reconstruction d'un défaut plan.

### 3.1 Contexte et objectifs de la prédiction

La prédiction des modes de reconstruction pertinents consiste à préjuger de la capacité d'un mode de reconstruction à imager un type de défaut recherché via l'algorithme TFM. Pour une application industrielle aisée, l'outil de prédiction doit être flexible et doit fournir des résultats faciles d'interprétation.

Nous avons défini trois propriétés nécessaires à cet outil :

- une cohérence entre la prédiction et la reconstruction TFM d'un défaut. Cette cohérence existe si la reconstruction TFM d'un défaut peut être prédite par la couverture de zone de l'outil prédiction et vice-versa.
- une cohérence entre l'amplitude de l'outil de prédiction et l'amplitude TFM. L'amplitude TFM doit être proportionnelle à l'amplitude de l'outil de prédiction.
- une minimisation du nombre de paramètres d'entrée de calcul liés au défaut.

L'outil de prédiction que nous cherchons à développer peut donc être vu comme un outil de simulation. Pour le déterminer, il est nécessaire de modéliser les interactions entre les ondes ultrasonores et le défaut. Au chapitre 2, nous avons montré que deux types d'interactions principales, la réflexion spéculaire et la diffraction, se produisent en présence d'un défaut plan. Les indications spéculaires ayant montré un réel intérêt

pour conclure sur la nature plane des défauts plans, nous nous sommes particulièrement intéressés à la modélisation de la physique sous-jacente.

Celle-ci relève d'une loi physique bien connue qui est la loi de Snell-Descartes. Cette loi est dépendante de l'angle d'incidence des ondes sur le défaut, par conséquent elle est dépendante de l'orientation du réflecteur sur laquelle elle se produit. Nous avons présumé dans un premier temps de sa connaissance et à partir de cette hypothèse, nous avons développé un outil de prédiction inspiré d'un opérateur de la littérature appelé compteur de réflexions [42] dont nous allons rappeler le principe au paragraphe suivant.

## 3.2 Rappel du compteur de réflexions

Le compteur de réflexions, utilisé à des fins d'analyse des images TFM, consiste à déterminer l'existence de trajets spéculaires pour justifier la reconstruction du profil d'un défaut plan par un mode de reconstruction donné. Il repose sur la supposition de l'existence d'un réflecteur plan en chaque point de la ROI. Il calcule ensuite le nombre de couples émetteur-récepteur vérifiant la loi de Snell-Descartes sur ce réflecteur et ce en chaque point de la ROI.

Ce calcul ne nécessite pas la connaissance de la position ou de la hauteur du réflecteur, mais il ne renseigne pas sur l'amplitude TFM. Le compteur de réflexions ne possède donc pas toutes les propriétés nécessaires à l'outil de prédiction, mais il constitue une bonne base pour développer un outil de prédiction avec les propriétés définies. Nous allons donc rappeler son principe de calcul.

### 3.2.1 Algorithme de calcul

Dans une ROI discrétisée, on considère que chaque point appartient à un réflecteur plan infini et que les différents points de calcul sont indépendants les uns des autres. Cette indépendance entre les différents points est très importante car elle permet de calculer le compteur de réflexions dans une région discrétisée avec un pas d'échantillonnage spatial plus grand que celui imposé pour l'algorithme TFM (ref paragraphe 2.1.4) permettant des calculs rapides.

Le calcul du compteur de réflexions consiste à comptabiliser pour chaque point  $P$ , les trajets spéculaires reliant les différents couples d'éléments  $ij$  soient les trajets  $i \rightarrow P \rightarrow j$ , qui respectent la loi de Snell-Descartes au passage au point  $P$ .

Déterminer leur existence revient à vérifier si la loi de Snell-Descartes est respectée à toutes les interfaces rencontrées par l'onde depuis l'émetteur jusqu'au récepteur. Dans un calcul TFM, les temps de vol étant calculés selon le principe de Fermat, cette vérification se fait au niveau de toutes les interfaces entre l'émetteur et le point de calcul et entre le récepteur et le point de calcul. Pour le calcul du compteur de réflexions, une seule vérification supplémentaire est alors nécessaire, celle au niveau du point de calcul supposé appartenir à un réflecteur plan.

À partir des trajets à l'émission et à la réception, on déduit une normale dite théo-



réflexions pour un mode de reconstruction donné. Un nombre de trajets spéculaires nul se traduit par une non reconstruction du défaut.

### 3.2.2 Cartographie du compteur de réflexions

La configuration d'inspection Fig 2.19 a été choisie pour illustrer la cartographie du compteur de réflexions. Celle-ci a été calculée dans la ROI définie pour le mode TLT choisi arbitrairement et pour un défaut vertical. Le nombre maximal en un pixel donné est obligatoirement inférieur à  $64 \times 64$  où le nombre d'éléments est de 64.

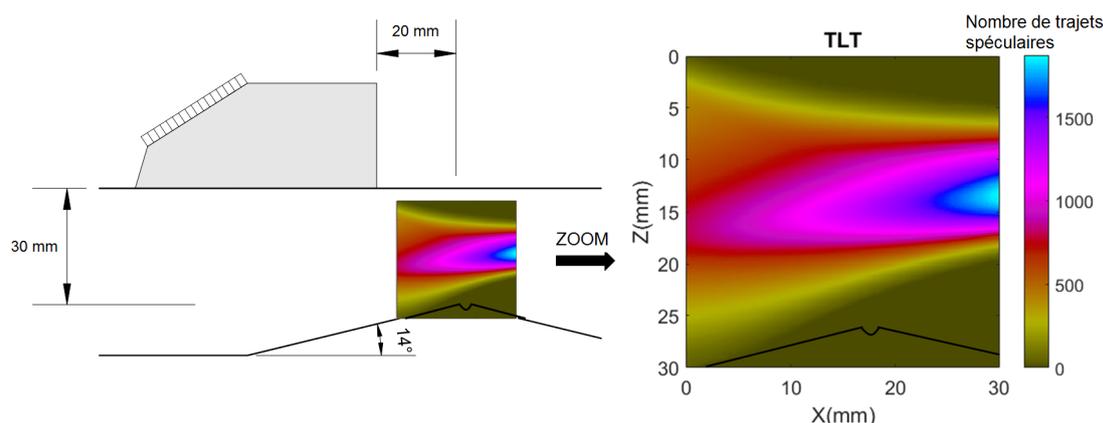


Fig 3.2 – Cartographie du compteur de réflexions pour un défaut plan vertical

L'interprétation de la cartographie du nombre de couples (cf. Figure 3.2) est la suivante :

- Il existe en chaque pixel, un nombre de trajets spéculaires variant entre zéro et deux mille.
- Dans les parties inférieure et supérieure de la pièce, il n'y a pas de trajets spéculaires, par conséquent aucun défaut vertical présent en ces endroits ne pourra être reconstruit par l'imagerie TFM.
- La partie centrale de la pièce concentre le maximum de trajets spéculaires pour un défaut vertical.

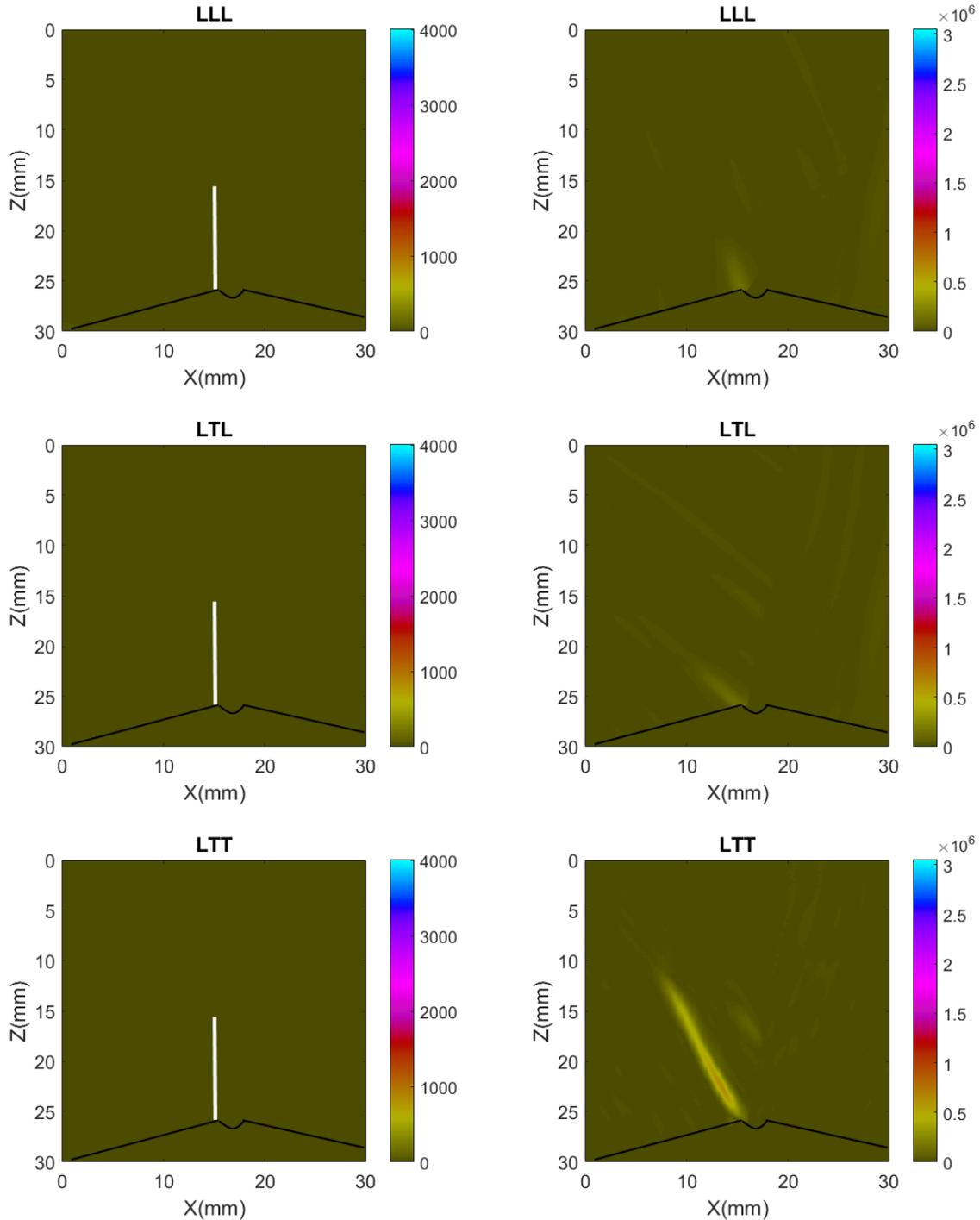
La cartographie du compteur de réflexions permet donc d'évaluer en un seul calcul l'existence de trajets spéculaires se réfléchissant sur un défaut plan quelles que soient sa position et sa hauteur dans la ROI définie. Nous avons vérifié par une analyse de cartographies de compteur de réflexions et d'images TFM la corrélation entre l'existence de trajets spéculaires et la reconstruction TFM d'un défaut plan.

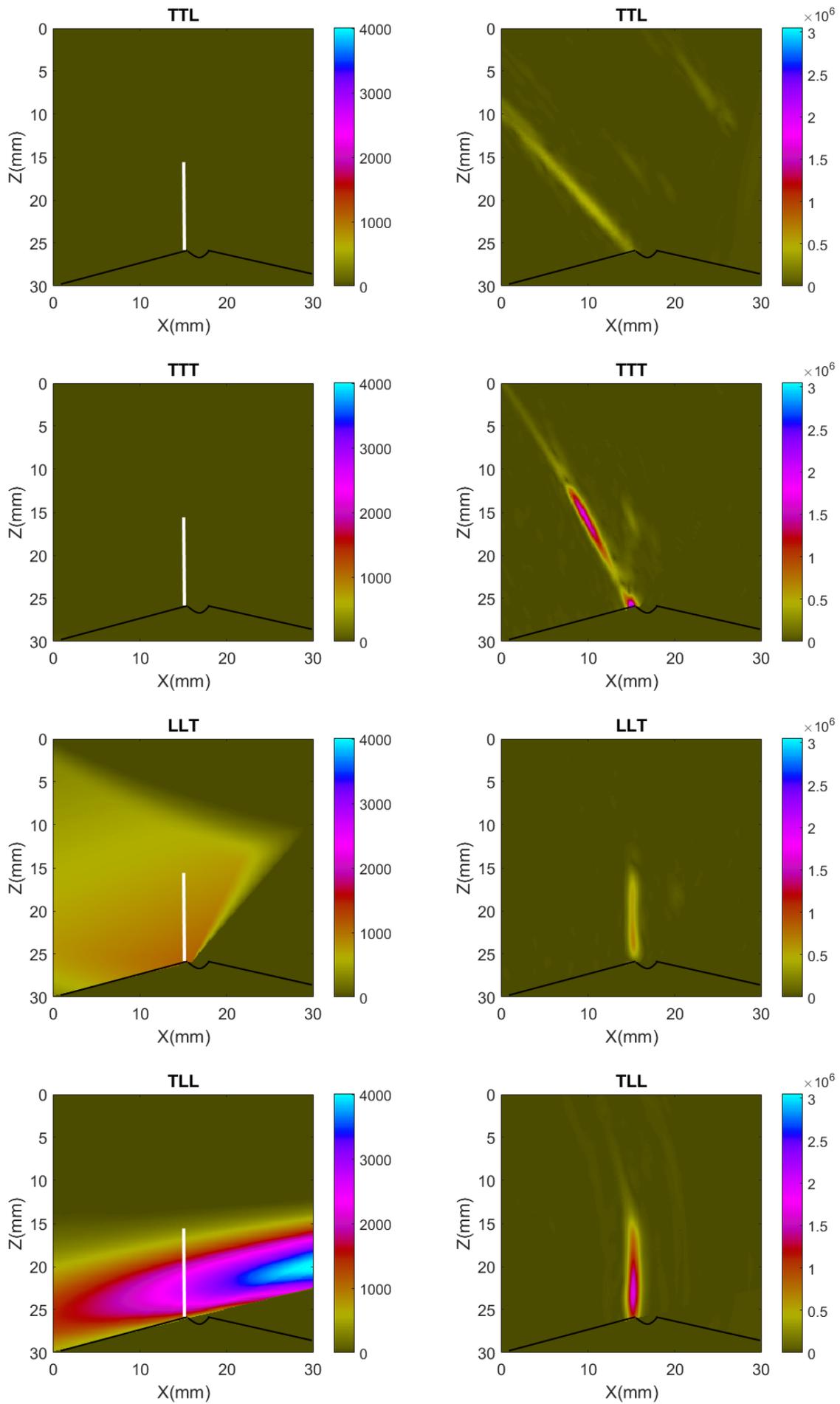
### 3.2.3 Analyse de la cohérence entre le compteur de réflexions et l'imagerie TFM

L'analyse des images TFM basée sur la cartographie du nombre de couples, consiste à vérifier la cohérence entre la reconstruction TFM d'un défaut et l'existence de trajets spéculaires passant par la position du défaut.

Nous avons calculé les cartographies du compteur de réflexions ainsi que les images TFM en mode écho de coin pour la configuration (cf. Fig 2.19). Les images des cartographies ont une dynamique comprise entre 0 et 4096. Les images TFM ont quant à elles une dynamique comprise entre zéro et l'amplitude maximale du mode TLT qui est le plus énergétique dans ce cas particulier.

Notons que sur les cartographies de compteur de réflexions, le défaut recherché est indiqué avec la bonne position et la bonne hauteur, ceci afin de faciliter la compréhension des images, mais ces informations n'interviennent nullement dans le calcul.





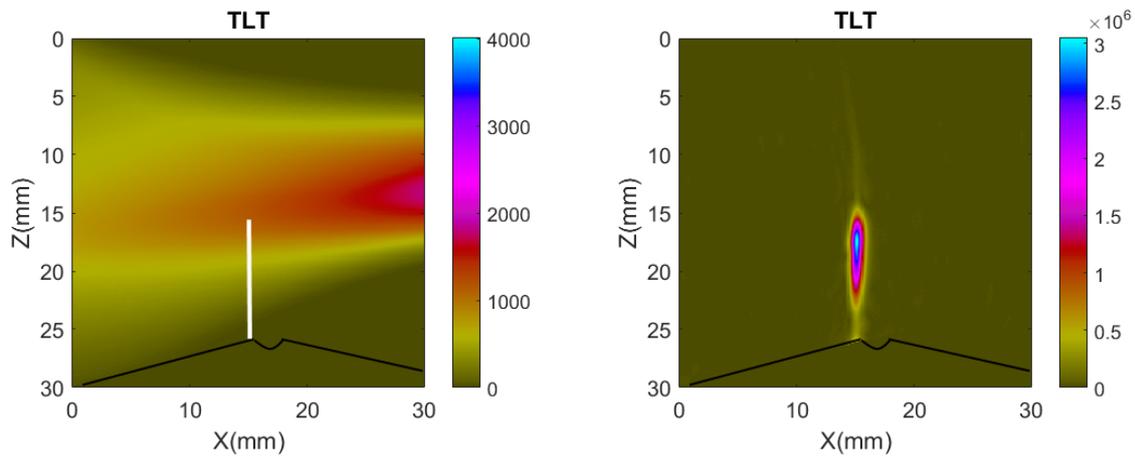


Fig 3.3 – A gauche, la cartographie du compteur de réflexion, à droite l'image TFM associée pour les modes écho de coin

– Les cartographies calculées pour les modes LLL, LTL, LTT, TLL, TTL et TTT montrent qu'il n'existe aucun trajet spéculaire entre les différents couples d'éléments et le défaut recherché (en blanc). L'analyse des images TFM pour ces modes de reconstruction montre que le défaut n'est jamais reconstruit. Toutes les indications présentes sur les images TFM sont donc des indications de diffraction ou des artefacts.

– La cartographie du mode LLT présente environ 1000 trajets spéculaires pour chaque pixel situé le long du défaut. Le défaut est reconstruit sur toute sa hauteur avec l'algorithme TFM.

– La cartographie du mode TLL montre qu'il existe entre 2000 et 3000 trajets spéculaires en chaque point le long du défaut. L'image TFM associée montre que le défaut est bien reconstruit sur toute sa hauteur.

– La cartographie du mode TLT montre qu'il n'existe aucun trajet spéculaire dans la partie inférieure du défaut et environ 1000 trajets spéculaires en chaque point dans la partie supérieure du défaut. L'image TFM montre que la partie inférieure du défaut n'est pas reconstruite contrairement à sa partie supérieure.

Pour tous les modes de reconstruction considérés, il existe bien une corrélation entre l'existence des trajets spéculaires et la reconstruction TFM du profil du défaut.

On constate comme prévu que l'amplitude TFM n'est pas liée au nombre de trajets spéculaires. En effet, considérons les modes de reconstruction LLT TLL et TLT, les seuls aptes à reconstruire le défaut dans le cas présent. L'amplitude TFM maximale est observée pour le mode TLT alors que le nombre de trajets maximal est observé pour le mode TLL.

### 3.2.4 Discussions sur le compteur de réflexions

Le compteur de réflexions présente un nombre de paramètres d'entrée lié au défaut réduit par rapport à la simulation classique et il est possible de justifier la reconstruction TFM par l'existence de trajets spéculaires. Toutefois l'inverse n'est pas vérifié. En effet, il est impossible de prédire qu'un défaut sera reconstruit dès lors qu'il existe des trajets spéculaires car l'amplitude TFM dépend de l'amplitude des ondes empruntant ces trajets. Par conséquent, le compteur de réflexions n'est pas suffisant pour prédire les modes de reconstruction pertinents. Nous avons donc développé un nouvel outil : l'estimateur d'échos spéculaires (SEE pour *Specular Echoes Estimator*) qui est décrit dans le paragraphe suivant.

## 3.3 Estimateur d'Echos Spéculaires (SEE)

L'estimateur d'échos spéculaires a été développé pour prédire la sensibilité d'un mode donné pour un défaut plan et ce quelle que soit sa position dans la région d'intérêt définie et quelle que soit sa hauteur. Il est inspiré du compteur de réflexions, mais contrairement à celui-ci, il associe un poids différent à chaque trajet spéculaire. Ce poids est l'amplitude de l'onde empruntant ledit trajet.

La cartographie générée à partir de cet opérateur est une cartographie d'amplitude spéculaire pour laquelle plus l'amplitude est élevée et plus l'amplitude TFM d'un défaut présent dans la ROI est importante. Le calcul de ce nouveau modèle nécessite toutefois de poser des hypothèses.

### 3.3.1 Hypothèses

Le calcul de l'estimateur d'échos spéculaires repose sur un modèle d'interaction spéculaire faisceau-défaut basé sur deux hypothèses :

- Le défaut considéré est un réflecteur plan parfait d'orientation connue. Cette hypothèse est la même que celle imposée pour le calcul du compteur de réflexions.
- Le calcul est fait en champ lointain. C'est d'ailleurs généralement le cas dans les configurations considérées. On peut alors faire une approximation en ondes planes. En effet dès lors que le point d'observation est suffisamment éloigné de la source, considérée ponctuelle, émettant une onde sphérique divergente, l'onde se comporte comme une onde plane. Son vecteur d'onde est dirigé du point source vers le point d'observation et son amplitude décroît avec la distance parcourue.

Une fois ces hypothèses posées, on calcule l'amplitude des ondes empruntant les trajets spéculaires précédemment définis. Cette amplitude peut être évaluée à partir de l'amplitude du vecteur déplacement de l'onde. Celle-ci étant considérée comme plane, on décrit le modèle mathématique du vecteur déplacement d'une onde plane dans la section suivante.

### 3.3.2 Vecteur déplacement d'une onde plane

Le vecteur déplacement d'une onde plane  $\mathbf{u}_{ij}^m(P)$  émise par un élément  $i$ , reçue par un élément  $j$ ,  $i$  et  $j$  étant considérés comme ponctuels, passant par un point d'observation  $P$  appartenant à un réflecteur plan de normale  $\mathbf{n}$  et empruntant le trajet défini par le mode  $m$ , est donné par l'expression suivante :

$$\mathbf{u}_{ij}^m(P) = A_{ij}^m(P, \mathbf{n}) \mathbf{q} \delta(t - t_{ij}^{P,m}) e^{i\phi} \quad (3.4)$$

où  $A_{ij}^m(P, \mathbf{n})$  est l'amplitude du vecteur de déplacement de l'onde au point  $P$ ,  $\phi$  est la phase de l'onde,  $t_{ij}^{P,m}$  est le temps de vol et  $\mathbf{q}$  est le vecteur de polarisation. Ce vecteur est normé et représente la direction du déplacement des particules au passage de l'onde. Il dépend de la nature de l'onde (onde longitudinale ou onde transversale) et de sa direction de propagation.

L'amplitude de l'onde plane est quant à elle proportionnelle au produit des coefficients de transmission et réflexion aux interfaces rencontrées durant le parcours ultrasonore de l'onde [43].

Dans le cas d'un trajet en mode écho de coin, l'amplitude varie à chaque interface selon le trajet défini à la Fig 3.4 et peut s'écrire sous la forme suivante :

$$A_{ij}^m(P, \mathbf{n}) \propto t_{cs}^{I_1} \times r_{sv}^{I_2} \times r_{sv}^P(\mathbf{n}) \times t_{sc}^{I_3} \quad (3.5)$$

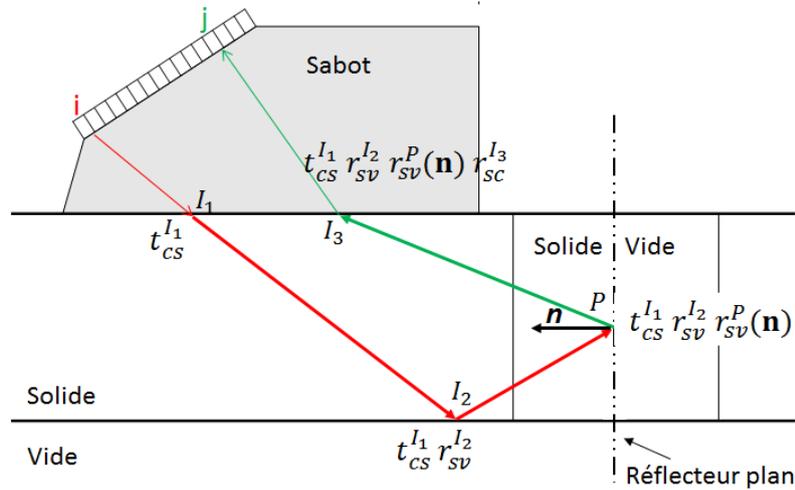


Fig 3.4 – Variation de l'amplitude d'une onde plane entre un couple émetteur et récepteur

où  $t_{cs}^{I_1}$  est le coefficient de transmission sabot-solide de l'onde réfractée dans la pièce au point d'impact  $I_1$ ,  $r_{sv}^{I_2}$  est le coefficient de réflexion solide-vide de l'onde qui se réfléchit sur la paroi interne de la pièce au point d'impact  $I_2$ ,  $r_{sv}^P$  est le coefficient de réflexion solide-vide de l'onde qui se réfléchit sur le réflecteur plan (soit le défaut) au point  $P$  et  $t_{sc}^{I_3}$  est le coefficient de transmission solide-couplant de l'onde transmise dans le sabot.

Pour tout type de trajet, on peut généraliser l'amplitude  $A_{ij}^m(P, \mathbf{n})$  sous la forme

suivante :

$$A_{ij}^m(P, \mathbf{n}) \propto A_i(P) \times r_{sv}^P(\mathbf{n}) \times A_j(P) \quad (3.6)$$

où  $A_i(P)$  est l'amplitude de l'onde plane émise par l'élément  $i$  et mesurée en  $P$  et  $A_j(P)$  est l'amplitude de l'onde plane émise par l'élément  $j$  et mesurée en  $P$ . Cette relation est rendue possible par le principe de réciprocité qui stipule que l'amplitude émise au point  $P$  et mesurée en  $j$  est la même que celle émise en  $j$  et mesurée en  $P$ .

L'expression (3.6) est alors le poids associé à chaque trajet dans le calcul de l'estimateur SEE décrit dans le paragraphe suivant.

### 3.3.3 Algorithme de calcul de l'estimateur SEE

L'algorithme de l'estimateur SEE est calculé comme l'algorithme de calcul du compteur de réflexions en associant en plus à chaque trajet spéculaire un poids qui est l'amplitude du vecteur déplacement de l'onde.

L'amplitude de l'estimateur SEE  $A^m(P, \mathbf{n})$  est donnée par la relation suivante :

$$A^m(P, \mathbf{n}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \begin{cases} A_i(P) \times r_{sv}^P(\mathbf{n}) \times A_j(P) & \text{si } |\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_{ij}| = 1, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.7)$$

Ce modèle de calcul est une approximation d'une simulation FMC suivie d'une reconstruction TFM en supposant que tous les points appartiennent à un réflecteur.

Par conséquent, pour un défaut plan à une position donnée, l'amplitude de l'estimateur SEE est proportionnelle à l'amplitude TFM. Cette proportionnalité se vérifie également entre les différents modes de reconstruction. L'estimateur SEE possède alors toutes les propriétés nécessaires à l'outil de prédiction définies au paragraphe 3.1 et peut donc être exploité comme un outil de prédiction des modes de reconstruction pertinents.

### 3.3.4 Calcul numérique

Dans le cadre de nos travaux, l'amplitude de l'onde est calculée via le module de calcul de champ du logiciel CIVA qui résout les équations de l'élastodynamique via la méthode des pinces [44] dans des configurations simples et complexes.

En outre, le calcul CIVA prend en compte la divergence du faisceau ultrasonore ce qui permet une meilleure approximation.

#### *Remarque*

Pour la prédiction, on néglige le caractère 3D des éléments, l'une des dimensions étant très grande devant les deux autres. Les calculs réalisés ont montré que la différence de variation de l'amplitude de l'estimateur quel que soit l'axe considéré dans le plan des images est négligeable pour un calcul tridimensionnel et un calcul bidimensionnel. Pour souci d'efficacité, tous les calculs de champ se font donc en 2D.

### 3.3.5 Cartographie spatiale SEE

La cartographie spatiale SEE a été calculée pour la même configuration que précédemment (cf. Fig 2.19). Dans la ROI définie, nous avons calculé l'estimateur SEE pour un défaut orienté verticalement en mode TLT (cf Fig 3.5).

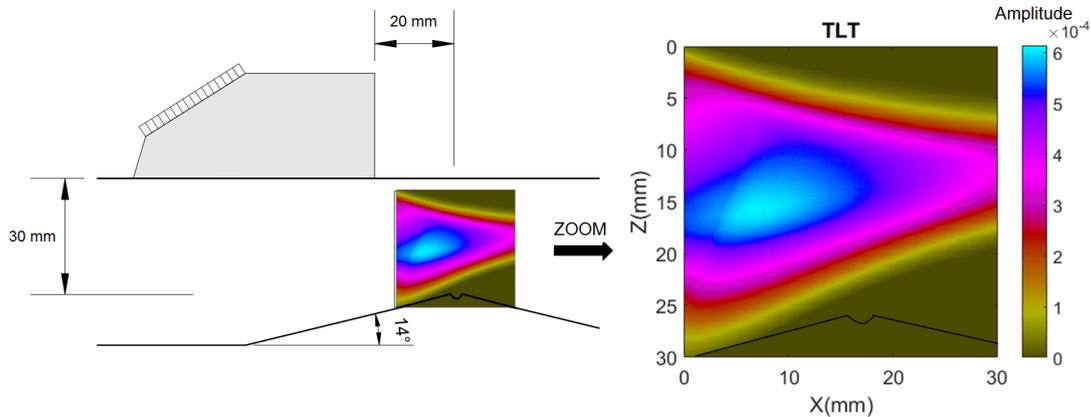


Fig 3.5 – Cartographie spatiale SEE en mode TLT pour un défaut vertical

L'interprétation de cette cartographie est la suivante :

- si un défaut vertical est présent dans la partie inférieure ou dans la partie supérieure de la pièce où l'amplitude SEE est nulle, il ne sera pas reconstruit,
- s'il est dans la partie médiane, autour de  $Z = 15\text{mm}$ , il sera reconstruit avec une amplitude maximale.

Cette information est celle qui manquait avec le compteur de réflexion. Ainsi, en plaçant la cartographie SEE et celle du compteur de réflexion côte à côte, on note qu'elles présentent des allures très différentes (cf. Fig 3.6).

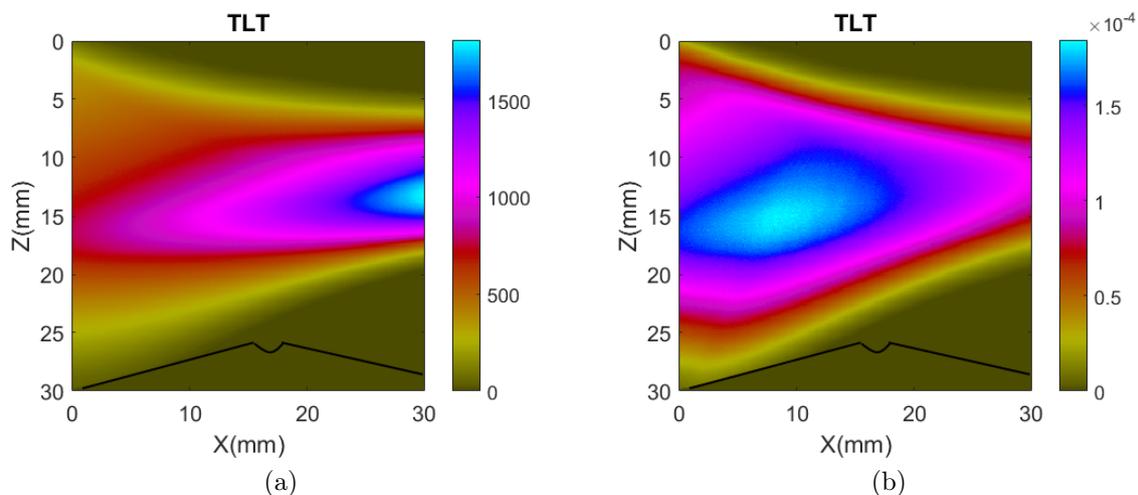


Fig 3.6 – (a) Cartographie compteur de réflexions en mode TLT pour un défaut vertical, (b) Cartographie spatiale SEE en mode TLT pour un défaut vertical

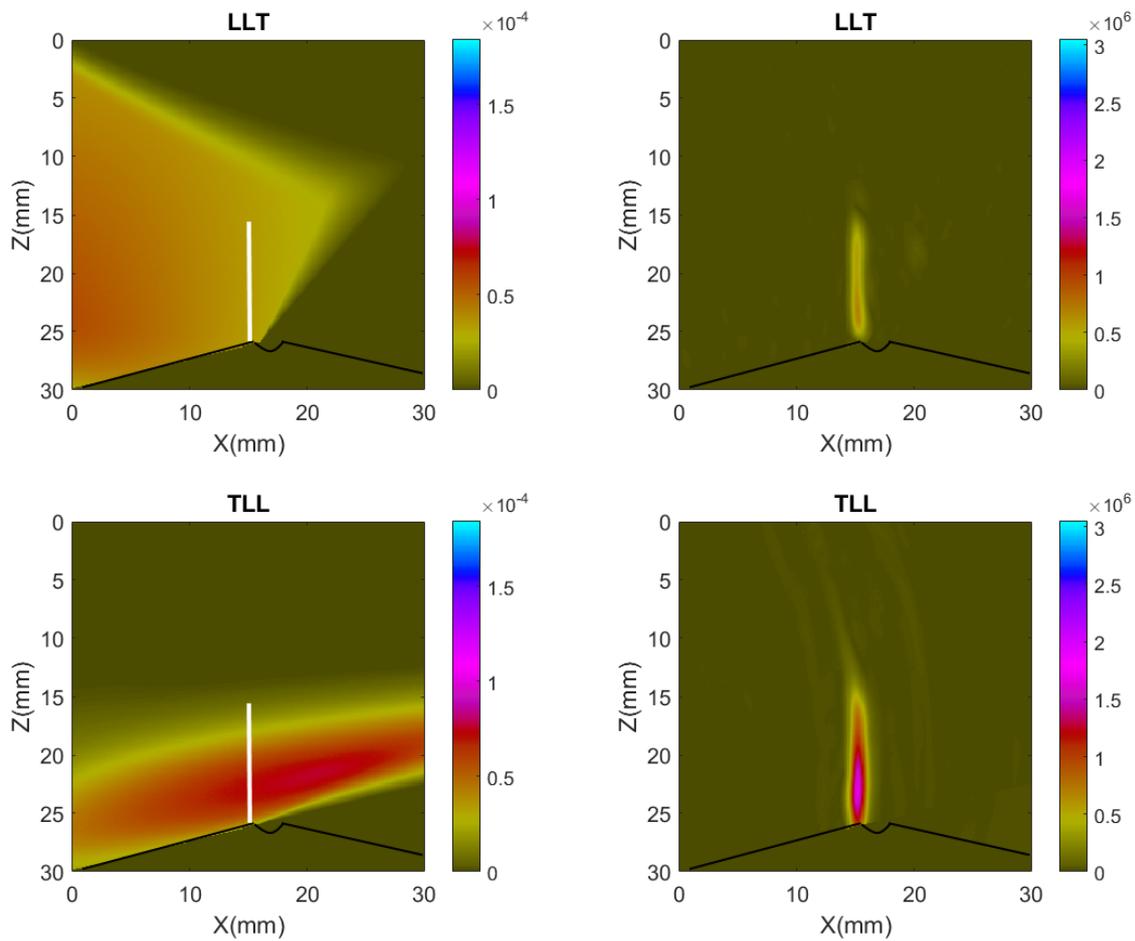
Un défaut situé dans la zone qui présente le maximum de trajets spéculaires ne sera pas reconstruit avec une amplitude TFM maximale. Alors qu'un défaut placé dans la zone

qui présente une amplitude SEE maximale sera reconstruit avec une amplitude TFM maximale.

Nous allons maintenant valider pour le cas expérimental considéré précédemment, la cohérence entre la cartographie SEE et l'image TFM.

### 3.3.6 Analyse de la cohérence entre les cartographies spatiales SEE et les images TFM

Les images TFM et les cartographies SEE ont été calculées suivant les différents modes écho de coin. Seuls les trois modes de reconstruction LLT, TLL et TLT sont illustrés, tous les autres modes ayant des cartographies nulles comme au paragraphe 3.2.3.



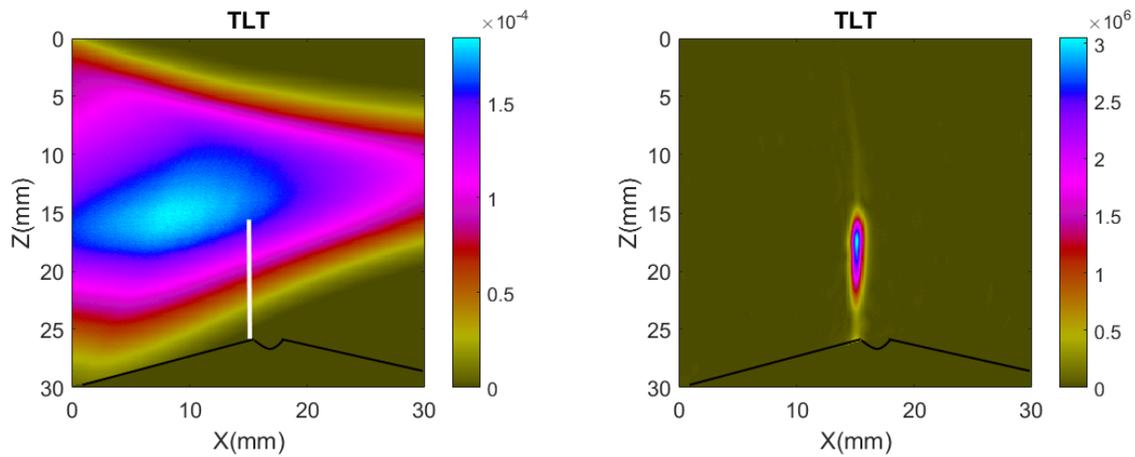


Fig 3.7 – A gauche, la cartographie SEE pour chaque mode, à droite l'image TFM associée

– La cartographie SEE du mode LLT présente une amplitude SEE quasi-constante tout le long du défaut. L'image TFM associée montre une reconstruction du profil du défaut avec une amplitude quasi-constante.

– La cartographie du mode TLL présente une amplitude SEE également quasi-constante sur le défaut avec une légère perte d'amplitude au sommet et à la racine. L'analyse de l'image TFM montre que le défaut est reconstruit sur toute sa hauteur avec une légère perte d'amplitude au sommet et à la racine.

– La cartographie du mode TLT présente une amplitude SEE nulle dans la partie inférieure du défaut et non nulle dans la partie supérieure, avec une amplitude qui décroît avec la profondeur. L'image TFM associée ne reconstruit que la partie supérieure du défaut avec une amplitude maximale au sommet qui décroît avec la profondeur.

Il existe donc bien une cohérence en terme de couverture de zone entre l'estimateur SEE et l'imagerie TFM mais aussi en terme de variation d'amplitude au sein de chaque mode.

Par ailleurs, on note qualitativement qu'entre des modes différents, il existe une cohérence en terme d'amplitude : le mode TLT qui prédit l'amplitude SEE la plus forte présente une amplitude TFM maximale. De même le mode LLT ayant l'amplitude SEE minimale présente l'amplitude TFM minimale, une cohérence qui n'existe pas pour le compteur de réflexions comme on peut le voir sur la Fig 3.9 qui montre la cartographie de compteur de réflexions, la cartographie SEE et l'image TFM des modes LLT, TLL et TLT.

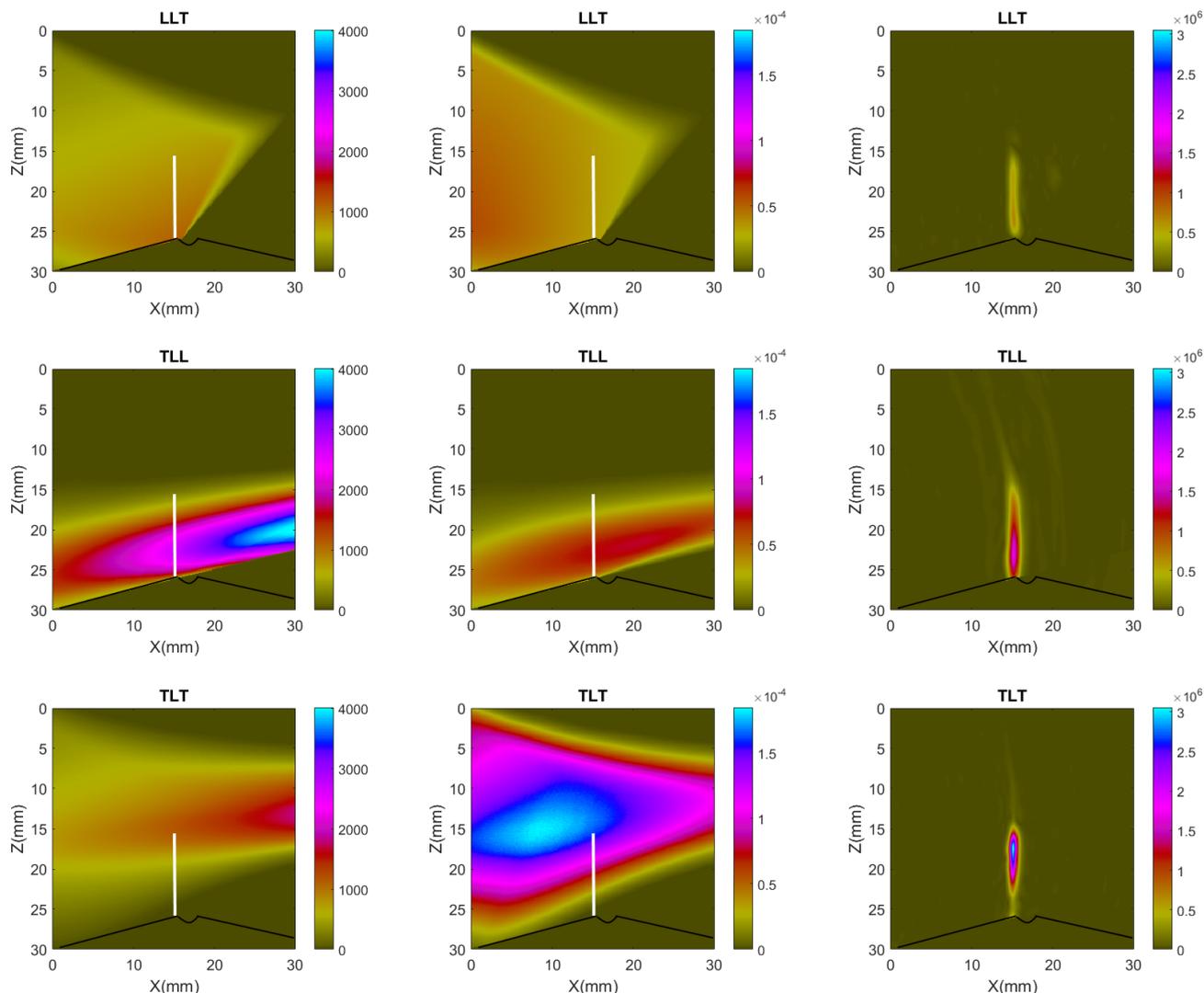


Fig 3.9 – A gauche la cartographie du compteur de réflexion, au milieu la cartographie SEE pour chaque mode, à droite l'image TFM associée

Après une comparaison qualitative des images, il reste cependant à valider quantitativement le modèle de calcul de l'estimateur SEE.

### 3.3.7 Comparaison quantitative de l'amplitude TFM vs SEE

L'algorithme de calcul de l'estimateur SEE prédit qu'il existe une relation de proportionnalité entre l'amplitude SEE et l'amplitude TFM sur un défaut. Pour vérifier ce postulat, nous avons dans un premier temps comparé les amplitudes SEE et TFM au sein d'un même mode de reconstruction puis entre des modes de reconstruction différents.

La validation s'est faite sur des données simulées où tous les paramètres sont maîtrisés. Par ailleurs, le modèle est basé sur des défauts infinis c'est-à-dire sans prise en compte de la diffraction qui peut interférer de manière constructive ou destructive avec l'écho spéculaire amplifiant ou réduisant ainsi l'amplitude TFM du défaut.

La simulation FMC est réalisée à partir de la même configuration que précédemment avec un défaut dont la hauteur est égale à l'épaisseur de la pièce, cela afin de s'affranchir des phénomènes de diffraction dans la région d'intérêt définie.

Pour chaque mode nous avons ensuite tracé la variation de l'amplitude TFM et de l'amplitude SEE à la position du défaut. L'amplitude TFM et l'amplitude SEE ont ensuite été normalisées de la manière suivante :

$$f_{norm}^m(z) = \frac{f^m(z)}{f^m(z_{max})} \quad (3.8)$$

et

$$g_{norm}^m(z) = \frac{g^m(z)}{g^m(z_{max})} \quad (3.9)$$

où  $f^m(z)$  et  $g^m(z)$  sont respectivement la colonne de l'image TFM et celle de la cartographie SEE à la position du défaut reconstruit suivant le mode  $m$ .  $z_{max}$  est le pixel ayant la plus forte amplitude TFM sur cette colonne. Avec cette normalisation, les deux courbes seront confondues s'il existe une relation de proportionnalité.

### 3.3.7.1 Au sein d'un même mode

Nous avons calculé les images TFM, et avons tracé les courbes  $f_{norm}^m(z)$  pour le défaut "infini". Celles-ci sont comparées avec les courbes  $g_{norm}^m(z)$  des cartographies SEE.

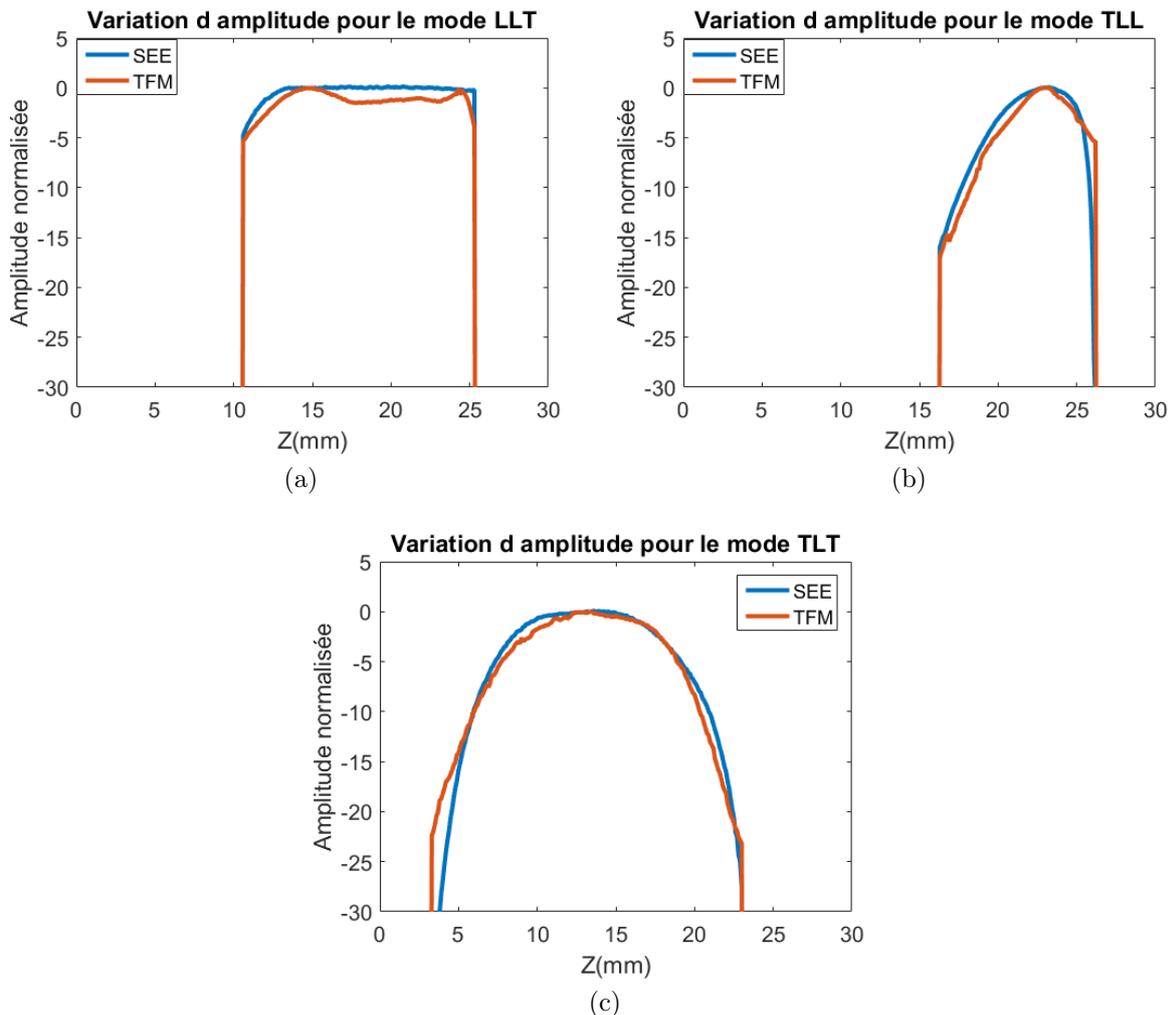


Fig 3.10 – Variation de l'amplitude SEE et celle de l'amplitude TFM le long d'un défaut vertical pour (a) le mode LLT, (b) le mode TLL et (c) le mode TLT

Sur la Fig 3.10, on note que les courbes de variation liées à l'image TFM et celles liées à l'estimateur SEE ne présentent pas d'écart significatif (écart maximal observé de 2dB).

Par conséquent, il existe bien une relation de proportionnalité entre l'amplitude TFM d'un défaut et l'amplitude SEE au sein d'un même mode de reconstruction.

### 3.3.7.2 Entre des modes différents

Nous avons ensuite vérifié l'existence d'une relation de proportionnalité entre l'amplitude TFM et l'amplitude SEE pour des modes différents. Si elle existe, le coefficient de proportionnalité  $\alpha^m$  donné par la relation (3.10) est identique pour les différents modes et en tout point appartenant au défaut.

$$\alpha^m(z) = \frac{f^m(z)}{g^m(z)} \quad (3.10)$$

avec  $g^m(z) > 0$ .

Ce rapport a été calculé pour les images TFM simulées. La Fig 3.11 montre la variation de  $\alpha^m$  pour les trois modes LLT, TLL et TLT.

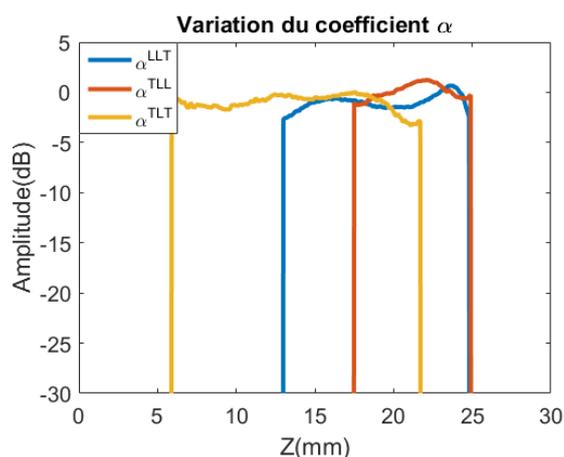


Fig 3.11 – Variation du rapport TFM/SEE le long du défaut pour les modes LLT, TLL et TLT

Pour les différentes courbes, les coefficients de proportionnalité sont très proches avec un écart maximal inférieur à 3dB, ce qui confirme l'existence d'une relation de proportionnalité.

Par ailleurs, une amplitude SEE non nulle n'est pas toujours synonyme de reconstruction d'un défaut. En effet, une image TFM expérimentale présente du bruit. Pour détecter une indication spéculaire, l'amplitude TFM de celle-ci doit être supérieure au niveau de bruit. Il existe donc une amplitude SEE minimale de détection dépendant du matériau considéré.

### 3.3.8 Amplitude minimale de détection

L'amplitude minimale de détection est l'amplitude SEE minimale nécessaire pour qu'un défaut reconstruit suivant un mode de reconstruction donné ait une amplitude

TFM supérieure au niveau de bruit. Pour estimer cette amplitude, on exploite la relation de proportionnalité entre l'amplitude SEE et celle TFM à partir d'un réflecteur de référence situé dans une pièce constituée du même matériau que la pièce d'intérêt. L'image TFM et la cartographie SEE du réflecteur sont ensuite calculées. L'amplitude minimale de détection  $A_{min}$  est calculée à partir de la relation (3.11) :

$$A_{min} = A(P_r) \frac{I(P_{bruit})}{I(P_r)} \quad (3.11)$$

où  $P_r$  est un pixel appartenant à l'indication TFM du réflecteur,  $A(P_r)$  est l'amplitude de la cartographie SEE au point  $P_r$ ,  $I(P_r)$  est l'amplitude TFM mesurée en  $P_r$  et  $I(P_{bruit})$  est l'amplitude TFM mesurée pour un point hors du réflecteur.

On définit alors la notion de zone effective d'un mode comme étant la zone pour laquelle l'amplitude SEE de tous les pixels est toujours supérieure à l'amplitude minimale de détection. L'outil de prédiction permet donc de prédire la région où le défaut peut être reconstruit ainsi que le rapport signal à bruit associée dès lors que l'orientation du défaut est supposée connue. Pour s'affranchir de cette orientation, nous avons étendu la prédiction en introduisant une incertitude sur cette orientation. La prédiction est alors représentée sur une cartographie appelée la cartographie angulaire SEE dont nous expliciterons le principe dans le paragraphe suivant.

### 3.3.9 Cartographie angulaire SEE

Lorsqu'il existe une incertitude sur l'orientation du défaut, la prédiction va consister à déterminer la cartographie spatiale SEE de chaque mode de reconstruction et ce pour chaque orientation de la plage d'incertitude. Le nombre de cartographies spatiales peut alors devenir important. Pour condenser cette information, nous avons défini une représentation compacte de l'information appelée la cartographie angulaire SEE.

La cartographie angulaire SEE consiste à calculer les cartographies spatiales SEE pour toutes les orientations de la plage angulaire et pour tous les modes, puis à estimer pour chacune la proportion de pixels couverts c'est dire dont l'amplitude SEE est supérieure à l'amplitude minimale de détection. On calcule également le nombre total de pixels pouvant être couverts par l'ensemble des modes considérés.

Pour une plage angulaire de  $k$  orientations possibles et pour  $M$  modes de reconstruction considérés, il existe  $k \times M$  cartographies spatiales SEE, la cartographie angulaire SEE est donc une matrice de taille de  $k \times (M + 1)$ .

A titre d'illustration, nous avons calculé une cartographie angulaire SEE sur une plage de  $-15^\circ$  à  $0^\circ$ , choisie arbitrairement pour la même configuration que précédemment. Pour chaque inclinaison de la plage d'incertitude, nous avons estimé la proportion de pixels couverts par chaque mode, telle que pour un défaut vertical ( $0^\circ$ ) par exemple, il existe 55% de pixels couverts en mode LLT, 40% en mode TLL, 75% en mode TLT et 0% en

mode TTT (cf Fig 3.12).

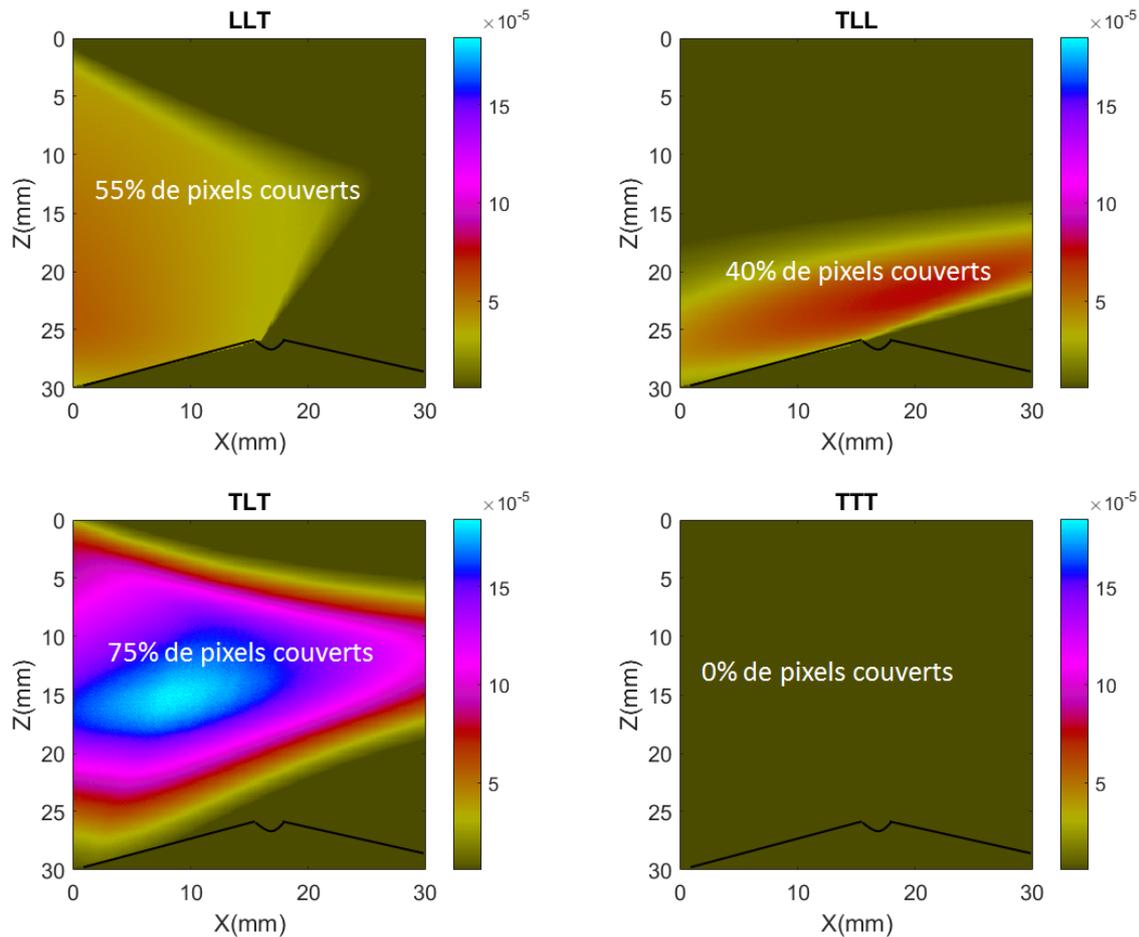


Fig 3.12 – Proportion de pixels couverts par modes pour un défaut vertical

A partir de l'information issue des différentes inclinaisons, pour pas angulaire de  $1^\circ$ , nous avons généré la cartographie angulaire SEE (cf. Fig 3.13).

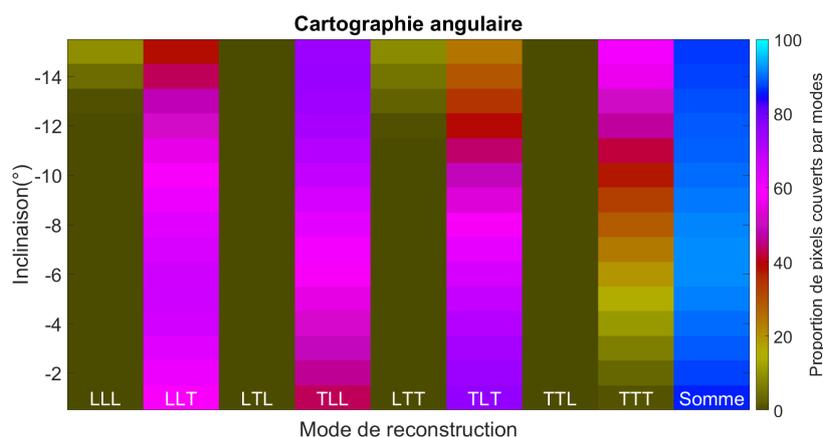


Fig 3.13 – Cartographie angulaire pour une plage angulaire de  $-15^\circ$  à  $0^\circ$

Pour cet exemple, nous pouvons conclure qu'un défaut dont l'orientation est comprise entre  $-15^\circ$  et  $0^\circ$  :

- ne sera jamais reconstruit par les modes LTL et TTL, et a peu de chance d'être reconstruit par les modes LLL et LTT qui ne couvrent qu'une faible zone de la ROI.

– sera reconstruit par au moins un mode de reconstruction parmi les modes LLT, TLL, TLT et TTT.

### 3.3.10 Discussions sur l'estimateur SEE

L'estimateur SEE fournit donc une cartographie de couverture de zone dont la sensibilité est proportionnelle à l'amplitude TFM. Cette caractéristique permet de l'utiliser comme un outil de prédiction des modes pertinents et ce, quelles que soient la position et la hauteur du défaut mais aussi lorsqu'il existe une incertitude sur l'orientation du défaut.

Par ailleurs, il n'est pas toujours nécessaire de reconstruire le défaut avec tous les modes potentiellement pertinents. On peut en sélectionner quelques uns suivant différents critères que nous définirons dans le paragraphe suivant.

## 3.4 Sélection des modes de reconstruction pertinents

L'estimateur SEE permet de prédire un ou plusieurs modes potentiellement pertinents. Cependant, il n'est pas toujours nécessaire d'exploiter tous les modes aptes à reconstruire le défaut. On propose donc d'en sélectionner un nombre suffisant pour obtenir une image pertinente du défaut. Nous avons défini trois méthodes de sélection basées sur l'estimateur d'échos spéculaires :

- une méthode basée sur la maximisation de l'amplitude SEE,
- une méthode basée sur la maximisation du nombre de modes de reconstruction
- et une méthode basée sur la minimisation du nombre de modes de reconstruction.

### 3.4.1 Maximisation de l'amplitude SEE

Le critère de maximisation de l'amplitude SEE consiste à choisir en chaque pixel le mode ayant l'amplitude SEE la plus élevée. Cette sélection permet de reconstruire le défaut avec le maximum d'amplitude TFM.

Si on associe à chaque mode un indice numérique variant de 1 à  $M$ , où  $M$  est le nombre de modes total pris en compte, on choisit en chaque pixel le mode  $k$  tel que :

$$k = \operatorname{argmax}(A^m(P, \mathbf{n}))_{m=1,2,\dots,M} \quad (3.12)$$

où  $A^m(P, \mathbf{n})$  est l'amplitude de l'estimateur SEE au point  $P$  pour un défaut de normale  $\mathbf{n}$ .

Cette sélection découpe la ROI en différentes sous-régions dont chacune est associée à un mode.

A partir de la configuration expérimentale étudiée et dans le cas d'un défaut vertical, la sélection des modes permet d'obtenir la cartographie ci-dessous (cf. Fig 3.14).

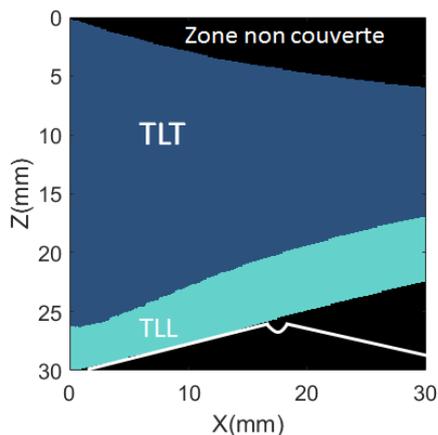


Fig 3.14 – Cartographie de la répartition des modes les plus énergétiques pour un défaut vertical

A partir de cette cartographie, on peut conclure qu'un défaut vertical situé :

- dans la région bleue, sera reconstruit par le mode TLT avec une amplitude TFM maximale,
- dans la région verte, sera reconstruit par le mode TLL avec une amplitude TFM maximale.
- dans la région noire, ne sera jamais reconstruit suivant un mode écho de coin.

Parmi les modes écho de coin, les deux modes TLL et TLT suffisent donc pour reconstruire un défaut plan vertical quelles que soient sa position et sa hauteur dans la zone effective. Notons qu'il subsiste une zone non couverte.

### 3.4.2 Maximisation du nombre de modes

Cette sélection consiste à exclure tous les modes ayant une zone effective nulle. Elle permet d'exploiter toute l'information spéculaire disponible sur les images TFM.

Pour la configuration d'intérêt, la sélection sur maximisation du nombre de modes conduit aux trois modes LLT, TLL et TLT pour la reconstruction d'un défaut vertical (cf. Fi 3.15).

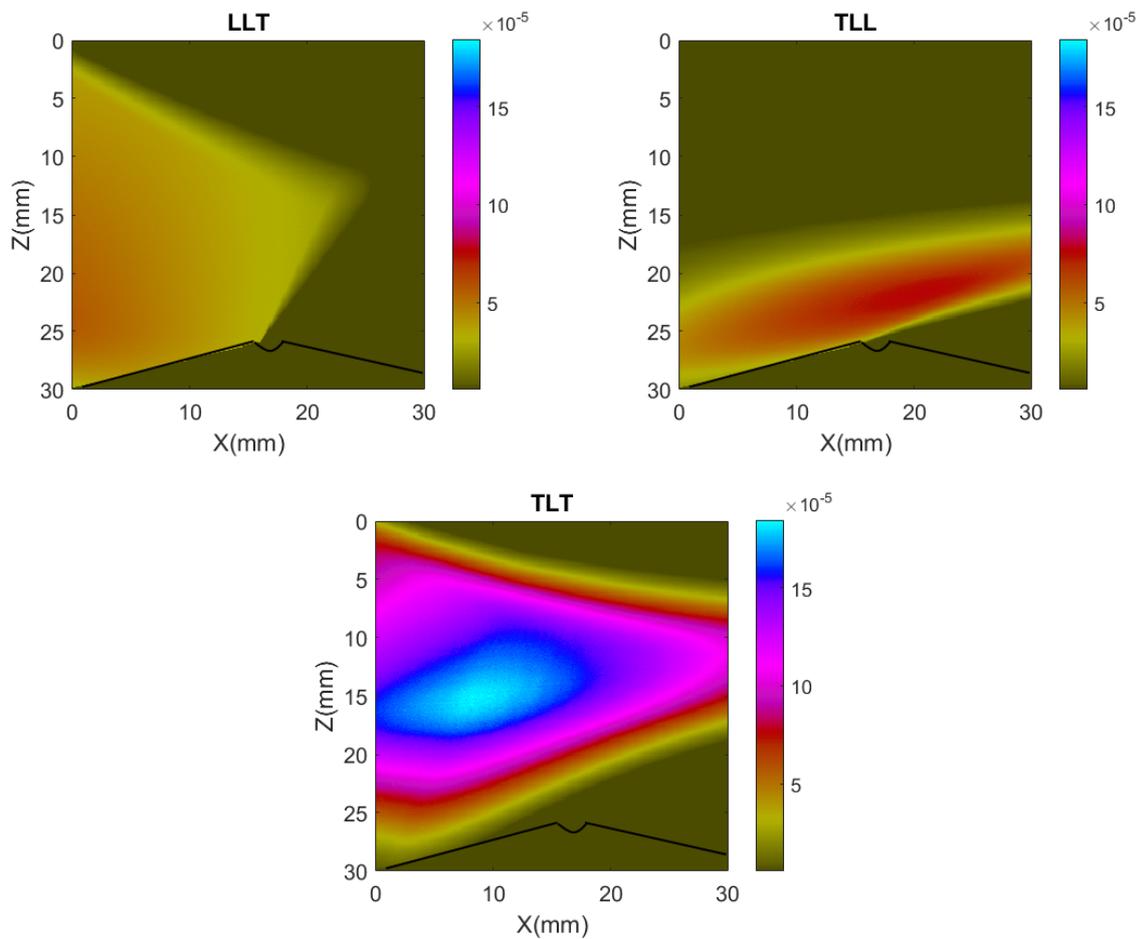


Fig 3.15 – Les trois modes prédits par la sélection des modes basée sur la maximisation du nombre de modes

A l'inverse de la sélection sur la maximisation du nombre de modes, nous avons défini une méthode de sélection qui minimise le nombre de modes de reconstruction nécessaires.

### 3.4.3 Minimisation du nombre de modes

La sélection des modes basée sur la minimisation du nombre de modes consiste à chercher la combinaison de modes permettant une couverture maximale de la zone d'intérêt tout en minimisant le nombre de modes.

Soient  $b^l$  le nombre de pixels de la zone de reconstruction couverts par la somme de  $l$  modes de reconstruction et  $B$  le nombre total de pixels de la zone de reconstruction. On cherche la combinaison de modes de telle sorte à :

$$\begin{aligned} & \text{minimiser } l \\ & \text{minimiser } (B - b^l) \end{aligned} \tag{3.13}$$

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle peut conduire à la sélection des modes les moins énergétiques en terme d'amplitude SEE, ce qui conduira à des images de faible rapport signal à bruit.

Avec l'exemple choisi, la minimisation du nombre de modes fournit les deux modes TLL et TLT.

### 3.4.4 Application à la cartographie angulaire SEE

La sélection des modes peut également être appliquée dans le cas où il existe une incertitude sur l'orientation du défaut. La sélection est alors faite sur les différentes cartographies spatiales SEE, et la cartographie angulaire est reconstruite en associant à chaque mode et à chaque inclinaison la proportion de pixels couverts après sélection.

La Fig 3.16 montre la cartographie angulaire après sélection basée sur maximisation de l'amplitude SEE réalisée pour la plage angulaire  $-15 - 0^\circ$ .

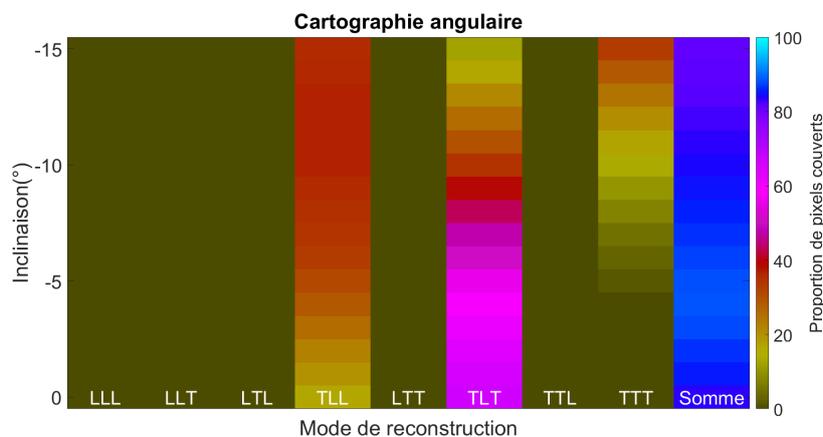


Fig 3.16 – Sélection des modes sur critère de maximisation de l'amplitude SEE pour une plage angulaire de  $-15$  à  $0^\circ$

La sélection montre que les trois modes TLL, TLT et TTT sont suffisants pour reconstruire un défaut plan quelle que soit son orientation dans une plage angulaire de  $-15^\circ$  à  $0^\circ$ . Cette sélection est en accord avec le tableau 2.3 où un défaut vertical était reconstruit par les modes TLL et TLT et un défaut de  $-14^\circ$  par le mode TTT.

### 3.4.5 Discussions sur les critères de sélection

Trois critères de sélection ont été proposés à partir de l'estimateur SEE. Ils permettent tous de retrouver l'indication spéculaire avec une sensibilité plus ou moins importante.

La sélection des modes à partir de l'estimateur SEE peut également être vu comme un outil de filtrage des artefacts, car elle exclut un grand nombre de modes de reconstruction.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé un outil de prédiction des modes de reconstruction, l'estimateur d'échos spéculaires. Cet outil fournit une cartographie qui permet de prédire la reconstruction d'un défaut en terme de couverture de zone mais aussi en terme de sensibilité.

Nous avons également définie la notion de zone effective avec l'introduction de la notion d'amplitude minimale de détection qui permet de connaître la zone où un défaut peut être reconstruit avec une amplitude supérieure au niveau de bruit. Lorsque la zone effective de différents modes se chevauchent, l'information devient redondante, nous avons donc défini trois critères de sélection des modes dont la pertinence dépendra du type de fusion d'images réalisé à posteriori comme nous le verrons au chapitre 4.

# Chapitre 4

## Fusion des images et filtrage des artefacts

### Contents

---

<b>4.1</b>	<b>Fusion d'images TFM</b>	<b>72</b>
4.1.1	Configurations d'inspection considérées	73
4.1.2	Fusion des indications spéculaires	74
4.1.3	Fusion des indications de diffraction	87
4.1.4	Fusion des indications de diffraction et spéculaires	89
4.1.5	Conclusions sur les méthodes de fusion	90
<b>4.2</b>	<b>Filtrage des artefacts</b>	<b>91</b>
4.2.1	La méthode MTE	91
4.2.2	Développement d'une procédure de filtrage des artefacts	94
<b>4.3</b>	<b>Conclusion</b>	<b>101</b>

---

## Introduction

La fusion de données [45] est un concept basé sur l'utilisation synergique de l'information générée à partir de sources multiples. Dans le cas de la fusion d'images, il s'agit d'un processus de combinaison des informations d'un ensemble d'images en une seule qui contient l'information complète, ce qui la rend plus facile d'interprétation que toutes les images d'entrée prises séparément.

En contrôle non destructif, la fusion d'images [46–49] consiste généralement à combiner des images issues de différentes techniques d'inspection permettant ainsi de révéler des informations complémentaires ou redondantes sur la santé d'un matériau. Cette combinaison génère une image qui peut révéler des détails qui auraient pu être cachés en analysant chaque image séparément, améliorant ainsi la détection et la caractérisation des défauts.

La fusion des images peut également se faire pour des images acquises suivant une même technique d'inspection mais en des temps différents pour observer des changements apparus au cours du temps. Elle peut aussi se faire pour améliorer la résolution spatiale d'images de basse résolution, la fusion par transformée en ondelettes [50] est généralement utilisée pour ce type de fusion. Enfin, la fusion d'images peut être une combinaison de plusieurs images bidimensionnelles pour générer une dimension supplémentaire (c'est-à-dire 3-D).

Dans le cas de l'imagerie TFM, nous cherchons à condenser l'information pertinente liée au défaut issue des différents modes de reconstruction considérés afin d'obtenir une image plus facile d'analyse. Par ailleurs, étant donné que les artefacts présents sur chaque image TFM prise séparément peuvent se retrouver dans l'image issue de la fusion, celle-ci devra si nécessaire s'accompagner d'une méthode de filtrage d'artefacts.

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps proposer des méthodes de fusion d'images et dans un second temps nous développerons des méthodes de filtrage des artefacts. Les différentes méthodes que nous présenterons seront appliquées sur des données expérimentales et sur des données simulées.

### 4.1 Fusion d'images TFM

La fusion des images TFM que nous allons réaliser consiste à rechercher la meilleure combinaison permettant d'obtenir une image finale avec toutes les informations pertinentes relatives au défaut.

Pour ce faire, nous nous sommes intéressés aux méthodes de fusion d'images pixel à pixel. Ces méthodes, comme leur nom l'indique, consistent à appliquer des opérations simples de type maximum, sommation, moyenne pondérée, soustraction ou encore produit en chaque pixel des images.

La fusion par maximum d'amplitude consiste à sélectionner en chaque pixel le mode de reconstruction ayant l'amplitude TFM la plus forte, la fusion par sommation consiste en une somme des amplitudes TFM issues des différents modes de reconstruction et la moyenne pondérée associe un poids différent à chaque mode de reconstruction avant la

sommation. Ces différentes méthodes exploitent la complémentarité des modes de reconstruction, c'est-à-dire qu'elles ne présentent pas de risque de perte d'information.

Les opérations telles que la soustraction et le produit quant à elles exploitent les similitudes entre les images. La soustraction peut être utilisée par exemple afin d'observer les changements qui se sont opérés entre deux acquisitions. Elle nécessite alors une image de référence, c'est à dire l'image du milieu sain. Elle peut alors permettre de filtrer tous les échos de géométrie de la pièce et ne conserver que les échos liés à un potentiel défaut moyennant un recalage des signaux. Le produit consiste quant à lui à multiplier en chaque pixel les amplitudes TFM des différents modes de reconstruction. Il permet ainsi de conserver les indications communes et de supprimer les différences.

Cependant dans le cas où seul un mode présente une indication pertinente, celle-ci sera filtrée par le produit.

On peut aussi appliquer une méthode de superposition d'images qui consiste à associer une couleur différente aux indications présentes sur chaque image avant de les superposer. Cette méthode est pertinente lorsqu'une des images présente une sensibilité moindre comparée aux autres, elle permet alors d'éviter de masquer une partie de l'information.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à la fusion par maximum d'amplitude et la fusion par sommation pour exploiter la complémentarité des images et nous avons développé une méthode dite de fusion par corrélation pour exploiter les similitudes. Pour chaque méthode, nous allons décrire l'algorithme de calcul avant d'expliquer les avantages et les limites.

Par la suite, ces méthodes pourront être appliquées sur les images brutes issues de l'algorithme d'imagerie TFM ou sur des images normalisées. En effet, les images issues des différents modes de reconstruction peuvent présenter des écarts d'amplitude significatifs, comme nous l'avons déjà observé dans le chapitre précédent et l'indication de plus faible amplitude peut alors être masquée après l'opération de fusion.

Pour éviter toute perte d'information, chaque image peut être normalisée par le maximum d'amplitude de l'image avant la fusion, ce qui permet d'avoir des amplitudes du même ordre de grandeur. Toutefois, dans le cas où les modes fusionnés présentent des artefacts, la normalisation des images peut avoir pour effet de les amplifier sur l'image finale. Nous verrons donc que le choix de la normalisation dépendra de la méthode de fusion. Et dans le même objectif, nous distinguerons trois types de fusion : une fusion des indications spéculaires, une fusion des indications de diffraction et une fusion pour réunir les deux. Pour chaque type d'indication, nous proposerons différentes méthodes de fusion. Celles-ci seront illustrées pour les deux configurations décrites dans la section suivante.

### 4.1.1 Configurations d'inspection considérées

Dans ce chapitre deux configurations sont considérées, une configuration expérimentale et une configuration simulée.

La Fig 4.1 montre la configuration expérimentale et la Fig 4.2 montre la configuration simulée. Ces deux configurations ont été choisies car elles font intervenir des modes pertinents différents et elles permettront de mettre en évidence les limites des méthodes de

fusion.

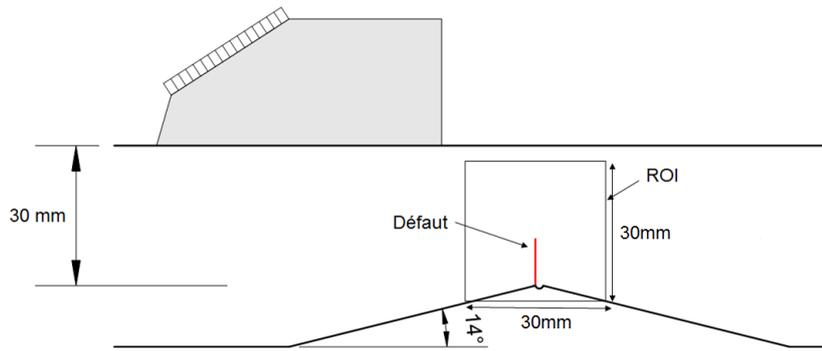


Fig 4.1 – Configuration d’inspection expérimentale

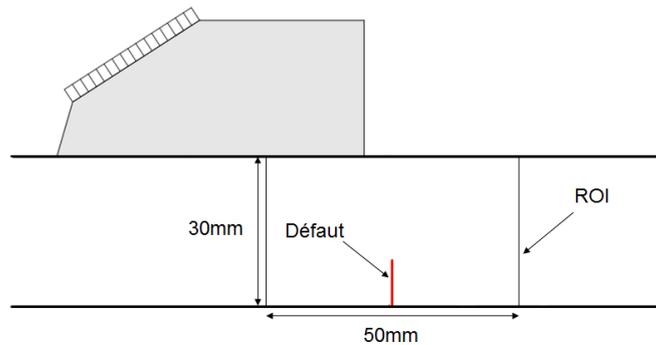


Fig 4.2 – Configuration d’inspection simulée

## 4.1.2 Fusion des indications spéculaires

Dans le cas de la fusion des indications spéculaires, nous allons fusionner les images des modes de reconstruction prédits grâce à l’estimateur d’échos spéculaires introduit au précédent chapitre et nous allons distinguer deux cas de figure : le cas où l’orientation du défaut est supposée connue et le cas où il existe une incertitude sur celle-ci.

### 4.1.2.1 Inclinaison du défaut supposée connue

Lorsque l’orientation du défaut est supposée connue, les images TFM peuvent être calculées sur toute la ROI ou sur la zone effective de chaque mode.

Pour rappel, la zone effective, définie au chapitre 3, est une zone de la ROI où en chaque pixel l’amplitude de l’estimateur SEE est toujours supérieure à l’amplitude minimale de détection. La limitation de la reconstruction TFM à la zone effective consiste alors à annuler l’amplitude TFM en dehors de la zone effective selon l’expression suivante :

$$I^m(P) = \begin{cases} I^m(P) & \text{si } A^m(P, \mathbf{n}) > A_{min}, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.1)$$

où  $I^m(P)$  est l'amplitude TFM,  $A^m(P, \mathbf{n})$  est l'amplitude de l'estimateur SEE pour le mode  $m$  au point  $P$  appartenant à un défaut de normale  $\mathbf{n}$  et  $A_{min}$  est l'amplitude SEE minimale de détection.

Ce traitement permet de supprimer tous les artefacts potentiels qui seraient situés hors de la zone effective, tout en conservant l'information spéculaire pertinente.

La Fig 4.3 montre la restriction des images TFM à la zone effective pour les trois modes LLT, TLL et TLT de la configuration expérimentale (cf. Fig 4.1).

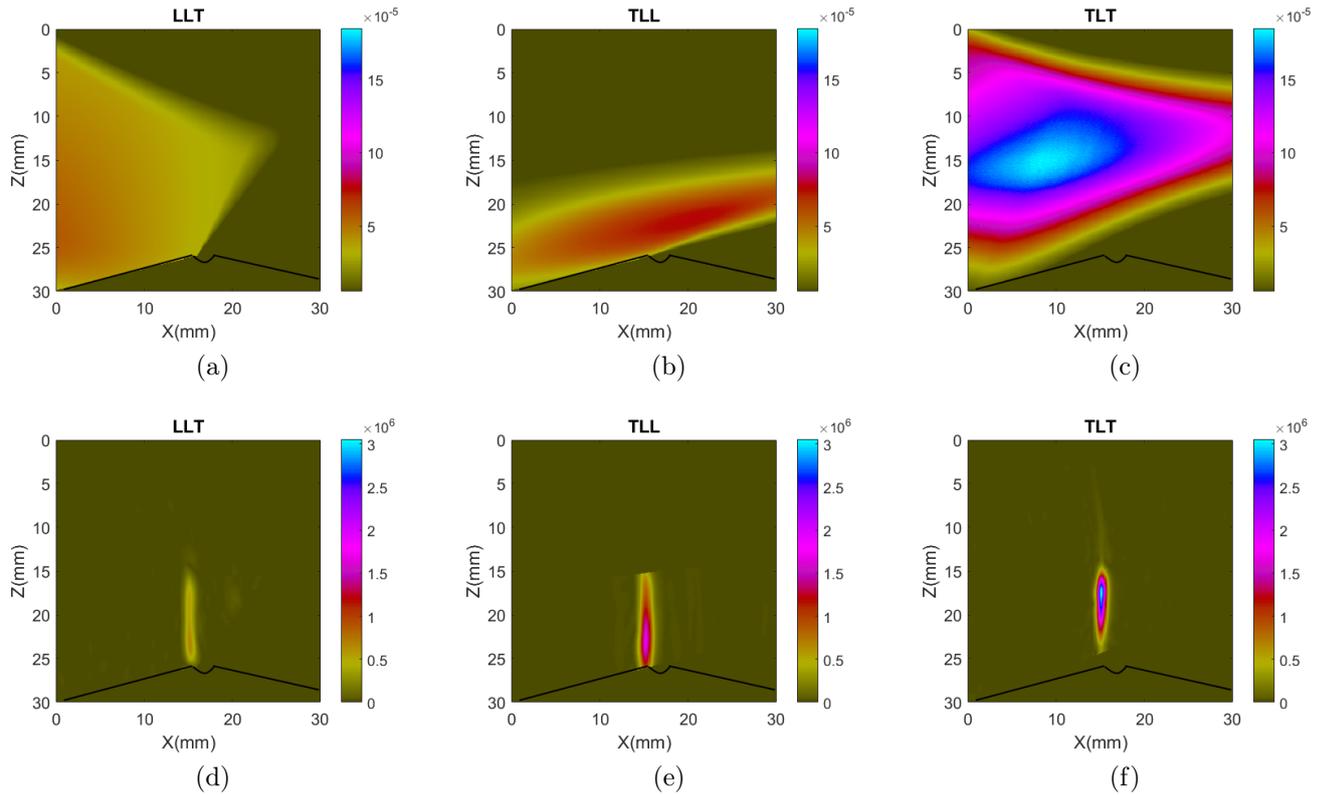


Fig 4.3 – Cartographie SEE du mode (a) LLT, (b) TLL et (c) TLT. Image TFM réduite à la zone effective reconstruite suivant le mode (d) LLT (e) TLL et (f) TLT

Comme prévu, l'information spéculaire liée au défaut est conservée pour tous les modes de reconstruction.

La Fig 4.4 montre la restriction des images TFM à la zone effective pour les trois modes LLT, TLT et TTT de la configuration simulée (cf. Fig 4.2).

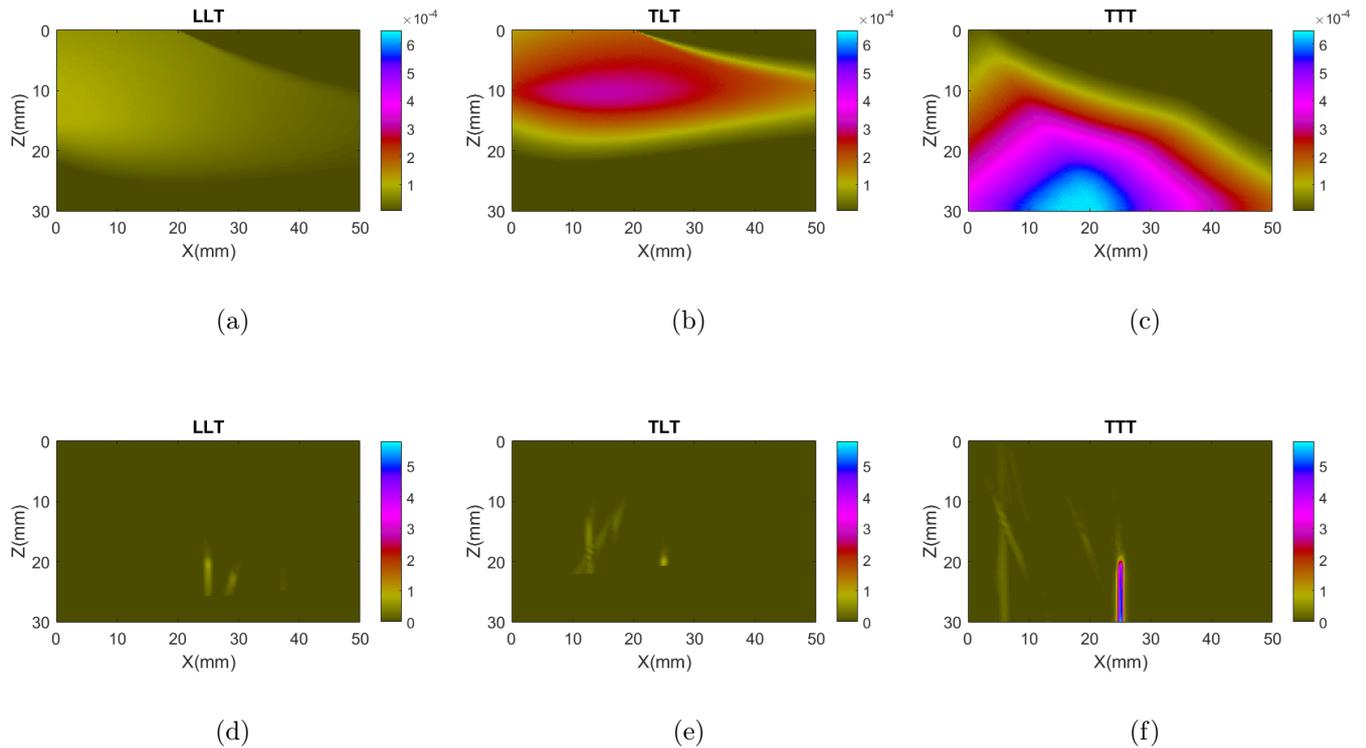


Fig 4.4 – Cartographie SEE du mode (a) LLT, (b) TLT et (c) TTT. Image TFM réduite à la zone effective reconstruite suivant le mode (d) LLT (e) TLT et (f) TTT

Comme prévu, l'information spéculaire liée au défaut est conservée pour le mode de reconstruction TTT qui couvre la partie inférieure de la pièce.

Pour combiner les informations présentes sur ces images, nous avons appliqué quatre méthodes de fusion : la fusion par maximum d'amplitude TFM, la fusion par maximum d'amplitude SEE qui comme nous le verrons découle de la précédente, la fusion par sommation et la fusion par corrélation.

Nous allons décrire le principe de chaque méthode, ses avantages, ses inconvénients et fournir pour chaque, la méthode de sélection des modes de reconstruction la plus adaptée.

### Fusion par maximum d'amplitude TFM

La fusion par maximum d'amplitude TFM permet de reconstruire un défaut avec une sensibilité maximale. Elle consiste à choisir en chaque pixel le mode ayant l'amplitude TFM la plus forte parmi les modes sélectionnés.

Soit  $M$  le nombre d'images à fusionner, chaque mode est indexé par un numéro compris entre 1 et  $M$ . L'image finale est donnée par la relation suivante :

$$I^{fusion}(P) = I^k(P) \text{ avec } k = \operatorname{argmax}(I^m(P))_{m=1,2..M} \quad (4.2)$$

Avec ce type de fusion, toutes les indications présentes dans les différentes images, pertinentes ou non, seront conservées. Pour éviter une augmentation de l'amplitude des

artefacts, il est préférable d'effectuer cette fusion sans normalisation des images. Le défaut sera reconstruit avec une amplitude TFM maximale, mais le niveau de bruit sera également maximal.

En outre, pour obtenir un maximum d'amplitude TFM, la méthode de sélection des modes la plus adaptée pour cette fusion est la sélection sur critère d'amplitude SEE maximale qui fournit les modes ayant les amplitudes TFM les plus fortes. Toutefois dans ce cas, l'image de chaque mode est reconstruite sur toute sa zone effective avant l'étape de fusion.

Si le défaut est reconstruit avec différents modes ayant des résolutions différentes, celui-ci aura un aspect segmenté au passage d'un mode à un autre. Si en outre ces modes de reconstruction ont des écarts d'amplitude significatifs, l'amplitude TFM du défaut ne sera pas uniforme.

Cette méthode de fusion a été appliquée aux images TFM des modes TLL et TLT sélectionnés suivant le critère de maximisation de l'amplitude SEE pour la configuration expérimentale correspondant à la Fig 4.1.

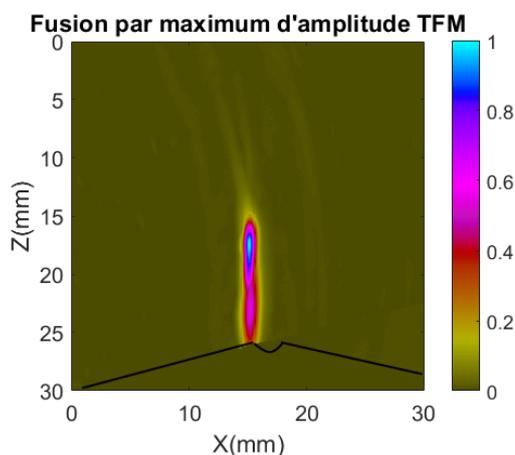


Fig 4.5 – Fusion des modes par maximum d'amplitude TFM des modes TLL et TLT

La Fig 4.5 montre que le défaut est reconstruit sur toute sa hauteur. On peut noter que la résolution et l'amplitude sont légèrement différentes le long du défaut. La partie basse reconstruite avec le mode TLL a une résolution et une amplitude différentes de la partie haute reconstruite avec le mode TLT. Pour ce type de fusion cependant, le passage d'un mode à l'autre s'effectue de manière relativement douce, le défaut n'a donc pas un aspect segmenté très prononcé comme nous le verrons au paragraphe suivant. Notons aussi que dans cet exemple, il est impossible d'observer l'impact de la présence des artefacts, car ils ne sont pas présents sur les images avant la fusion.

La fusion par maximum d'amplitude TFM a également été appliquée sur les images TFM des modes LLT, TLT et TTT sélectionnés suivant le critère de maximisation de l'amplitude SEE pour la configuration simulée (cf. Fig 4.2).

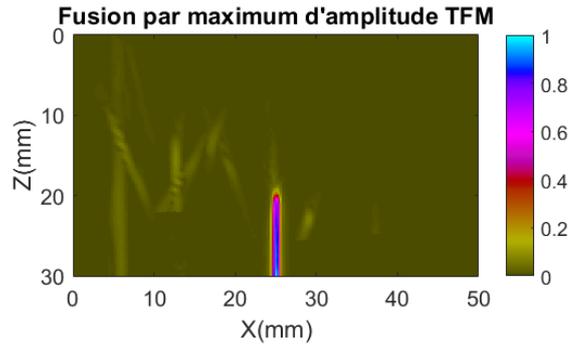


Fig 4.6 – Fusion des modes par maximum d’amplitude TFM des modes LLT, TLT et TTT

Le défaut est reconstruit sur toute sa hauteur sur la Fig 4.6. L’amplitude et la résolution sont homogènes sur le défaut, et comme prévu, les artefacts présents dans les images de départ sont conservés après la fusion.

De cette méthode a ensuite découlé la fusion par maximum d’amplitude SEE. En effet, étant donnée la relation de proportionnalité entre l’amplitude TFM et l’amplitude SEE, sélectionner en un pixel le mode ayant l’amplitude TFM maximale revient à sélectionner le mode ayant l’amplitude SEE maximale. Cette méthode présente toutefois certains avantages en terme de réduction des artefacts.

### Fusion par maximum d’amplitude SEE

La fusion par maximum d’amplitude SEE consiste à choisir en chaque pixel le mode ayant la plus forte amplitude SEE. Par conséquent, la méthode de sélection la plus adaptée est la sélection sur critère de maximisation de l’amplitude SEE.

Soit  $M$  le nombre d’images à fusionner, l’image finale est donnée par la relation suivante :

$$I^{fusion}(P) = I^k(P) \text{ avec } k = \operatorname{argmax}(A^m(P, \mathbf{n}))_{m=1,2..M} \quad (4.3)$$

Comme précédemment, le défaut sera reconstruit avec une amplitude TFM maximale. Toutefois, le niveau de bruit ne sera pas obligatoirement maximal et ne sera pas uniforme sur toute la ROI. Par ailleurs, si des modes de reconstruction de résolution et d’amplitude différentes interviennent dans la reconstruction du défaut, l’aspect de ce dernier ne sera pas uniforme en termes de résolution et d’amplitude. Et comme précédemment, cette fusion se fera sans la normalisation des images pour éviter une amplification des artefacts.

Mais contrairement à la fusion par maximum d’amplitude TFM qui conserve tous les artefacts, la fusion par maximum d’amplitude SEE ne conserve que les artefacts situés dans les zones ayant une amplitude SEE maximale.

Les images TLL et TLT de la configuration expérimentale (cf. Fig 4.1) ont été fusionnées suivant cette méthode. La Fig 4.7 (a) montre la distribution des modes dans la ROI et la Fig 4.7 (b) montre l’image issue de la fusion.

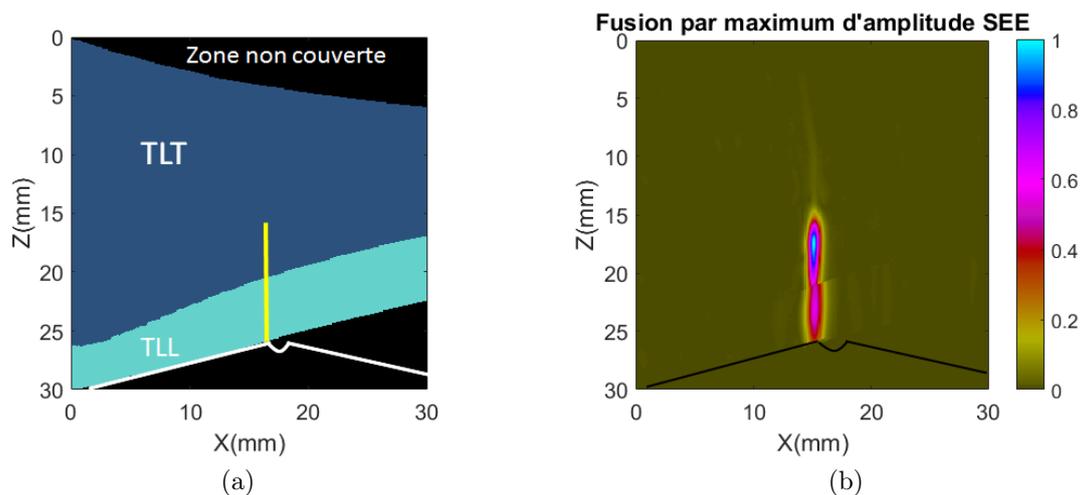


Fig 4.7 – (a) Cartographie de distribution des modes dans la ROI (b) Fusion des modes par maximum d'amplitude SEE

La position du défaut sur la cartographie de distribution des modes montre que la partie inférieure sera reconstruite suivant le mode TLL et la partie supérieure suivant le mode TLT. Comme précédemment, l'amplitude et la résolution ne sont pas uniformes le long du défaut. Cette fois cependant, l'aspect segmenté de l'indication est plus marqué, le passage d'un mode à l'autre s'effectuant de manière brusque. Cette rupture s'observe aussi sur le niveau de bruit qui est celui du mode TLL dans la partie inférieure et du mode TLT dans la partie supérieure.

La fusion par maximum d'amplitude SEE a également été appliquée aux images de la configuration simulée correspondant à la Fig 4.2.

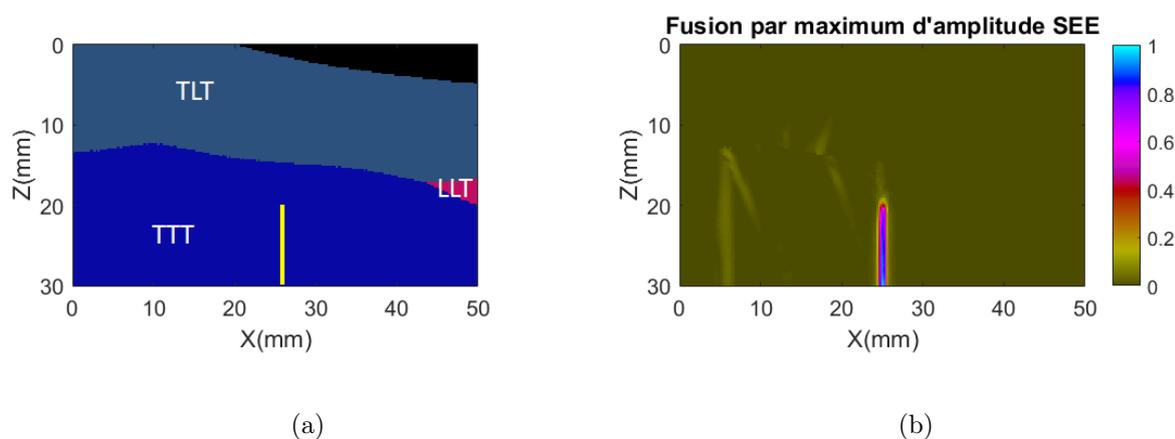


Fig 4.8 – (a) Cartographie de distribution des modes dans la ROI (b) Fusion des modes par maximum d'amplitude SEE

Le défaut étant reconstruit par le mode TTT seul, l'amplitude et la résolution sont homogènes le long du défaut. Des artefacts sont toujours conservés, mais on relève qu'ils sont en quantité moindre par rapport à l'image issue de la fusion par maximum d'ampli-

tude TFM.

Les méthodes de fusion par maximum d'amplitude TFM et SEE sont donc particulièrement pertinentes lorsqu'un seul mode couvre tout le défaut. Une principale différence entre les deux méthodes est que la première ne peut s'appliquer qu'après la reconstruction complète des images alors que la seconde permet de limiter la reconstruction pour chaque mode dans la zone où elle présente une amplitude SEE maximale.

### Fusion par sommation

Alors que les méthodes de fusion précédentes associent à chaque pixel un seul mode de reconstruction, la fusion par sommation permet d'exploiter plusieurs modes simultanément en chaque pixel. Toute l'information provenant des différentes images est ainsi conservée. Par conséquent, lorsque les images sommées sont porteuses d'artefacts, alors l'image issue de la sommation sera également porteuse d'artefacts. Il est donc préférable de mettre en œuvre une fusion sans normalisation des images.

L'algorithme de fusion par sommation est donné par l'expression suivante :

$$I^{fusion}(P) = \sum_{m=1}^M I^m(P) \quad (4.4)$$

Où  $M$  est le nombre de modes prédits.

Rappelons que  $I^m(P)$  est une valeur réelle positive. Cette remarque est importante car les images issues de modes de reconstruction différents possèdent des phases différentes. Par conséquent, la sommation des amplitudes sans passage par le module, par exemple si l'expression (2.1) est utilisée, peut conduire à des interférences destructives sur le défaut.

Cependant, la sommation d'amplitudes réelles positives conduit à l'augmentation du niveau de bruit avec le nombre de modes. Ainsi, pour avoir un rapport signal à bruit optimal, l'amplitude TFM doit être maximale sur le défaut et le nombre de modes minimal. On privilégiera donc la sélection sur critère de maximisation de l'amplitude SEE. Comme pour la fusion par maximum d'amplitude TFM, les modes sélectionnés sont reconstruits sur toute leur zone effective et non pas qu'aux pixels où ils ont été sélectionnés. On a ainsi des chevauchements des zones effectives des différents modes.

La Fig 4.9 montre la distribution du nombre de modes sommés en chaque pixel et l'image issue de la fusion par sommation des images TLL et TLT pour la configuration expérimentale (cf. Fig 4.1).

Sur la Fig 4.9 (a), les pixels associés à la couleur rouge sont ceux pour lesquels il n'existe qu'un mode ayant une amplitude SEE supérieure à l'amplitude minimale de détection et les pixels associés à la couleur bleue sont ceux pour lesquels il existe deux modes de reconstruction ayant une amplitude supérieure à l'amplitude minimale SEE. Ainsi la partie supérieure du défaut est reconstruite avec la sommation des deux modes, alors que la partie inférieure est reconstruite avec le mode TLL seul.

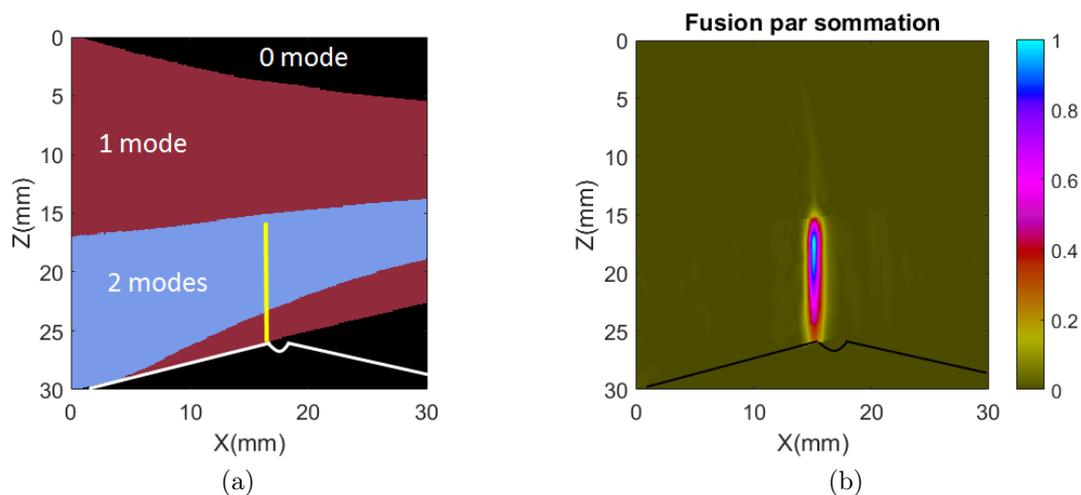


Fig 4.9 – (a) Cartographie de distribution du nombre de modes pertinents en chaque pixel, (b) Fusion par sommation des modes TLT et TLL

L'image du défaut issue de la fusion possède un aspect lissé en terme de résolution et la variation de l'amplitude sur le défaut est relativement homogène avec des variations lentes. En terme de niveau de bruit, la partie supérieure de la ROI (en rouge) a celui du mode TLT et la partie inférieure (en rouge) a celui du mode TLL, tandis que la zone de chevauchement (en bleu) a celui égal à la somme de celui des deux modes.

La fusion par sommation a également été appliquée aux images de la configuration simulée (cf. Fig 4.2). L'image issue de la fusion est proposée dans la Fig 4.10.

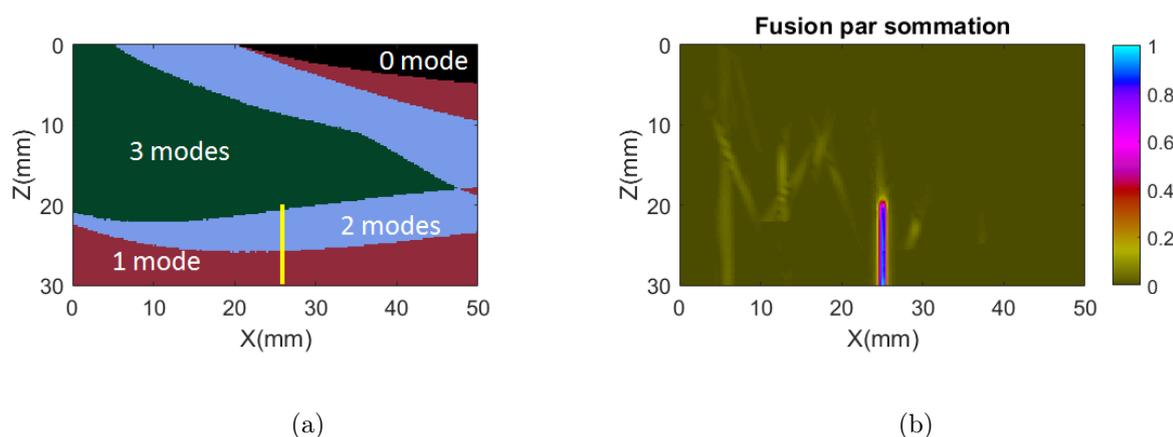


Fig 4.10 – (a) Cartographie de distribution du nombre de modes pertinents en chaque pixel, (b) Fusion par sommation des modes LLT, TLT et TTT

Le défaut est reconstruit sur toute sa hauteur et tous les artefacts présents dans les images de départ sont conservés.

Ces différentes méthodes ainsi décrites exploitent la complémentarité des modes, ce qui permet de toujours conserver l'information spéculaire du défaut, mais elles ne filtrent pas les artefacts de reconstruction.

Par opposition à ces méthodes, nous avons développé une méthode exploitant les similitudes entre les images qui par construction ne conservera que l'information liée au défaut et filtrera les artefacts. Il s'agit de la méthode de fusion par corrélation.

### Fusion par corrélation d'images

La fusion par corrélation que nous avons développée consiste à amplifier les similitudes et à atténuer les différences entre les modes de reconstruction. Elle consiste à sommer le produit des images deux par deux selon l'expression(4.5) :

$$I^{fusion}(P) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=k+1}^{M-1} r_{kl} \times I^k(P) \times I^l(P) \quad (4.5)$$

où  $r_{kl}$  est le coefficient de corrélation entre les deux images calculé selon la relation suivante :

$$r_{kl} = \frac{\sum_{N_z} \sum_{N_x} (I^k(z, x) - \bar{I}^k) \times (I^l(z, x) - \bar{I}^l)}{\sqrt{(\sum_{N_z} \sum_{N_x} (I^k(z, x) - \bar{I}^k)) \times (\sum_{N_z} \sum_{N_x} (I^l(z, x) - \bar{I}^l))}} \quad (4.6)$$

où  $x$  et  $z$  sont les coordonnées des points,  $N_x$  est le nombre de pixels selon l'axe horizontal,  $N_z$  est le nombre de pixels selon l'axe vertical,  $\bar{I}^k$  et  $\bar{I}^l$  sont les amplitudes TFM moyennes.

Le coefficient de corrélation, compris entre 0 et 1, permet d'augmenter la contribution des modes qui ont le plus de similitudes et d'atténuer les modes qui présentent le moins de similitudes.

Le résultat de la fusion sera d'autant plus pertinent que le nombre d'images présentant des similitudes est important. Par conséquent, la sélection des modes sur maximisation du nombre de modes est la sélection la plus adaptée pour ce type de fusion.

L'indication liée au défaut étant toujours à la même position pour des modes différents, elle sera amplifiée par le produit, tandis que les artefacts ayant généralement des positions différentes vont être atténués. Grâce à cette propriété, une normalisation des images avant fusion est possible sans risque d'amplification des artefacts.

Cependant cette fusion n'est adaptée que lorsqu'au moins deux modes reconstruisent le défaut. Dans le cas contraire, l'indication liée au défaut est perdue.

Pour prendre en compte ce cas, la fusion par corrélation peut être faite en vérifiant en chaque pixel la couverture de zone avant le produit. L'algorithme de fusion a donc été modifié et correspond à la relation suivante :

$$I^{fusion}(P) = \begin{cases} \sum_{k=1}^M \sum_{l=k+1}^{M-1} r_{kl} \times \sqrt{I^k(P) \times I^l(P)} & \text{si } A^k(P, \mathbf{n}) > A_{min} \text{ et } A^l(P, \mathbf{n}) > A_{min} \\ |I^u(P)| & \text{si } A^u(P, \mathbf{n}) > A_{min} \text{ et } [A^m(P, \mathbf{n}) < A_{min}]_{m=[1, M]-u} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.7)$$

Ainsi, si les zones effectives de deux modes se chevauchent, la fusion par corrélation d'images permet de conserver les informations communes. Dans le cas où il n'y a pas de

chevauchement entre les zones effectives alors l'information (pertinente ou non) est quand même conservée. L'introduction de la racine carrée permet de réduire les écarts d'amplitude entre les pixels reconstruits avec le produit de deux modes et les pixels reconstruits avec un seul mode.

La Fig 4.11 présente la cartographie de distribution du nombre de modes et l'image issue de la fusion par corrélation des modes LLT, TLL et TLT pour la configuration expérimentale (cf Fig 4.1). Trois modes sont sélectionnés suivant le critère de maximisation du nombre de modes.

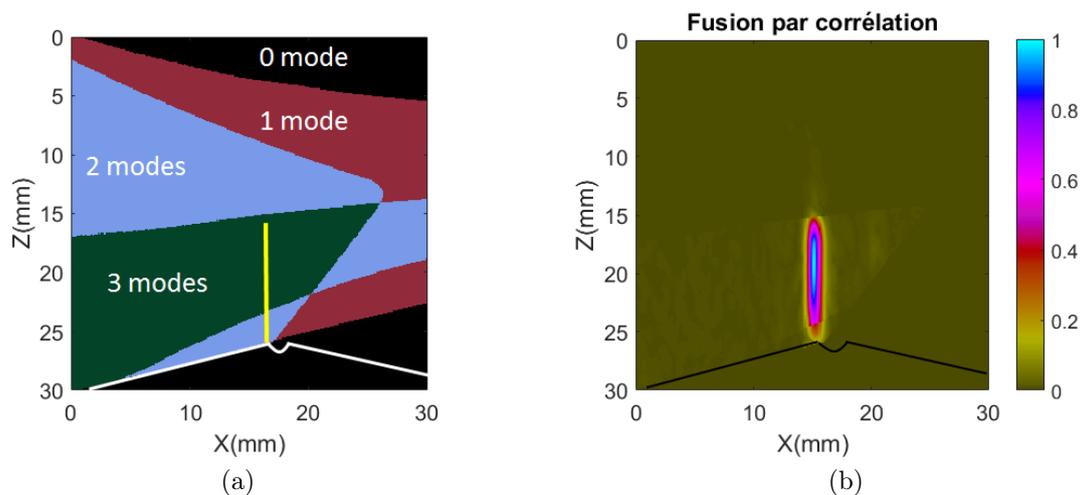


Fig 4.11 – (a) Cartographie de la distribution du nombre de modes fusionnés par pixel, (b) Fusion par corrélation des modes LLT, TLL et TLT

La cartographie de distribution du nombre de modes montre que la partie supérieure du défaut est reconstruite par la fusion de trois modes et la partie inférieure par la fusion de deux modes. L'image issue de la fusion conserve donc l'information liée au défaut. Cependant, on peut relever une rupture en terme d'amplitude entre la région reconstruite par la fusion des deux modes et celle reconstruite avec la fusion des trois modes.

La fusion par corrélation a également été appliquée aux images LLT, TLT et TTT de la configuration simulée (cf. Fig4.2).

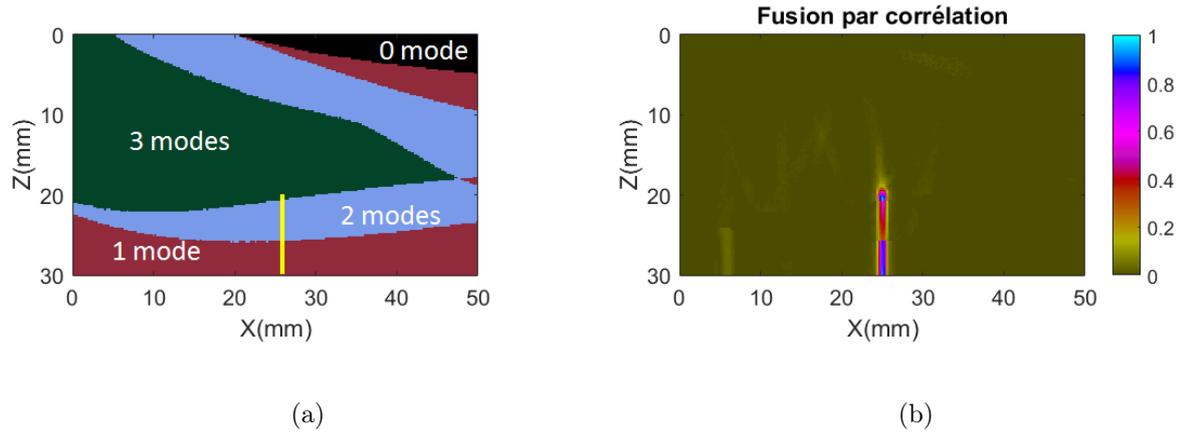


Fig 4.12 – (a) Cartographie de la distribution du nombre de modes fusionnés par pixel, (b) Fusion par corrélation des modes LLT, TLT et TTT

La Fig 4.12 (a) montre que la partie inférieure du défaut sera reconstruite par un mode (TTT), la partie supérieure par la fusion de deux modes (TTT et LLT) et l'extrémité supérieure par la fusion des trois modes (LLT, TLT et TTT). L'image issue de la fusion montre une atténuation des artefacts comparée à la fusion par sommation. Cependant le défaut a un aspect non homogène en terme d'amplitude.

La fusion par corrélation permet donc bien d'atténuer les artefacts, mais elle est très sensible au nombre de modes intervenant dans la fusion. Elle conduit ainsi à une inhomogénéité de l'amplitude lorsque le défaut est reconstruit par un nombre de modes de reconstruction différents.

### Discussions sur les méthodes de fusion

L'analyse des différentes méthodes de fusion a montré que la sélection des modes sur critère de maximisation de l'amplitude SEE est la plus adaptée pour la fusion par maximum d'amplitude TFM, la fusion par maximum d'amplitude SEE et la fusion par sommation, alors que la sélection sur critère de maximisation du nombre de modes est favorable à la fusion par corrélation. Rappelons toutefois que dans les cas de la fusion par maximum d'amplitude TFM et celle par sommation, les modes sélectionnés sont reconstruits sur toute leur zone effective et pas seulement aux pixels pour lesquels ils ont été sélectionnés.

Les deux premières méthodes de fusion sont pertinentes lorsque seul un mode présente une zone effective à la position du défaut auquel cas l'amplitude de l'indication reconstruite est homogène et la résolution uniforme. Toutefois la hauteur et la position du défaut n'étant pas connues a priori, il est impossible de prédire le nombre de modes qui vont intervenir dans sa reconstruction.

La fusion par sommation quant à elle fournit une indication qui a un aspect lissé avec une amplitude et une résolution homogène quel que soit le nombre de modes, mais elle s'accompagne d'une augmentation du niveau de bruit avec le nombre de modes et de la conservation de tous les artefacts. Enfin, la fusion par corrélation exploite les similitudes

entre les différentes images et filtre les différences permettant ainsi d'atténuer les artefacts de reconstruction. Cependant, elle peut conduire à des écarts d'amplitude non négligeables lorsque tout le défaut n'est pas reconstruit avec le même nombre de modes ce qui lui donne un aspect segmenté et une amplitude non uniforme.

#### 4.1.2.2 Incertitude sur l'orientation du défaut

Lorsqu'il existe une incertitude sur l'orientation du défaut, les modes sélectionnés à partir de la cartographie angulaire peuvent être fusionnés. Dans ce cas cependant, la notion de zone effective ne peut plus être utilisée, car elle varie avec l'orientation pour un même mode. Par conséquent, les modes sélectionnés sont pris en compte dans la fusion en chaque point de la ROI.

Par ailleurs, les méthodes de fusion basées sur la cartographie spatiale SEE telle que la fusion par maximum d'amplitude SEE et la fusion par corrélation ne peuvent plus être appliquées. Ce sont donc les deux méthodes de fusion que sont la méthode de fusion par maximum d'amplitude TFM et la sommation qui pourront être appliquées. Le critère de sélection adapté pour chaque méthode est le même que précédemment.

A titre d'illustration, les méthodes de fusion seront appliquées aux modes de reconstruction prédits pour une plage d'incertitude de  $-15^\circ$  à  $0^\circ$  pour la configuration expérimentale (cf. Fig 4.1). La Fig 4.13 montre la cartographie angulaire SEE pour cette plage angulaire après une sélection des modes basée sur la maximisation de l'amplitude SEE.

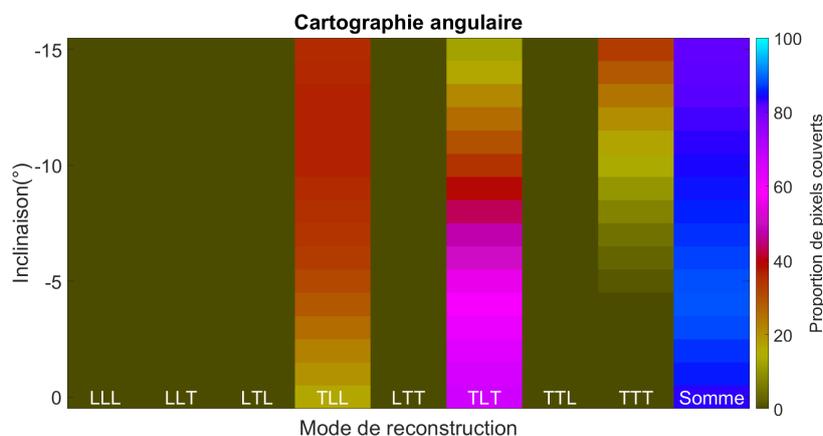


Fig 4.13 – Cartographie angulaire pour une plage angulaire de  $-15$  à  $0^\circ$

Les modes LLT, TLL et TTT sont potentiellement pertinents dans une plage angulaire de  $-15^\circ$  à  $0^\circ$ . Les images TFM associées à ces trois modes sont données dans la Fig 4.14.

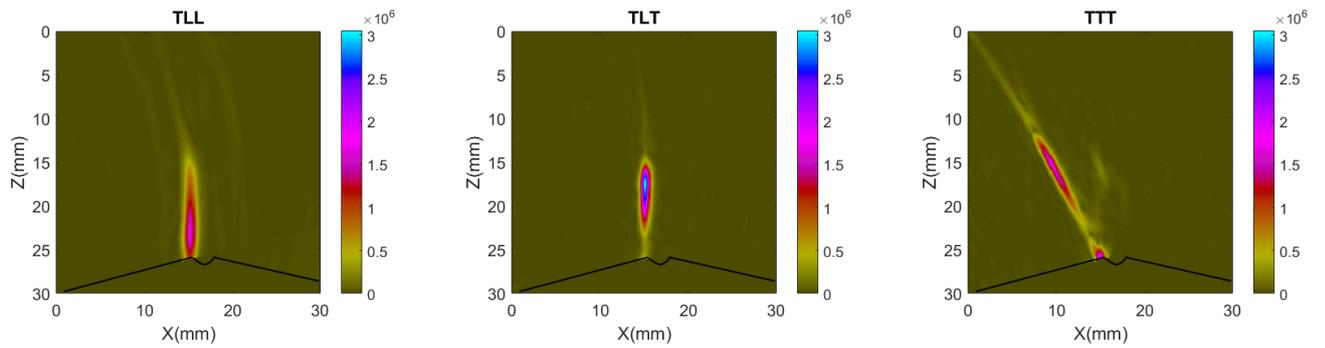


Fig 4.14 – Images TFM TLL, TLT et TTT générées à partir de la configuration 2.19

L’algorithme de fusion par maximum d’amplitude TFM et l’algorithme de fusion par sommation ont été appliqués sur ces trois images. La Fig 4.15 affiche les résultats des fusions.

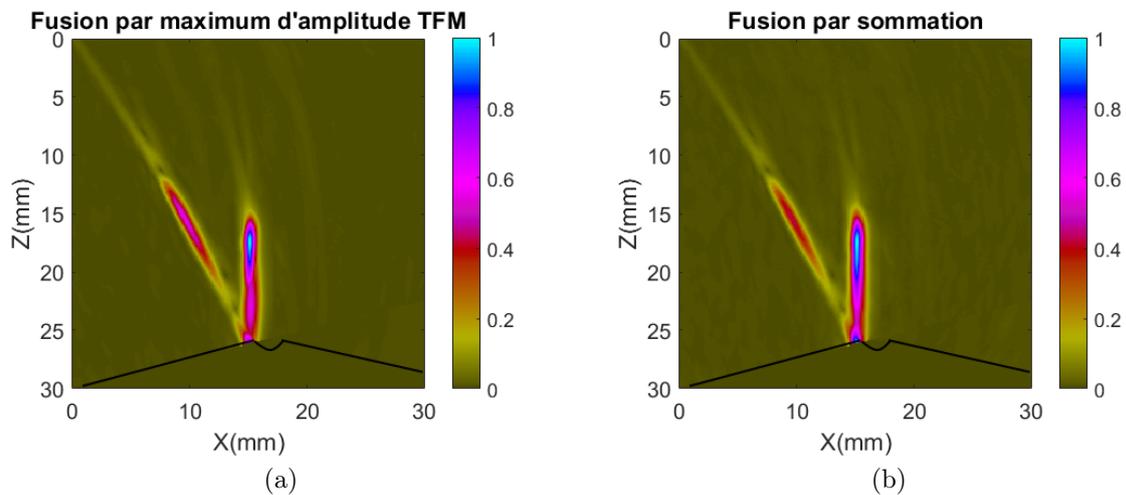


Fig 4.15 – (a) Fusion par maximum d’amplitude TFM (b) Fusion par sommation des modes TLL, TLT et TTT

– Dans le cas de la fusion par maximum d’amplitude, le défaut est bien reconstruit comme prévu et les artefacts conservés. A partir des images de départ, on constate que la racine du défaut est reconstruite suivant le mode TTT, sa partie médiane par le mode TLL et sa partie supérieure par le mode TLT et l’artefact issu du mode TTT est conservé. La prise en compte des trois modes conduit à une amplitude non uniforme sur le défaut.

– Dans le cas de la fusion par sommation, le défaut est aussi bien reconstruit avec un aspect plus lissé et l’artefact issu de mode TTT est conservé. Par ailleurs, on enregistre une perte de RSB de 5dB entre une fusion réalisée avec les deux modes TLL et TLT (cf. Fig 4.9) et une fusion réalisée avec le mode TTT en plus. On a effectivement une augmentation du niveau de bruit.

### Discussion

Dans le cas où il existe une incertitude sur l’orientation du défaut, le nombre de modes à fusionner devient plus important, par conséquent, le risque de présence d’artefacts augmente. Dans le cas de la fusion par maximum d’amplitude TFM, le défaut est reconstruit

par segment avec des modes d'amplitude et de résolution différentes. Dans le cas de la fusion par sommation, l'aspect du défaut est lissé mais le niveau de bruit sur l'image finale devient plus important. Les images considérées étant généralement peu bruitées, c'est la fusion par sommation qui sera privilégiée par la suite.

### 4.1.3 Fusion des indications de diffraction

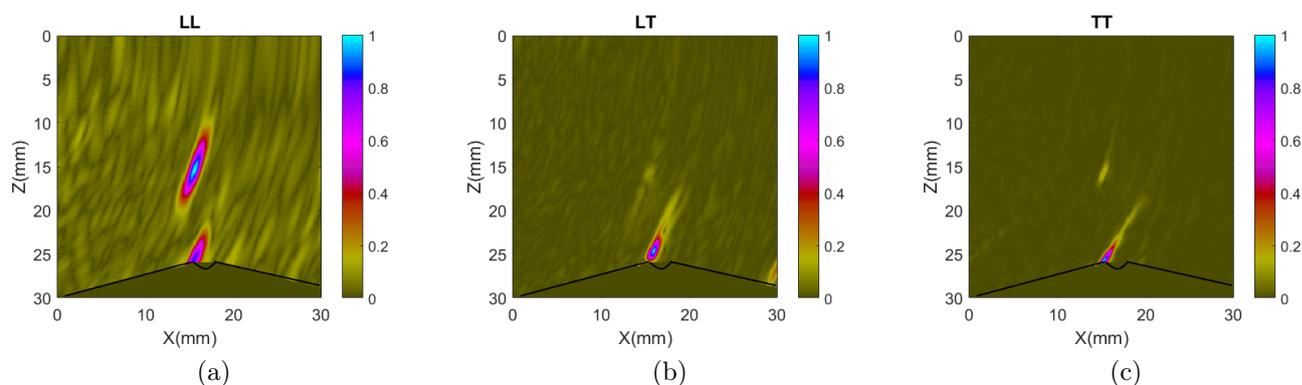
Outre les indications spéculaires, les défauts plans présentent des indications de diffraction qui peuvent être fusionnées. L'objectif de la fusion ici est de construire une image avec un RSB et une résolution optimaux pour bien distinguer les deux indications de diffraction.

Parmi les méthodes citées précédemment, seule la méthode de fusion par corrélation permet d'améliorer la résolution des images. C'est donc la méthode qui est choisie.

Pour le type de défaut étudié, la diffraction apparaît généralement dans les images associées aux modes directs. En outre, du fait de son caractère omnidirectionnel, la diffraction peut apparaître pour tous les modes de reconstruction. Dans le présent chapitre, nous ne nous sommes cependant intéressés qu'à la diffraction apportée par les modes directs LL, LT et TT.

Le mode LL présente généralement une meilleure sensibilité à la diffraction, mais sa résolution est plus faible que celle du mode TT, la longueur d'onde des ondes longitudinales étant environ deux fois plus grande que celle des ondes transversales. La fusion va donc permettre d'exploiter la sensibilité des ondes longitudinales et la résolution des ondes transversales.

La Fig 4.16 présente les images normalisées générées en modes directs LL, LT et TT ainsi que l'image issue de la fusion par corrélation pour la configuration expérimentale (cf. Fig 4.1).



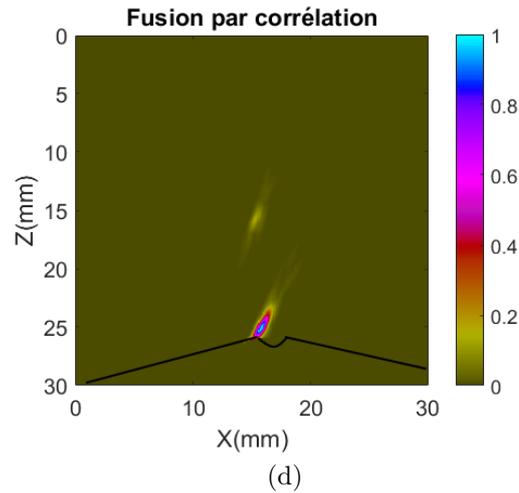
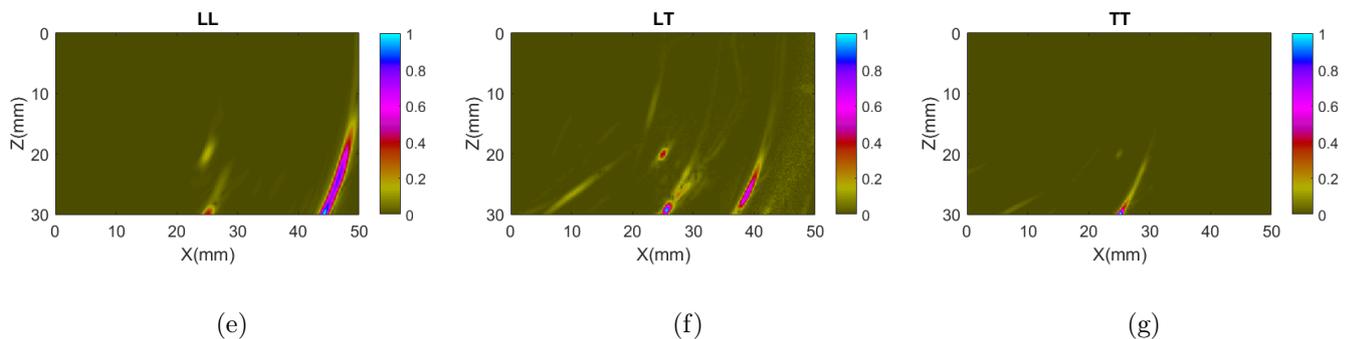


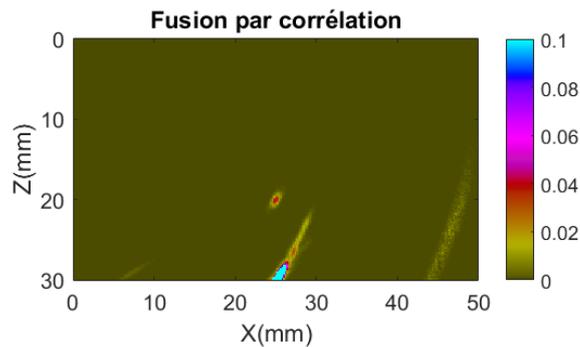
Fig 4.16 – Image TFM reconstruite en mode (a) LL, (b) LT, (c) TT et (d) fusion par corrélation des modes LL, LT et TT

Les images TFM présentent en effet des indications de diffraction avec des écarts d'amplitude TFM significatifs. Comme attendu, le mode TT offre une meilleure résolution que le mode LL. Cependant, il présente un écart de 16dB entre l'indication inférieure et l'indication supérieure alors que cet écart est négligeable pour le mode LL. Par ailleurs, le mode TT présente un meilleur RSB (42dB) que le mode LL (18dB).

La fusion par corrélation a permis de retrouver une meilleure résolution et un meilleur RSB (60dB) que le mode LL, mais l'écart d'amplitude entre la diffraction inférieure et la diffraction supérieure est plus prononcé (17dB) que pour le mode TT de par la faible amplitude de la diffraction supérieure des modes LT et TT.

La fusion par corrélation a également été appliquée aux images des modes directs de la configuration simulée (cf. Fig 4.2).





(h)

Fig 4.16 – Image TFM reconstruite en mode (a) LL, (b) LT, (c) TT et (d) fusion par corrélation des modes LL, LT et TT

Les trois modes présentent chacun les indications de diffraction inférieure et supérieure avec des écarts d'amplitude plus ou moins importants. Ces indications sont conservées après la fusion par corrélation et tous les artefacts sont filtrés.

#### 4.1.4 Fusion des indications de diffraction et spéculaires

L'indication spéculaire et les indications de diffraction peuvent être considérées soit séparément, soit fusionnées. Dans le cas d'une fusion, l'objectif est d'obtenir une image avec le profil du défaut qui est issu de la réflexion spéculaire délimité par la diffraction, et c'est donc la complémentarité des indications qui est recherchée.

Nous allons donc appliquer soit la fusion par maximum d'amplitude TFM, soit la fusion par sommation. Par ailleurs, étant donné que l'écart d'amplitude peut être significatif entre les indications, les fusions seront appliquées sur les images normalisées. Toutefois, les deux indications de diffraction présentent généralement des écarts d'amplitude non négligeables ; la normalisation ne sera pas toujours suffisante pour distinguer l'indication de diffraction de plus faible amplitude après la fusion avec l'indication spéculaire.

Toujours pour la même configuration choisie, la Fig 4.17 montre la fusion par sommation des indications spéculaires obtenues par sommation des modes TLL et TLT et des indications de diffraction obtenue par corrélation des modes LL, LT et TT de la configuration expérimentale.

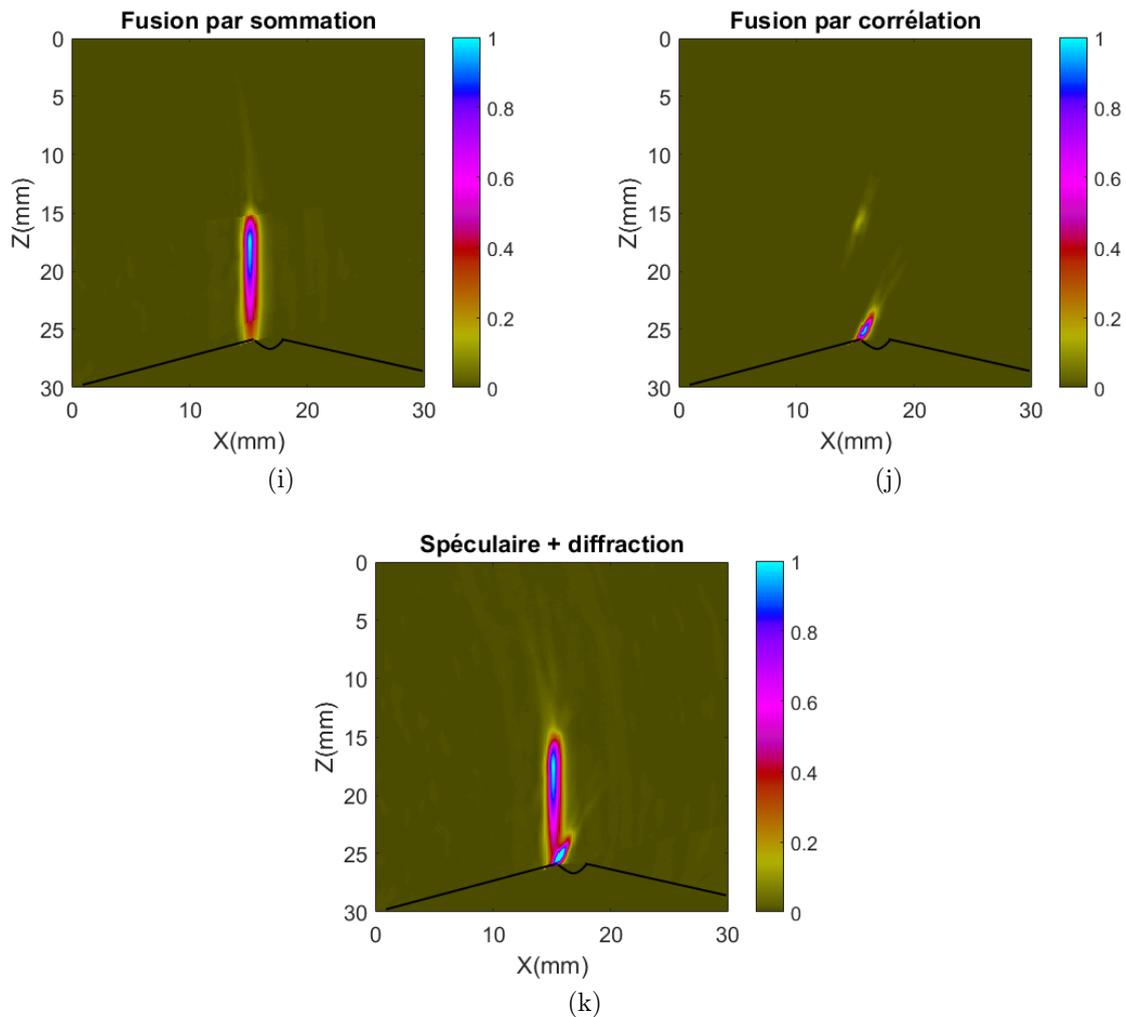


Fig 4.17 – (a) Indication spéculaire issue de la sommation des modes TLL et TLT, (b) Indications de diffraction issues de la corrélation des modes directs LL, LT et TT et (c) Sommation de (a) et (b)

On remarque que la diffraction supérieure est faible devant l'écho spéculaire; par conséquent, elle n'est pas visible dans l'image fusionnée et seule la diffraction inférieure du défaut est notable après la sommation.

#### 4.1.5 Conclusions sur les méthodes de fusion

Dans ce chapitre nous avons proposé différentes méthodes de fusion des images TFM. Pour éviter que certaines indications ne soient masquées nous avons proposé de fusionner les indications spéculaires d'une part et les indications de diffraction d'autre part. Dans le premier cas, nous avons distingué le cas où l'orientation du défaut est supposée connue et le cas où il existe une incertitude sur cette dernière.

Différentes méthodes de fusion ont alors été développées. Leur analyse a permis de conclure que la méthode par sommation des images issues des modes sélectionnés sur critère de maximisation de l'amplitude SEE est plus favorable aux indications spéculaires, alors que la fusion par corrélation est la plus adaptée pour la fusion des indications de diffraction. Dans le premier cas, la fusion est faite sans normalisation pour éviter d'amplifier les potentiels artefacts; dans le second cas elle doit s'appliquer sur les images

normalisées pour éviter un écart d'amplitude trop important entre différents pixels de l'image.

En outre, à l'exception de la corrélation qui permet d'atténuer les artefacts lorsque ceux-ci sont situés à des positions différentes, toutes les méthodes de fusion proposées peuvent conserver les artefacts présents dans les images avant la fusion. Par conséquent, elles doivent s'accompagner de techniques de filtrage d'artefacts.

## 4.2 Filtrage des artefacts

Les artefacts, comme nous l'avons déjà montré au chapitre 2, peuvent être pénalisants pour l'interprétation des images TFM. Pour effectuer une caractérisation du défaut, il est donc nécessaire d'avoir une image dénuée de tout artefact. Or la fusion par sommation que nous avons privilégiée conserve les artefacts de reconstruction présents sur les images de base.

Il existe peu de méthodes de filtrage d'artefacts dans la littérature, et celles qui existent sont pour la plupart adaptées au filtrage des artefacts liés aux échos de géométrie. En effet, pour le filtrage de ces derniers, il est possible d'exploiter la connaissance de la géométrie. Dans [51], il a été développé une méthode qui consiste à simuler l'écho de géométrie de la pièce et à le filtrer ensuite des signaux expérimentaux en appliquant un filtrage temporel aux temps de vol correspondant aux échos de géométrie. Une autre méthode de filtrage de ces artefacts est également décrite dans [52]. Elle consiste à filtrer les trajets élémentaires qui ne sont pas spéculaires par une pondération de l'algorithme TFM par un facteur dépendant de l'angle formé par les directions locales à l'émission et à la réception au point de calcul considéré. La méthode de transformation des échos (MTE) [52] est également pertinente pour le filtrage des échos de géométrie. Elle consiste à détecter une indication correctement reconstruite suivant un mode donné puis à observer son comportement dans un autre mode par exploitation des temps de vol associés.

Cette méthode peut être appliquée au filtrage des artefacts liés au défaut si le défaut est identifié au préalable. Nous nous sommes donc intéressés à la compréhension de cette méthode avant de développer une procédure de filtrage basée sur elle. Nous allons dans un premier temps présenter le principe de la méthode MTE.

### 4.2.1 La méthode MTE

La méthode MTE repose sur l'exploitation du principe de non unicité des temps de vol introduit au chapitre 2. Cette non-unicité stipule que si une indication est reconstruite dans un mode donné, alors elle peut se retrouver sous une autre forme dans un autre mode s'il existe une coïncidence de temps de vol entre les deux modes. La méthode MTE consiste à identifier une indication reconstruite dans un mode donné et à observer son comportement dans un autre mode.

### 4.2.1.1 Étapes de la méthode MTE

L'algorithme MTE se déroule en trois étapes :

**a.** On reconstruit une image TFM à partir de la matrice FMC  $S$  suivant un mode  $m_1$  et on localise spatialement une indication.

**b.** On identifie les temps de vol ayant permis la reconstruction de cette indication. Cette étape consiste en fait à générer une sous-matrice FMC  $S_{m_1}$  ne contenant que les échos associés à cette indication.

**c.** On reconstruit deux images TFM suivant le mode  $m_2$ , une à partir de la matrice  $S_{m_1}$  et une à partir de la matrice FMC  $S$ , et on compare les deux images.

### 4.2.1.2 Application de la méthode MTE sur un cas expérimental

Pour illustrer la méthode MTE, nous considérons la configuration expérimentale (cf. Fig 4.1). Nous allons montrer que l'indication du mode TTT (cf. Fig 4.18 (b)) est reconstruite à partir des mêmes signaux que l'indication reconstruite suivant le mode TLT (cf. Fig 4.18 (a)).

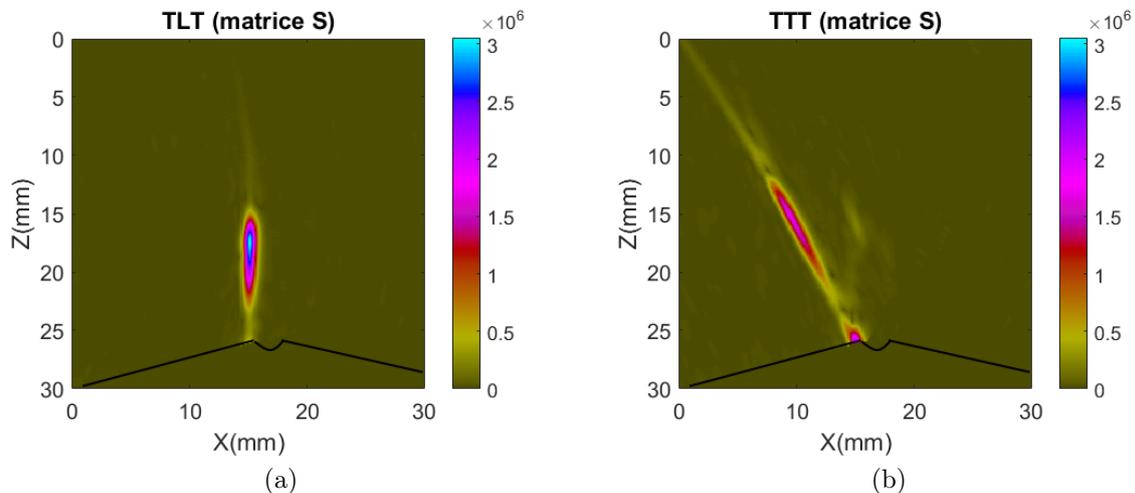


Fig 4.18 – Images TFM des modes TLT et TTT

#### a. Localisation d'une indication

A partir de l'image TFM TLT, on identifie la position d'une indication.

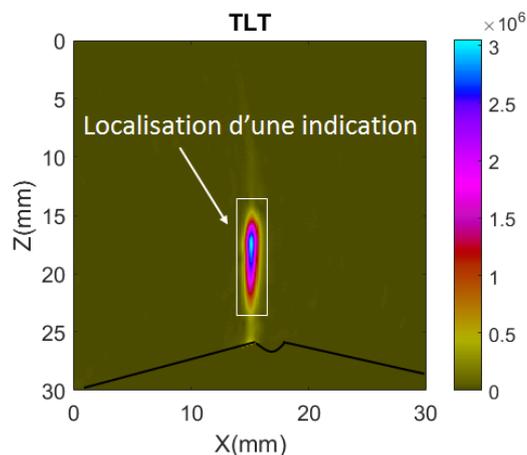
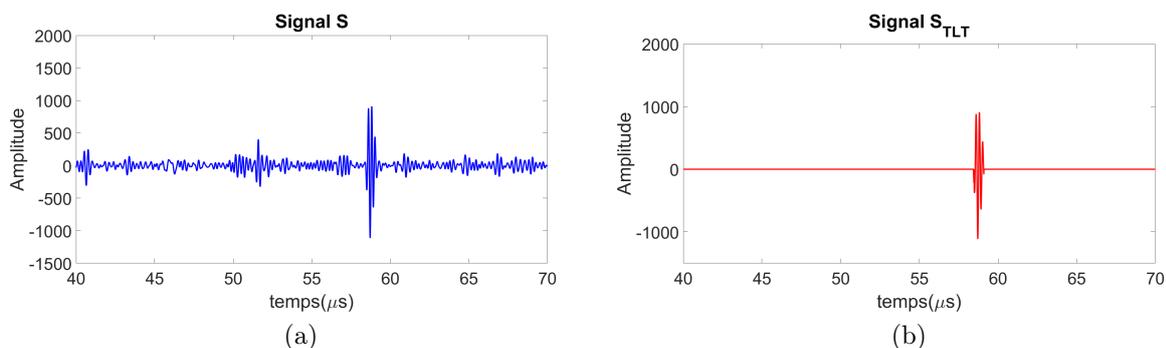


Fig 4.19 – Identification de la position d'une indication

### b. Génération de la sous-matrice

Pour tous les pixels appartenant à la zone délimitée par le rectangle blanc, on construit la sous-matrice  $S_{TLT}$  liée à cette indication à partir de la matrice FMC  $S$ .

Fig 4.20 – Signal temporel du couple d'éléments 30-60 de la (a) matrice FMC  $S$  et (b) de la sous-matrice  $S_{TLT}$ 

En bleu, on a le signal de la matrice FMC  $S$  émis par l'élément 30 et reçu par l'élément 60, en rouge, on a le signal de la matrice FMC  $S_{TLT}$  pour le même couple d'éléments. Le signal lié à l'indication reconstruite suivant le mode TLT apparaît donc entre 55 et 60  $\mu\text{s}$  où on retrouve les mêmes échos.

### c. Reconstruction TFM suivant le mode TTT à partir de la sous-matrice

On reconstruit une image TFM suivant le mode TTT avec les signaux de la matrice  $S_{TLT}$  et on la compare à l'image reconstruite suivant le mode TTT à partir des signaux de la matrice  $S$ .

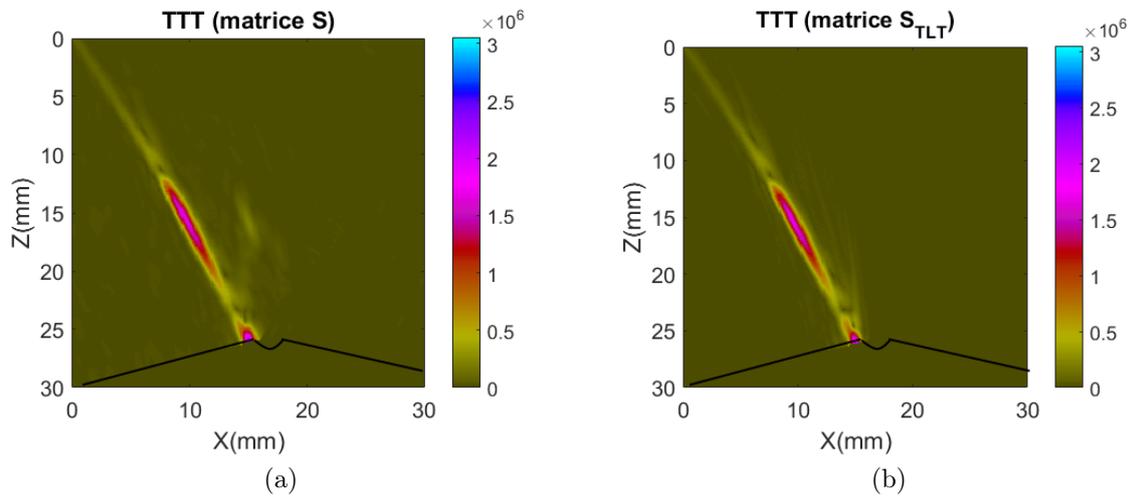


Fig 4.21 – Image TTT reconstruite (a) à partir de la matrice  $S$ , (b) à partir de la matrice  $S_{TLT}$

L'indication reconstruite à partir de la matrice  $S$  l'est également à partir de la matrice  $S_{TLT}$ , on peut donc conclure que l'indication inclinée du mode TTT est issu des mêmes échos que l'indication verticale du mode TLT.

#### 4.2.1.3 Discussions sur la méthode MTE

La méthode MTE permet ainsi de comprendre la formation des artefacts. Elle permet de connaître le devenir d'une indication d'un mode donné dans un autre mode. Cependant, à moins de connaître à priori la position du réflecteur, la méthode MTE ne permet pas de faire la distinction entre l'indication pertinente du défaut et l'artefact. En outre, il est impossible de prédire que deux indications situées dans deux modes différents sont reconstruits à partir des mêmes échos avant le calcul MTE, ce qui rend la méthode lourde d'utilisation.

Pour dépasser ces limites, nous avons développé une procédure qui permet de faire la distinction entre le défaut et les artefacts sous certaines hypothèses et qui filtre les artefacts sans connaissance des modes qui en sont à l'origine.

### 4.2.2 Développement d'une procédure de filtrage des artefacts

La méthode de filtrage que nous avons développée est basée sur l'hypothèse suivante : l'amplitude TFM de l'indication correctement reconstruite du défaut est toujours d'amplitude plus forte que celle des artefacts liés au défaut. Cette hypothèse a été vérifiée dans de précédents travaux [51] mais aussi pour toutes les reconstructions simulées et expérimentales que nous avons réalisées. Elle s'explique par le fait que les interférences entre les différents signaux lors du calcul TFM sont optimales aux points où les échos ont effectivement été générés.

Pour filtrer les artefacts, nous allons considérer que toutes les indications présentes dans l'image issue de la fusion sont de possibles réflecteurs. Le signal associé à chaque

réflecteur est alors déterminé selon une méthode de décomposition du signal, puis pour chaque réflecteur supposé nous allons retrouver les artefacts associés en commençant par le réflecteur ayant la plus forte amplitude.

#### 4.2.2.1 Décomposition du signal

Pour décomposer le signal temporel issu de la matrice inter-éléments  $S$ , nous avons fait l'approximation simple que cette matrice est une somme de sous-matrices inter-éléments  $S_r$ , chacune étant associée à un réflecteur  $r$  telle que :

$$S(t) = \sum_r S_r(t) \quad (4.8)$$

Le signal temporel d'une sous-matrice est lui-même une somme d'un ensemble d'échos issus de différents trajets soit de différents modes de reconstruction  $m$  telle que :

$$S_r(t) = \sum_m S_r^m(t) \quad (4.9)$$

où  $S_r^m$  est la sous-matrice associée à un mode de reconstruction  $m$  lié à un réflecteur  $r$ .

Pour construire la sous-matrice  $S_r^m$  d'un réflecteur donné, on identifie la région  $Z_r$  de l'indication du réflecteur. On construit ensuite le signal temporel de la sous-matrice pour un couple d'éléments  $ij$  à partir de la matrice FMC grâce à l'expression suivante :

$$S_{r,ij}^m(t_{ij}^{P,m}) = \begin{cases} S_{ij}(t_{ij}^{P,m}) & \text{si } P \in Z_r \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.10)$$

Comme, le réflecteur est supposé être un défaut plan, la sous-matrice associée  $S_r^m$  suivant un mode  $m$  peut elle-même être décomposée en une composante de diffraction  $S_r^{m,diff}$  et une composante spéculaire  $S_r^{m,spec}$  telles que :

$$S_r^m(t) = S_r^{m,diff}(t) + S_r^{m,spec}(t) \quad (4.11)$$

A partir de l'orientation du réflecteur, la matrice spéculaire peut être extraite selon l'expression (4.12) :

$$S_{d,ij}^{m,spec}(t_{ij}^{P,m}) = \begin{cases} S_{ij}(t_{ij}^{P,m}) & \text{si } P \in Z_d \text{ et } |\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_{ij}^P| = 1, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.12)$$

où  $\mathbf{n}$  est la normale du réflecteur.

Sous l'hypothèse que le réflecteur de plus forte amplitude est un défaut, nous allons d'abord retrouver la sous-matrice liée à ce réflecteur. La position et l'orientation de ce dernier sont déterminées par les algorithmes décrits dans les paragraphes suivants.

#### 4.2.2.2 Détermination de la position de l'indication de plus forte amplitude

Pour identifier la région d'un défaut  $Z_r$ , nous avons utilisé une méthode de traitement d'images qui est connu sous le nom d'algorithme de croissance de région. Il permet de détecter au sein d'une image une région dont les pixels respectent des critères communs. A partir d'une graine d'initialisation (un pixel ou un ensemble de pixels), on fait croître de manière itérative la région autour de cette graine. L'algorithme peut se résumer en deux étapes.

##### a. Graine d'initialisation

On définit la graine d'initialisation qui est un pixel ou un ensemble de pixels. On choisit la graine d'initialisation comme le pixel de plus forte amplitude TFM ou un ensemble de pixels entourant ce pixel.

##### b. Croissance de la région

Cette étape a pour objectif de faire grandir la région en agglomérant des pixels voisins. Les pixels sont choisis afin de maintenir l'homogénéité de la région. Les pixels voisins sont ajoutés à la région si l'indicateur d'homogénéité reste vrai. La croissance s'arrête lorsqu'on ne peut plus ajouter de pixels sans briser l'homogénéité. La définition de cet indicateur est l'étape critique de l'algorithme. Nous en avons défini deux : un lié à l'amplitude et un lié à l'orientation.

###### *b.1 Indicateur d'homogénéité lié à l'amplitude TFM*

L'indicateur d'homogénéité lié à l'amplitude est tel que, tant que l'amplitude TFM au point considéré est supérieure au niveau de bruit, le pixel est considéré comme appartenant au défaut. Cette méthode est robuste tant que les indications reconstruites dans l'image sont spatialement distinctes.

L'algorithme de croissance de région a été appliquée à une image issue de la fusion par sommation des modes TLL, TLT et TTT de la configuration expérimentale (cf Fig 4.1). La Fig 4.24 montre les images avant et après application de l'algorithme.

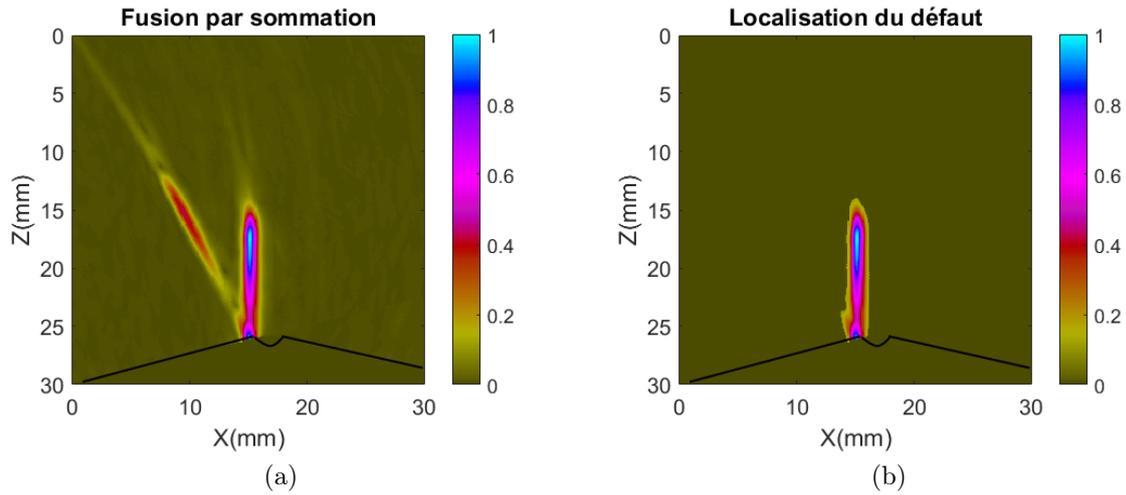


Fig 4.22 – (a) Image issue de la fusion par sommation des modes TLL, TLT et TTT (b) Image obtenue après l'application de l'algorithme de croissance de région

L'indication de plus forte amplitude est bien isolée.

Pour parer au risque d'intégrer plusieurs indications dans la même région, nous avons défini un critère d'homogénéité supplémentaire qui est lié à l'orientation de l'indication de plus forte amplitude.

### b.2. Critère d'homogénéité lié à l'orientation

Les différentes indications liées à un même défaut ont généralement des inclinaisons différentes. Il est possible d'utiliser un indicateur d'homogénéité supplémentaire liée à l'orientation dans l'algorithme de croissance de région.

Pour ce faire, il nous faut d'abord définir l'orientation de l'indication de plus forte amplitude. Cette orientation est retrouvée à partir d'un outil que nous avons développé, appelé histogramme d'orientation.

Le principe consiste à associer une normale dite de spécularité à tous les points de la ROI. Cette normale est définie par sa direction qui est la normale de l'indication à laquelle appartient le point et sa norme qui est l'amplitude TFM au point considéré. L'histogramme d'orientation associe à chaque orientation comprise entre  $-\pi/2$  et  $\pi/2$  une amplitude correspondant à la somme des amplitudes TFM de tous les points de la ROI ayant cette orientation.

La normale de spécularité  $\mathbf{n}^P$  pour un point  $P$  est définie comme la sommation des différentes normales théoriques des différents couples émetteur-récepteur  $ij$  pondérés par l'amplitude du signal issue de la matrice FMC  $S$ . Elle est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{n}^P = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (K_{ij}(t_{ij}^{m,P}) + K_{ji}(t_{ij}^{m,P})) \mathbf{n}_{ij}^P \quad (4.13)$$

La norme de ce vecteur est donc égale à l'amplitude TFM au point considéré. S'il existe une indication en ce point, alors la direction du vecteur  $\mathbf{n}^P$  est colinéaire à la normale de l'indication.

L'amplitude de l'histogramme d'orientation  $\mathcal{H}(\mathbf{n})$  pour une normale  $\mathbf{n}$  est alors la somme des amplitudes TFM de tous les points  $P$  de l'image dont la normale  $\mathbf{n}_P$  est colinéaire à  $\mathbf{n}$ .

$$\mathcal{H}(\mathbf{n}) = \sum_P |\mathbf{n}_d^P| \text{ si } \left| \frac{\mathbf{n}^P}{|\mathbf{n}^P|} \cdot \mathbf{n} \right| = 1 \quad (4.14)$$

Dans le cas où plusieurs indications sont présentes dans la pièce, l'histogramme d'orientation présentera plusieurs pics, mais l'amplitude des pics sera maximale à l'orientation de l'indication de plus forte amplitude supposée être un défaut. La normale de ce défaut  $\mathbf{n}_d$  est alors donnée par l'expression suivante :

$$\mathbf{n}_d = \text{argmax}_{\mathbf{n}}(\mathcal{H}(\mathbf{n})) \quad (4.15)$$

Cette méthode suppose toutefois que l'amplitude associée à l'écho réfléchi est très grande devant l'amplitude associée à l'écho de diffraction des extrémités. En effet la diffraction étant omnidirectionnelle, les extrémités du défaut peuvent avoir des vecteurs  $\mathbf{n}_P$  non colinéaires à la normale du défaut.

Une fois l'orientation du défaut trouvée, l'algorithme de croissance de région peut alors être développé en rejetant tous les points dont le vecteur  $\mathbf{n}^P$  n'est pas colinéaire à la normale  $\mathbf{n}_d$ .

Pour illustrer cette approche, nous avons calculé l'histogramme d'orientation sur la même image que précédemment (cf. Fig 4.24 (a)).

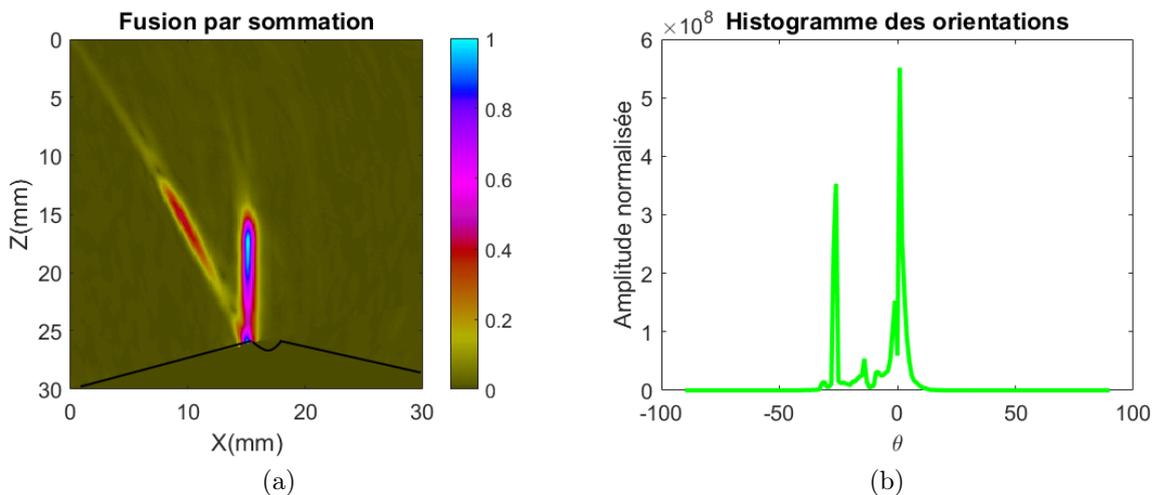


Fig 4.23 – (a) Image TFM issue de la sommation des modes TLL, TLT et TTT (b) Histogramme des orientations des indications présentes dans l'image

On distingue deux pics de forte amplitude, un à  $0^\circ$  et un autre à  $-27^\circ$ . Sous l'hypothèse que l'indication de plus forte amplitude est un défaut, on peut conclure qu'il existe un défaut vertical.

La croissance de région est ensuite réalisée en rejetant tous les points dont l'orientation est différente de  $0^\circ$ . La Fig 4.24 montre que l'indication de plus forte amplitude est encore une fois isolée.

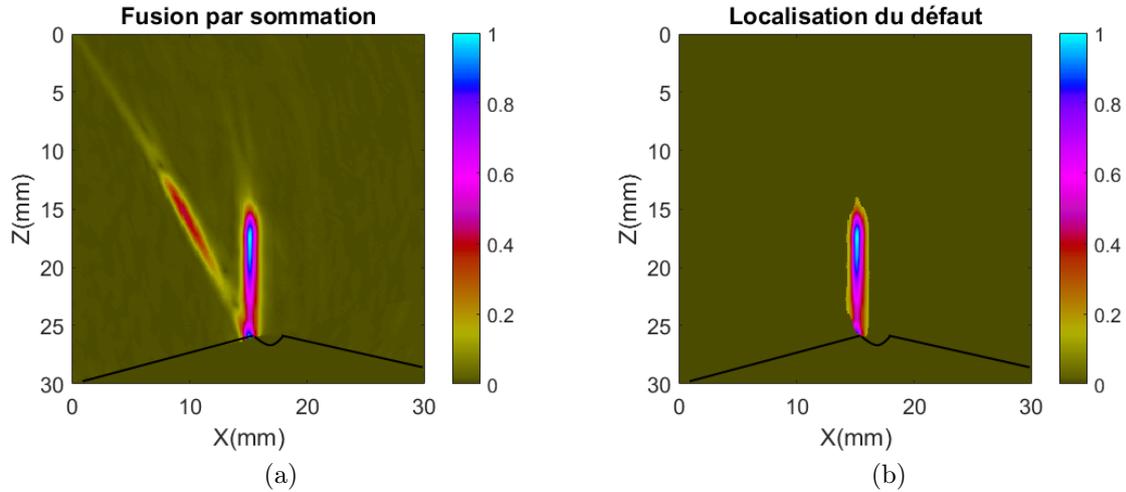


Fig 4.24 – (a) Image issue de la fusion par sommation des modes TLL, TLT et TTT (b) Indication de plus forte amplitude isolée avec le critère d'homogénéité lié à l'orientation

Une fois la position et l'orientation de l'indication de plus forte amplitude déterminée, la sous-matrice liée à ce défaut peut être générée.

#### 4.2.2.3 Génération de la sous-matrice liée au défaut de plus forte amplitude

La sous-matrice du défaut de plus forte amplitude est construite à partir de tous les modes de reconstruction possibles selon l'expression suivante :

$$S_{d,ij}^{spec}(t_{ij}^P) = \sum_m \begin{cases} S_{ij}(t_{ij}^{P,m}) & \text{si } P \in Z_d \text{ et } |\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_{ij}^P| = 1, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.16)$$

où  $M$  est l'ensemble des modes de reconstruction possibles. Avec la condition d'orientation, la sous-matrice ne contiendra que les échos spéculaires. Ceci conduira au filtrage des artefacts liés aux échos spéculaires seuls. En effet, ces derniers sont les plus pénalisants, car ils ont généralement une amplitude plus forte. Par ailleurs, cette restriction permet le filtrage des artefacts sans connaissance à priori du mode à l'origine des artefacts.

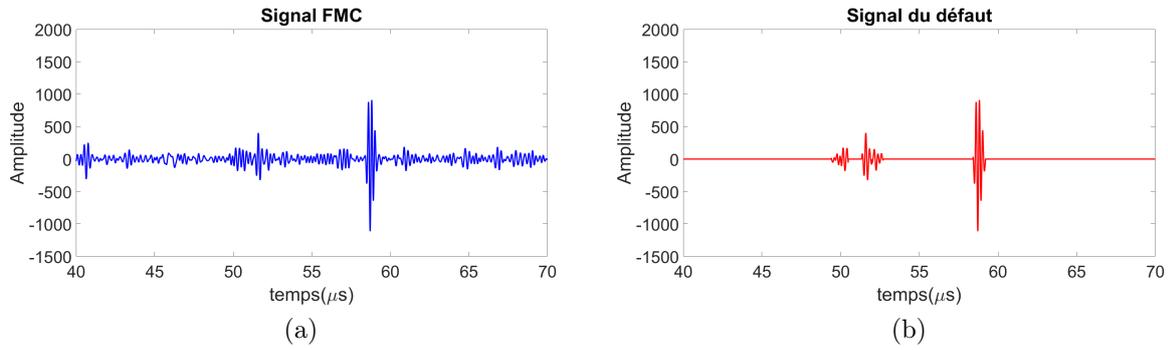


Fig 4.25 – (a) Signal temporel issu de la matrice FMC et (b) Signal temporel associé à un défaut avec les échos issus de tous les modes

Le signal bleu correspond au signal de la matrice FMC contenant tous les échos générés par les différentes interactions et le signal rouge correspond au signal ne contenant que les échos spéculaires associés au défaut dont l'indication est celle de plus forte amplitude.

#### 4.2.2.4 Filtrage de l'artefact

Soit  $Z_d$  la région identifiée à l'étape **b** de la croissance de région, soit celle contenant l'indication d'un défaut. L'algorithme TFM est appliqué aux signaux de la matrice  $S_d^{spec}$  pour tous les points  $P$  n'appartenant pas à la zone  $Z_d$  selon l'expression suivante :

$$I_{K_d^{spec}}^m(P) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N K_{d,ij}^{spec}(t_{ij}^{m,P}) + K_{d,ji}^{spec}(t_{ij}^{m,P}) \right| \text{ si } P \notin Z_d \quad (4.17)$$

où  $K_d^{spec}(t) = S_d^{spec}(t) + jH_d^{spec}(t)$ , où  $H_d^{spec}$  est la transformée de Hilbert de la matrice  $S_d^{spec}$ .

Ce calcul est fait pour tous les modes utilisés lors de la fusion de l'image de départ. Les images résultantes sont fusionnées selon le même principe. Cette image ne contiendra donc que des artefacts de reconstruction. Le filtrage se fait ensuite simplement par soustraction de l'image reconstruite avec la matrice FMC  $S$  et l'image reconstruite avec la matrice  $S_d^{spec}$ .

Dans notre exemple, l'expression (4.17) est calculée pour les modes de reconstruction TLT, TLL et TTT puis leurs images sont fusionnées par sommation. L'image issue de cette fusion est ensuite soustraite de l'image issue de la fusion des images reconstruites à partir de la matrice FMC  $S$ .

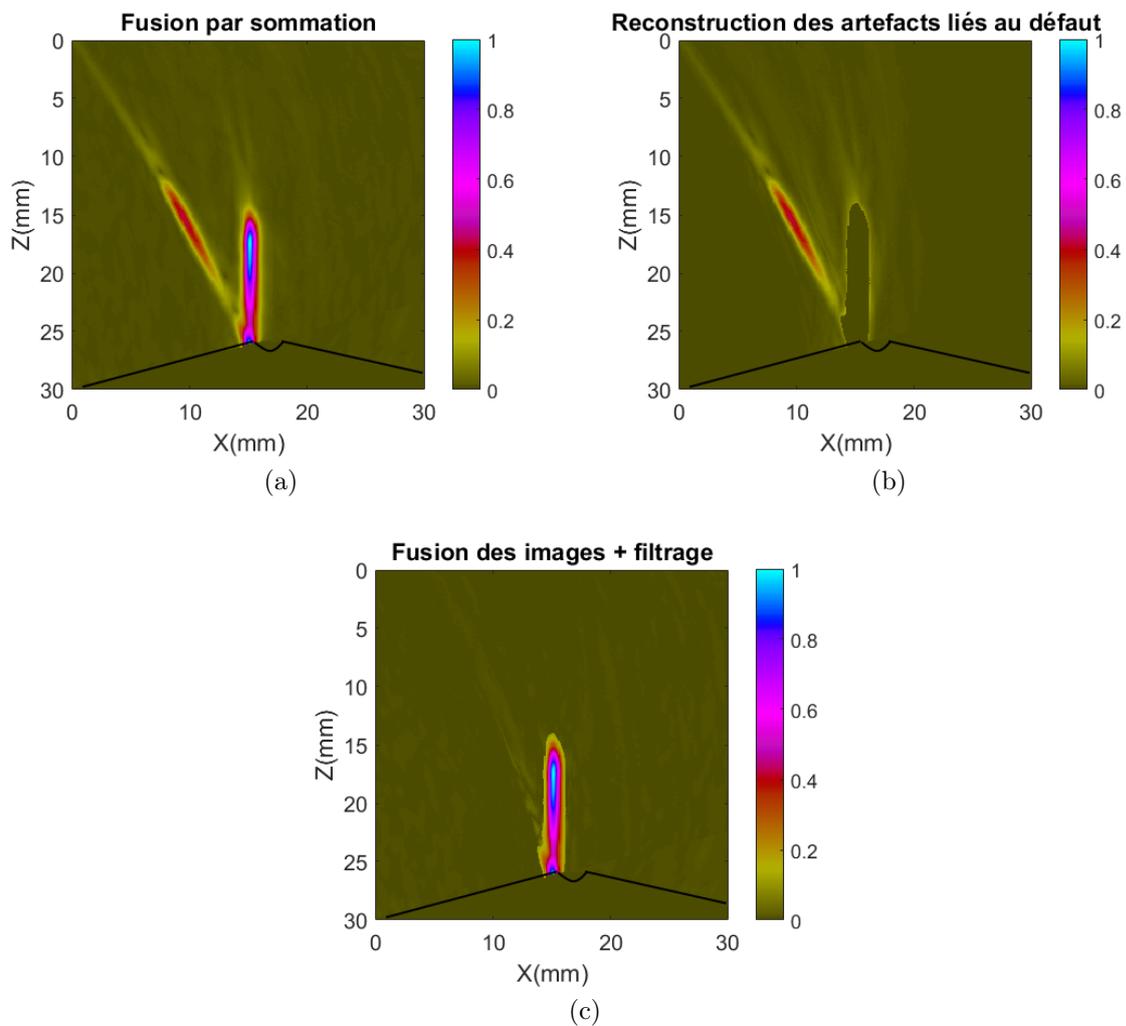


Fig 4.26 – Fusion par sommation des images reconstruites à partir de la matrice (a) FMC  $S$  et (b)  $S_d^{spec}$ . Soustraction des images (a) et (b)

La soustraction des deux images fournit une image avec une seule indication. On peut donc conclure que toutes les autres indications qui étaient présentes dans l'image issue de la fusion sont donc des artefacts liés au défaut et non des réflecteurs.

#### 4.2.2.5 Discussions sur la procédure de filtrage des artefacts

La procédure que nous avons développée permet en résumé :

- de retrouver l'indication liée au défaut à partir de l'hypothèse de maximum d'amplitude TFM,
- de filtrer les artefacts sans connaissance des modes qui en sont à l'origine,
- et d'améliorer le RSB.

## 4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé différentes méthodes de fusion d'images. Ces méthodes peuvent être regroupées en deux grands groupes, les méthodes permettant d'exploiter la complémentarité des images et les méthodes exploitant les similitudes. Et pour

chaque méthode, nous avons distingué une fusion des indications spéculaires obtenues à partir des modes prédits avec l'estimateur SEE, une fusion des indications de diffraction généralement obtenues à partir des modes directs et une fusion de ces deux types d'indications.

A partir de l'analyse des différentes méthodes, nous avons privilégié la fusion par sommation pour les indications spéculaires, avec la possibilité de restriction des images à la zone effective lorsque l'orientation du défaut est supposée connue. Cette méthode s'accompagne cependant d'une augmentation du niveau de bruit avec le nombre de modes. Par conséquent, la sélection des modes par maximum d'amplitude SEE est la plus adaptée. Par ailleurs, étant donné le risque de présence d'artefacts, les images sont fusionnées sans normalisation et la sommation est suivie d'un filtrage des artefacts si nécessaire. Une procédure de fusion basée sur le principe de la méthode MTE a ainsi été développée. Elle repose sur une décomposition du signal et sur des méthodes de traitement d'images permettant de localiser spatialement et temporellement l'écho d'un défaut et de filtrer les artefacts qui lui sont associés.

Pour la fusion des indications de diffraction, la fusion par corrélation sur des images normalisées allie la sensibilité des ondes L et la résolution des ondes T pour retrouver les extrémités du défaut avec une grande résolution tout en atténuant les potentiels artefacts. La difficulté réside dans la prédiction des modes sensibles aux échos de diffraction. Pour le type de défaut étudié, les modes directs sont généralement sensibles à la diffraction mais, à priori, tous les modes autres pourront être exploités pour la fusion des indications de diffraction comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

Les méthodes de fusion permettent donc en résumé de condenser toute l'information liée au défaut et facilitent l'interprétation des images. Le défaut peut alors être caractérisé en terme de position. L'estimation des autres caractéristiques telles que l'orientation et la dimension fera l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre 5

## Caractérisation des défauts plans

### Contents

---

<b>5.1</b>	<b>Détermination de la résolution des images TFM . . . . .</b>	<b>105</b>
<b>5.2</b>	<b>Estimation de l'orientation des défauts plans . . . . .</b>	<b>105</b>
5.2.1	Estimation de l'orientation d'un défaut à partir des signaux FMC : histogramme d'orientation . . . . .	106
5.2.2	Estimation de l'orientation d'un défaut à partir de méthodes de traitement d'images . . . . .	107
5.2.3	Étude comparative des différentes méthodes sur des données si- mulées . . . . .	109
<b>5.3</b>	<b>Dimensionnement des défauts plans . . . . .</b>	<b>110</b>
5.3.1	Dimensionnement des défauts plans à partir des échos de diffraction	111
5.3.2	Dimensionnement des défauts plans à partir de l'écho spéculaire : état de l'art . . . . .	116
5.3.3	IAC-sizing . . . . .	117
<b>5.4</b>	<b>Application sur des données expérimentales . . . . .</b>	<b>121</b>
5.4.1	Dimensionnement via la diffraction . . . . .	121
5.4.2	Dimensionnement via la réflexion spéculaire . . . . .	122
5.4.3	Discussion . . . . .	123

---

## Introduction

La caractérisation d'un défaut présent dans une pièce est une des étapes les plus importantes du contrôle non destructif. Elle permet de prendre une décision quant à la mise au rebut, la réparation ou la conservation de la pièce. La prise de décision dépendra de la nature et des dimensions du défaut. Par conséquent les méthodes de caractérisation doivent être robustes et fiables.

L'imagerie TFM est particulièrement intéressante pour la caractérisation des défauts, en particulier grâce à la fourniture d'une indication spéculaire qui, sous certaines conditions, peut fournir une grande quantité d'informations : position, nature, orientation et dimension.

Cependant la littérature sur la caractérisation des défauts est encore peu fournie en imagerie TFM. La plupart des méthodes de dimensionnement existantes ont été développées pour le contrôle conventionnel avec un capteur monoélément. Elles se décomposent en trois principales méthodes. Les méthodes basées sur la comparaison d'amplitude sont utilisées pour le dimensionnement des défauts dont la dimension est inférieure à la taille du faisceau. Elles consistent à comparer l'écho maximal du signal du défaut avec les échos d'un ensemble de réflecteurs de références (méthode AVG [53]). Les méthodes basées sur la chute d'amplitude, qui s'appliquent pour les grands défauts consistent à balayer mécaniquement ou électroniquement le faisceau ultrasonore le long du défaut et à estimer sa dimension lorsque l'amplitude du signal décroît d'un nombre de décibels fixé, les plus courantes sont la méthode à -6dB et la méthode à -20dB [54]. Enfin, il y a les méthodes qui exploitent les échos de diffraction comme la méthode TOFD [55–58] qui consistent à estimer la dimension d'un défaut plan à partir de l'écart de temps de vol entre les deux échos de diffraction considérés comme apparaissant aux extrémités du défaut observé.

Ces différentes méthodes ont ensuite été étendues aux techniques d'imagerie conventionnelle (Bscan, Sscan...) faisant intervenir des capteurs multi-éléments [59] avant d'être transposées à l'imagerie TFM. La méthode TOFD renommée DTFM pour *Diffraction TFM* [60] est une méthode basée sur le principe de l'acquisition TOFD utilisant deux capteurs pour l'acquisition des données. Cette configuration est favorable à la diffraction et permet de dimensionner un défaut plan à partir de ses indications de diffraction. Cette méthode n'a cependant pas été exploitée dans le cadre de cette thèse où un même capteur est utilisé en émission-réception. La méthode à -6dB en imagerie TFM [61] [62] pour le dimensionnement des défauts a également fourni des résultats intéressants pour les petits défauts. D'autres méthodes comme celle exploitant la matrice de scattering [63, 64], des méthodes de classification qui exploitent des bases de données peuvent être utilisées.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes essentiellement intéressés au dimensionnement des défauts plans dont la taille est supérieure à la résolution des images. Nous avons exploité la méthode de dimensionnement via les indications de diffraction et avons développé une méthode par chute d'amplitude, qui comme nous le verrons, nécessite la connaissance préalable de certaines caractéristiques du défaut telle que son orientation. Nous avons donc développé des algorithmes d'estimation de l'orientation du défaut.

Nous allons dans un premier temps définir une méthode de détermination de la résolution des images TFM pour préciser les conditions d'applicabilité des méthodes de caractérisation que nous allons développer. Dans un second temps, nous présenterons les méthodes développées pour l'estimation de l'orientation d'un défaut plan avant d'aborder le dimensionnement. Les méthodes seront validées sur des données simulées où tous les paramètres sont parfaitement maîtrisés. Par conséquent, toute erreur sera inhérente à la méthode. Des mises en œuvre de ces méthodes sur des données expérimentales seront présentées à la fin du chapitre.

## 5.1 Détermination de la résolution des images TFM

La résolution d'une image TFM est la dimension en deçà de laquelle nos méthodes de caractérisation ne peuvent plus s'appliquer.

Dans le cas d'un capteur mono-élément d'ouverture circulaire, la résolution latérale peut être calculée de manière analytique. Pour un capteur de diamètre  $D$  focalisé en émission-réception à une profondeur  $F$ , la taille  $d$  de la tâche focale est donnée pour une longueur d'onde  $\lambda$  par l'expression suivante :

$$d = \frac{\lambda F}{D} \quad (5.1)$$

Cette relation a ensuite été étendue empiriquement aux capteurs multi-éléments. Mais dans le cas de l'imagerie TFM, du fait de la complexité de la focalisation qui peut se faire avec des parcours comprenant des rebonds aux interfaces et des conversions de modes de propagation, cette relation ne peut être utilisée comme approximation.

Pour déterminer la résolution, nous allons donc effectuer un calcul TFM à partir du logiciel CIVA pour un défaut volumique de diamètre très petit devant la longueur d'onde. La résolution est ensuite déduite à partir de la largeur de la tâche reconstruite à -6dB.

## 5.2 Estimation de l'orientation des défauts plans

Pour estimer l'orientation d'un défaut plan, nous avons défini deux types de méthodes : les méthodes basées sur les signaux d'acquisition [60] [42] et les méthodes basées sur les méthodes de traitement d'images.

Dans le premier cas, les méthodes exploitent l'amplitude du signal ainsi que les directions locales incidentes et réfléchies. Dans [60], la méthode *VTFM* consiste à subdiviser le capteur en un ensemble de sous-ouvertures et à chaque sous-ouverture est associée une image TFM. L'orientation de l'indication présente dans chaque image est ensuite calculée. La pertinence de la méthode dépend cependant de la taille des ouvertures. La méthode développée dans [42] consiste à estimer l'orientation nominale du point central du défaut à partir des directions locales et incidentes. La détermination de l'orientation à partir d'un seul point peut toutefois se révéler non robuste. Nous avons donc développé une méthode appelée l'histogramme d'orientation qui exploite les mêmes informations, soient

le signal d'acquisition et les directions locales, mais a l'avantage d'être plus robuste et non paramétrique.

Dans le second cas, les méthodes telles que la transformée de Hough [65] et la méthode de régression linéaire seront utilisées afin de retrouver l'orientation du défaut. Chaque méthode sera décrite et avantages et inconvénients considérés.

### 5.2.1 Estimation de l'orientation d'un défaut à partir des signaux FMC : histogramme d'orientation

L'histogramme d'orientation introduit au chapitre 4 est un outil développé pour estimer l'orientation des indications présentes dans une image TFM. Pour rappel, il est basé sur l'exploitation des signaux et des normales théoriques pour chaque couple d'éléments. Il consiste à estimer pour chaque point de la zone de reconstruction un vecteur dont la norme est l'amplitude TFM et dont la direction est obtenue par la sommation des normales théoriques de chaque couple d'éléments, pondérées par les amplitudes des signaux mesurées aux temps de vol adéquats. L'histogramme associe à chaque angle la somme de l'amplitude TFM de tous les pixels ayant la même orientation.

Tous les pixels appartenant au défaut ayant théoriquement la même orientation, l'histogramme présentera donc un pic maximal à l'angle correspondant à l'orientation du défaut.

Cette méthode suppose toutefois que la somme des amplitudes TFM associée à la réflexion spéculaire est très grande devant celle associée à la diffraction de l'onde aux extrémités. En effet, la diffraction étant omnidirectionnelle, les extrémités du défaut peuvent avoir des orientations théoriques différentes de celle du défaut. Par conséquent, plus la longueur du défaut sera importante, plus l'orientation estimée sera proche de l'orientation réelle du défaut.

Nous avons appliqué cet algorithme sur une image TFM obtenue à partir de données simulées. Le défaut est vertical, c'est-à-dire d'orientation nulle et reconstruit suivant le mode TTT.

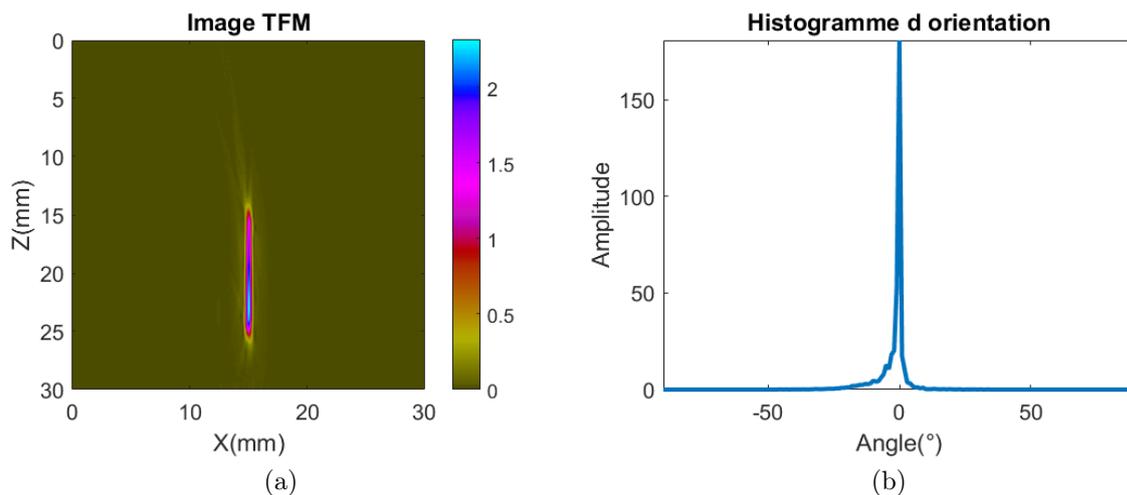


Fig 5.1 – (a) Image TFM reconstruite suivant le mode TTT et (b) histogramme d'orientation associée à l'image

Le pic maximal de l'histogramme est à  $0^\circ$ , qui est l'orientation réelle du défaut.

## 5.2.2 Estimation de l'orientation d'un défaut à partir de méthodes de traitement d'images

Les défauts plans ayant une géométrie simple, ils sont assimilables à une ligne et peuvent être vus comme un objet dans une image. Les méthodes de traitement d'images peuvent donc s'appliquer. Nous avons considéré deux méthodes pour retrouver l'orientation d'un défaut plan : la transformée de Hough et la régression linéaire. Le principe de chaque méthode est décrit et chacune a été appliquée sur des données simulées.

### 5.2.2.1 Estimation de l'orientation basée sur la transformée de Hough

La transformée de Hough est un algorithme de détection et de caractérisation d'objets très efficace lorsque les objets peuvent être décrits géométriquement (droite, cercle, ellipse). Dans le cas de l'image TFM, où le défaut a une résolution donnée, nous allons la représenter sous forme de ligne en prenant, par exemple en chaque ligne ou colonne, le point de plus forte amplitude.

Chacun des points ainsi identifiés avec ses coordonnées  $(x, z)$  va alors permettre une projection dans un plan (le plan transformé) des coordonnées polaires de toutes les droites passant par ce point. Les équations des droites passant en chacun de ces points  $(x, z)$  sont représentées par l'équation :

$$\rho = x \cos(\theta) + z \sin(\theta) \quad (5.2)$$

où  $\theta$  est l'angle de la droite et  $\rho$  la distance de la droite à l'origine. Au point  $(x, y)$ , on fait alors correspondre une courbe  $[\theta, \rho]$ , où  $\theta$  prend toutes les valeurs possibles de 0 à  $2\pi$ . Une fois ce qui précède appliqué à tous les points du défaut, les points  $(\theta, \rho)$  de l'espace transformé les plus souvent adressés sont les coordonnées des droites les plus représentées dans l'image de départ.

En pratique, l'espace transformé de Hough est représenté par une image, dont les abscisses sont les angles  $\theta$  et les ordonnées les valeurs de  $\rho$ . L'intensité pour un point de coordonnées  $(\theta, \rho)$  est le nombre d'occurrences de  $(\theta, \rho)$  provenant de l'image d'origine. Ainsi, l'orientation du défaut correspond au point de l'image ayant le nombre maximal d'occurrences. Plus le défaut est grand, plus le nombre d'occurrences est importante et meilleure est la précision de la méthode.

Nous avons appliqué la transformée de Hough à la même image qu'au paragraphe précédent.

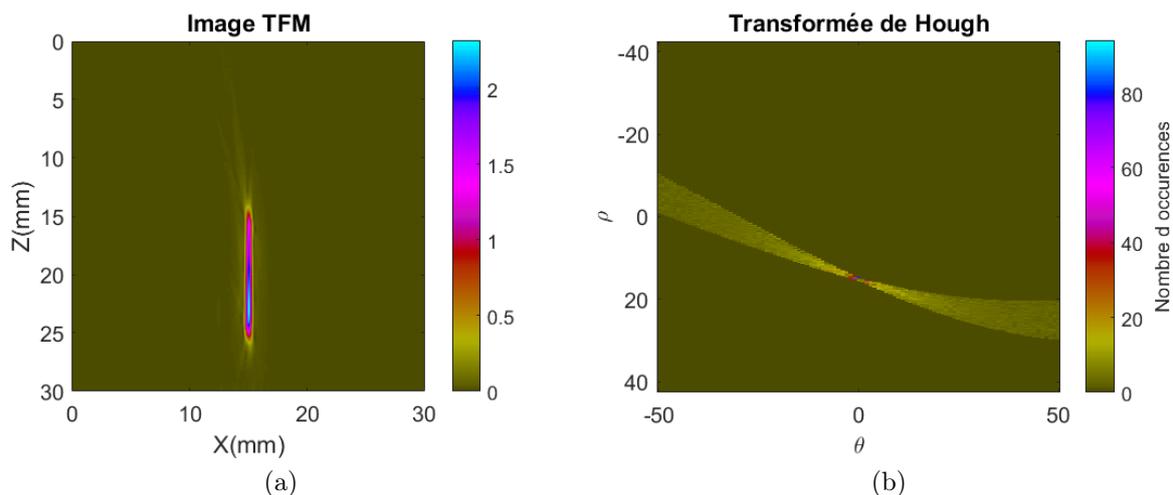


Fig 5.2 – (a) Image TFM reconstruite avec l'enveloppe du signal, (b) Transformée de Hough de l'image

Le nombre d'occurrences est maximal à  $0^\circ$ , qui est l'orientation du défaut.

### 5.2.2.2 Estimation de l'orientation basée sur la régression linéaire

Cette méthode consiste à extraire les coordonnées de tous les points appartenant au défaut et d'en déduire par une méthode de régression linéaire l'équation de la droite  $z = ax + b$  formée par l'ajustement affine de ces points. On peut alors obtenir l'inclinaison du défaut à partir du coefficient directeur de la droite  $a$  via la relation suivante :

$$\theta_d = \tan^{-1}(a) \quad (5.3)$$

Pour considérer qu'un point appartient à un défaut, on applique l'algorithme de croissance de région qui nécessite donc un seuillage

La Fig 5.3 montre le résultat de la méthode de régression appliquée à une image TFM.

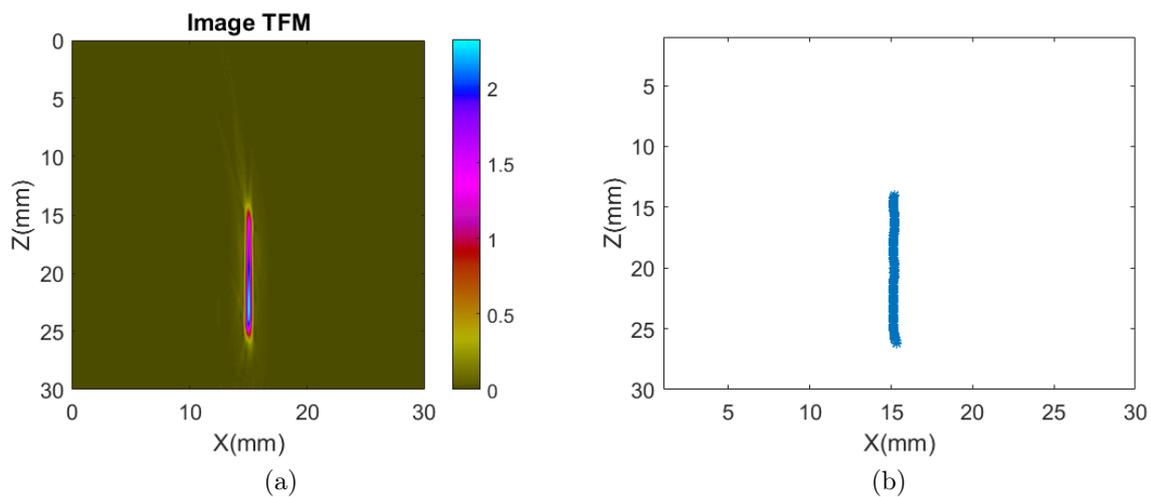


Fig 5.3 – (a) Image TFM, (b) Extraction de la position des maxima d’amplitude à chaque ligne à partir de l’image TFM

Le coefficient directeur de la droite obtenue par régression linéaire estime l’orientation du défaut à  $0^\circ$ , qui est l’orientation réelle du défaut.

### 5.2.2.3 Remarque

Ces différentes méthodes peuvent s’appliquer sur les images reconstruites à partir d’un seul mode ou sur les images issues de la fusion des modes.

Pour comparer l’efficacité des méthodes en fonction de la hauteur des défauts, nous avons réalisé différents tests de comparaison entre les différentes méthodes d’estimation de l’orientation sur des données simulées.

## 5.2.3 Étude comparative des différentes méthodes sur des données simulées

Les trois méthodes précédemment décrites ont été appliquées sur plusieurs défauts de hauteurs différentes. La configuration considérée est une pièce en acier. Le capteur utilisé est un capteur de 64 éléments émettant à une fréquence centrale de 5MHz.

Dans un premier temps, les défauts considérés sont verticaux et leur profil reconstruit par le mode de reconstruction TTT.

La résolution des images TFM pour cette configuration a été déterminée pour ce mode ; elle est de 1,6mm. On ne considérera donc que des défauts de hauteur supérieure à cette valeur.

Les résultats d’estimation d’orientation pour des défauts compris entre 2mm et 10mm sont reportés dans le tableau ci-dessous :

Hauteur	Transformée de Hough	Régression linéaire	Histogramme d'orientation
3,1 $\lambda$ (2mm)	×	0°	0°
4,7 $\lambda$ (3mm)	-2°	0°	0°
6,25 $\lambda$ (4mm)	0°	0°	0°
7,5 $\lambda$ (5mm)	0°	0°	0°
15 $\lambda$ (10mm)	0°	0°	0°

Tableau 5.1 – Estimation de l'orientation d'un défaut plan orienté de 0° en fonction de sa longueur pour trois différentes méthodes

Lorsque l'orientation ne peut être déterminée, le symbole × est mis à la case correspondante. On remarque que l'orientation mesurée est égale à l'orientation réelle sauf dans deux cas seulement.

Nous avons ensuite considéré des défauts inclinés de -10° par rapport à la verticale, le mode TTT est toujours utilisé pour reconstruire les défauts. Les résultats sont reportés dans le tableau 5.2.

Hauteur	Transformée de Hough	Régression linéaire	Histogramme d'orientation
3,1 $\lambda$ (2mm)	×	-12°	-5°
4,7 $\lambda$ (3mm)	-11°	-10°	-9°
6,25 $\lambda$ (4mm)	10°	-10°	-9°
7,5 $\lambda$ (5mm)	-10°	-10°	-9°
15 $\lambda$ (10mm)	-10°	-10°	-10°

Tableau 5.2 – Estimation de l'orientation d'un défaut plan orienté de -10° en fonction de sa longueur pour trois différentes méthodes

L'orientation mesurée est très proche de l'orientation réelle et ce quelle que soit la méthode à partir de 3mm de hauteur. L'échec à 2mm peut s'expliquer par la présence de la diffraction qui n'est plus négligeable et est d'orientation différente.

#### *Remarque*

Pour toutes les méthodes on note une convergence vers l'orientation du défaut lorsque la hauteur du défaut augmente. Les trois méthodes restent donc fiables tant que la hauteur du défaut est grande devant la longueur d'onde.

### 5.3 Dimensionnement des défauts plans

Pour dimensionner un défaut plan à partir d'une image TFM, deux informations sont disponibles : les indications de diffraction et l'indication spéculaire du profil. Dans le premier cas, une méthode de dimensionnement de type TOFD peut être appliquée alors que dans le second cas nous montrerons que les méthodes disponibles dans la littérature ne permettent pas un dimensionnement avec une grande fiabilité. Nous avons donc développé une méthode appelée IAC-sizing (Imaging amplitude compensation).

### 5.3.1 Dimensionnement des défauts plans à partir des échos de diffraction

Le dimensionnement à partir des indications de diffraction consiste à estimer l'écart entre la position des deux indications de diffraction. Cette méthode fournit des mesures fiables mais nécessite d'avoir des indications de diffraction d'amplitude supérieure au niveau de bruit et ayant une résolution suffisante pour distinguer spatialement les deux indications.

La difficulté principale de cette méthode est la caractère non prédictible de la sensibilité du défaut à la diffraction. Dans le chapitre 4, nous avons posé qu'elle est généralement retrouvée à partir des modes directs. Mais du fait de son caractère omnidirectionnel, on peut supposer que tous les modes y sont sensibles, on peut donc la retrouver à partir des modes écho de coin. Nous montrerons qu'il est également possible sous certaines conditions de retrouver la composante de diffraction noyée dans la composante spéculaire à partir de modes aptes à reconstruire le défaut de manière spéculaire. Nous montrerons l'exploitation de la diffraction suivant les modes directs et suivant les modes écho de coin.

Pour illustrer les différentes méthodes de dimensionnement, nous exploiterons les images de la configuration simulée décrite au chapitre 4 (cf. Fig 4.2).

#### 5.3.1.1 Diffraction en modes directs

Le défaut est reconstruit suivant le mode LL puis suivant le mode TT. Les deux modes sont ensuite fusionnés par corrélation. La Fig 5.4 montre l'image fusionnée et sa courbe échodynamique.

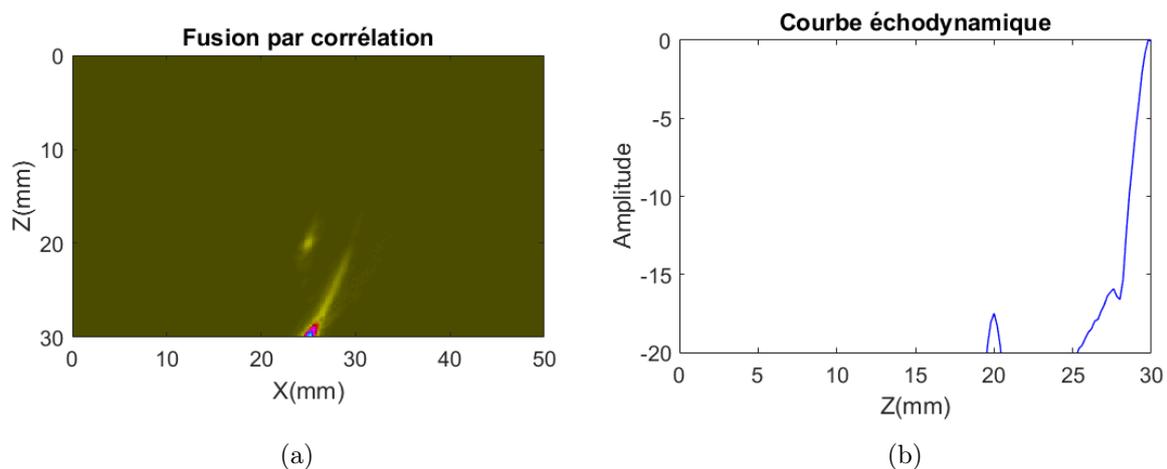


Fig 5.4 – (a) Fusion par corrélation des modes directs, (b) courbe échodynamique de (a) suivant l'axe Z

On relève deux maxima d'amplitude en  $z=20\text{mm}$  et en  $z=30\text{mm}$ . La hauteur du défaut est correctement déterminée.

Nous allons maintenant présenter un dimensionnement via les indications de diffraction à partir des modes écho de coin.

### 5.3.1.2 Diffraction en modes écho de coin

Comme pour les modes directs, la diffraction peut être retrouvée via les modes écho de coin. Cependant, pour le type de défaut étudié, ces modes présentent des indications spéculaires qui peuvent masquer l'indication de diffraction après fusion. Pour retrouver des indications de diffraction dénuées d'indications spéculaires, il est possible de fusionner par corrélation tous les modes autres que ceux prédits par l'estimateur SEE. En effet, ce dernier prédit les principales contributions en mode spéculaire, on peut supposer les modes de reconstruction non retenus contribuent principalement sur des phénomènes de diffraction.

Pour le défaut considéré, les modes aptes à reconstruire le profil du défaut sont les modes LLL, LLT, TLL et TTT. La fusion par corrélation est alors réalisée pour les modes LTL, LTT, TLT et TTL. La Fig 5.5 montre l'image issue de la fusion par corrélation et la courbe échodynamique.

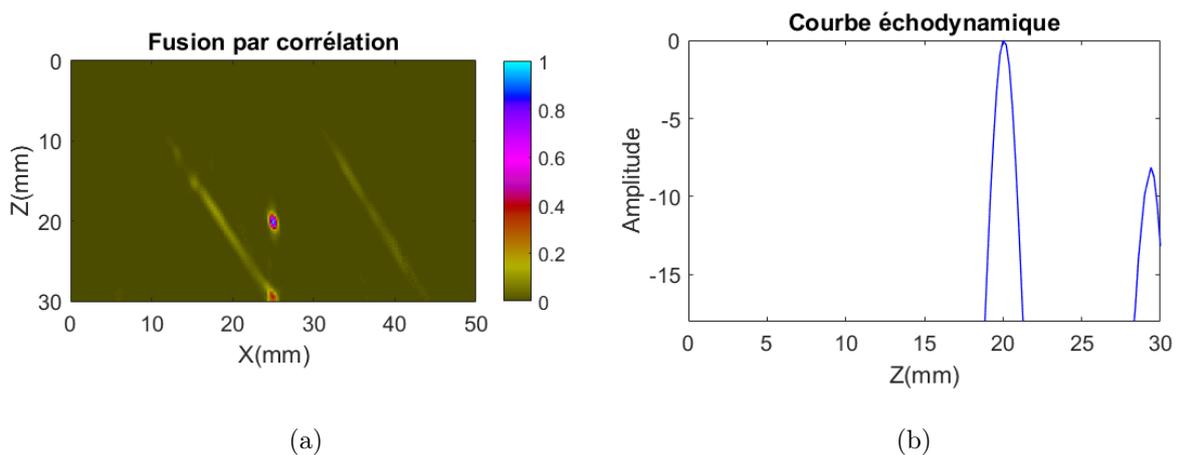


Fig 5.5 – (a) Image issue de la fusion par corrélation des images TFM LTL, LTT, TLT et TTL, (b) courbe échodynamique selon l'axe Z

La diffraction supérieure est bien retrouvée à  $z = 20\text{mm}$ , mais les artefacts ne sont pas suffisamment atténués. En effet dans le cas présent, certains artefacts reconstruits à partir de modes différents sont situés aux mêmes positions.

Pour mieux atténuer ces artefacts, il est possible de reconstruire les images TFM à partir de la matrice FMC filtrée de la composante spéculaire du défaut. Cette méthode n'est cependant applicable que lorsque l'information de la position et de l'orientation du défaut est connue à partir des indications spéculaires.

Cette décomposition est celle réalisée au chapitre 4 pour filtrer les artefacts de reconstruction. Notons toutefois que cette décomposition n'est possible que lorsque la diffraction et la réflexion spéculaire sont temporellement bien distinctes. Dans ce cas, les indications de diffraction pourront alors être retrouvées en construisant les images TFM à partir de

la matrice  $S_d^{diff}$  obtenue à partir de la relation suivante :

$$S_d^{diff}(t) = S(t) - S_d^{spec}(t) \quad (5.4)$$

où  $S(t)$  est le signal d'acquisition,  $S_d^{spec}(t)$  renferme l'ensemble des échos spéculaires liés au défaut pour un couple d'éléments.

La Fig 5.6 montre le résultat de la fusion par corrélation des quatre images écho de coin reconstruites à partir de la matrice de diffraction. La courbe échodynamique montre un pic d'amplitude en  $z = 20\text{mm}$ .

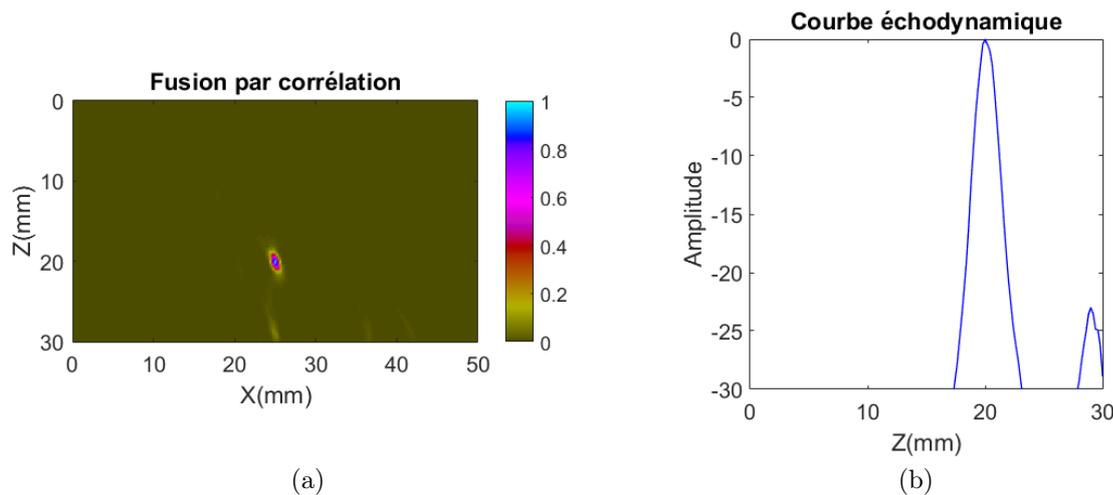


Fig 5.6 – (a) Image issue de la fusion par corrélation des images reconstruites TFM à partir de la matrice de diffraction, (b) Courbe échodynamique selon l'axe Z

Le filtrage des indications spéculaires des signaux peut donc permettre d'atténuer les artefacts pour améliorer la détection des échos de diffraction.

### 5.3.1.3 Diffraction issue des modes sensibles à la réflexion spéculaire

La diffraction peut aussi être retrouvée sous certaines conditions à partir des modes aptes à reconstruire le profil du défaut de manière spéculaire. On pose l'hypothèse qu'il existe toujours une composante de diffraction noyée dans la composante spéculaire.

Pour isoler cette diffraction, nous avons développé un algorithme qui permet de favoriser la composante de diffraction en présence de la réflexion spéculaire. L'atténuation consiste à modifier l'algorithme TFM en pondérant l'amplitude du signal pour chaque couple d'éléments par une fonction dépendant de l'angle entre la normale théorique (cf. paragraphe 3.1) dudit couple et la normale du défaut.

Soit  $\theta_{ij}$  l'angle entre la normale théorique  $\mathbf{n}_{ij}$  et la normale du défaut  $\mathbf{n}$  pour un couple d'élément  $ij$  au point  $P$ , la fonction de pondération que nous avons définie est une fonction gaussienne de  $\theta_{ij}$ , de moyenne nulle et d'écart type  $\sigma$ .

L'algorithme d'atténuation de la réflexion spéculaire que nous avons désigné sous l'acronyme SA-TFM (Specular Attenuation) est donné par l'expression suivante :

$$I_{diff}^m(P) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (K_{ij}(t_{ij}^{m,P}) + K_{ji}(t_{ij}^{m,P})) \times (1 - f(\theta_{ij})) \right| \quad (5.5)$$

où

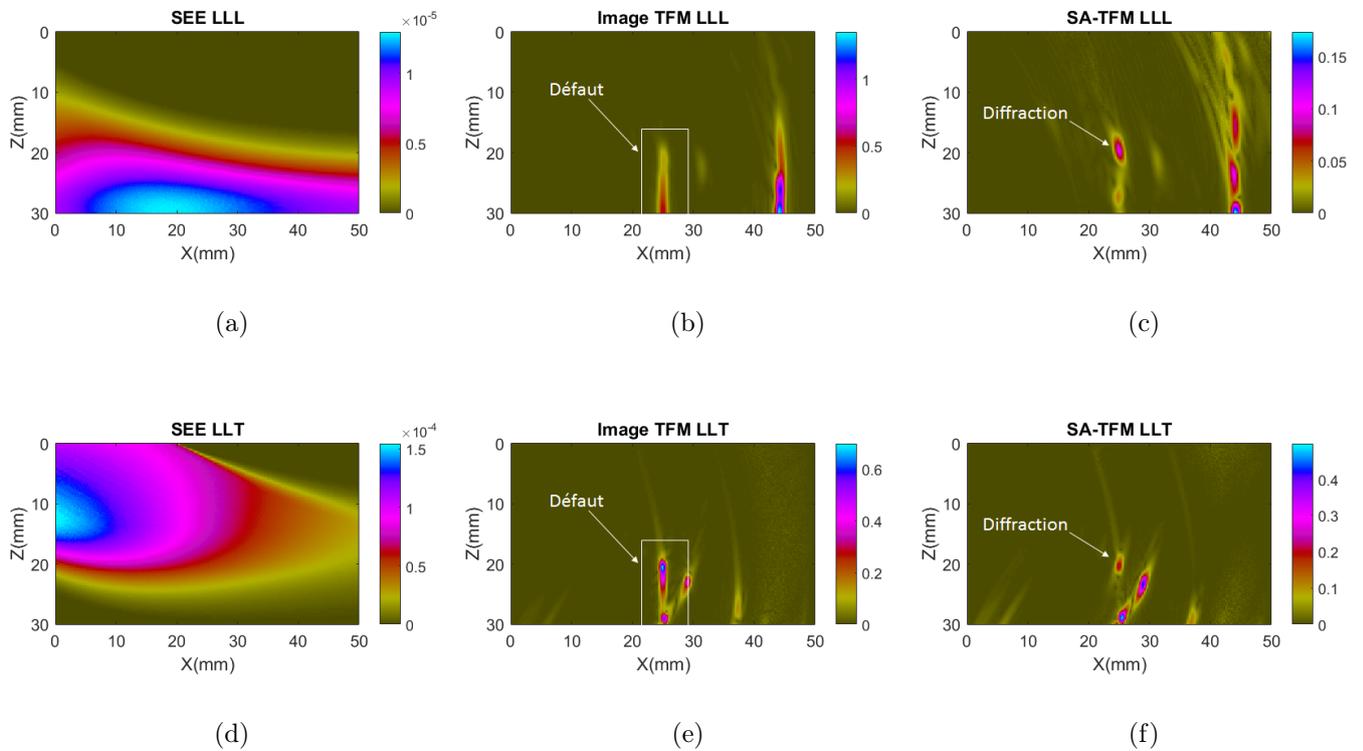
$$f(\theta_{ij}) = e^{-\frac{\theta_{ij}^2}{2\sigma^2}} \quad (5.6)$$

avec  $\theta_{ij} = \cos^{-1}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_{ij}^P)$

Cet algorithme permet d'atténuer les contributions aux petits angles, c'est-à-dire la réflexion spéculaire, ce qui se traduit par une amplification de la diffraction.

Cette séparation n'est cependant possible que lorsque la diffraction recueillie en dehors des trajets spéculaires n'est pas nulle et est supérieure au bruit. Elle sera d'amplitude d'autant plus importante que l'extrémité du défaut se trouve dans une zone où la réflexion spéculaire est minimale, c'est-à-dire où l'amplitude de l'estimateur SEE est minimale. En complément de la SA-TFM, une méthode permettant d'atténuer la composante de diffraction a également été développée. Cette méthode est décrite et son intérêt présenté en annexe D.

La Fig 5.7 montre la cartographie SEE, l'image TFM et l'image SA-TFM pour les modes LLL, LLT et TTT.



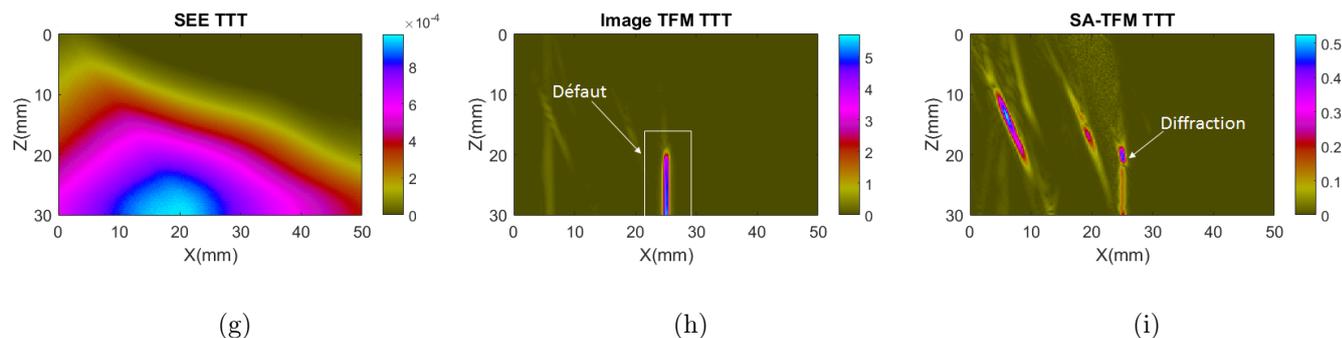


Fig 5.7 – Cartographie SEE, image TFM et image SA-TFM du mode (a) LLL, (b) LLT et (c) du mode TTT

La SA-TFM a permis de retrouver la diffraction supérieure qui était masquée par l'indication spéculaire, mais pas la diffraction inférieure pour les modes LLL et TTT. Ceci s'explique par le fait que l'algorithme est surtout pertinent dans la région où le phénomène spéculaire n'est pas prépondérant. Il est donc d'autant plus pertinent que les extrémités des défauts sont éloignés du fond de pièce où l'amplitude SEE est maximale pour ces deux modes.

La Fig 5.8 montre l'image issue de la fusion par corrélation des trois images.

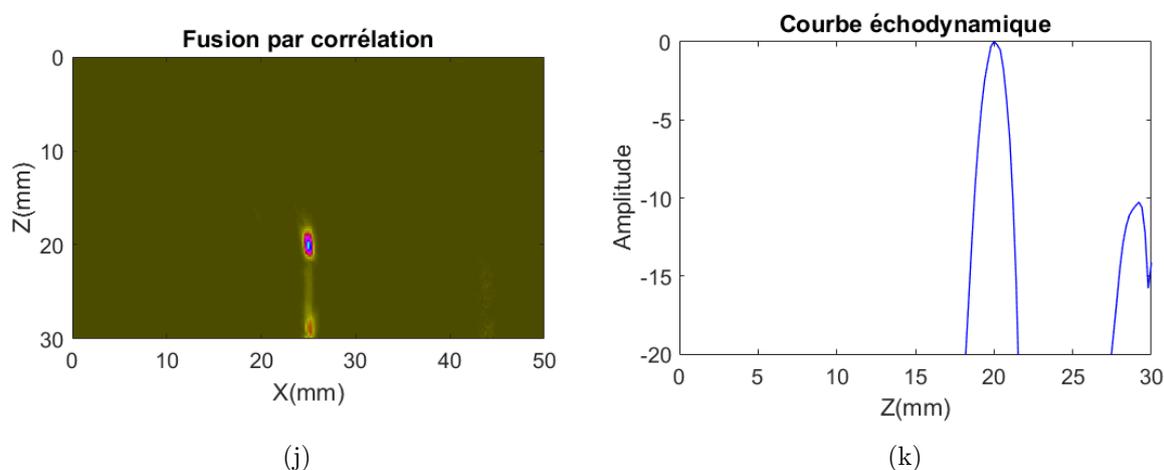


Fig 5.8 – Image issue de la fusion par corrélation et courbe échodynamique associée

La courbe échodynamique présente un pic d'amplitude à  $z = 20\text{mm}$ , soit à l'extrémité du défaut.

#### 5.3.1.4 Conclusions sur le dimensionnement à partir des échos de diffraction

Le dimensionnement via les indications de diffraction est une méthode fiable, car l'amplitude de diffraction est maximale aux extrémités. En outre, contrairement à la réflexion spéculaire, la diffraction n'est pas très sensible à l'orientation du défaut ; elle peut donc se retrouver dans un grand nombre de modes de reconstruction. Nous avons montré qu'elle peut se retrouver dans tous les modes de reconstruction, aussi bien les

modes directs à partir desquels elle est généralement exploitée qu'à partir des modes écho de coin. Nous avons donc montré que la diffraction peut être retrouvée à partir des modes écho de coin via la fusion par corrélation et via le filtre des échos spéculaires.

Toutes ces méthodes ne sont cependant intéressantes que si le défaut présente une arête sensible à la diffraction et si les deux indications de diffraction sont spatialement dissociées. Dans le cas contraire, il est possible de dimensionner un défaut plan à partir de son indication spéculaire.

### 5.3.2 Dimensionnement des défauts plans à partir de l'écho spéculaire : état de l'art

Dans la littérature, le dimensionnement via l'indication spéculaire est réalisée par une chute à -6dB [61, 62]. Cette méthode peut cependant conduire à des erreurs de dimensionnement. Pour comprendre les limites de la méthode, nous allons rappeler son principe en contrôle conventionnel.

#### 5.3.2.1 Méthode à -6dB en contrôle conventionnel

La méthode à -6dB en contrôle conventionnel consiste à déplacer un capteur le long du défaut et à observer la variation de l'amplitude reçue par le capteur. Pour faciliter la compréhension de la méthode, nous allons considérer un défaut parallèle au capteur.

Lorsque tout le faisceau est au-dessus du défaut, le signal incident subit une réflexion totale et lorsque seule la moitié du faisceau est au-dessus du défaut, l'amplitude réfléchie décroît de moitié, soit de six décibels (cf. Fig 5.9), d'où le nom de la méthode.

Cette méthode repose toutefois sur une hypothèse d'invariance du champ le long du défaut. La décroissance de l'amplitude du champ ne doit être liée qu'au défaut.

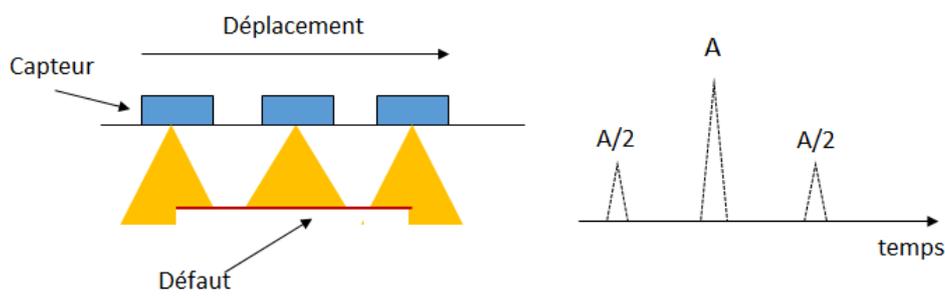


Fig 5.9 – Principe de la méthode de chute à -6dB

Cette méthode a été transposée à l'imagerie TFM de manière empirique selon le principe que nous allons décrire dans le paragraphe suivant.

#### 5.3.2.2 Méthode à -6dB en imagerie TFM

La méthode à -6dB en imagerie TFM [61] [62] consiste à fixer les limites du défaut aux positions où l'amplitude maximale TFM décroît de moitié (cf 5.10). La seule différence est que l'image TFM est calculée en statique, c'est-à-dire sans déplacement du capteur.

L'ouverture de capteur multi-éléments doit alors être suffisante pour reconstruire tout le défaut de manière spéculaire.

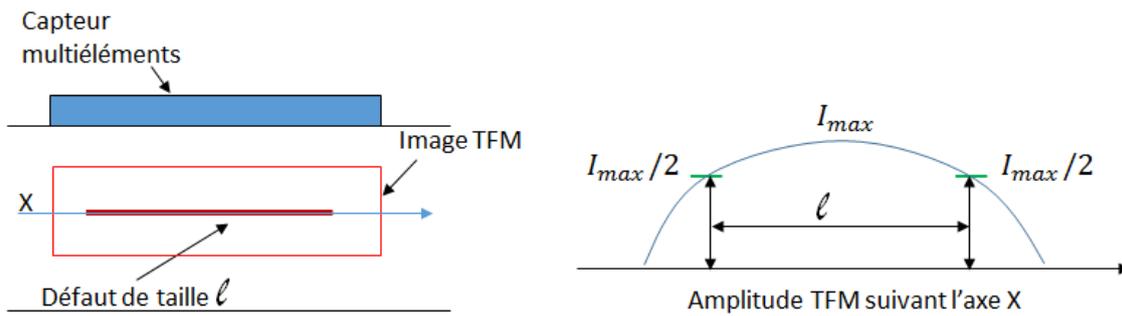


Fig 5.10 – Principe de la méthode de chute à -6dB en imagerie TFM

Cependant, la condition de d'invariance du champ en contrôle conventionnel, qui devient en imagerie TFM une condition d'invariance de l'amplitude TFM, n'est plus vérifiée. En effet, cette dernière varie avec la position du défaut dans la ROI d'une valeur qui peut être quantifiée via l'estimateur SEE développé au chapitre 3. La méthode à -6dB ne peut donc s'appliquer que lorsque la variation de de l'amplitude TFM est très faible sur le défaut, comme dans le cas des petits défauts.

Nous avons donc développé une nouvelle méthode de dimensionnement appelée l'*Imaging Amplitude Compensation sizing* que nous désignerons sous l'acronyme IAC-sizing à partir des indications spéculaires. Elle se base toujours sur une chute d'amplitude mais respecte la condition d'invariance de l'amplitude TFM.

### 5.3.3 IAC-sizing

La méthode que nous avons développée consiste à compenser la variation en sensibilité de l'amplitude TFM liée à l'algorithme d'imagerie puis à dimensionner le défaut à partir de la nouvelle image corrigée par la méthode à -6dB. Par ailleurs, nous allons justifier de manière théorique les six décibels de décroissance nécessaire pour estimer la limite du défaut dans le cas d'une reconstruction TFM.

#### 5.3.3.1 Compensation de la variation en sensibilité en imagerie TFM

Pour appliquer une méthode de dimensionnement sur les défauts de manière analogue à la méthode à -6dB en contrôle conventionnel, il est au préalable nécessaire de compenser les variations d'amplitude de l'image TFM induites par les variations en sensibilité intrinsèque aux modes de reconstructions eux-mêmes. Cette compensation permettra de retrouver une amplitude constante le long du défaut indépendamment de sa longueur.

Elle sera faite à partir de l'image TFM d'un défaut "infini" qui par construction va présenter les mêmes variations que l'image TFM du défaut que l'on cherche à dimensionner. L'amplitude TFM de ce défaut "infini" peut être retrouvée à partir d'une simulation d'un défaut très grand devant la dimension du défaut à dimensionner via le logiciel CIVA suivie d'une reconstruction TFM ou encore à partir de l'estimateur SEE. On rappelle que

l'amplitude de ce dernier est proportionnelle à l'amplitude TFM (cf. chapitre 3) pour tous les pixels appartenant au défaut tant que la diffraction est négligeable.

Dans la suite de notre étude, la compensation des variations en sensibilité sera réalisée à partir de l'estimateur SEE. Elle consiste à faire le rapport entre l'amplitude TFM et l'amplitude de l'estimateur SEE. L'amplitude résultante est alors une constante sur tout le défaut.

Soit  $I(P)$  l'amplitude TFM au point  $P$  et  $A(P)$  l'amplitude TFM de l'estimateur SEE au point  $P$  :

-Si  $P \in$  au défaut, alors :

$$\frac{I(P)}{A(P)} = \alpha \quad (5.7)$$

-Si  $P \in$  aux extrémités du défaut, alors :

$$\frac{I(P)}{A(P)} = \alpha + d \quad (5.8)$$

où  $d$  est le rapport entre l'amplitude de diffraction et l'estimateur SEE.

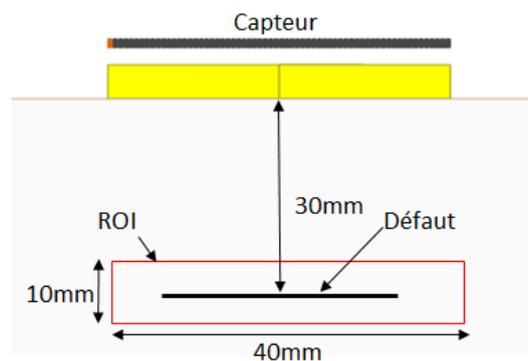
- Sinon :

$$\frac{I(P)}{A(P)} = b \quad (5.9)$$

où  $b$  est le rapport entre l'amplitude du bruit de l'image et l'estimateur SEE.

Par conséquent, si  $d \ll \alpha$ , alors le rapport d'amplitude conduit à une image avec une amplitude constante le long du défaut.

La Fig 5.11 montre une configuration d'inspection simulée avec un défaut de 20mm de long. L'acquisition est réalisée à partir d'un capteur multi-éléments de 64 éléments émettant à une fréquence centrale de 5MHz. L'image TFM reconstruite suivant le mode LL a été compensée par l'estimateur SEE. La courbe échodynamique a été tracée avant et après compensation de la variation en sensibilité.



(a)

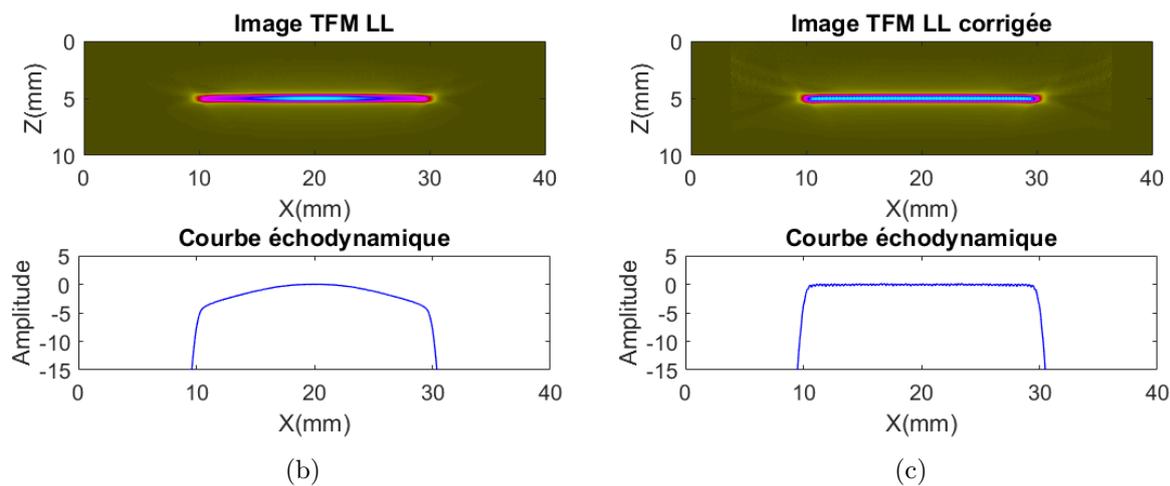


Fig 5.11 – (a) Configuration d’inspection, (b) Image TFM et sa courbe échodynamique, (c) Image TFM corrigée et sa courbe échodynamique

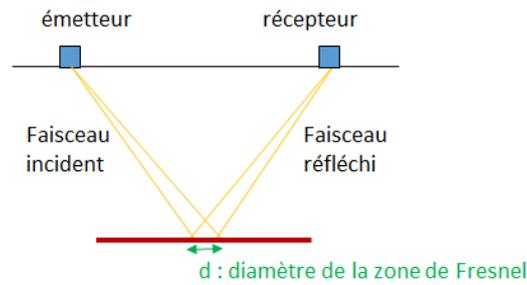
Dans une première approximation, la correction des variations d’amplitude conduit à une amplitude constante le long du défaut. Cependant, nous allons montrer dans le paragraphe suivant qu’il subsiste une décroissance de l’amplitude TFM aux extrémités du défaut liée à la notion de zone de Fresnel [66].

### 5.3.3.2 Zone de Fresnel

Contrairement à ce qui est prédit par le tracé de rayon, la réflexion spéculaire d’un faisceau ultrasonore n’est pas le fait d’un seul point mais d’une surface de dimension donnée appelée zone de Fresnel. La zone de Fresnel est définie comme un disque centré au point  $P$  et de diamètre  $2 \times PQ$ , où  $Q$  appartient à la circonférence du disque. Le trajet entre la source et le point  $Q$  est défini comme étant  $\lambda/4$  plus long que le trajet entre la source et le point  $P$ .

En supposant que la vitesse est constante, cela signifie que l’onde arrivant au point  $P$  et l’onde arrivant au point  $Q$  seront déphasées de  $\lambda/2$  au niveau du récepteur après un aller-retour. Tous les ondes arrivant que la zone de Fresnel auront donc une différence de phase inférieure à  $\lambda/2$ . Par conséquent, elles vont interférer de manière plus ou moins constructive avec l’onde arrivant en  $P$  qui interfère de manière destructive avec l’onde arrivant en  $Q$ .

Ainsi, le signal reçu au niveau du récepteur est une sommation d’échos associés aux différents points de la zone de Fresnel de diamètre  $d$  (cf. Fig 5.12).



(d)

Fig 5.12 – Zone de Fresnel pour un couple d'éléments

L'amplitude TFM associée à un point donné est donc la somme d'un ensemble d'échos réfléchis provenant de la zone de Fresnel de diamètre  $d$ . Par conséquent, l'amplitude réfléchie est maximale lorsque le point  $P$  considéré est loin des bords du réflecteur et elle décroît lorsque la distance entre le point  $P$  considéré et l'extrémité du défaut est inférieure au diamètre  $d$ , auquel cas la réflexion spéculaire devient partielle.

Par une analyse simple, nous allons expliquer comment cette décroissance permet d'estimer la dimension du défaut.

### 5.3.3.3 Principe du dimensionnement

Soit  $P$  un point de l'image,  $P_1$  et  $P_2$  les points situés de part et d'autre de  $P$  sur l'axe du défaut tels que  $|x_P - x_{P_1}| < d/2$  et  $|x_P - x_{P_2}| < d/2$ .

– Si  $P \in$  au défaut,  $P_1 \in$  au défaut et  $P_2 \in$  au défaut, alors la réflexion spéculaire sur la zone de Fresnel est totale, donc :

$$\frac{I(P)}{A(P)} = \alpha \quad (5.10)$$

– Si  $P \in$  à l'extrémité du défaut,  $P_1 \in$  au défaut alors  $P_2 \notin$  au défaut. La réflexion spéculaire ne se fait alors que sur la moitié de la distance de Fresnel. Par conséquent, seule la moitié de l'énergie est réfléchie, donc :

$$\frac{I(P)}{A(P)} = \alpha/2 \quad (5.11)$$

La limite du défaut est donc atteinte lorsque l'amplitude décroît de six décibels. Le dimensionnement que nous proposons est donc une méthode par chute d'amplitude à -6dB sur une image dont les variations en sensibilité TFM ont été corrigées.

Nous avons appliqué cette méthode sur la configuration en Fig 5.11. Le défaut est dimensionné après correction de la décroissance de l'amplitude TFM. L'image corrigée est normalisée par rapport au pixel de référence ce qui permet d'avoir une amplitude égale à 0dB sur le défaut.

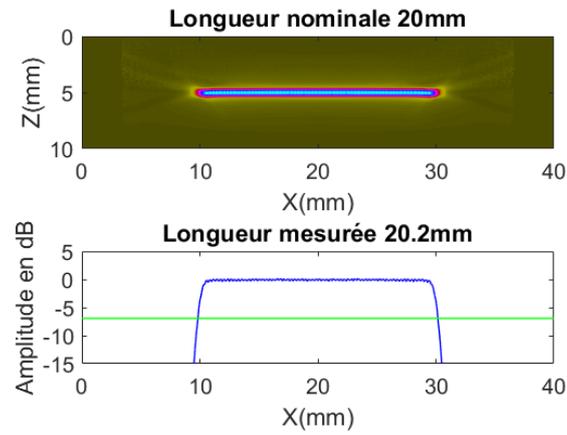


Fig 5.13 – Dimensionnement à -6dB sur l’amplitude corrigée. La courbe bleue est la courbe échodynamique du défaut suivant l’axe  $X$  et la courbe verte est une constante à -6dB.

La chute d’amplitude à -6dB permet alors de retrouver la longueur réelle du défaut avec une grande précision. L’erreur de 0,2mm réalisée ici est liée au pas de discrétisation de la ROI qui est de 0,1mm ici.

Notons que cette méthode reste valable lorsque le défaut est reconstruit par fusion par sommation ou par fusion par maximum d’amplitude SEE. Dans ces cas en effet, la relation de proportionnalité est conservée entre l’amplitude TFM et l’amplitude SEE.

#### 5.3.3.4 Conclusion sur la méthode de dimensionnement

La méthode de dimensionnement est une méthode par chute d’amplitude pour laquelle la condition d’invariance de l’amplitude TFM est respectée par la compensation de la variation en sensibilité de l’amplitude TFM. Nous avons ensuite montré par une étude théorique basée sur la notion de zone de Fresnel qu’il est possible de retrouver la taille réelle des défauts à partir d’une chute à -6dB sur l’image corrigée.

## 5.4 Application sur des données expérimentales

Nous avons appliqué les méthodes de dimensionnement développées sur la configuration expérimentale (cf. Fig 4.1).

### 5.4.1 Dimensionnement via la diffraction

Le dimensionnement à partir des indications de diffraction est réalisé sur les images issues de la fusion par corrélation des images TFM des modes directs et des images TFM des modes échos de coin reconstruites à partir de la matrice de diffraction. On rappelle que cette matrice déterminée à partir de la matrice FMC et de la connaissance de la position et de l’orientation du défaut obtenues à partir des indications spéculaires.

La Fig 5.14 montre l’image issue de la fusion par corrélation des modes directs et sa courbe échodynamique associée. L’écart entre la position des maxima d’amplitude est de 10mm qui est la hauteur réelle du défaut.

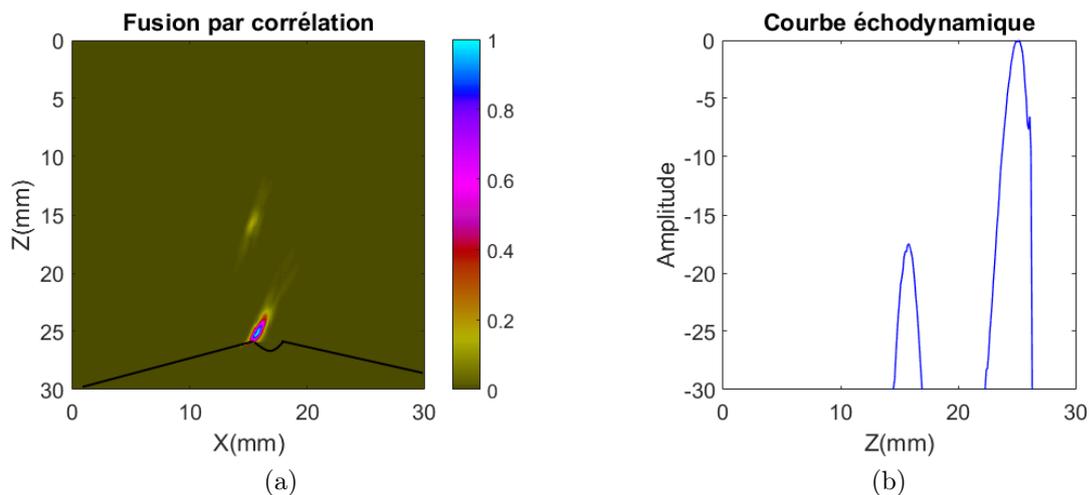


Fig 5.14 – Indications de diffraction issue de la fusion par corrélation des modes LL, LT et TT et sa courbe échodynamique selon l'axe Z

Toujours dans le but d'exploiter les échos de diffraction, nous avons déterminé la matrice de diffraction et reconstruit tous les modes écho de coin à partir de cette matrice avec l'algorithme TFM. Nous avons ensuite fusionné les images par corrélation.

La Fig 5.15 montre le résultat de la fusion et sa courbe échodynamique associée. Les maxima d'amplitude sont distants de 10mm soit la hauteur réelle du défaut.

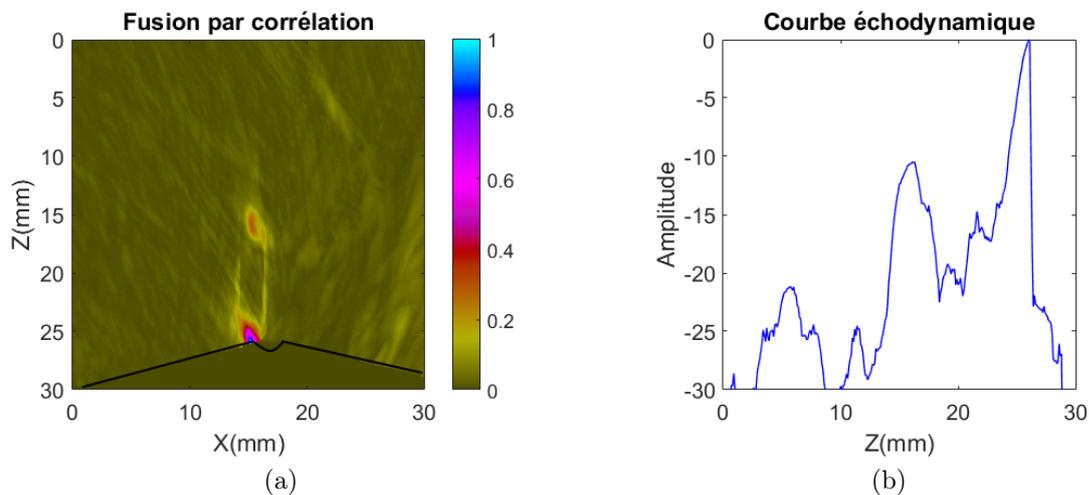


Fig 5.15 – Indications de diffraction issue de la fusion par corrélation des modes LLL, LTL, LTT, TTL et TTT reconstruits à partir de la matrice de diffraction isolée et sa courbe échodynamique selon l'axe Z

### 5.4.2 Dimensionnement via la réflexion spéculaire

L'IAC-sizing est réalisé sur des images issues de la fusion par sommation des modes TLT et TLL. La Fig 5.16 montre les différentes étapes de la compensation ainsi que la courbe échodynamique du défaut après compensation.

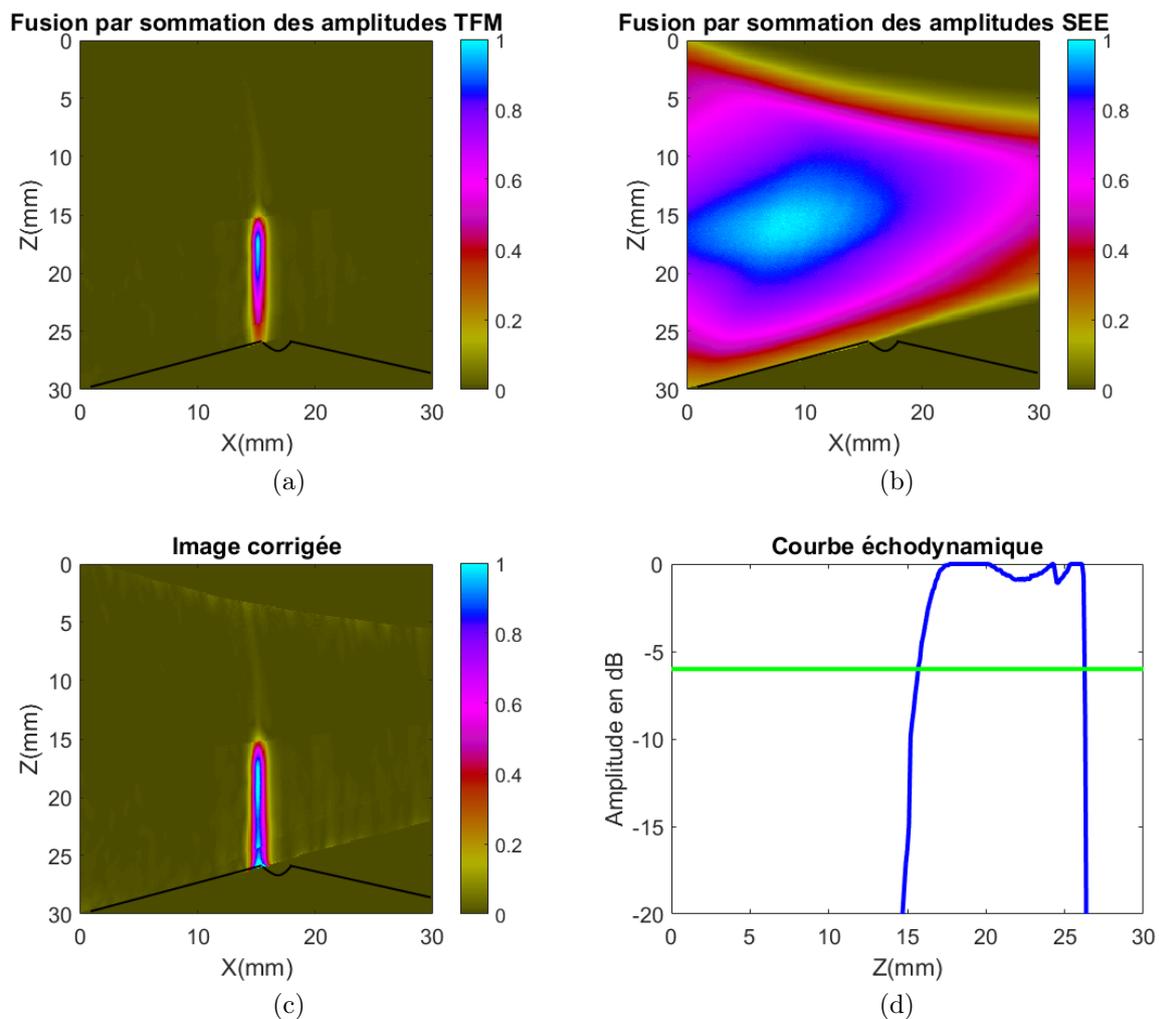


Fig 5.16 – (a) Image obtenue par la fusion par sommation des modes TLL et TLT, (b) Image obtenue par la fusion par sommation des cartographies SEE des modes TLL et TLT, (c) Image corrigée obtenue par le rapport entre l'image (a) et (b). Courbe échodynamique associée à l'image (c)

La dimension du défaut est donnée par l'intersection entre la courbe verte qui est une constante à  $-6\text{dB}$  et le courbe bleue et donne une hauteur de  $10,5\text{mm}$ , soit une erreur de  $4\%$  environ.

### 5.4.3 Discussion

L'application des différentes méthodes sur ce cas a montré que le dimensionnement via les indications de diffraction ou via l'indication spéculaire donne une hauteur de défaut proche de la hauteur réelle, l'erreur absolue mesurée est inférieure à la longueur d'onde.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé des méthodes de caractérisation des défauts plans en termes d'estimation de l'orientation et de dimensionnement. Nous nous sommes intéressés aux méthodes valables pour des défauts dont la hauteur est supérieure à la résolution pour laquelle nous avons proposé une méthode d'estimation.

Nous avons ensuite développé trois méthodes d'estimation de l'orientation dont une basée sur l'exploitation des signaux et deux basées sur des méthodes de traitement d'images. L'évaluation des différentes méthodes sur des données simulées a montré des estimations très proches des orientations réelles du défaut. La précision de ces méthodes augmente avec la dimension des défauts.

Deux méthodes de dimensionnement ont également été proposées. Une méthode basée sur l'exploitation de la diffraction et une méthode basée sur l'exploitation de l'indication spéculaire. Dans le premier cas, lorsque la diffraction est détectée, le dimensionnement permet de retrouver les limites du défaut avec une grande précision. Nous avons donc proposé différentes méthodes pour retrouver cette diffraction suivant différents modes de reconstruction. Cette diffraction peut cependant ne peut être retrouvée si les arêtes du défaut ne sont pas favorable, l'alternative est alors le dimensionnement via les indications spéculaire qui présente en outre une amplitude plus importante. Nous avons donc proposé une méthode appelée IAC-sizing dont l'approche théorique a été présentée. Elle est basée sur la compensation des variations de l'amplitude TFM sur le défaut suivie d'un dimensionnement à -6dB.

Les méthodes de dimensionnement ont ensuite été évaluées sur des données expérimentales qui ont permis de caractériser le défaut avec une précision absolue inférieure à la longueur d'onde.

# Chapitre 6

## Validations sur des données simulées et expérimentales

### Contents

---

<b>6.1</b>	<b>Procédé de contrôle</b>	<b>126</b>
<b>6.2</b>	<b>Pièce avec une pente de délardage de 14°</b>	<b>127</b>
6.2.1	Défaut vertical de 10mm de hauteur	127
6.2.2	Défaut vertical de 3mm de hauteur	131
6.2.3	Défaut incliné de 10mm de hauteur	135
6.2.4	Défaut incliné de 3mm de hauteur	140
<b>6.3</b>	<b>Pièce à faces planes</b>	<b>144</b>
6.3.1	Défaut vertical de 10mm de hauteur	144
6.3.2	Défaut vertical de 3mm de hauteur	151
6.3.3	Défaut de 10mm de hauteur incliné	154
6.3.4	Défaut de 3mm de hauteur incliné	159
<b>6.4</b>	<b>Tableaux récapitulatifs</b>	<b>162</b>

---

## Introduction

Ce chapitre est consacré à la validation sur des données simulées et expérimentales des algorithmes de prédiction des modes pertinents, de fusion par sommation, de filtrage des artefacts et de dimensionnement des défauts plans via les indications spéculaires.

Les pièces considérées sont en acier homogène et isotrope avec une vitesse des ondes longitudinales de 5900m/s et une vitesse des ondes transversales de 3230m/s. Deux géométries de pièces sont étudiées. La première est une pièce qui présente une pente de délardage de 14° par rapport à l'horizontale et la seconde est une pièce à faces planes. Les défauts présents sont des entailles artificielles usinées dans la pièce par électro-érosion, cette technique permettant de maîtriser convenablement la forme et les dimensions souhaitées.

Les caractéristiques du traducteur utilisé sont décrites dans le tableau suivant.

Découpe du traducteur	Linéaire
Nombre d'éléments	64
Fréquence	5MHz
Pas inter-éléments	0.6mm
Sabot	T55

Tableau 6.1 – Caractéristiques du traducteur

## 6.1 Procédé de contrôle

Le procédé de contrôle se déroule en quatre étapes :

- Nous allons supposer connue l'orientation du défaut puis nous allons prédire les modes de reconstruction pertinents via l'estimateur SEE décrit au chapitre 3. Les modes pertinents sont ensuite sélectionnés selon le critère de maximisation de l'amplitude SEE. Cette sélection nécessite la détermination de l'amplitude SEE minimale de détection. Pour les données simulées, elle est nulle et pour les données expérimentales nous l'avons calculée conformément à la relation 3.11.

Le réflecteur de référence choisi est un bord de la pièce à faces planes. Celui-ci étant vertical, l'estimateur SEE prédit qu'il est reconstruit suivant le mode TTT. La mesure du niveau de bruit sur l'image TFM de ce réflecteur a ensuite permis d'estimer l'amplitude SEE minimale de détection qui sera utilisée pour les deux pièces constituées du même matériau.

- Puis, les images TFM des modes sélectionnés sont reconstruites sur la zone effective définie comme étant la zone où l'amplitude de l'estimateur SEE est supérieure à l'amplitude minimale de détection. Ces images obtenues sont ensuite fusionnées selon la méthode de fusion par sommation décrite au chapitre 4.

- Par la suite, les artefacts présents sur l'image issue de la sommation sont filtrés

suivant la procédure de filtrage proposée au paragraphe 4.2.2. Le défaut est alors localisé sans ambiguïté et peut alors être dimensionné.

– Pour estimer la hauteur de chaque défaut, nous avons ensuite appliqué la méthode IAC-sizing décrite au paragraphe 5.3.3. Les variations de l’amplitude TFM du défaut sont corrigées via l’estimateur SEE. Pour éviter d’amplifier le bruit, cette compensation est réalisée sur une petite région entourant le défaut. Cette région est déterminée par l’algorithme de croissance de région décrite au paragraphe 4.2.2.2. La courbe échodynamique de cette image est ensuite extraite suivant l’axe Z et la projection de la hauteur du défaut  $h_z$  sur l’axe Z est retrouvée lorsque l’amplitude du point de référence décroît de six décibels. On rappelle que le point de référence est choisi comme étant le point dont l’amplitude TFM est maximale avant la compensation.

La hauteur du défaut est donnée par l’expression suivante :

$$h = \frac{h_z}{\cos \beta} \quad (6.1)$$

Où  $\beta$  est l’inclinaison du défaut par rapport à l’axe Z.

On rappelle également que ce dimensionnement reste valable tant que la diffraction est négligeable devant la réflexion spéculaire. En effet, lorsque le ratio échos de diffraction et échos spéculaires n’est plus négligeable, les interférences entre ces deux échos peuvent conduire à des erreurs de dimensionnement. Dans le cas où ces interférences sont constructives, un pic de diffraction légèrement décalé de l’extrémité du défaut peut être observé, il modifie alors la pente de décroissance. Lorsque les interférences sont destructives, l’amplitude spéculaire est plus faible que prédite par l’estimateur SEE, la compensation n’est alors pas suffisante.

Pour valider ces différentes étapes, des données simulées et des données expérimentales seront étudiées.

## 6.2 Pièce avec une pente de délardage de 14°

On considère une pièce qui présente une pente de délardage de 14° par rapport à l’horizontale. Elle comprend quatre défauts, deux défauts verticaux de 10mm et 3mm de hauteur et deux défauts inclinés de 14° par rapport à la verticale de 10mm et 3mm de hauteur.

### 6.2.1 Défaut vertical de 10mm de hauteur

La configuration est la suivante.

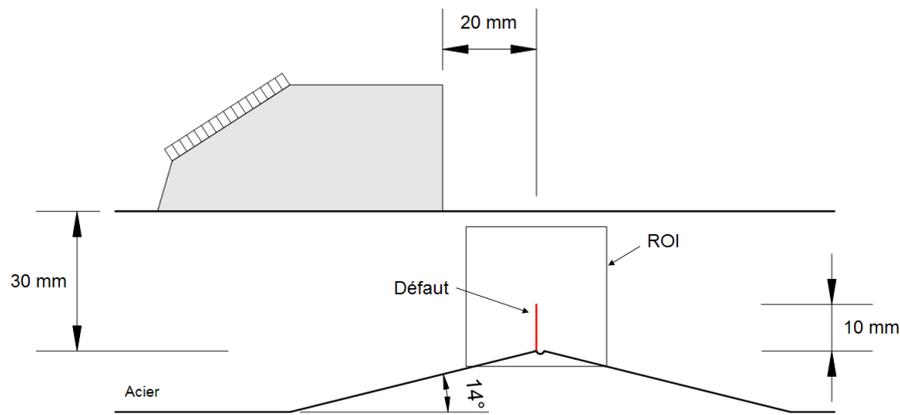


Fig 6.1 – Configuration d’inspection : pièce avec une pente de délardage de  $14^\circ$ , défaut vertical de 10mm de hauteur

Les différentes cartographies SEE des modes écho de coin ont été calculées et les modes de reconstruction pertinents ont été sélectionnés suivant le critère de maximisation de l’amplitude SEE. Cette sélection fournit la cartographie suivante :

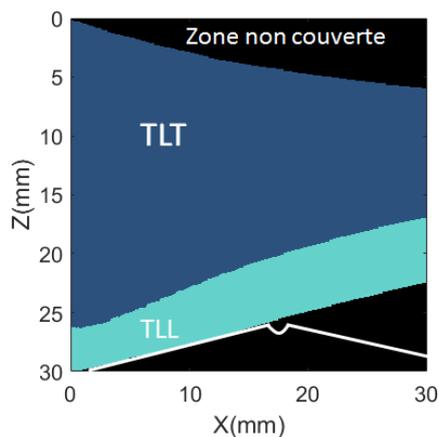


Fig 6.2 – Cartographie de la répartition des modes les plus énergétiques pour un défaut vertical

Elle montre que les modes TLT et TLL sont suffisants pour reconstruire un défaut plan quelle que soit sa position dans la ROI définie sauf dans les régions en noir qui sont non couvertes par les modes écho de coin.

Les cartographies spatiales SEE associées à ces modes sont présentées dans la figure ci-dessous.

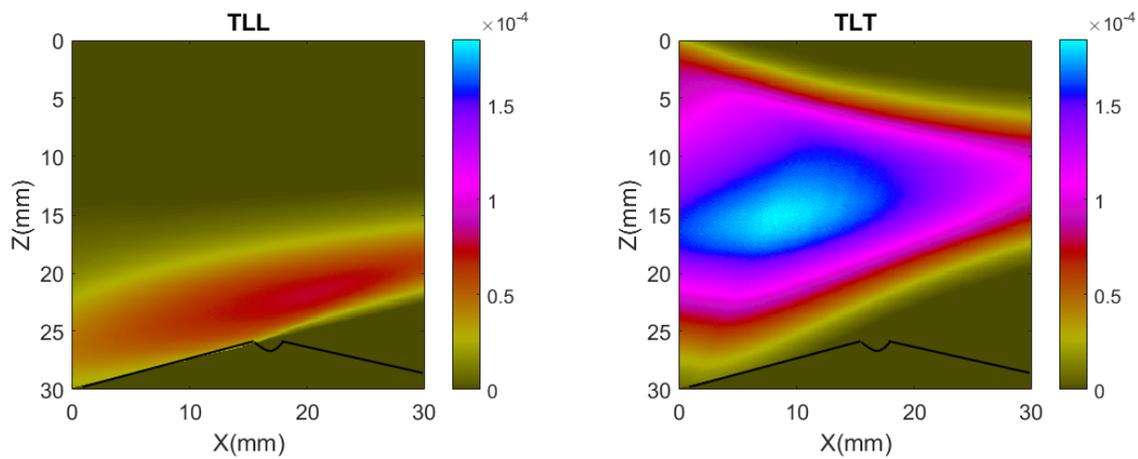


Fig 6.3 – Cartographie SEE des modes TLL et TLT

– La cartographie SEE du mode TLL montre que le défaut sera reconstruit sur toute sa hauteur mais avec une amplitude moins importante que le mode TLT.

– La cartographie SEE du mode TLT montre que la partie supérieure du défaut sera reconstruit avec une amplitude maximale.

L'acquisition FMC a ensuite été réalisée et les images TFM ont été calculées pour des données simulées et pour des données expérimentales.

### 6.2.1.1 Données simulées

#### Reconstructions TFM

Les images TFM ont été calculées pour les modes TLL et TLT dans la zone effective de chaque mode. On rappelle que la zone effective est la région où l'amplitude SEE est toujours supérieure à l'amplitude minimale de détection.

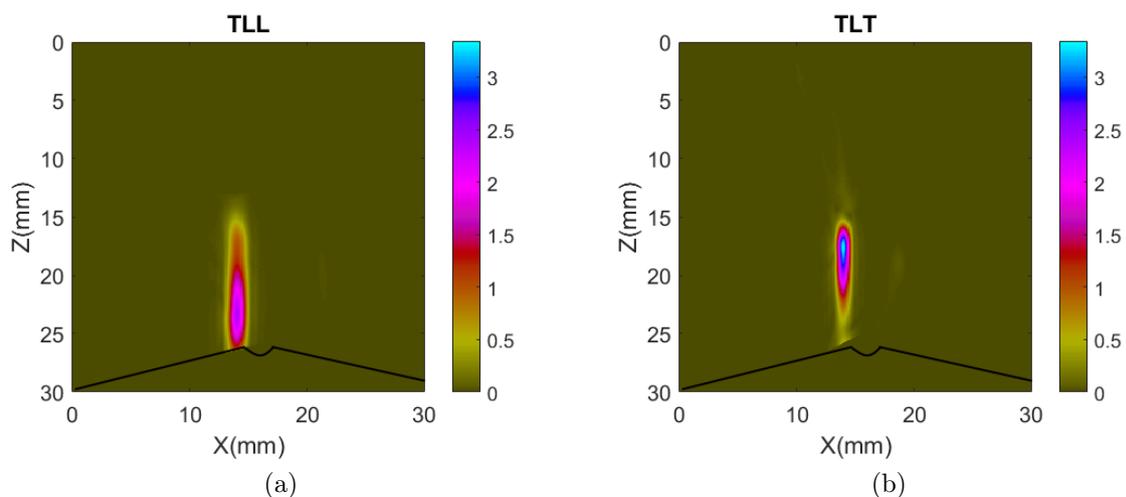


Fig 6.4 – Images TFM simulées des modes TLL et TLT

Conformément à la prédiction, l'image TFM du mode TLL montre une reconstruction totale du défaut tandis que l'image TFM du mode TLT montre une reconstruction partielle du défaut.

### Fusion par sommation

Les deux images sont fusionnées selon la méthode de fusion par sommation.

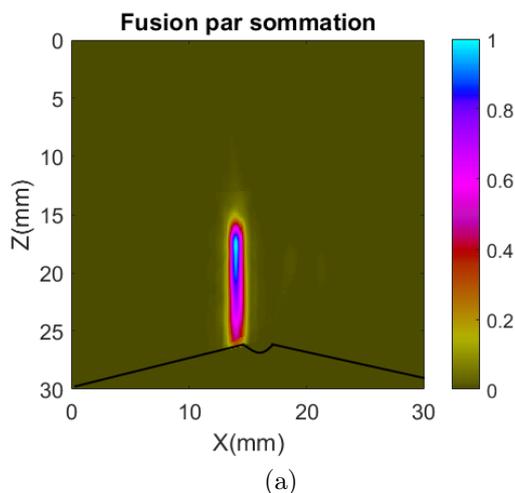


Fig 6.5 – Fusion par sommation des modes sélectionnés

L'image issue de la sommation ne présentant qu'une seule indication, le filtrage des artefacts n'est pas nécessaire dans le cas présent.

### Dimensionnement

Pour dimensionner le défaut, nous avons d'abord compensé les variations d'amplitude TFM grâce à l'estimateur SEE. Au vu de la cartographie SEE, on peut prédire que l'erreur de dimensionnement liée à la présence de la diffraction sera minimale dans le cas présent. En effet, l'IAC-sizing marche bien tant que la composante de diffraction est faible devant la composante spéculaire. Or, l'extrémité supérieure du défaut est située dans une zone où l'amplitude SEE est forte, la diffraction ne sera donc pas gênante pour le dimensionnement.

La compensation s'est faite sur une zone restreinte autour du défaut pour éviter d'amplifier de potentiels échos de faible amplitude ou du bruit. La courbe échodynamique a ensuite été tracée et la hauteur du défaut a été estimée pour une décroissance à -6dB.

L'image compensée a été normalisée par rapport à l'amplitude du point de référence, lequel point est le point de plus forte amplitude dans l'image issue de la fusion par sommation. L'amplitude "1" de l'image compensée correspond donc au "0dB" de la courbe échodynamique.

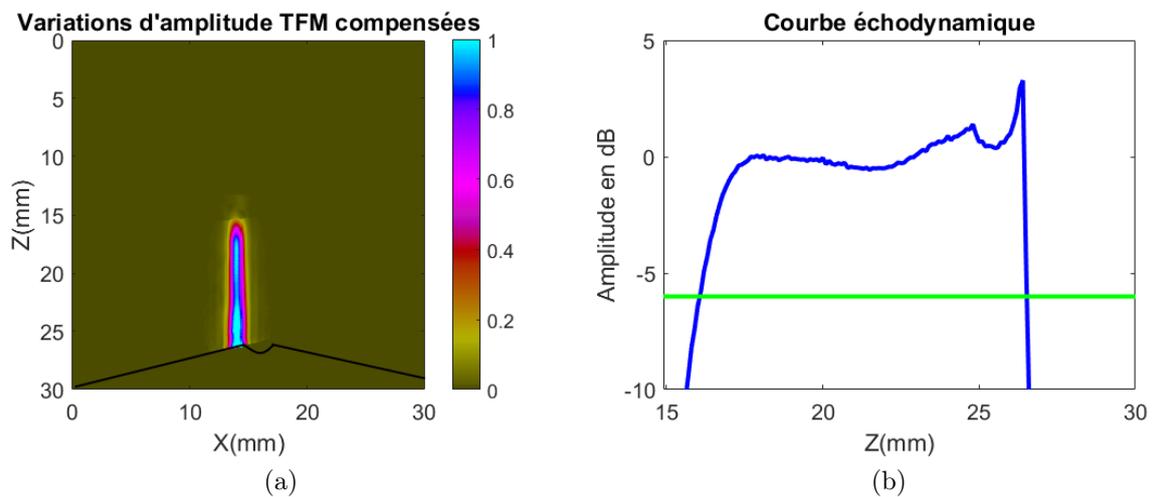


Fig 6.6 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

La compensation des variations d'amplitude a permis d'avoir une amplitude relativement constante sur le défaut avec un pic d'amplitude à l'extrémité inférieure.

La hauteur mesurée sur la courbe échodynamique à -6dB est de 10,4mm soit une erreur relative de 4%.

#### 6.2.1.2 Données expérimentales

Les résultats ont déjà été présentés au paragraphe 5.4.2, ils ne seront donc pas repris ici.

### 6.2.2 Défaut vertical de 3mm de hauteur

On s'intéresse à un défaut vertical de 3mm de hauteur. L'algorithme TFM a été calculé suivant les modes de reconstruction sélectionnés TLL et TLT.

#### 6.2.2.1 Données simulées

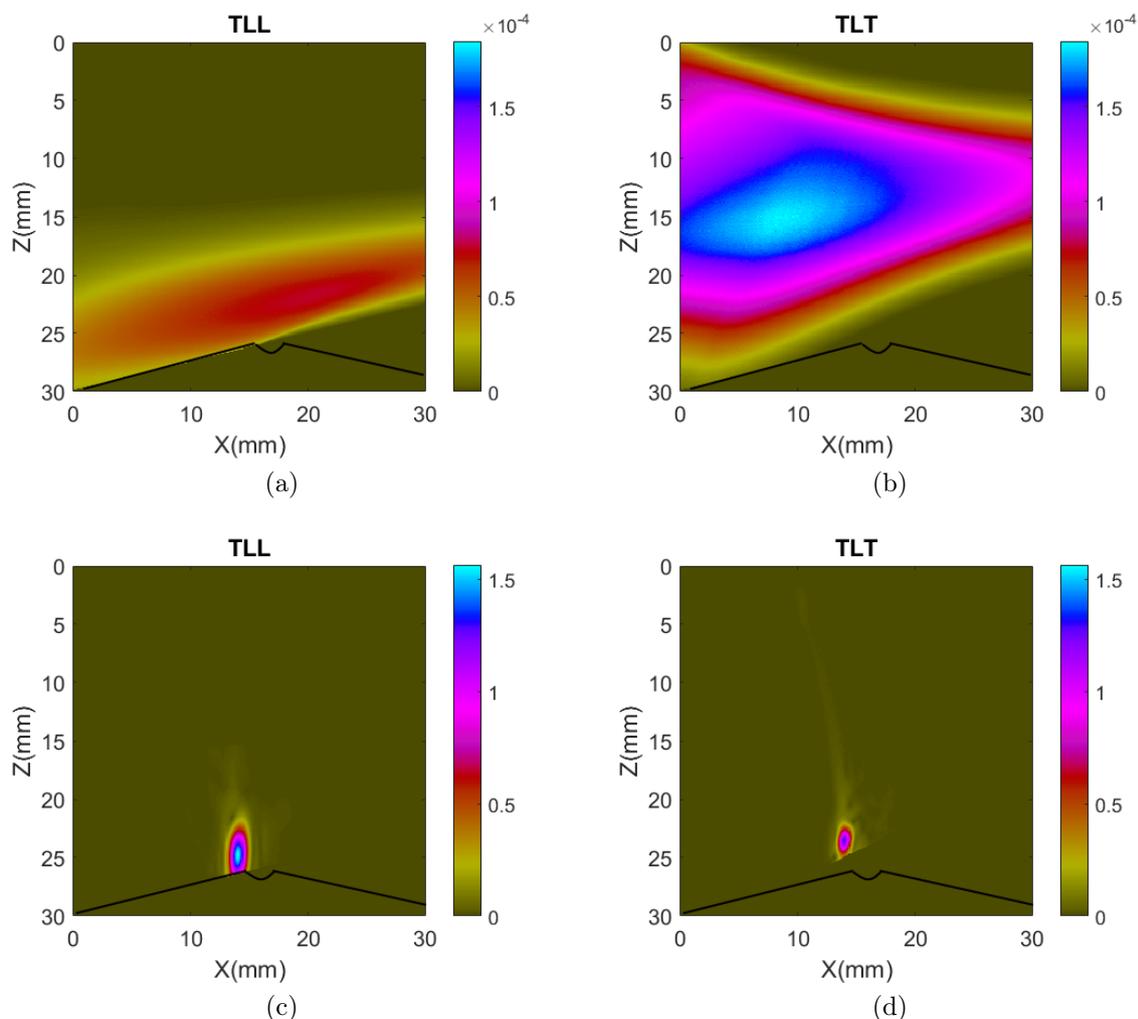


Fig 6.7 – Images TFM simulées des modes TLL et TLT

– Le mode TLL qui couvre la partie inférieure de la pièce permet donc de reconstruire le défaut sur toute sa hauteur.

– Le mode TLT ne couvre que la partie supérieure avec une amplitude faible comme on peut l’observer sur la cartographie SEE. Les échos de diffraction sont alors d’amplitude plus importante que les échos spéculaires et c’est une indication de diffraction qui est donc reconstruite.

### Fusion par sommation

Les images TFM des deux modes ont ensuite été sommées. Les images de départ ne présentant pas d’artefact, l’étape de filtrage n’est pas nécessaire.

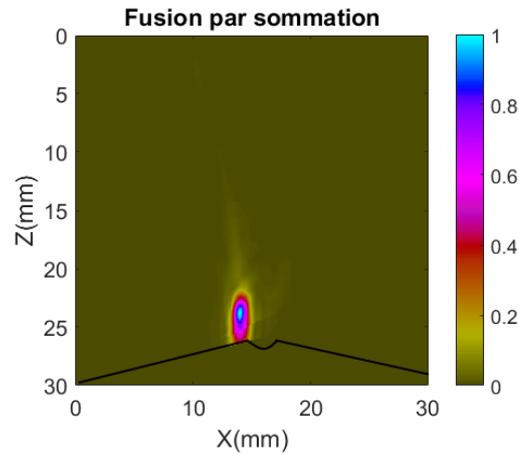


Fig 6.8 – Fusion par sommation des modes sélectionnés

L'information du défaut est bien conservée et le défaut peut être dimensionné.

### Dimensionnement

Du fait de la présence de la diffraction du mode TLT, nous pouvons prévoir que le défaut sera sur-dimensionné. Nous avons appliqué l'algorithme de compensation des variations d'amplitude et nous avons mesuré la hauteur du défaut à partir de la courbe échodynamique.

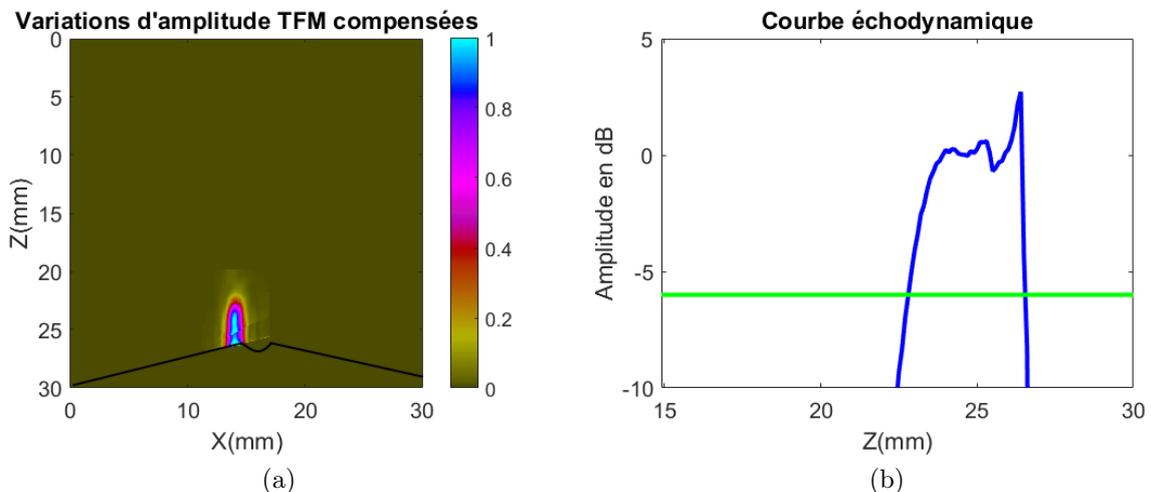


Fig 6.9 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

La compensation des variations d'amplitude TFM a permis d'avoir une amplitude relativement constante dans la partie supérieure du défaut. Sur la courbe échodynamique, on enregistre une légère chute d'amplitude dans la région où on passe de deux modes sommés à un mode et un pic d'amplitude à l'extrémité inférieure du défaut.

La hauteur mesurée à -6dB est de 3,6mm soit une erreur relative de 20% ce qui n'est pas négligeable. Cette erreur est comme prédite liée à la présence de la diffraction du mode TLT. Cette diffraction ne génère pas un pic d'amplitude notable ici, mais elle modifie la pente de décroissance conduisant à la surestimation de la hauteur du défaut.

### 6.2.2.2 Données expérimentales

#### Reconstructions TFM

Les images TFM ont également été reconstruites pour des données expérimentales. Comme précédemment, les images ne sont reconstruites que dans leur zone effective.

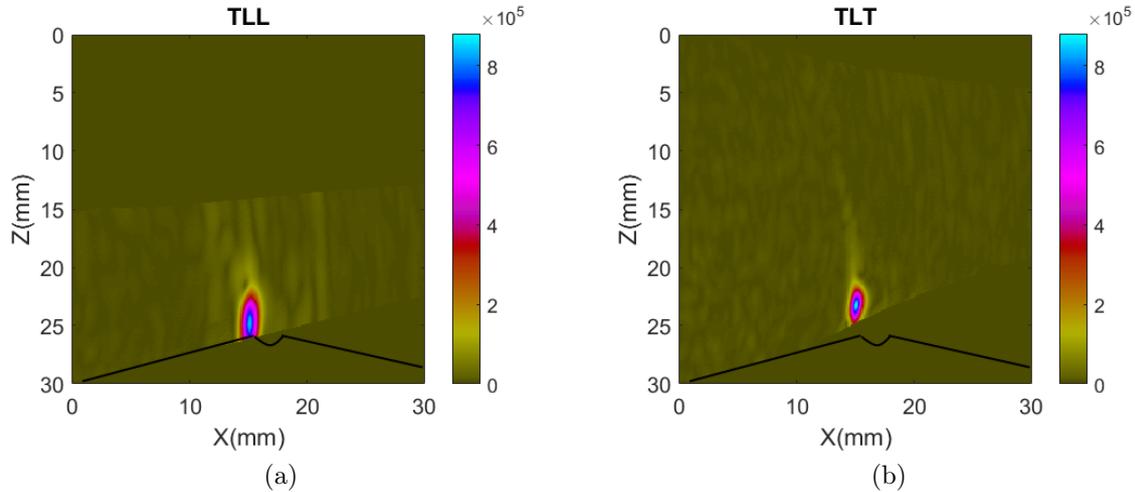


Fig 6.10 – Images TFM expérimentales des modes TLL et TLT

Comme sur les images simulées, le mode TLL reconstruit le profil du défaut tandis que le mode TLT n'apporte que la diffraction supérieure.

#### Fusion par sommation

Les deux images sont ensuite sommées.

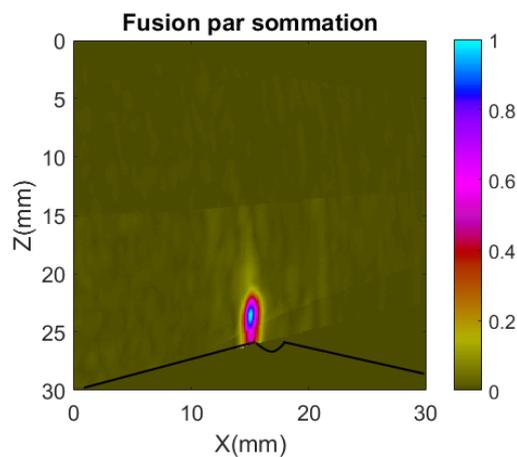


Fig 6.11 – Fusion par sommation des modes sélectionnés

On remarque que l'information spéculaire du défaut est bien conservée.

#### Dimensionnement

Nous avons appliqué l'algorithme de compensation des variations d'amplitude sur une zone restreinte autour du défaut et nous avons tracé la courbe échodynamique du défaut.

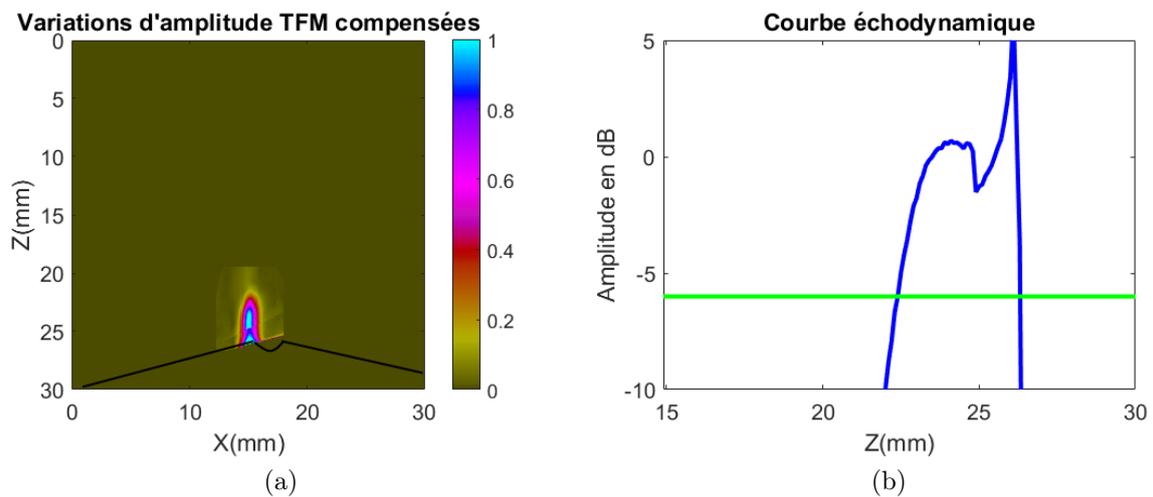


Fig 6.12 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

Comme pour les données simulées, on observe une chute d'amplitude lorsque l'image est reconstruite avec la somme de deux modes et lorsque l'image est reconstruite avec un seul mode et un pic d'amplitude à l'extrémité inférieure du défaut.

La hauteur mesurée sur la courbe échodynamique est de 3,7mm soit une erreur relative de 23%. Ce sur-dimensionnement est lié aux mêmes raisons que celles citées pour les données simulées.

### 6.2.3 Défaut incliné de 10mm de hauteur

Le défaut est maintenant incliné de 14° par rapport à la verticale et a une hauteur de 10mm. La configuration est la suivante :

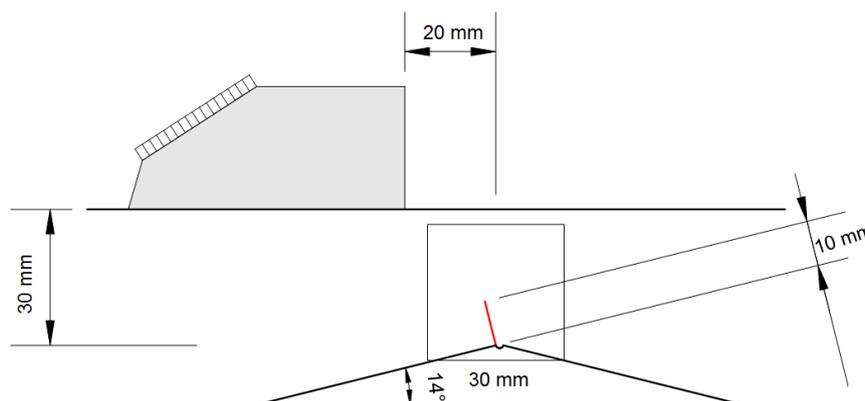


Fig 6.13 – Configuration d'inspection : pièce avec délardage de 14° par rapport à l'horizontale, défaut incliné de 14° par rapport à la verticale

L'estimateur SEE a été calculé pour tous les modes et une sélection a été effectuée suivant le critère de maximisation de l'amplitude SEE. La cartographie de la répartition des modes est la suivante :

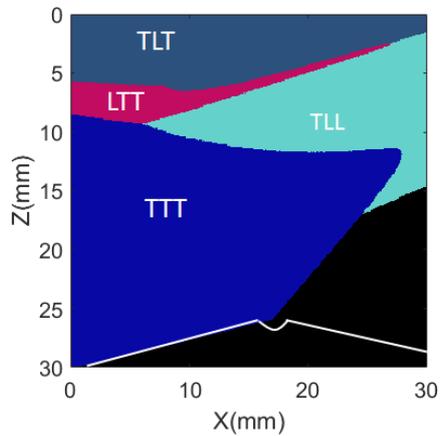


Fig 6.14 – Sélection sur critère de maximisation de l'estimateur SEE

Les cartographies spatiales SEE des modes TTT, LTT, TLT et TLL sont illustrées ci-dessous.

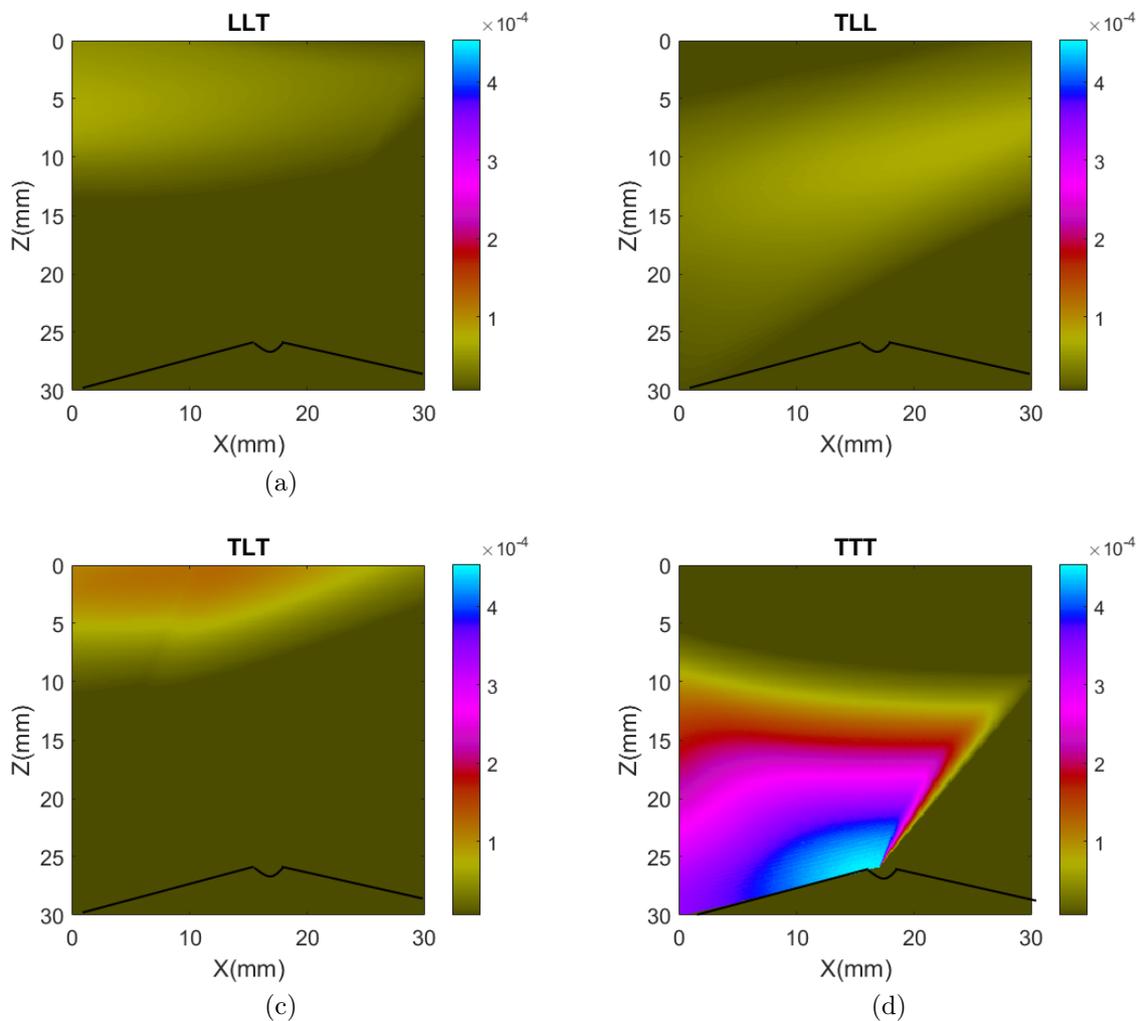


Fig 6.15 – Cartographies SEE des modes LLT, TLL, TLT et TTT

Les défauts étudiés étant débouchant en paroi interne, nous pouvons prédire que seul le mode TTT sera apte à les reconstruire.

Nous avons calculé les images TFM de ces modes pour des données simulées et pour des données expérimentales.

### 6.2.3.1 Données simulées

#### Reconstructions TFM

Les images TFM des modes sélectionnés ont été calculées dans leur zone effective respective.

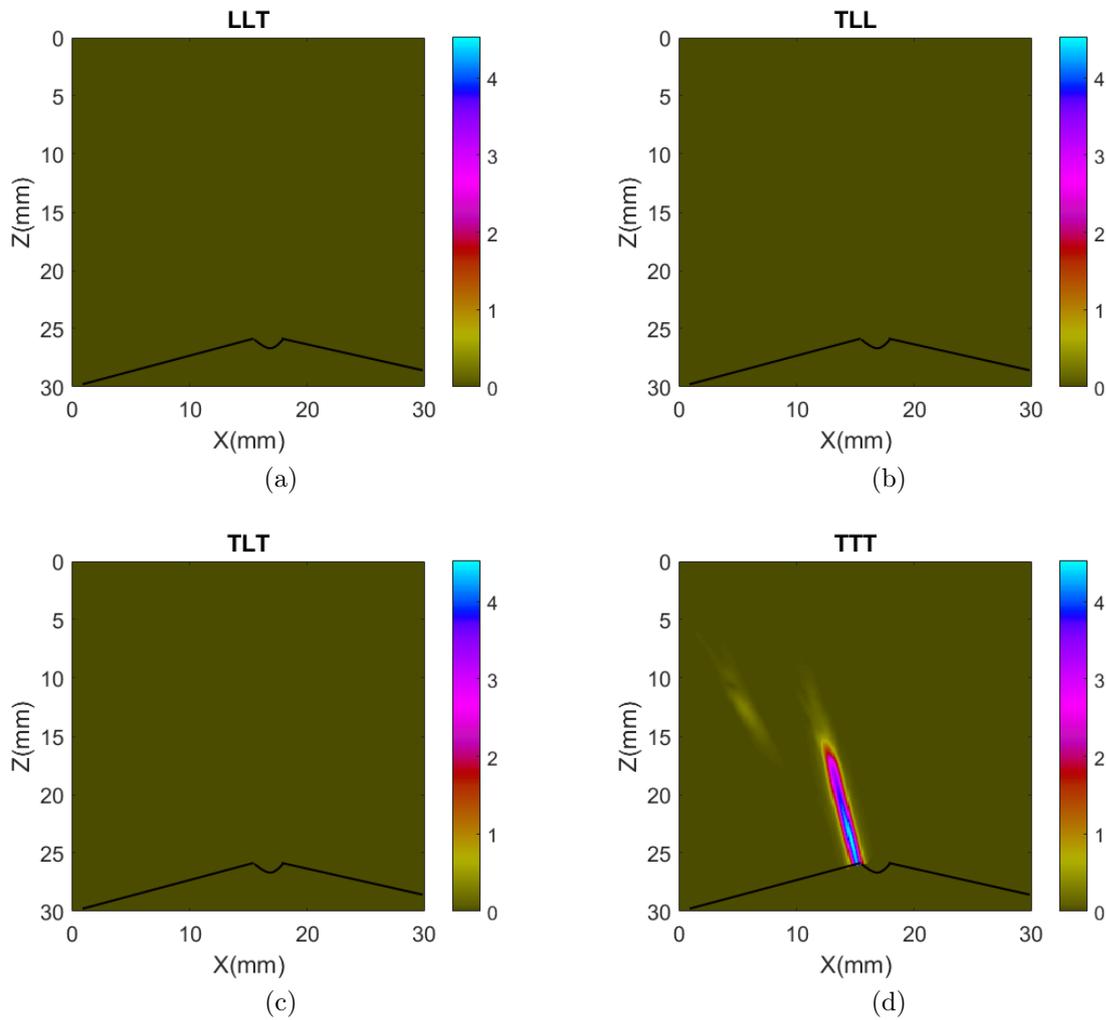


Fig 6.16 – Images TFM simulées des modes LLT, TLT et TTT

Seul le mode TTT a permis de reconstruire en cohérence avec la prédiction.

#### Fusion par sommation et filtrage des artefacts

Les images ont ensuite été sommées et la procédure de filtrage des artefacts a été appliquée sur l'image fusionnée.

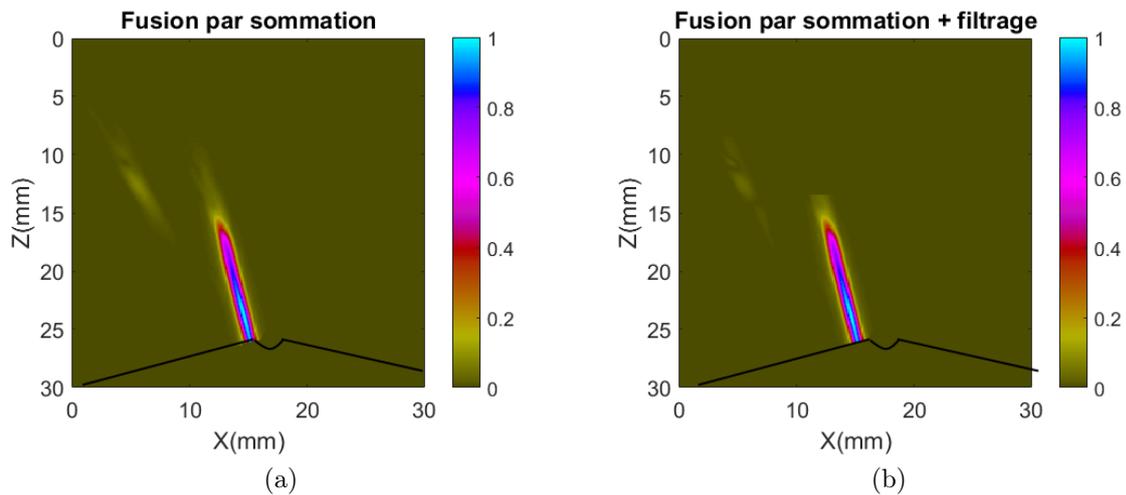


Fig 6.17 – (a) Fusion par sommation des modes sélectionnés (b) Image obtenue après le filtrage des artefacts

L'information spéculaire est conservée après la fusion par sommation et l'artefact est atténué avec l'application de l'algorithme de filtrage.

### Dimensionnement

Avec la cartographie SEE du mode TTT, le seul apte à reconstruire le défaut, on note que les extrémités du défaut se trouvent dans des zones de forte amplitude SEE, on peut prédire que la diffraction n'induera pas ou peu d'erreurs de dimensionnement.

Nous avons appliqué l'algorithme de compensation des variations d'amplitude et nous avons tracé la courbe échodynamique.

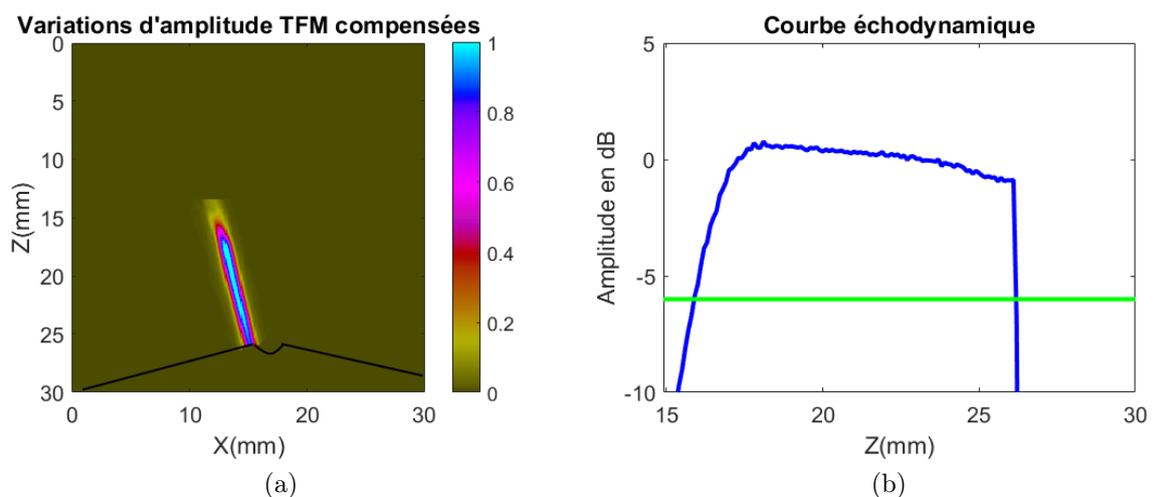


Fig 6.18 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

Le défaut étant incliné, la hauteur mesurée sur la courbe échodynamique suivant l'axe Z est corrigée par l'inclinaison du défaut. Elle est alors estimée à 10,5mm soit une erreur relative de 5%.

### 6.2.3.2 Données expérimentales

Les images TFM des modes sélectionnés sont fournies dans la figure ci-dessous.

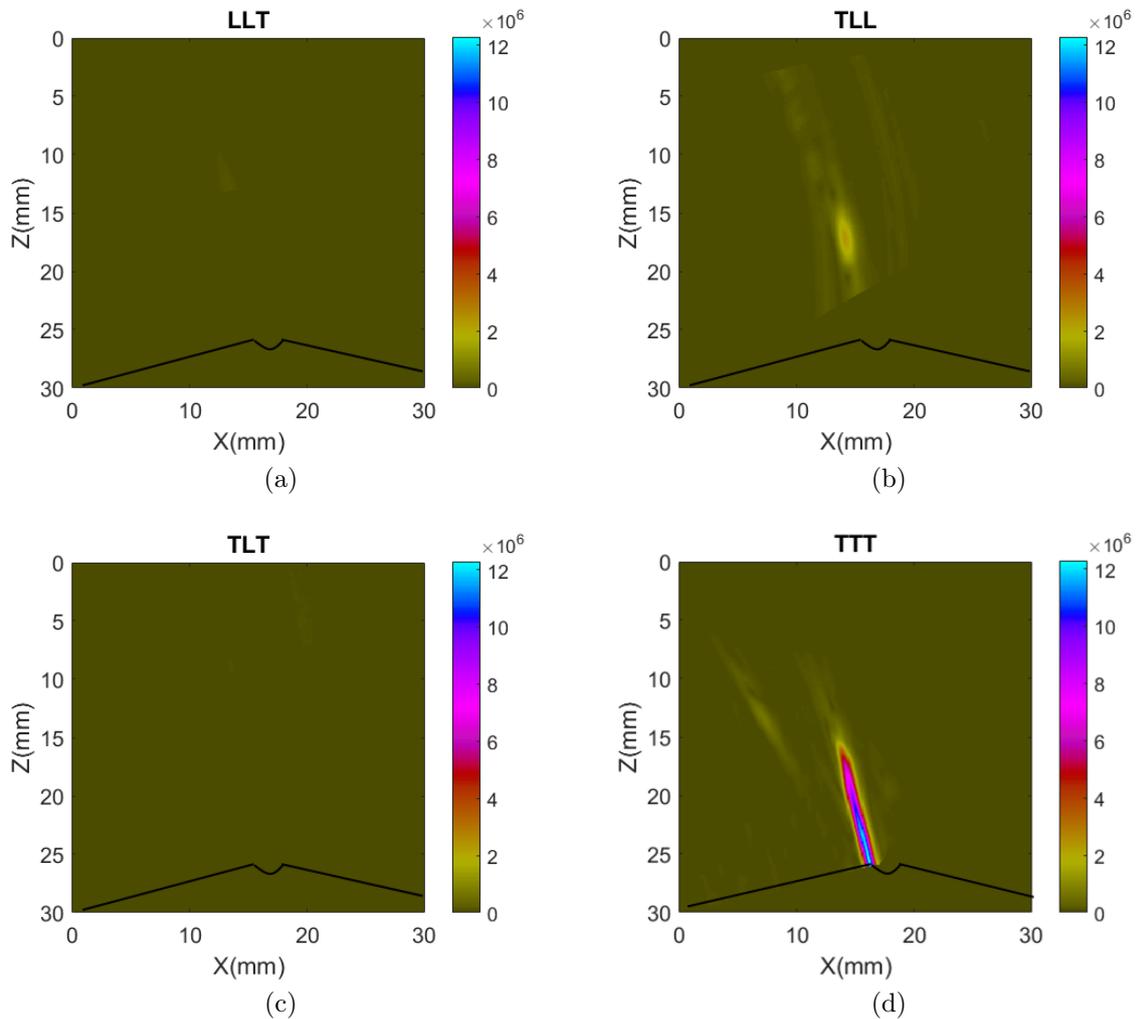


Fig 6.19 – Images TFM expérimentales des modes LLT, TLT et TTT

Comme pour les données simulées, le défaut n'est reconstruit qu'avec le mode TTT conformément à la prédiction.

#### Fusion par sommation

Les images ont ensuite été sommées et les artefacts filtrés.

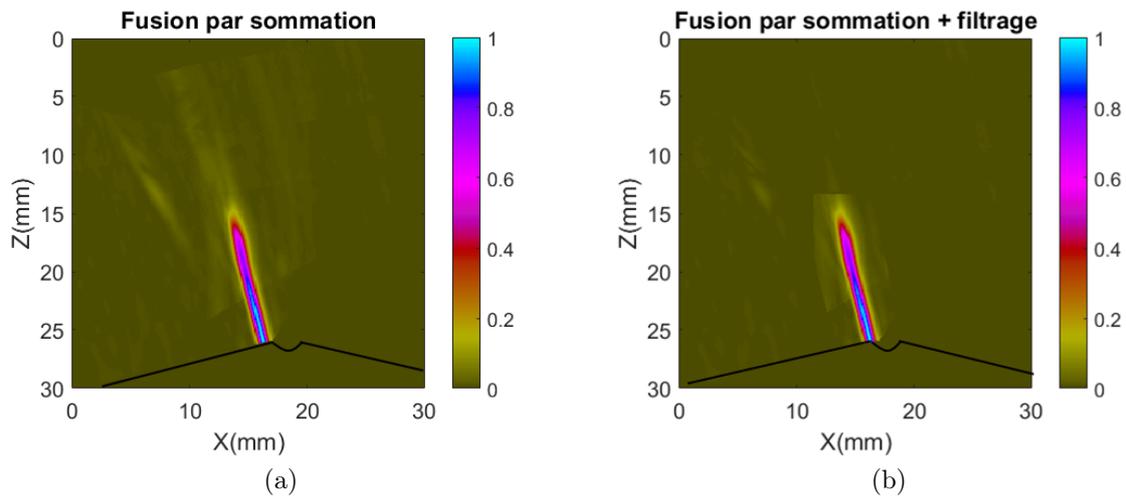


Fig 6.20 – (a) Fusion par sommation des modes sélectionnés (b) Image obtenue après le filtrage des artefacts

L'information spéculaire est conservée et les artefacts ont été fortement atténués.

### Dimensionnement

Nous avons appliqué l'algorithme de compensation des variations d'amplitude et nous avons mesuré la hauteur du défaut.

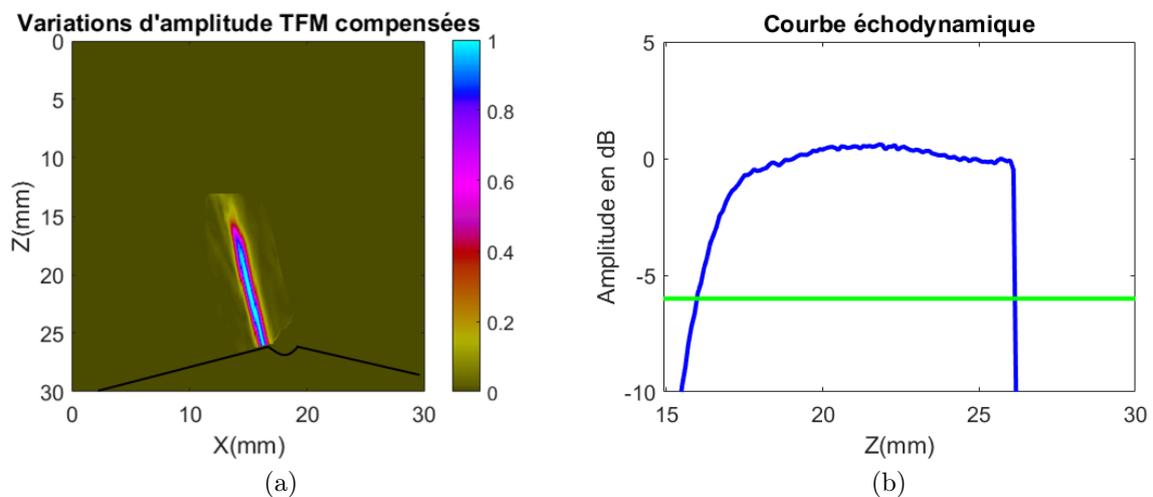


Fig 6.21 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

La hauteur mesurée est 10,4mm soit une erreur relative de 4%.

### 6.2.4 Défaut incliné de 3mm de hauteur

L'étude porte maintenant sur le défaut 3mm de hauteur et incliné de  $14^\circ$  par rapport à la verticale. Les images sont générées à partir des modes de reconstruction sélectionnés pour cette orientation.

### 6.2.4.1 Données simulées

#### Reconstructions TFM

Les images TFM des modes sélectionnés ont été calculées dans leur zone effective respective.

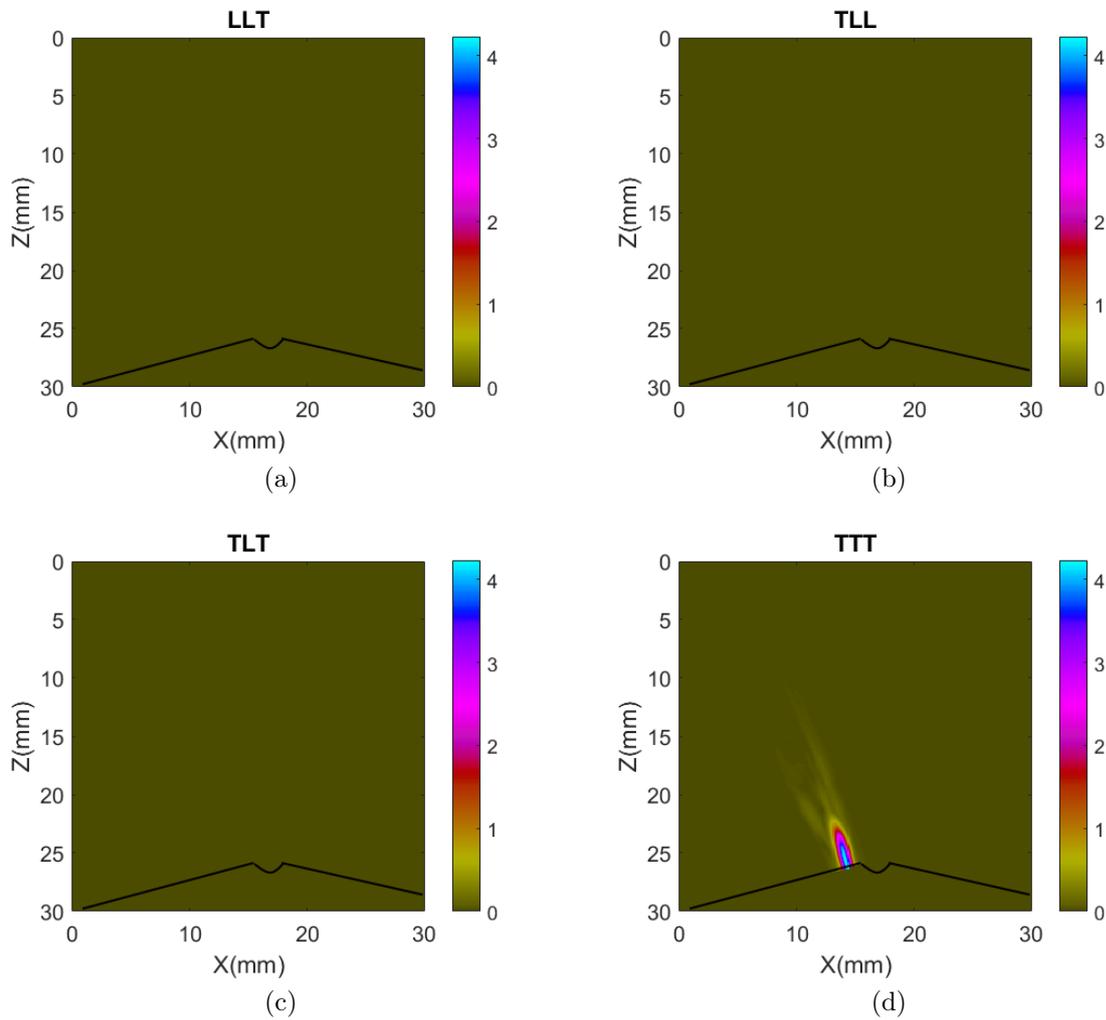


Fig 6.22 – Images TFM simulées des modes LLT, TLT et TTT

Le défaut étant débouchant en paroi interne, seul le mode TTT le reconstruit en cohérence avec la prédiction.

#### Fusion par sommation

Les images ont ensuite été sommées.

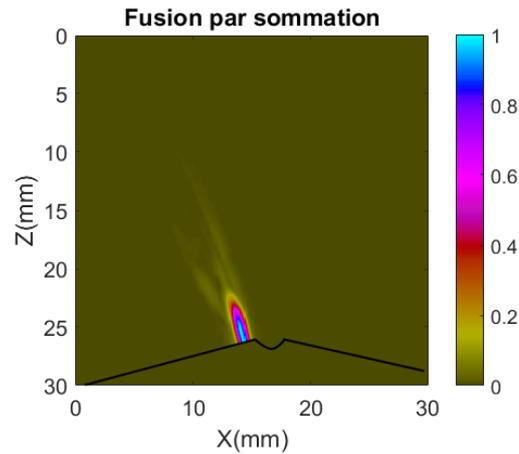


Fig 6.23 – Fusion par sommation des modes sélectionnés

L'information spéculaire est conservée après la fusion par sommation. L'image ne présentant pas d'artefacts, la procédure de filtrage n'a pas été appliquée.

### Dimensionnement

La position du défaut dans une zone de forte amplitude SEE nous permet de prédire que la diffraction ne sera pas gênante pour le dimensionnement car négligeable devant la réflexion spéculaire.

Nous avons appliqué l'algorithme de compensation des variations d'amplitude et nous avons tracé la courbe échodynamique du défaut.

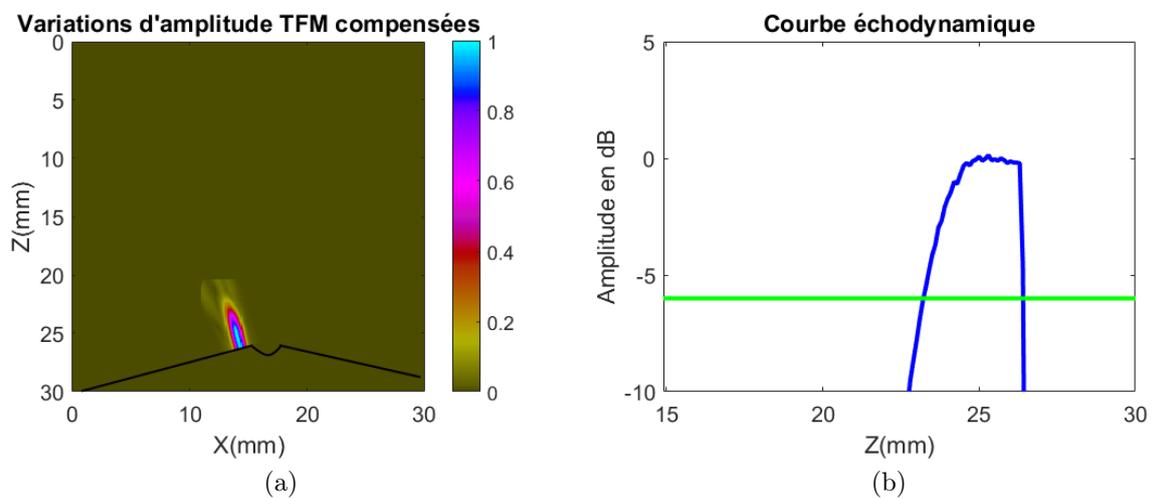


Fig 6.24 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

La hauteur mesurée est 3,2mm soit une erreur relative de 5%.

#### 6.2.4.2 Données expérimentales

Les images TFM des modes sélectionnés sont fournies dans la figure ci-dessous.

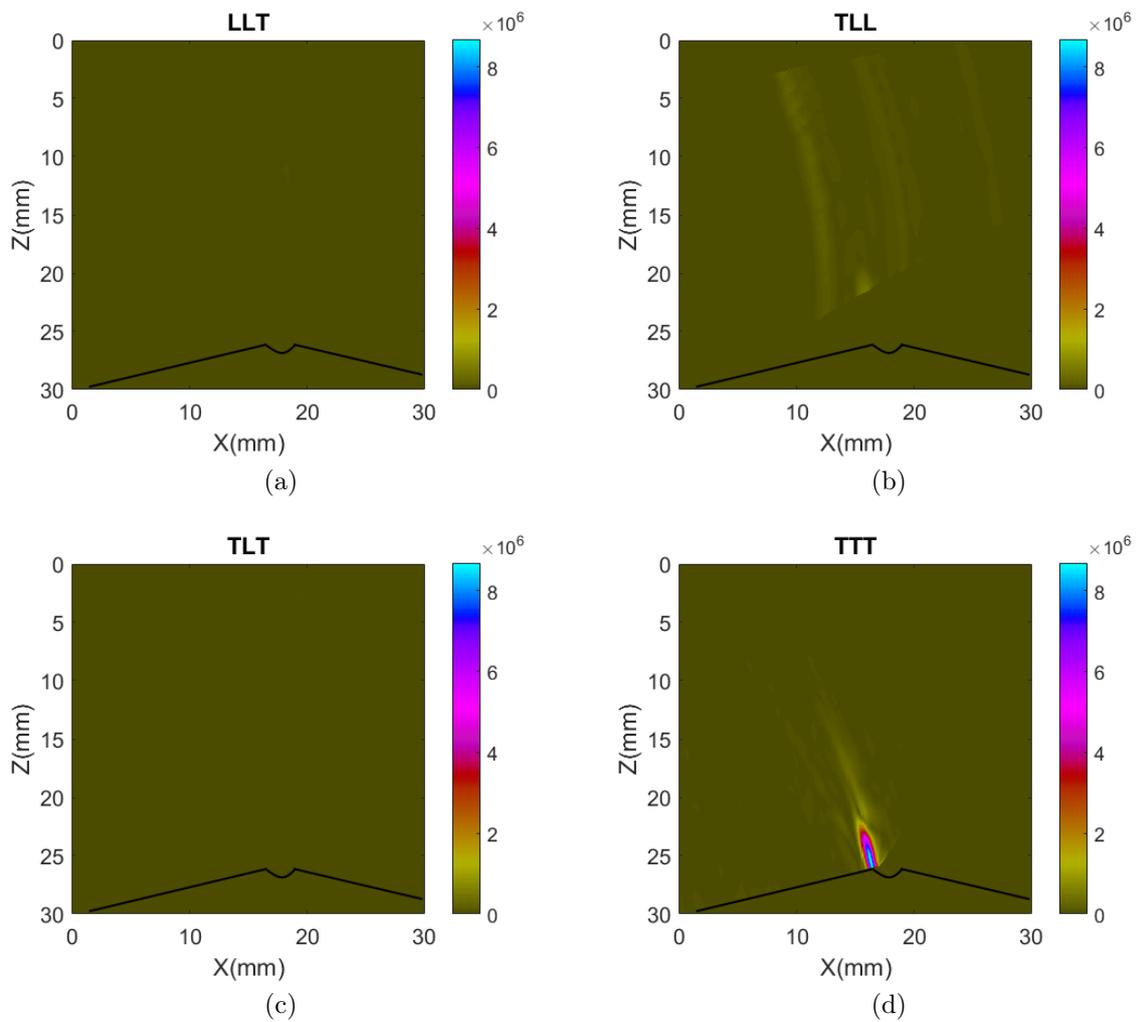


Fig 6.25 – Images TFM expérimentales des modes LLT, TLT et TTT

Comme pour les données simulées, le défaut n'est reconstruit qu'avec le mode TTT conformément à la prédiction.

### Fusion par sommation

Les images ont ensuite été sommées.

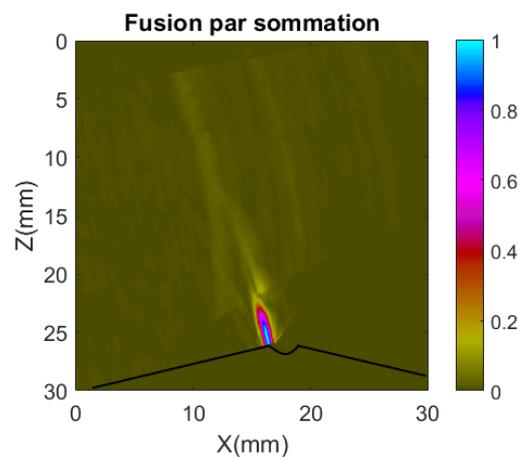


Fig 6.26 – Fusion par sommation des modes sélectionnés

L'information spéculaire est conservée.

## Dimensionnement

Nous avons appliqué l'algorithme de compensation des variations d'amplitude et nous avons tracé la courbe échodynamique du défaut.

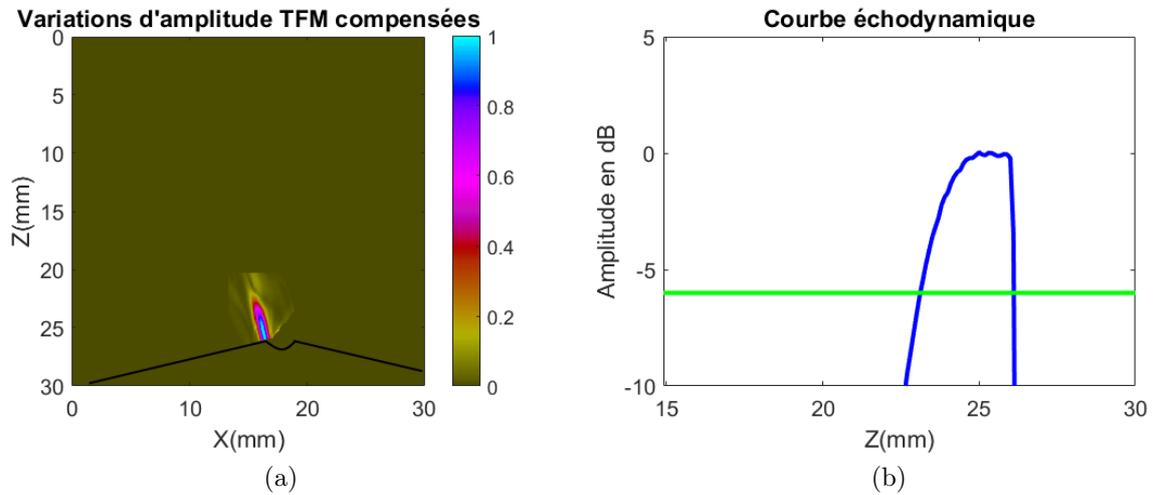


Fig 6.27 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

La hauteur mesurée est 3mm soit la hauteur réelle du défaut.

## 6.3 Pièce à faces planes

Dans cette pièce, deux défauts verticaux et deux défauts inclinés de  $20^\circ$  par rapport à la verticale ont été usinés.

### 6.3.1 Défaut vertical de 10mm de hauteur

La configuration considérée est la suivante :

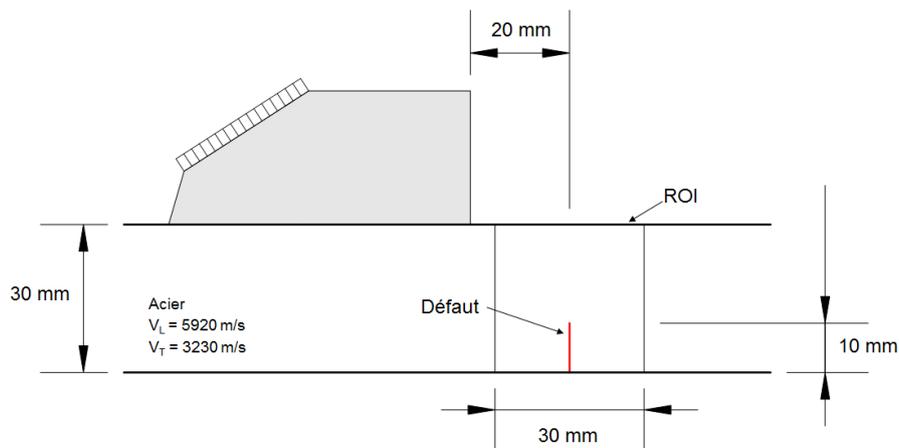


Fig 6.28 – Configuration d'inspection : pièce plane, défaut vertical de 10mm de hauteur

Nous avons calculé l'estimateur SEE pour tous les modes écho de coin. La sélection des modes basée sur la maximisation de l'amplitude SEE conduit aux trois modes TTT, TLT et LLT (Fig 6.29).

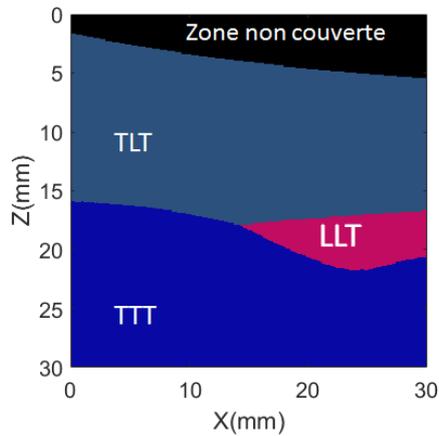


Fig 6.29 – Cartographie des modes obtenue à partir de la sélection sur critère de maximisation de l'estimateur SEE

Cette cartographie montre que les trois modes LLT, TLT et TTT sont suffisants pour reconstruire un défaut vertical dans la ROI définie, sauf dans la partie supérieure de la pièce qui n'est pas couverte. Ainsi un défaut débouchant en paroi externe ne sera pas reconstruit par un mode écho de coin.

Pour valider l'estimateur SEE, nous avons calculé les cartographies SEE et les images TFM des modes sélectionnés pour des données simulées et pour des données expérimentales.

### 6.3.1.1 Données simulées

#### Cartographies SEE et reconstructions TFM

Dans le cas des données simulées, on rappelle que l'amplitude minimale de détection est nulle, la dynamique des cartographies SEE est donc comprise en 0 et l'amplitude maximale du mode TTT qui a l'amplitude SEE la plus énergétique dans ce cas présent.

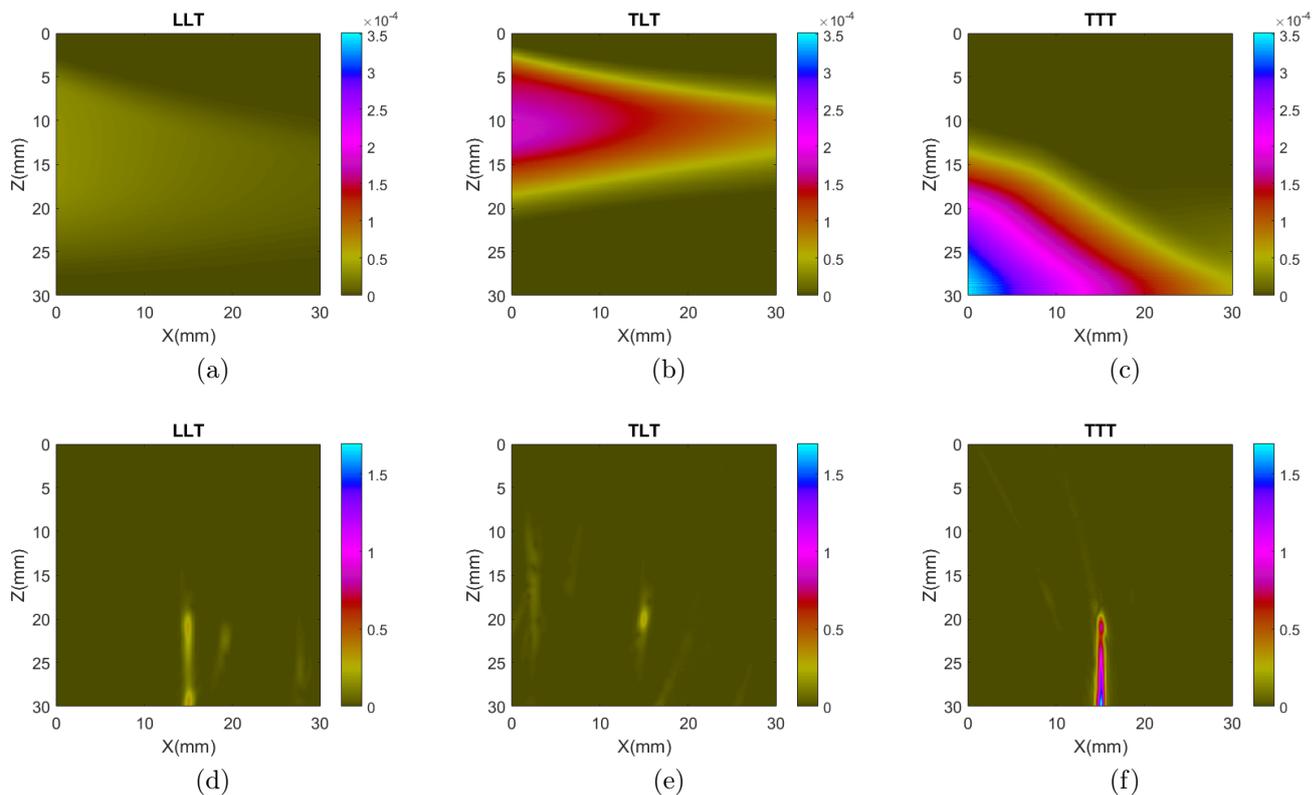


Fig 6.30 – Cartographies SEE des modes (a) LLT, (b) TLT et (c) TTT, Images TFM simulées des modes (d) LLT, (e) TLT et (f) TTT

– Le mode LLT montre que le défaut sera reconstruit sur quasiment toute sa hauteur avec une amplitude qui décroît légèrement avec la profondeur. En outre, cette amplitude est faible comparée à celle du mode TTT.

En accord avec la prédiction, l'image TFM du mode LLT présente une amplitude faible comparée au mode TTT et qui décroît avec la profondeur.

– La cartographie SEE du mode TLT montre que le défaut débouchant en paroi interne de 10mm de hauteur ne sera pas reconstruit. Sur l'image TFM, seule la diffraction haute est reconstruite.

– La cartographie du mode TTT montre que le défaut sera reconstruit sur toute sa hauteur avec une amplitude qui croît avec la profondeur, en accord avec l'image TFM.

### Fusion par sommation

Avant de fusionner par sommation les images TFM, on rappelle que l'amplitude TFM est annulée en dehors de la zone effective de chaque mode.

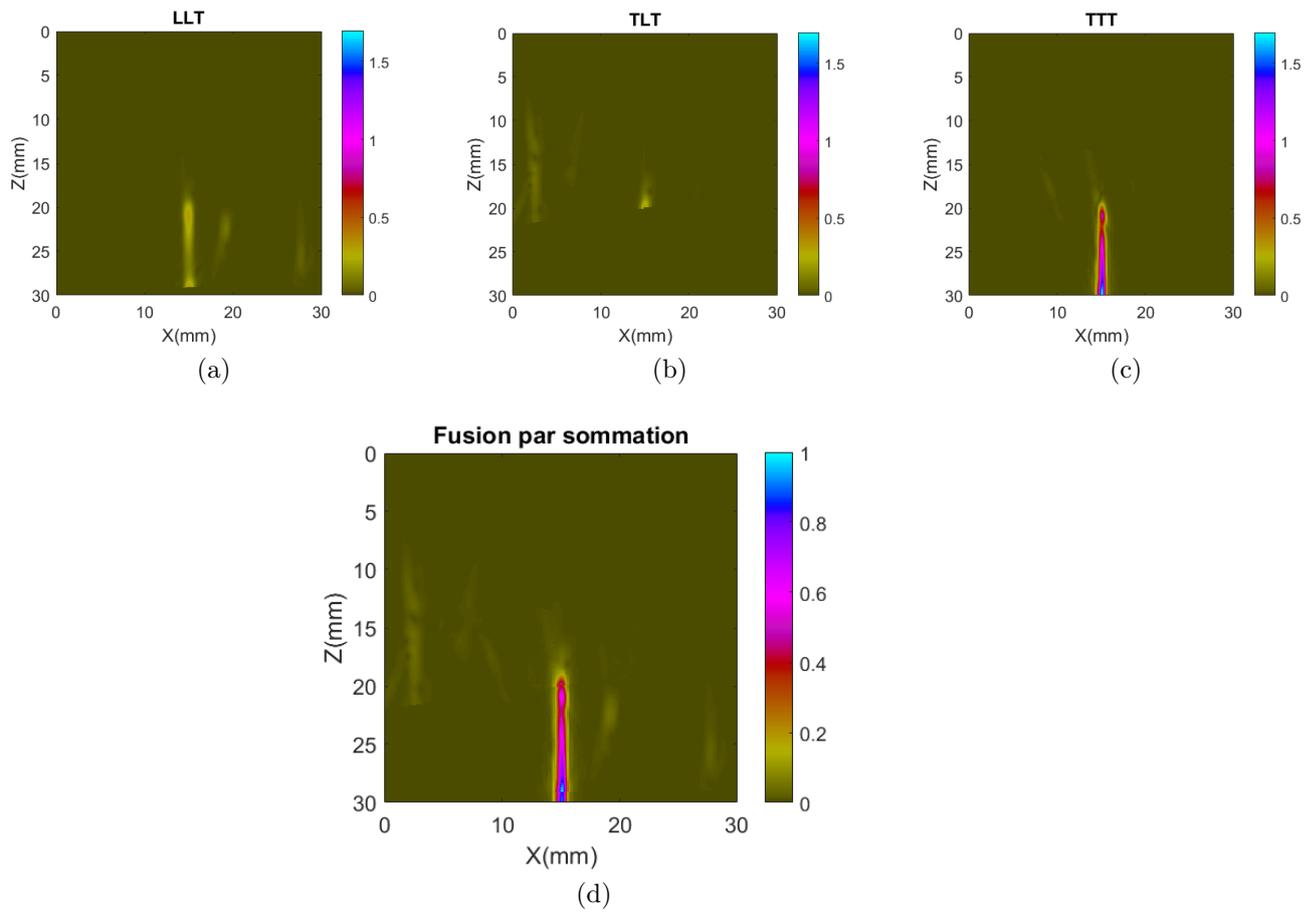


Fig 6.31 – Images TFM restreintes à la zone effective pour les modes (a) LLT, (b) TLT et (c) TTT, (d) Image issue de la sommation des images (a), (b) et (c)

Le défaut est reconstruit sur toute sa hauteur et comme attendu, les artefacts présents dans les images de départ sont également conservés.

### Filtrage des artefacts

Pour éliminer ces artefacts, la procédure de filtrage a été appliquée sur l'image issue de la sommation.

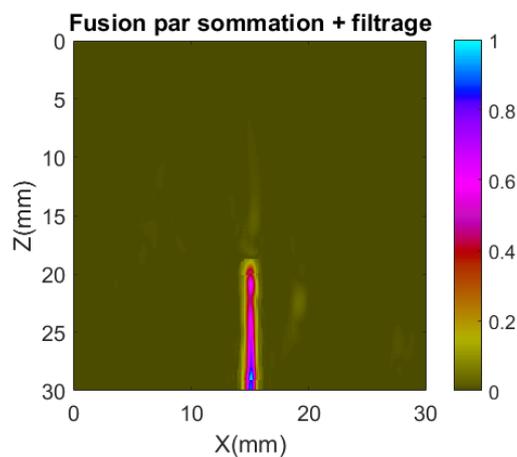


Fig 6.32 – Image obtenue après filtrage des artefacts

L'image obtenue montre que le filtrage a permis de filtrer la plupart des artefacts.

### Dimensionnement

Sur la cartographie SEE du mode TTT apte à reconstruire le défaut de manière spéculaire, on constate que l'extrémité supérieure du défaut est située dans une zone où l'amplitude de l'estimateur SEE est faible. Dans ce cas, la diffraction n'est plus négligeable et va induire des erreurs de dimensionnement.

Nous avons compensé les variations de l'amplitude TFM sur une zone restreinte autour du défaut. La courbe échodynamique de cette image est ensuite tracée et les limites du défaut sont retrouvées à -6dB.

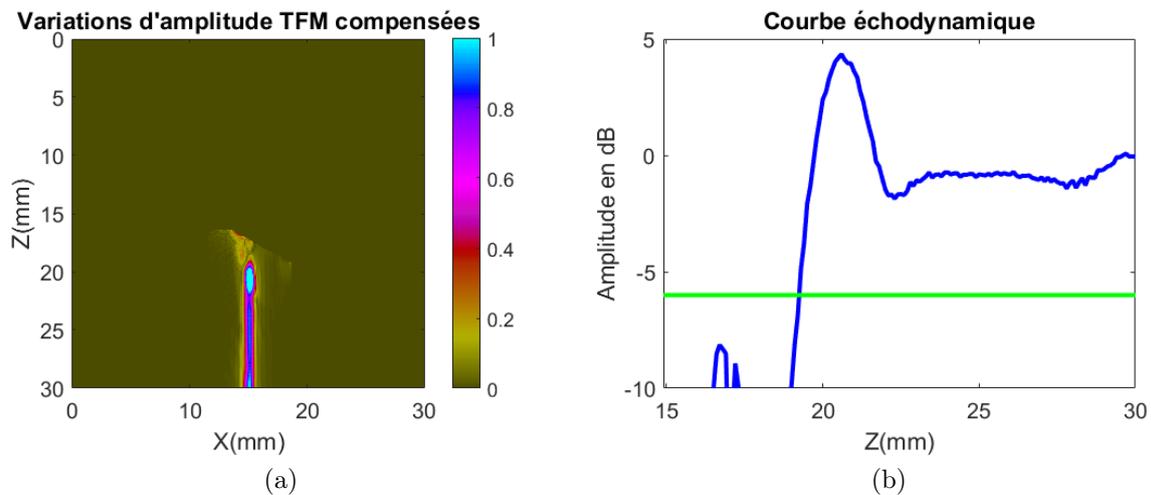


Fig 6.33 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

La compensation permet de retrouver une amplitude quasi-constante le long du défaut. On note cependant une surintensité aux extrémités du défaut liée à la présence de la diffraction. La hauteur du défaut est estimée à -6dB à partir des coordonnées du point de référence qui on le rappelle est le point d'amplitude maximale avant la compensation. La hauteur mesurée est de 10,7mm, soit une surestimation de 7% de la hauteur réelle.

Notons également que le pic d'amplitude liée à la diffraction n'est pas maximal à  $z=20$ mm soit à l'extrémité du défaut mais en  $z=20,6$ mm.

#### 6.3.1.2 Données expérimentales

##### Cartographies SEE et reconstructions TFM

Les cartographies SEE des modes LLT, TLT et TTT ont également été calculées pour des données expérimentales. Les images TFM sont reconstruites dans la zone effective associée.

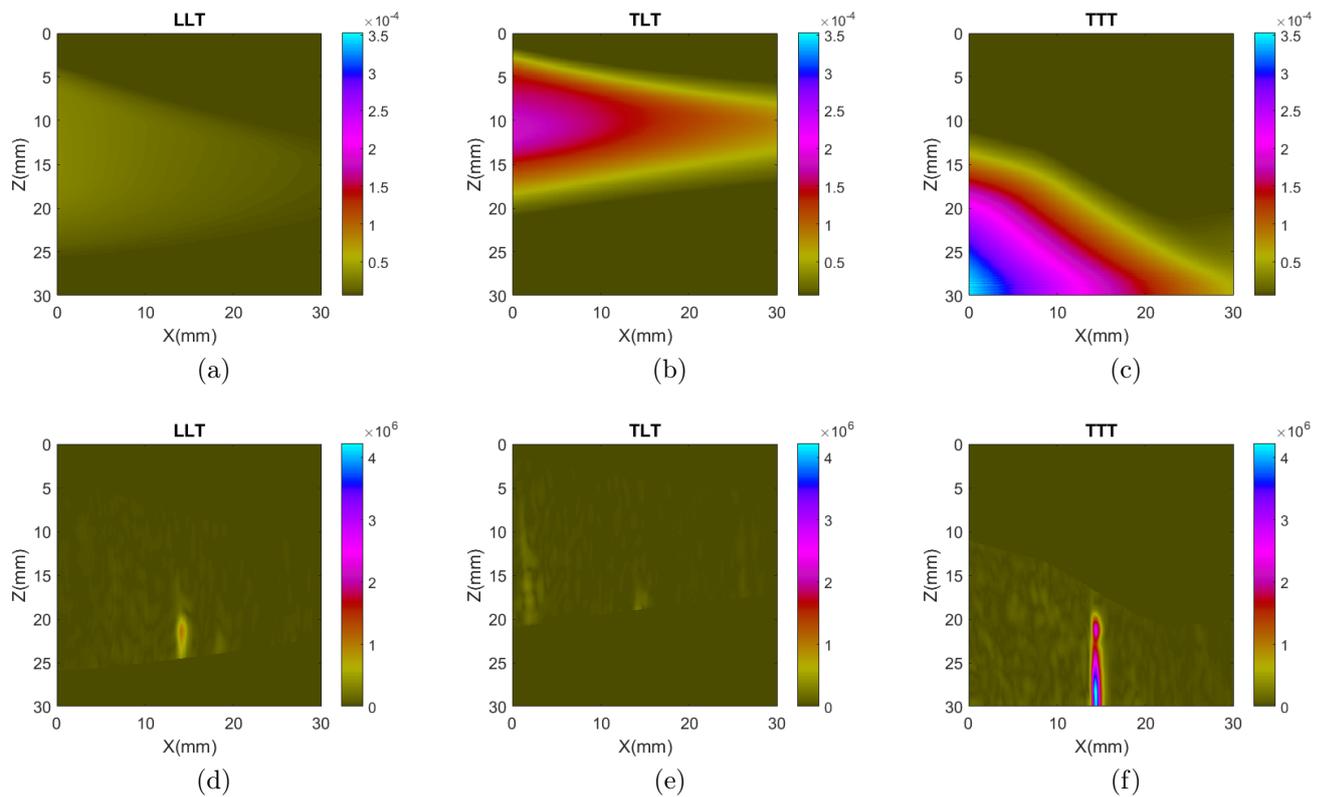


Fig 6.34 – Cartographies SEE des modes (a) LLT, (b) TLT et (c) TTT, Images TFM expérimentales restreintes à leur zone effective des modes (d) LLT, (e) TLT et (f) TTT

En accord avec les cartographies SEE, seul le mode TTT reconstruit le défaut sur toute sa hauteur avec une amplitude maximale. Le mode LLT couvre la partie supérieure du défaut qui est également reconstruite mais avec une amplitude plus faible que le mode TTT.

### Fusion par sommation

Les images TFM reconstruites ont ensuite été fusionnées selon la méthode de fusion par sommation.

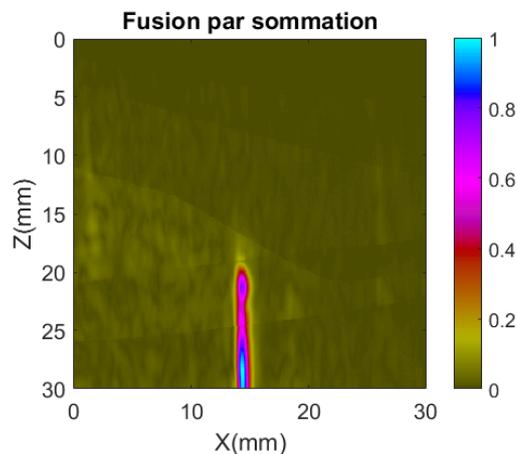


Fig 6.35 – Fusion par sommation des modes sélectionnés

L'image ne présente pas d'artefacts de reconstruction d'amplitude notable, c'est à dire supérieure au niveau de bruit. Nous avons cependant appliqué la procédure de filtrage

afin d'améliorer le rapport signal à bruit. On rappelle en effet que le filtrage des artefacts s'accompagne d'un gain de RSB.

### Filtrage des artefacts

La procédure de filtrage des artefacts a été appliquée sur l'image issue de la fusion par sommation.

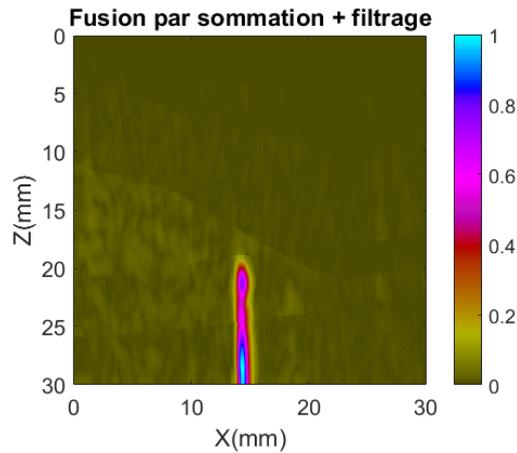


Fig 6.36 – Image obtenue après filtrage des artefacts de reconstruction

Le gain de RSB (2dB) est négligeable dans le cas présent.

### Dimensionnement

Comme pour les données simulées, la diffraction va conduire à des erreurs de dimensionnement car non négligeables.

Les variations d'amplitude ont été compensées via l'estimateur SEE et la courbe échodynamique a été tracée.

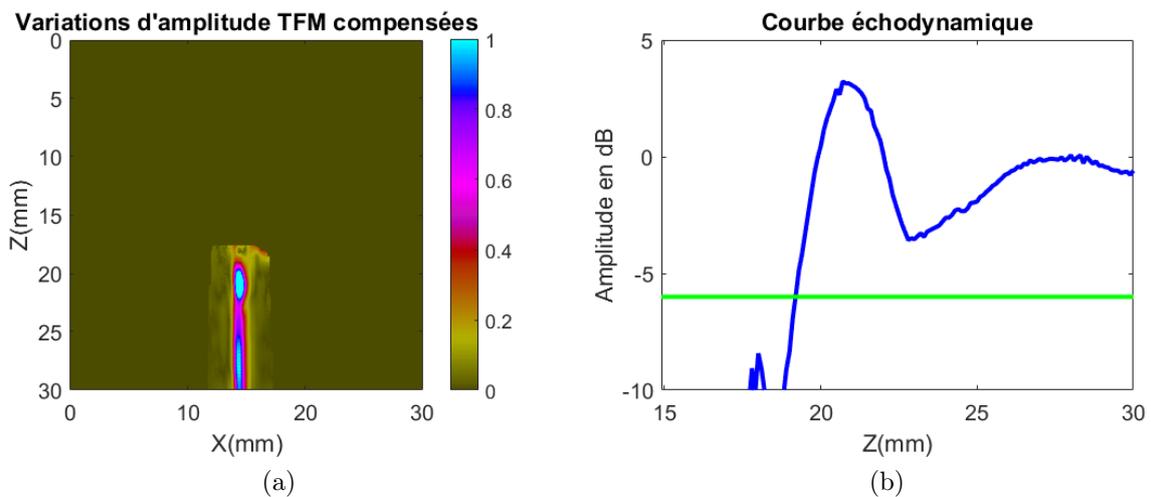


Fig 6.37 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

Comme pour les données simulées, la position de l'extrémité supérieure dans une zone où l'amplitude de l'estimateur SEE est négligeable conduit à des interférences entre les échos spéculaires et les échos de diffraction.

La compensation des variations d'amplitude TFM ne permet alors pas de retrouver une amplitude constante le long du défaut. Outre le pic d'amplitude à l'extrémité supérieure, on a une baisse d'amplitude non négligeable autour de  $z=23\text{mm}$  qui peut s'expliquer par ces phénomènes d'interférences.

Le tracé de la courbe échodynamique a permis de mesurer une hauteur de  $10,7\text{mm}$  à  $-6\text{dB}$ . L'erreur induite par la diffraction reste donc négligeable dans le cas présent.

### 6.3.2 Défaut vertical de 3mm de hauteur

Avec la même configuration que précédemment, nous avons réalisé une acquisition FMC pour un défaut vertical débouchant de  $3\text{mm}$  de hauteur. Les images des modes de reconstruction sélectionnés ont été calculées.

#### 6.3.2.1 Données simulées

##### Reconstruction TFM des modes prédits

Les images TFM des modes LLT, TLT et TTT ont été calculées pour les données simulées. Les images ne sont reconstruites que dans leur zone effective.

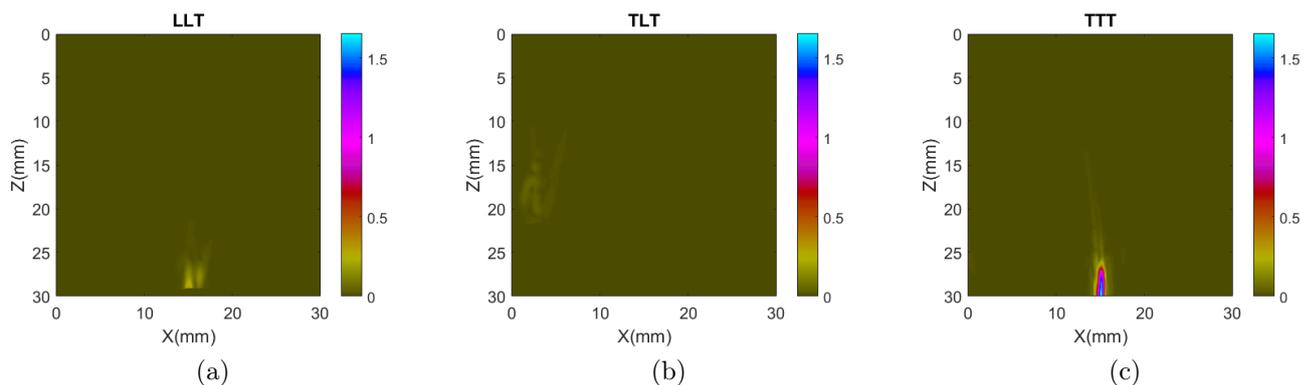


Fig 6.38 – Images TFM simulées des modes LLT, TLT et TTT

Comme prédit, seul le mode TTT permet de reconstruit le défaut sur toute sa hauteur.

##### Fusion par sommation

Les images précédentes ont été fusionnées selon le principe de la fusion par sommation

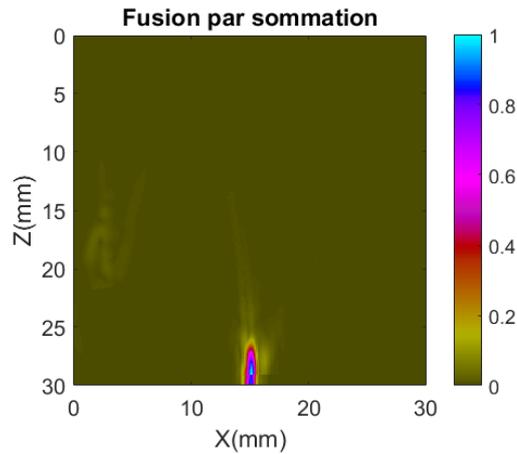


Fig 6.39 – Fusion par sommation des modes sélectionnés

L'information liée au défaut est conservée. Au vu de l'amplitude très faible des artefacts, la procédure de filtrage n'est pas nécessaire ici.

### Dimensionnement

La cartographie SEE du mode TTT qui est le seul mode apte à reconstruire le défaut sur toute sa hauteur montre que les limites du défaut sont situées dans une zone de forte amplitude SEE. On peut donc prédire que la diffraction sera négligeable.

Les variations d'amplitude ont été compensées via l'estimateur SEE et la hauteur du défaut estimée à partir de la courbe échodynamique à -6dB.

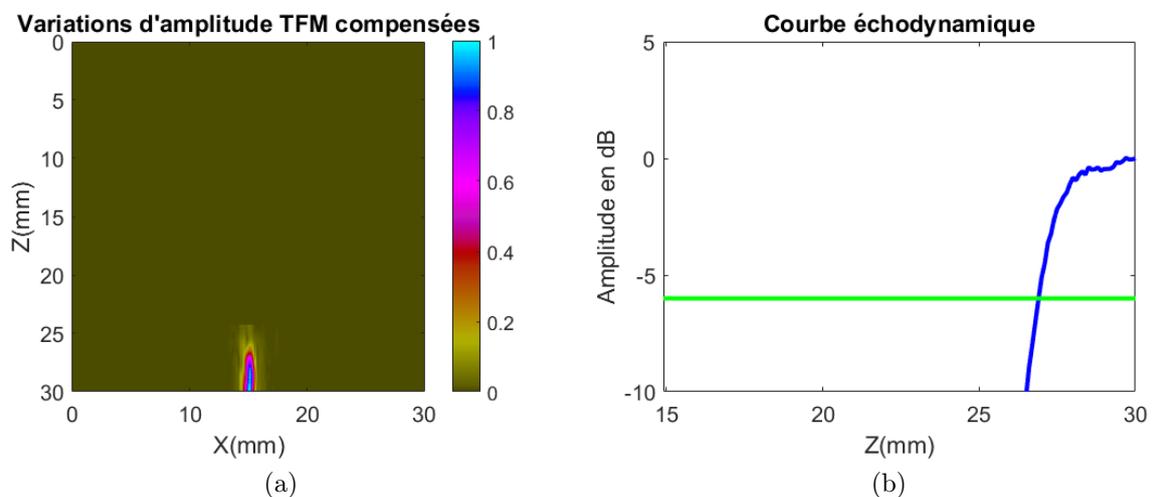


Fig 6.40 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

La hauteur du défaut estimée à -6dB sur la courbe échodynamique est de 3mm soit la hauteur réelle du défaut.

### 6.3.2.2 Données expérimentales

#### Reconstruction TFM des modes sélectionnés

Les images TFM ont été calculées pour les modes LLT, TLT et TTT sur les données expérimentales. Les calculs sont faits sur la zone effective associée à chaque mode.

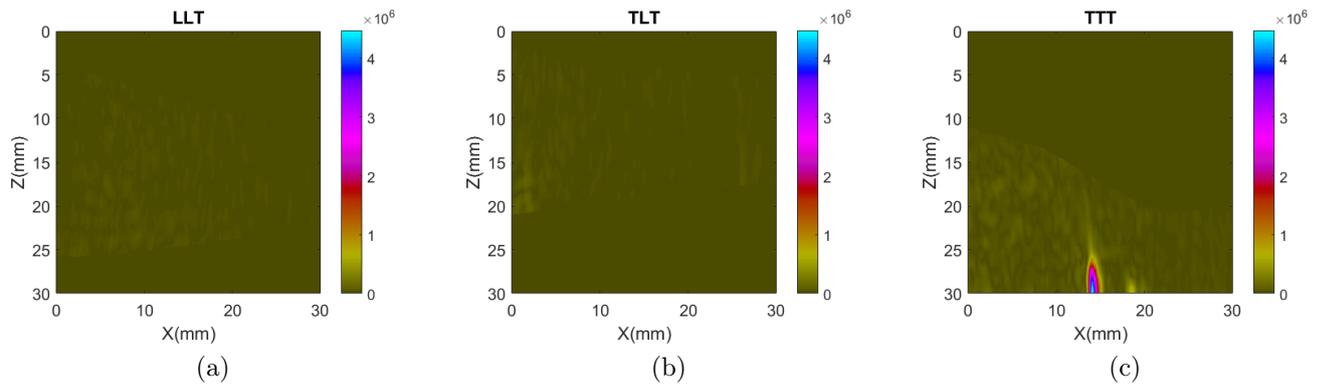


Fig 6.41 – Images TFM expérimentales des modes LLT, TLT et TTT

Seul mode TTT est apte à reconstruire de manière spéculaire le défaut. Cette prédiction est en cohérence avec les images TFM.

### Fusion par sommation

Les images TFM ont ensuite été sommées.

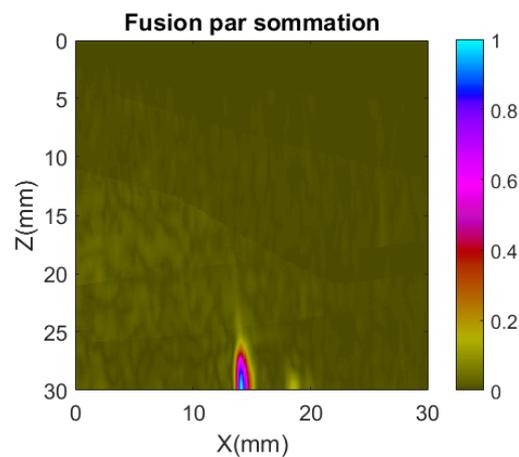


Fig 6.42 – Fusion par sommation des modes sélectionnés

La fusion par sommation a permis de conserver l'information pertinente du défaut.

### Dimensionnement

Comme pour les données simulées, les extrémités du défaut sont situées dans des zones où l'amplitude SEE est maximale. Le dimensionnement ne sera donc pas perturbé par la présence de la diffraction.

Les variations d'amplitude ont été compensées via l'estimateur SEE et la hauteur du défaut estimée à partir de la courbe éhodynamique à -6dB.

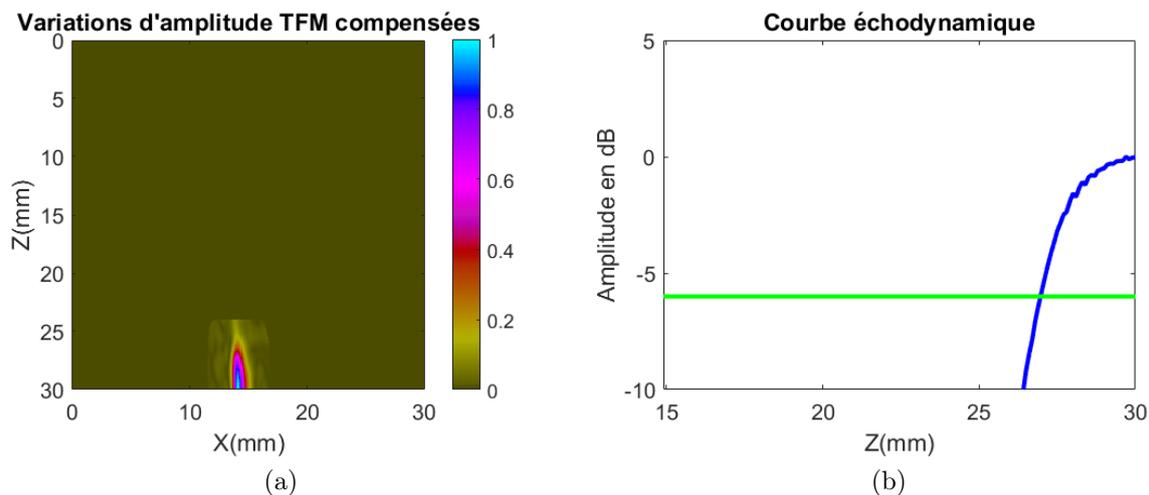


Fig 6.43 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

La hauteur du défaut estimée à -6dB sur la courbe échodynamique est de 3mm soit la hauteur réelle du défaut.

### 6.3.3 Défaut de 10mm de hauteur incliné

Le défaut a une hauteur de 10mm et il est incliné de  $20^\circ$  par rapport à la verticale. L'inclinaison est dirigée vers le capteur comme illustrée dans la configuration ci-après :

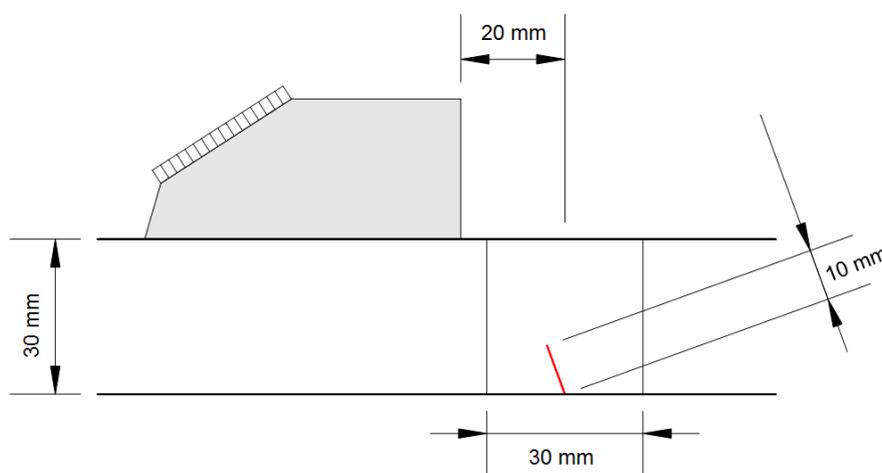


Fig 6.44 – Configuration d'inspection : pièce à faces planes, défaut de 10mm de hauteur et incliné de  $20^\circ$  par rapport à la verticale

L'estimateur SEE est calculé pour tous les modes écho de coin et une sélection suivant le critère de maximisation de l'amplitude SEE est réalisée. Elle fournit la cartographie suivante.

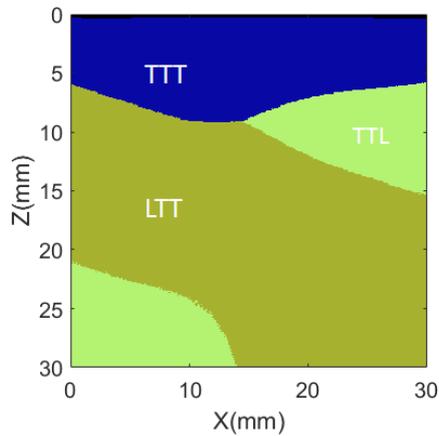


Fig 6.45 – Cartographie des modes obtenus suivant une sélection sur critère de maximisation de l'estimateur SEE

Les cartographies et les images TFM associées aux modes sélectionnés ont été calculées sur des données simulées et sur des données expérimentales.

### 6.3.3.1 Données simulées

#### Cartographies SEE et reconstructions TFM

Les cartographies SEE ainsi que les images TFM des modes LTT, TTL et TTT ont été reconstruites. Les images TFM sont reconstruites dans la zone effective associée de chaque mode.

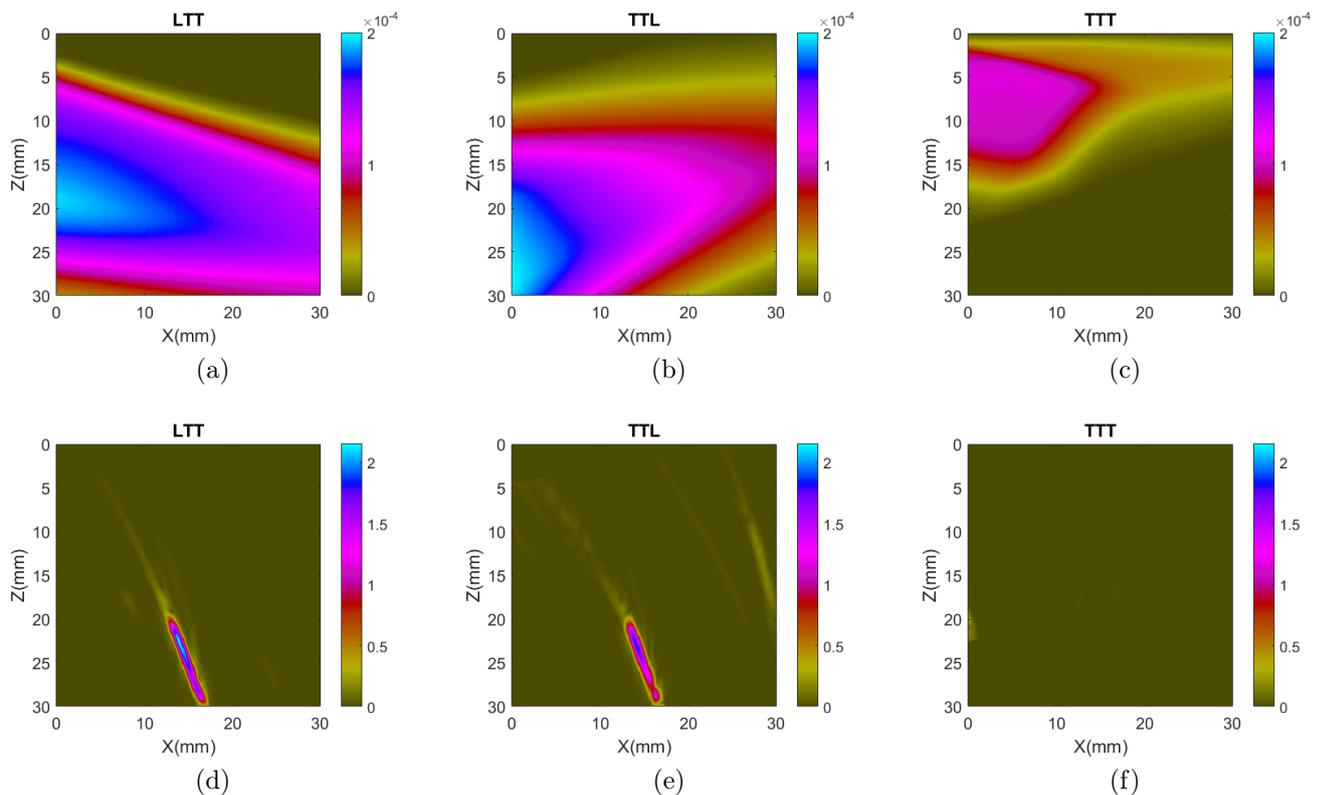


Fig 6.46 – Cartographie SEE des modes (a) LTT, (b) TTL et (c) TTT pour un défaut de 20°. Images TFM simulées des modes (d) LTT, (e) TTL et (f) TTT

Conformément à la prédiction, le défaut débouchant en paroi interne n'est reconstruit que par les modes LTT et TTL.

### Fusion par sommation et filtrage des artefacts

Les trois images ont ensuite été sommées et la procédure de filtrage des artefacts a été appliquée sur l'image issue de la sommation.

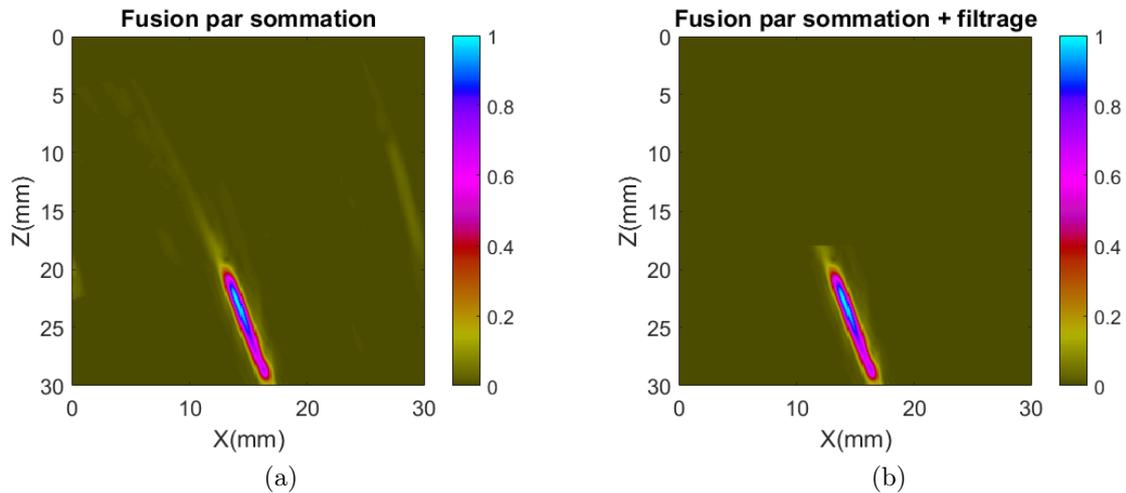


Fig 6.47 – (a) Fusion par sommation des modes sélectionnés (b) Image filtrée de ses artefacts

La fusion par sommation a permis de conserver l'information pertinente et la procédure de filtrage a permis de supprimer tous les échos parasites.

### Dimensionnement

L'extrémité supérieure du défaut est située dans une zone où l'amplitude SEE est maximale, tandis que l'extrémité inférieure est dans une zone où l'amplitude SEE est faible. On peut donc prédire que les effets de la diffraction seront surtout notables à l'extrémité inférieure du défaut.

Les variations d'amplitudes ont été compensées et la courbe échodynamique du défaut été tracée.

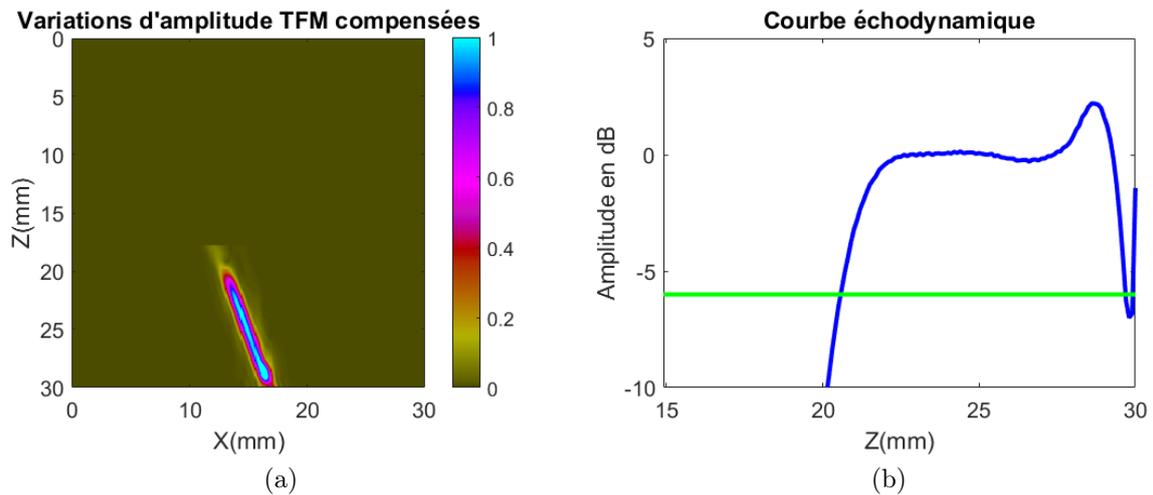


Fig 6.48 – (a) Compensation des variations d’amplitude (b) Courbe échodynamique

La compensation des variations d’amplitude a permis d’avoir une amplitude relativement constante sur le défaut. On relève un léger pic d’amplitude vers  $z=28\text{mm}$  avant une décroissance brusque de l’amplitude. Cette variation peut s’expliquer par les interférences entre les échos de diffraction et les échos spéculaires.

A partir de la courbe échodynamique du défaut, la hauteur projetée sur l’axe Z a été mesurée puis corrigée par l’inclinaison du défaut. On obtient ainsi une hauteur de  $9,6\text{mm}$  soit une erreur relative de 4%.

### 6.3.3.2 Données expérimentales

#### Cartographies SEE et reconstructions TFM

Les cartographies SEE ainsi que les images TFM des modes LTT, TTL et TTT ont été reconstruites. Les images TFM sont elles reconstruites dans la zone effective associée de chaque mode.

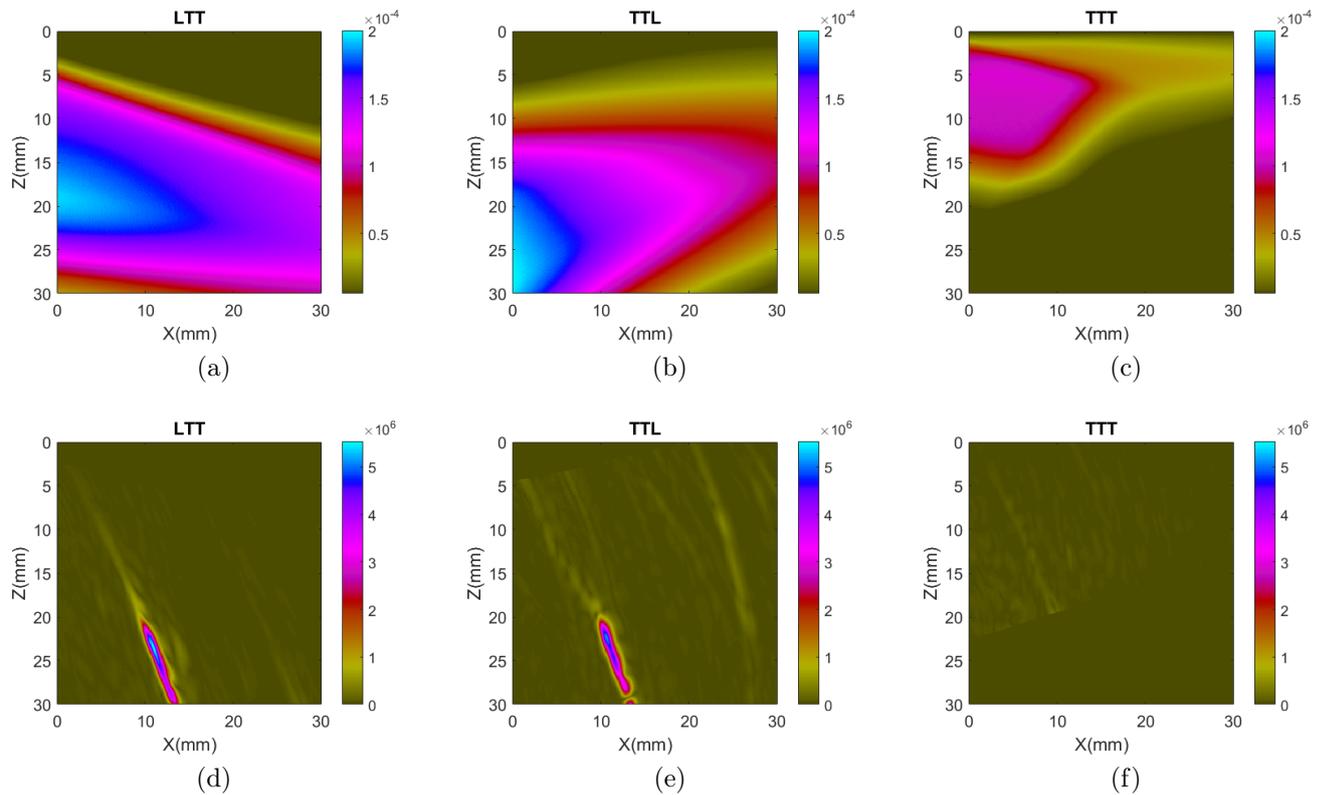


Fig 6.49 – Images TFM expérimentales des modes LTT, TTL et TTT

Comme les images simulées, les images expérimentales sont en cohérence avec les cartographies SEE. Les modes LTT et TTL permettent de reconstruire un défaut débouchant en paroi interne.

### Fusion par sommation et filtrage des artefacts

Les images ont ensuite été sommées et les artefacts filtrés.

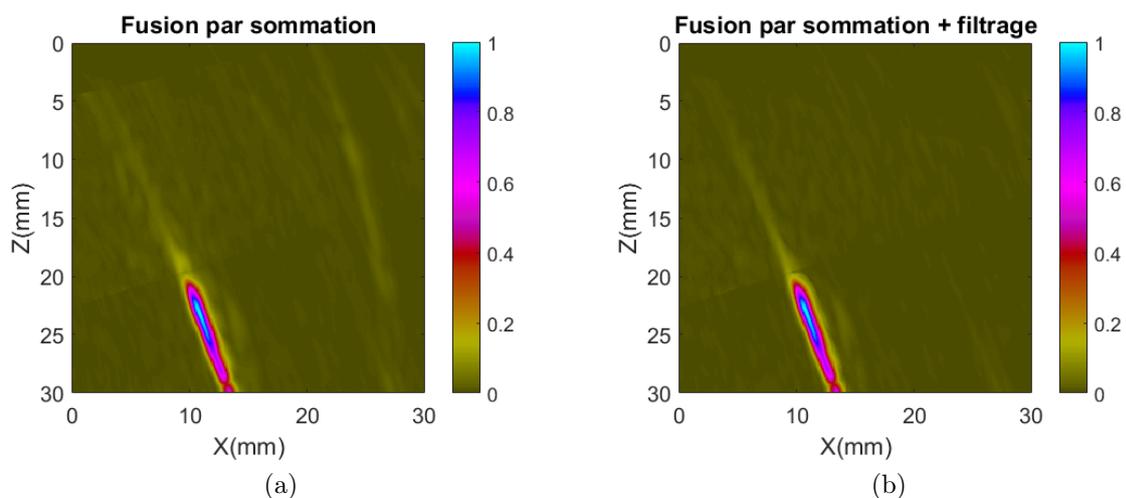


Fig 6.50 – (a) Fusion par sommation des modes sélectionnés (b) Image filtrée de ses artefacts

L'indication spéculaire du défaut est conservée après la fusion par sommation et tous les artefacts sont filtrés. On mesure un gain de rapport signal à bruit de 5dB après le

filtrage des artefacts.

### Dimensionnement

Les variations d'amplitudes ont été compensées grâce à l'estimateur SEE et la hauteur du défaut estimée à partir de la courbe échodynamique.

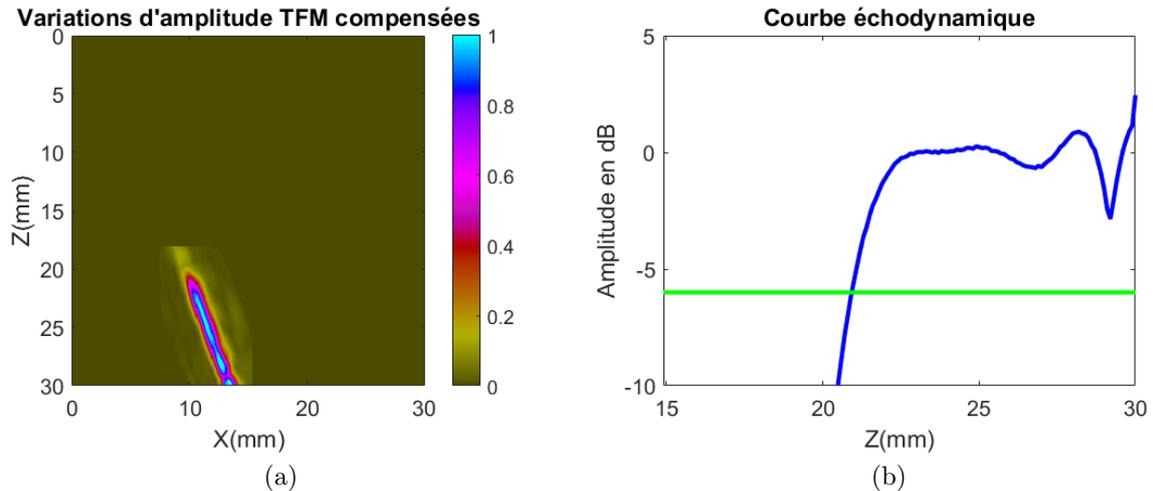


Fig 6.51 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

Comme pour les données simulées, la compensation des variations d'amplitude a permis d'avoir une amplitude relativement constante sur le défaut. De même, on observe une décroissance brusque de l'amplitude en  $z=28\text{mm}$ .

La hauteur mesurée à  $-6\text{dB}$  sur la courbe échodynamique est de  $9,6\text{mm}$  soit une erreur relative de  $4\%$ .

### 6.3.4 Défaut de 3mm de hauteur incliné

On considère maintenant un défaut incliné de 3mm de hauteur.

#### 6.3.4.1 Données simulées

##### Reconstruction TFM

Les images TFM ont été reconstruites pour les modes LTT, TTL et TTT dans leur zone effective.

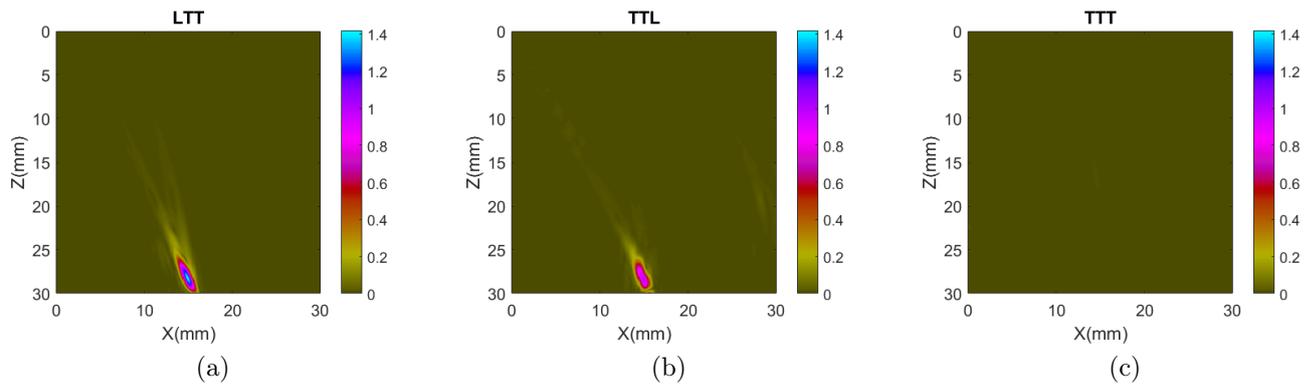


Fig 6.52 – Images TFM simulées des modes LTT, TTL et TTT

L'indication spéculaire est bien reconstruite par les modes LTT et TTL aptes à reconstruire un défaut débouchant.

### Fusion par sommation

L'algorithme de fusion par sommation a été appliqué aux trois images TFM.

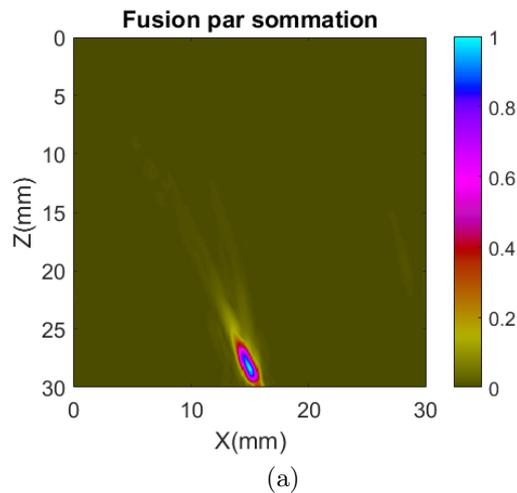


Fig 6.53 – Fusion par sommation des modes sélectionnés

L'information spéculaire est conservée après la fusion par sommation.

### Dimensionnement

Les variations d'amplitudes ont été compensées grâce à l'estimateur SEE et la hauteur du défaut estimée à partir de la courbe échodynamique.

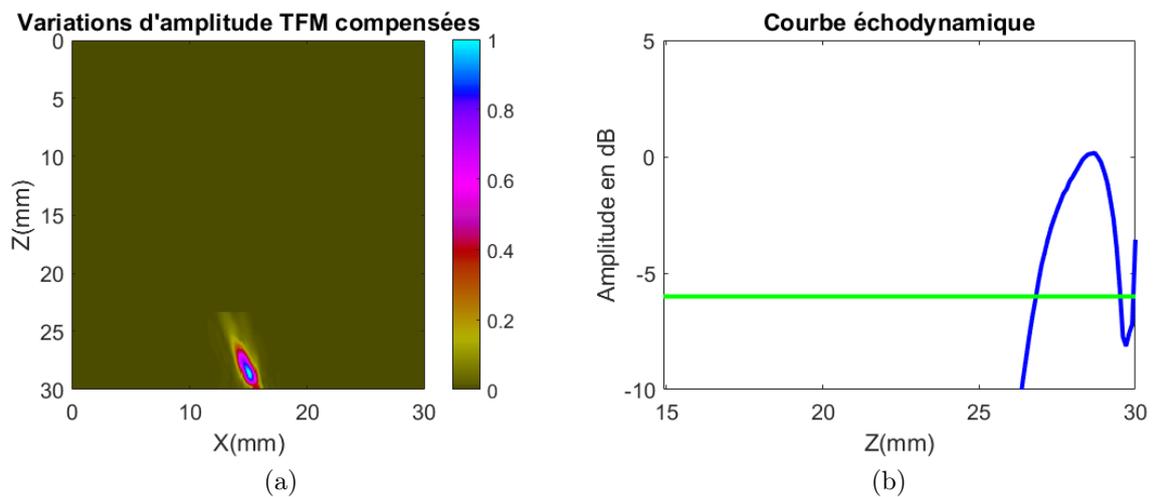


Fig 6.54 – (a) Compensation des variations d’amplitude (b) Courbe échodynamique

La hauteur mesurée à  $-6\text{dB}$  sur la courbe échodynamique est de  $2,8\text{mm}$  soit une erreur relative de  $7\%$ .

### 6.3.4.2 Données expérimentales

#### Reconstructions TFM

Les images TFM des modes LTT, TTL et TTT ont été calculées dans les zones effectives de ces modes.

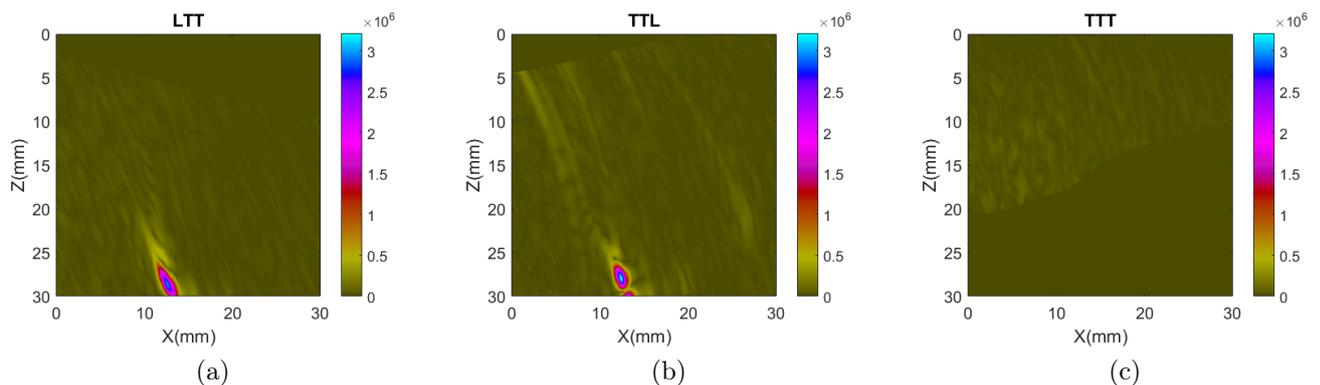


Fig 6.55 – Images TFM expérimentales des modes LTT, TTL et TTT

Les images TFM des modes LTT et TTL permettent de reconstruire le défaut comme prévu.

#### Fusion par sommation

Les images ont ensuite été sommées et les artefacts filtrés.

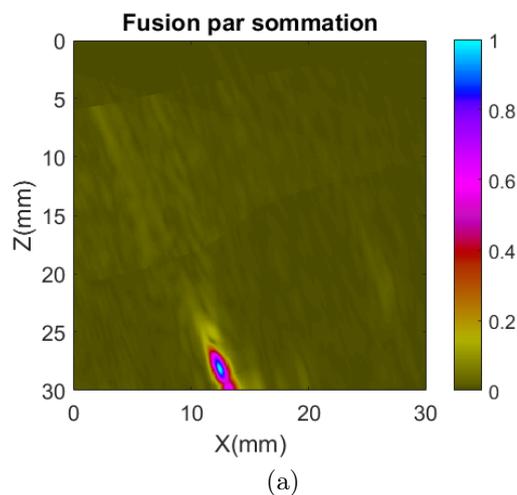


Fig 6.56 – Fusion par sommation des modes sélectionnés

L'information spéculaire est bien conservée.

### Dimensionnement

Les variations d'amplitude ont été compensées grâce à l'estimateur SEE et la hauteur du défaut mesurée.

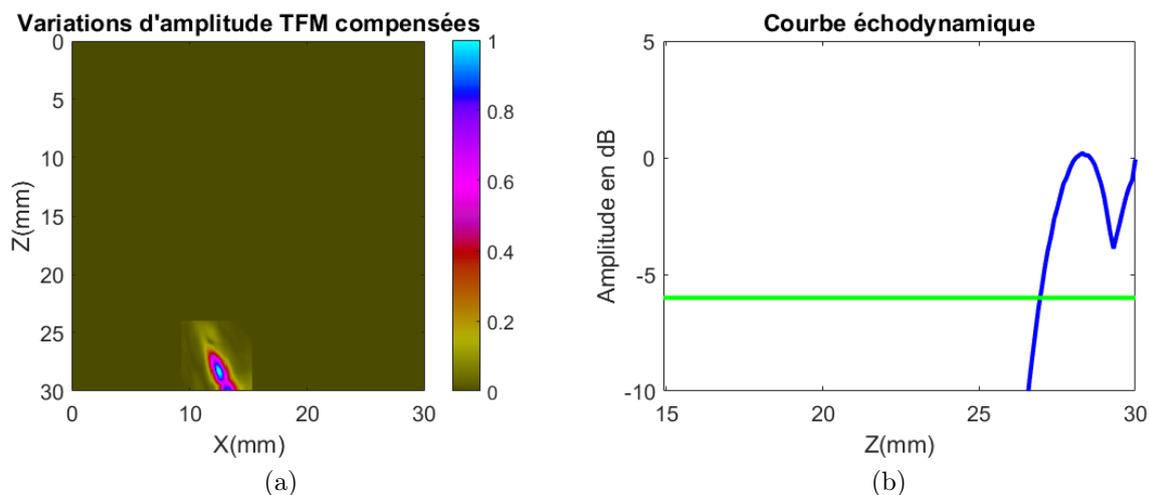


Fig 6.57 – (a) Compensation des variations d'amplitude (b) Courbe échodynamique

A  $-6\text{dB}$ , la hauteur mesurée sur la courbe échodynamique est de  $3,2\text{mm}$  soit une erreur relative de  $7\%$ .

## 6.4 Tableaux récapitulatifs

Les résultats de dimensionnement des différents défauts sont résumés dans les tableaux suivants :

Orientation	Hauteur réelle	Hauteur mesurée (données simulées)	Hauteur mesurée (données expérimentales)
0°	10mm	10,4mm	10,5mm
0°	3mm	3,6mm	3,4mm
-14°	10mm	10,5mm	10,4mm
-14°	3mm	3,2mm	3mm

Tableau 6.2 – Résumé du dimensionnement pour la pièce présentant un délardage de 14°

Orientation	Hauteur réelle	Hauteur mesurée (données simulées)	Hauteur mesurée (données expérimentales)
0°	10mm	10,8mm	10,7mm
0°	3mm	3mm	3mm
-20°	10mm	9,6mm	9,6mm
-20°	3mm	2,8mm	3,2mm

Tableau 6.3 – Résumé du dimensionnement pour la pièce à faces planes

Pour tous les défauts considérés, on peut noter que la hauteur mesurée est très proche de la hauteur réelle. L'erreur de mesure est en moyenne autour de 5% sauf dans les cas où la diffraction n'est pas négligeable. C'est le cas du défaut de 10mm vertical dans la première pièce et le défaut de 3mm vertical dans la seconde pièce.

## Conclusion

Pour tous les défauts considérés, nous avons observé que la cartographie SEE est toujours cohérente avec l'image TFM associée et la fusion et le filtrage des artefacts ont permis de retrouver l'indication du défaut sans ambiguïté.

Le dimensionnement réalisé a fourni des hauteurs très proches de la hauteur réelle du défaut. Il est d'autant plus fiable que le défaut est situé dans une zone de forte amplitude SEE. En effet dans le cas contraire, le ratio entre l'amplitude de diffraction et l'amplitude n'est plus négligeable et peut conduire à des interférences constructives ou destructives. Dans le premier cas, le défaut est surdimensionné, la pente de décroissance n'étant plus liée à la zone de Fresnel mais à la résolution liée à la diffraction.

Dans le second cas, l'amplitude spéculaire est plus faible que prévu et la compensation n'est alors pas suffisante, le défaut est alors sous-dimensionné.

Les erreurs induites restent cependant de l'ordre de la longueur d'onde pour tous les cas étudiés.



# Conclusion générale

Cette thèse avait pour objectif le développement de méthodes de caractérisation de défauts basées sur l'imagerie TFM. Celle-ci présente en effet un intérêt particulier pour retrouver la nature des défauts plans grâce à la reproduction réaliste de leur morphologie.

Pour atteindre cet objectif, nous avons, dans un premier temps, reposé les bases de la méthode d'imagerie TFM en rappelant le principe de calcul des temps de vol, en estimant le pas de discrétisation spatial minimal et en rappelant le principe de la formation des modes de reconstruction et des images TFM. Outre la compréhension de l'algorithme, cette étude a montré l'existence d'une redondance de certains modes de reconstruction lorsque la matrice d'acquisition est symétrique, c'est à dire lorsque le même capteur est utilisé en émission et en réception. Nous avons alors défini une nouvelle convention qui a été utilisée pour toute la suite des travaux. La reconstruction TFM suivant ces différents modes conduit à différentes images pour une même acquisition FMC donnée, chacune apportant des indications pertinentes ou pas sur le défaut.

Dans le cas d'un défaut plan, nous avons montré que ces indications sont de trois natures : les indications de diffraction aux extrémités du défaut, l'indication spéculaire sur le profil du défaut et les artefacts de reconstruction. Ces différentes indications peuvent apparaître simultanément ou séparément sur les différentes images et leur formation dépend du mode de reconstruction, de la géométrie de la pièce, des caractéristiques du capteur (ouverture, pente du sabot), des caractéristiques du défaut (hauteur, profondeur, orientation) et de la position relative entre le capteur et le défaut.

Pour faciliter l'analyse des images reconstruites, l'objectif premier de la thèse était donc de déterminer les modes de reconstruction pertinents pour une configuration donnée et d'exploiter de manière combinée les différentes images sélectionnées afin d'obtenir des images explicites et fiable du défaut.

Nous avons alors développé un outil de prédiction appelé estimateur d'échos spéculaires SEE qui est basé sur la modélisation des phénomènes spéculaires sans connaissance à priori de la position ni des dimensions du défaut. L'estimateur SEE fournit une cartographie de détectabilité dont l'amplitude est proportionnelle à l'amplitude TFM d'un défaut quelle que soit sa position dans la pièce. Après l'avoir validé sur des configurations simulées et expérimentales, nous avons défini des méthodes de sélection des modes pertinents basées sur cet estimateur et nous avons développé des méthodes de fusion pour analyser de manière complémentaire les images.

Parmi les différentes méthodes de fusion développées, nous en avons privilégié deux : la fusion par sommation pour les indications spéculaires et la fusion par corrélation pour

les indications de diffraction. Dans le premier cas, toute l'information pertinente ou pas est conservée alors que dans le second cas, les artefacts de reconstruction peuvent être atténués. Nous avons donc développé une méthode de filtrage des artefacts qui allie des méthodes de traitement du signal et des méthodes de traitement d'images. Cette méthode permet de localiser fidèlement le défaut dont les caractéristiques telles que l'orientation et la dimension peuvent alors être déterminées.

Différentes méthodes d'estimation de l'orientation basées sur l'exploitation des signaux ou sur des méthodes de traitement d'images ont ainsi été développées et testées sur différents cas simulés. Pour ce qui est de la dimension du défaut, deux méthodes ont été proposées : une méthode basée sur les indications de diffraction et une méthode basée sur les indications spéculaires. La première est une méthode fiable qui ne peut toutefois s'appliquer que lorsque les indications de diffraction sont d'amplitude supérieure au bruit et sont spatialement distinctes. La seconde, appelée l'Image Amplitude Compensation sizing ou IAC-sizing, consiste à corriger les variations en sensibilité de l'amplitude TFM d'une indication spéculaire avant de réaliser une chute d'amplitude à -6dB. L'application de cette méthode sur des données simulées et sur des données expérimentales a montré une précision inférieure à la longueur d'onde.

Dans cette thèse, nous avons donc développé différentes méthodes qui permettent de reconstruire de façon réaliste et fiable un défaut plan dans une zone connue puis de le caractériser suivant l'information de diffraction ou l'information spéculaire. Ces méthodes ont été validées à partir de données simulées et expérimentales et permettent d'envisager une implémentation dans le logiciel CIVIA et dans les logiciels M2M.

Dans un futur proche, les performances en terme de vitesse de calcul pour une exploitation industrielle seront étudiées. Nous étudierons également l'exploitation de l'estimateur SEE pour l'optimisation de la configuration de contrôle, c'est à dire le choix du capteur, de sa position...

A plus long terme, les méthodes développées pourront être étendues à des géométries non connues. En effet, dans le cadre de cette thèse, tous les paramètres tels que la géométrie de la pièce ainsi que les caractéristiques du matériau sont parfaitement connues. Cependant dans un contexte de contrôle réel, il peut subsister des incertitudes sur ces éléments. Il peut être intéressant d'utiliser les méthodes de reconstruction adaptatives pour retrouver le profil inférieur et supérieur de la pièce, avec des ondes de surface par exemple. Les méthodes pourront également être étendues à d'autres types d'imagerie, à des matériaux plus complexes et aussi à d'autres géométries de défauts (exemple : défaut ramifié).

# Bibliographie

- [1] R. Palanisamy and W. Lord. Prediction of eddy current probe signal trajectories. *IEEE Transactions on Magnetics*, 16(5) :1083–1085, Sep 1980.
- [2] D. Royer and E. Dieulesaint. *Ondes Elastiques dans les Solides*. Number vol. 2 in Enseignement de la physique. Masson, 1999.
- [3] Front matter. In J. D. Achenbach, editor, *Wave Propagation in Elastic Solids*, North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics, pages III –. Elsevier, Amsterdam, 1975.
- [4] B. A. Auld. *Rayleigh Wave Propagation*, pages 12–28. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1985.
- [5] H. Lamb. On waves in an elastic plate. *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 93(648) :114–128, 1917.
- [6] A. Macovski. Ultrasonic imaging using arrays. *Proceedings of the IEEE*, 67(4) :484–495, April 1979.
- [7] A. McNab and M. J. Campbell. Ultrasonic phased arrays for nondestructive testing. *NDT International*, 20(6) :333–337, 1987.
- [8] S.-C. Woo and Y. Shi. Influence of phased array element size on beam steering behavior. *Ultrasonics*, 36(6) :737–749, 1998.
- [9] J. F. Claerbout. *Fundamentals of Geophysical Data Processing*. Pennwell Books, Tulsa, OK, Jan 1985.
- [10] G. Zhan, W. Dai, M. Zhou, Y. Luo, and G. T. Schuster. Generalized diffraction-stack migration and filtering of coherent noise. *Geophysical Prospecting*, 62(3) :427–442, 2014.
- [11] R. H. Stolt. Migration by Fourier transform. *Geophysics*, 43(1) :23–48, 1978.
- [12] J. Gazdag. Wave equation migration with the phase-shift method. *Geophysics*, 43(7) :1342–1351, 1978.
- [13] A. J. Berkhout. Wave field extrapolation techniques in seismic migration, a tutorial. *Geophysics*, 46(12) :1638–1656, 1981.

- [14] W. A. Schneider. Integral formulation for migration in two and three dimensions. *Geophysics*, 43 :49, February 1978.
- [15] M. L. Moran, R. J. Greenfield, S. A. Arcone, and A. J. Delaney. Multidimensional GPR array processing using Kirchhoff migration. *Journal of Applied Geophysics*, 43(2) :281–295, 2000.
- [16] J.-Y. Lu. 2D and 3D high frame rate imaging with limited diffraction beams. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 44(4) :839–856, July 1997.
- [17] D. Garcia, L. L. Tarnec, S. Muth, E. Montagnon, J. Porée, and G. Cloutier. Stolt’s f-k migration for plane wave ultrasound imaging. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 60(9) :1853–1867, Sep 2013.
- [18] G. Montaldo, M. Tanter, J. Bercoff, N. Benez, and M. Fink. Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 56(3) :489–506, March 2009.
- [19] A. Austeng, C. I. C. Nilsen, A. C. Jensen, S. P. Näsholm, and S. Holm. Coherent plane-wave compounding and minimum variance beamforming. In *2011 IEEE International Ultrasonics Symposium*, pages 2448–2451, Oct 2011.
- [20] N. Portzgen, D. Gisolf, and G. Blacquiere. Inverse wave field extrapolation : a different NDI approach to imaging defects. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 54(1) :118–127, January 2007.
- [21] N. Pörtzgen, A. Gisolf, and G. Blacquiere. Inverse wave field extrapolation : a different NDI approach to imaging defects. 54 :118–127, 02 2007.
- [22] K. Chougrani and N. Portzgen. IWEX : A new ultrasonic array technology for direct imaging of subsurface defects. In *17th World Conference on Nondestructive Testing*, 10 2008.
- [23] X. Zhuge, T. G. Savelyev, A. G. Yarovoy, and L. P. Ligthart. UWB array-based radar imaging using modified Kirchhoff migration. In *2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, volume 3, pages 175–178, Sept 2008.
- [24] A. Fidahoussen, P. Calmon, M. Lambert, S. Paillard, and S. Chatillon. Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data. In *AIP Conference*, volume 1211, pages 847–854, 02 2010.
- [25] A. J. Hunter, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. Autofocusing ultrasonic imagery for non-destructive testing and evaluation of specimens with complicated geometries. *NDT & E International*, 43(2) :78–85, 2010.

- [26] A. Velichko and P. D. Wilcox. An analytical comparison of ultrasonic array imaging algorithms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(4) :2377–2384, 2010.
- [27] L. Le Jeune, S. Robert, E. Lopez Villaverde, and C. Prada. Plane wave imaging for ultrasonic non-destructive testing : Generalization to multimodal imaging. *Ultrasonics*, 64 :128–138, 2016.
- [28] S. R. Doctor, T. E. Hall, and L. D. Reid. SAFT — the evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing. *NDT International*, 19(3) :163–167, 1986.
- [29] J. A. Jensen, S. I. Nikolov, K. L. Gammelmark, and M. H. Pedersen. Synthetic aperture ultrasound imaging. *Ultrasonics*, 44(Supplement) :e5–e15, 2006. Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU).
- [30] C. Holmes, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation. *NDT & E International*, 38(8) :701–711, 2005.
- [31] X. Zhuge, T. G. Savelyev, A. G. Yarovoy, L. P. Lighthart, and B. Levitas. Comparison of different migration techniques for UWB short-range imaging. In *2009 European Radar Conference (EuRAD)*, pages 184–187, Sept 2009.
- [32] A. J. Devaney. Super-resolution Processing of Multi-static Data Using Time Reversal and MUSIC. *Journal of the Acoustical Society of America*.
- [33] Minghui Li and Gordon Hayward. Ultrasound nondestructive evaluation (NDE) imaging with transducer arrays and adaptive processing. *Sensors*, 12(1) :42–54, 2012.
- [34] J. Zhang, B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox, and A. J. Hunter. Defect detection using ultrasonic arrays : The multi-mode total focusing method. *NDT & E International*, 43(2) :123–133, 2010.
- [35] E. Iakovleva, S. Chatillon, P. Bredif, and S. Mahaut. Multi-mode TFM imaging with artifacts filtering using CIVA UT forwards models. In *AIP Conference*, volume 1581, 01 2014.
- [36] M. Sutcliffe, M. Weston, B. Dutton, P. Charlton, and K. Donne. Real-time full matrix capture for ultrasonic non-destructive testing with acceleration of post-processing through graphic hardware. *NDT & E International*, 51(Supplement C) :16–23, 2012.
- [37] L. Moreau, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. Ultrasonic imaging algorithms with limited transmission cycles for rapid nondestructive evaluation. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 56(9) :1932–1944, September 2009.

- [38] S. Bannouf, S. Robert, O. Casula, and C. Prada. Data set reduction for ultrasonic TFM imaging using the effective aperture approach and virtual sources. *Journal of Physics : Conference Series*, 457(1) :012007, 2013.
- [39] J. D. Achenbach, L. Adler, D. Kent Lewis, and H. McMaken. Diffraction of ultrasonic waves by penny-shaped cracks in metals : Theory and experiment. *Journal of the Acoustical Society of America*, 66 :1848–1856, 1979.
- [40] A. N. Norris and J. D. Achenbach. Elastic wave diffraction by a semi-infinte crack in a transversely isotropic material. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 37(4) :565–580, 1984.
- [41] S. Robert, L. Le Jeune, C. Prada, A. Membre, and P. Dumas. Adaptive ultrasonic imaging with the Total Focusing Method for inspection of complex components immersed in water. volume 1650, 07 2014.
- [42] A. Fidahoussen. *Développement d'une méthode de reconstruction ultrasonore pour la localisation et la caractérisation de défauts*. PhD thesis, 2012. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, 2012.
- [43] L. Brekhovskikh. *Waves in Layered Media*. Applied mathematics and mechanics. Elsevier Science, 1980.
- [44] N. Gengembre. Pencil method for ultrasonic beam computation. In *Proceedings of the 5th World Congress on Ultrasonics*, January 2003.
- [45] D. L. Hall and J. Llinas. An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85(1) :6–23, Jan 1997.
- [46] R. Heideklang and P. Shokouhi. Application of data fusion in nondestructive testing (NDT). In *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*, pages 835–841, July 2013.
- [47] X. E. Gros, P. Strachan, and D. W. Lowden. Theory and implementation of NDT data fusion. *Research in Nondestructive Evaluation*, 6(4) :227–236, Dec 1995.
- [48] X. E. Gros, J. Bousigue, and K. Takahashi. NDT data fusion at pixel level. *NDT & E International*, 32(5) :283–292, 1999.
- [49] R. Heideklang and P. Shokouhi. Multi-sensor image fusion at signal level for improved near-surface crack detection. *NDT & E International*, 71(Supplement C) :16–22, 2015.
- [50] G. Pajares and J. Manuel de la Cruz. A wavelet-based image fusion tutorial. *Pattern Recognition*, 37(9) :1855–1872, 2004.
- [51] N. Portzgen, D. Gisolf, and D. J. Verschuur. Wave equation-based imaging of mode converted waves in ultrasonic NDI, with suppressed leakage from nonmode converted

- waves. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 55(8) :1768–1780, August 2008.
- [52] E. Iakovleva, S. Chatillon, P. Brédif, and S. Mahaut. Multi-mode TFM imaging with artifacts filtering using CIVA UT forwards models. In *American Institute of Physics Conference Series*, volume 1581 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages 72–79, February 2014.
- [53] W. D. Kleinert, J. M. Cuffe, T. L. Ballenger, A. D. Weiner, and M. H. Feydo. Flaw detector incorporating dgs, April 30 1996. US Patent 5,511,425.
- [54] R. J. Ditchburn, S. K. Burke, and C. M. Scala. Ndt of welds : state of the art. *NDT & E International*, 29(2) :111–117, 1996.
- [55] M.G. Silk and B.H. Lidington. Defect sizing using an ultrasonic time delay approach. *British Journal of Non-Destructive Testing*, 17 :33–36, March 1975.
- [56] M. G. Silk. Changes in ultrasonic defect location and sizing. *NDT International*, 20(1) :9–14, 1987.
- [57] M. G. Silk and B. H. Lidington. The potential of scattered or diffracted ultrasound in the determination of crack depth. *Non-Destructive Testing*, 8(3) :146–151, 1975.
- [58] P.A. Doyle and C.M. Scala. Crack depth measurement by ultrasonics : a review. *Ultrasonics*, 16(4) :164–170, 1978.
- [59] L. Satyanarayan, C. Sridhar, C.V. Krishnamurthy, and K. Balasubramaniam. Simulation of ultrasonic phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84(12) :716–729, 2007.
- [60] P. Wilcox, C. Clark, and B. W. Drinkwater. Enhanced defect detection and characterisation by signal processing of ultrasonic array data. In *Array Data Proceedings of the 9th European conference on Non-Destructive Testing*, September 2006.
- [61] M. V. Felice, A. Velichko, and P. D. Wilcox. Accurate depth measurement of small surface-breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique. *NDT & E International*, 68(Supplement C) :105–112, 2014.
- [62] B. Dupont and F. Berthelot. Characterization of small defects using total focusing method. In *11th European Conference on Non-Destructive Testing*, October 2014.
- [63] J. Zhang, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. Defect characterization using an ultrasonic array to measure the scattering coefficient matrix. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 55(10) :2254–2265, October 2008.
- [64] J. Zhang, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. The use of ultrasonic arrays to characterize crack-like defects. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 29(4) :222–232, Dec 2010.

- [65] Richard O. Duda and Peter E. Hart. Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Commun. ACM*, 15(1) :11–15, January 1972.
- [66] N. Favretto-Cristini, P. Cristini, and E. de Bazelaire. What is a seismic reflector like? *Geophysics*, 74(1) :T13–T23, 2009.

# Annexe A

## Suppression des isochrones pour la TFM dans l'eau

L'imagerie TFM peut être utilisée pour la reconstruction du profil d'une pièce [41]. Dans ce cas, la pièce et le capteur sont immergés dans l'eau. Une fois l'acquisition FMC réalisée, l'image TFM de la surface est reconstruite en considérant que l'eau est le milieu de propagation. L'indication spéculaire reconstruite suit le profil de la pièce qui peut alors être extraite.

Toutefois, l'image reconstruite est généralement parasitée par la présence d'isochrones résiduelles au-dessus de la pièce, ce qui rend difficile l'extraction du profil.

Pour illustrer ce phénomène, nous allons considérer une pièce en acier inoxydable de surface complexe immergée dans de l'eau. Le traducteur utilisé pour acquérir les données est un multiéléments de 64 éléments, de fréquence centrale 5MHz avec un pas interéléments de 0,6mm.

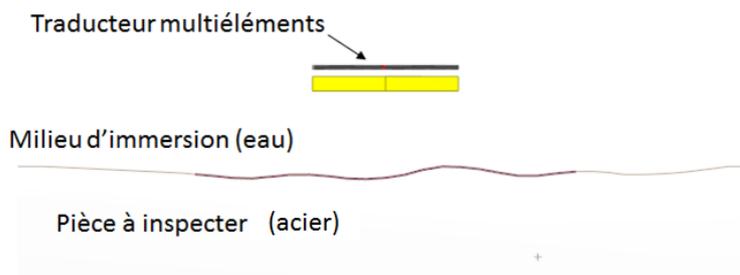


Fig A.1 – Configuration de contrôle

L'image TFM est reconstruite suivant le mode LL en considérant que le milieu de propagation est de l'eau.

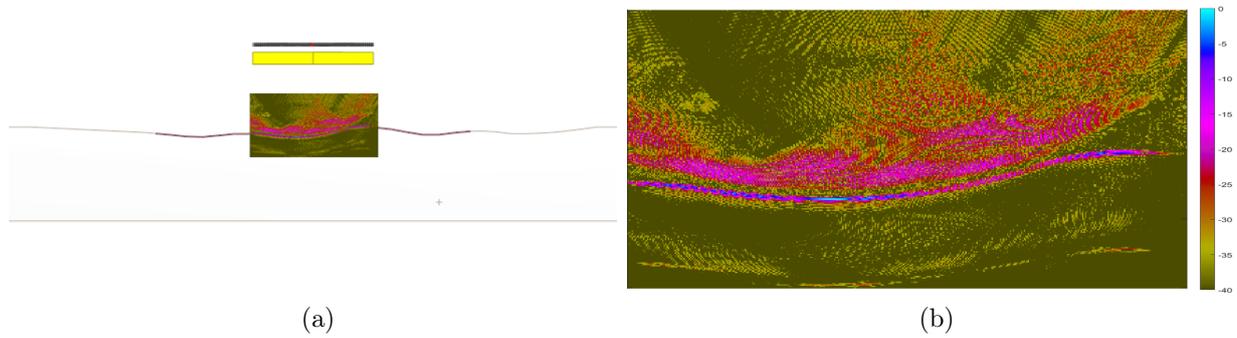


Fig A.2 – Reconstruction TFM dans l'eau

La présence des isochrones résiduelles est liée à des interférences destructives insuffisantes hors du profil de la pièce. Plusieurs facteurs expliquent cette insuffisance, les principaux que nous avons identifiés sont une faible divergence des éléments, une hauteur d'eau non optimale entre la pièce et le capteur, et un mauvais échantillonnage spatial du capteur. Nous allons décrire l'influence de ces différents paramètres avant de proposer une méthode d'optimisation.

## A.1 Influence et optimisation de la divergence des éléments

Lors d'une acquisition FMC, une grande zone est insonifiée grâce à l'utilisation d'ondes sphériques divergentes. Plus les ondes sont divergentes et plus les interférences sont optimales. Par conséquent, lors de l'acquisition FMC, le capteur doit être choisi de telle sorte à émettre des ondes fortement divergentes.

Cette divergence est liée à principalement à deux facteurs :

- la taille des éléments : plus un élément est petit et plus l'onde est divergente, mais aussi plus l'amplitude de l'onde émise est faible.
- la fréquence de l'onde : plus la fréquence est grande et plus l'onde est collimatée, donc moins divergente.

Un compromis doit donc être trouvé entre la fréquence du capteur, la taille des éléments et l'amplitude du signal nécessaire.

## A.2 Influence et optimisation de la hauteur d'eau pour un contrôle en immersion

Pour minimiser les isochrones résiduelles, il faut que la hauteur d'eau soit optimisée afin que les signaux réfléchis à la surface de la pièce soient reçus par un nombre maximal d'éléments du capteur.

En effet, si la hauteur d'eau est trop faible, comme illustrée sur la Fig A.3, alors il y aura très peu de recouvrement entre les cônes de divergence des éléments.

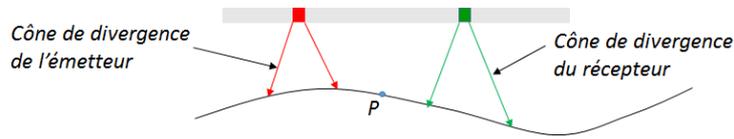


Fig A.3 – Hauteur d'eau insuffisante pour une superposition des cônes de divergence pour un couple d'éléments

Pour un couple d'éléments donné, la hauteur doit donc être suffisamment grande pour que leur cône de divergence se recouvre à la surface de la pièce comme illustré sur la Fig A.4.

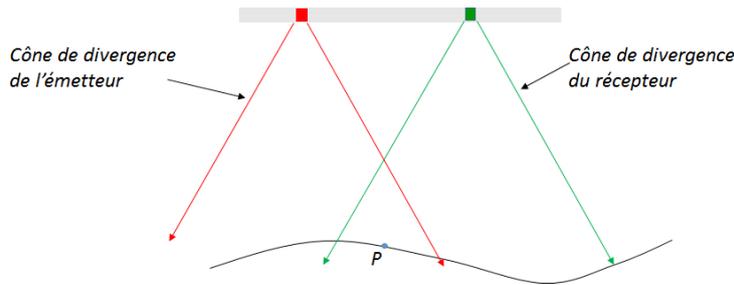


Fig A.4 – Hauteur d'eau suffisante pour une superposition des cônes de divergence pour un couple d'éléments

La condition de couverture n'est cependant pas suffisante, il faut en effet que l'écho réfléchi au point considéré puisse être reçu de manière spéculaire par l'élément récepteur.

Pour une couverture, optimale, il est possible qu'il n'existe pas de trajet spéculaire entre l'émetteur, le point  $P$  et le récepteur, comme illustré dans le sur la Fig A.5.

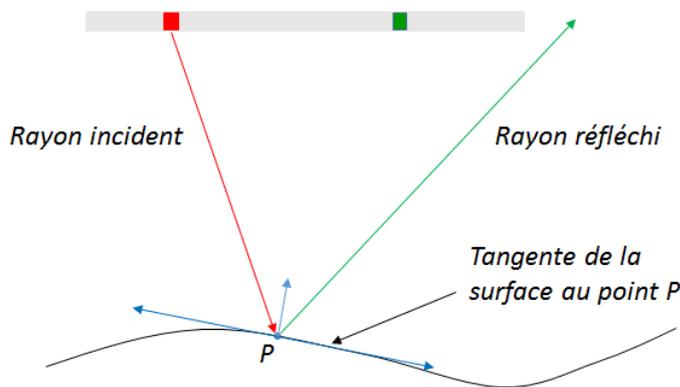


Fig A.5 – Hauteur d'eau suffisante pour une superposition des cônes de divergence mais trajet non spéculaire pour un couple d'éléments

Pour un couple d'éléments donné, la hauteur d'eau est optimale lorsque la couverture est optimale et le trajet spéculaire comme illustré dans la Fig A.6.

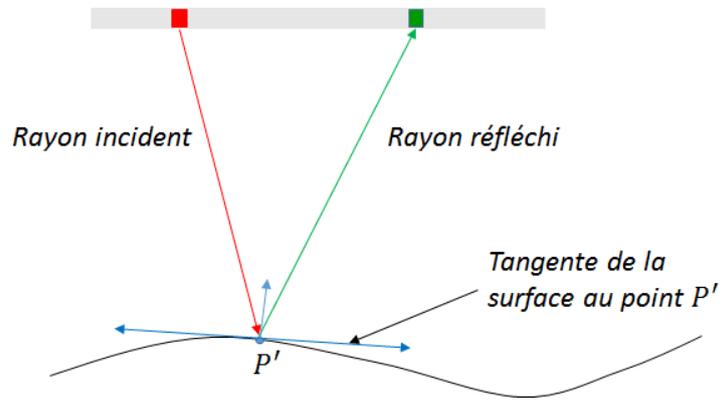


Fig A.6 – Hauteur d'eau suffisante pour une superposition des cônes de divergence et trajet spéculaire pour un couple d'éléments

Cette condition doit être respectée pour un maximum de trajets pour une hauteur d'eau optimale, elle dépend donc fortement des variations de la surface.

Dans le cas où un profil représentatif de la surface de la pièce est connu, l'estimateur SEE peut être utilisé afin de retrouver la hauteur d'eau optimale. Cette prédiction n'est pas traitée ici.

### A.3 Influence et optimisation de l'échantillonnage du traducteur

La minimisation des isochrones résiduelles passe également par le respect de critère de Shannon dans le domaine spatial. Celui-ci impose que le pas d'échantillonnage du capteur doit être inférieur à la demi-longueur d'onde.

La plupart des capteurs ultrasonores utilisés respecte cette condition pour un matériau de référence qui est l'acier. Ce critère n'est plus respecté lorsque le milieu considéré est l'eau où la vitesse des ondes longitudinales quatre fois plus petite que celle des ondes longitudinales dans l'acier.

Le moyen idéal serait d'avoir des capteurs ultrasonores dont le pas interéléments respecte les conditions d'échantillonnage de Shannon dans l'eau. Mais dans ce cas, il faudrait alors 4 fois plus d'éléments pour la même ouverture, ce qui suppose un système de pilotage avec quatre fois plus de voies. Ces différentes contraintes en sus de celles technologiques et économiques nous font écarter cette solution.

Une autre solution serait le sur-échantillonnage du capteur par interpolation des éléments. Il s'agit d'introduire artificiellement des éléments supplémentaires par interpolation de la matrice inter-éléments.

Dans la configuration présente, le traducteur devrait donc compter quatre fois plus d'éléments pour permettre une reconstruction optimale.

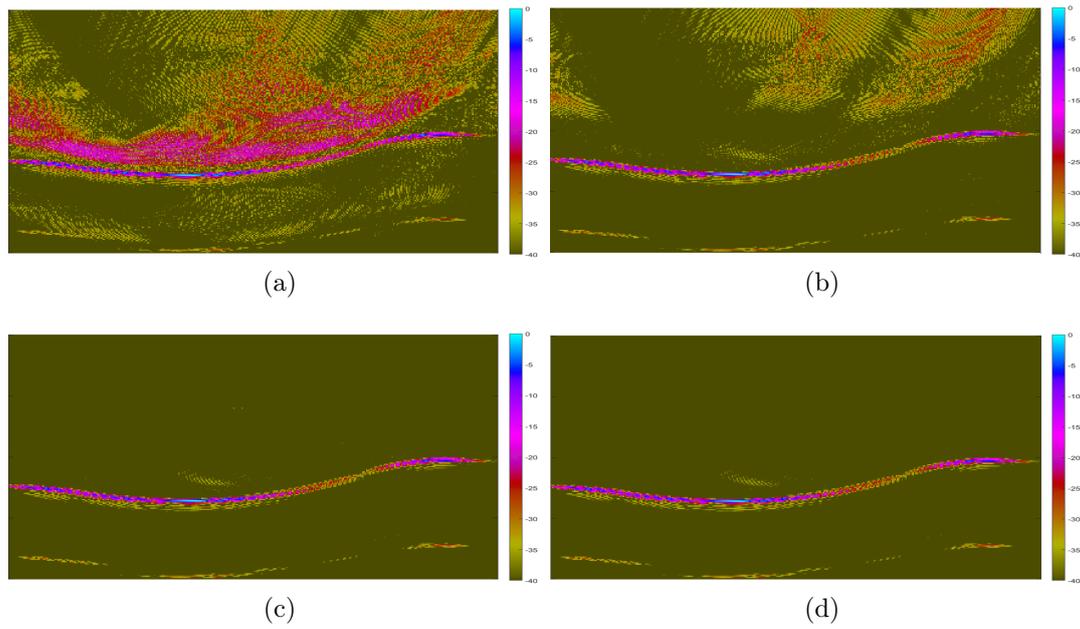


Fig A.7 – Reconstruction de profil avec une interpolation du traducteur (a)  $\times 1$ , (b)  $\times 2$  (c)  $\times 3$  (d)  $\times 4$

On remarque sur la Figure A.7, que plus le pas d'interpolation est grand et meilleure est la reconstruction. Le sur-échantillonnage du capteur a donc permis la suppression des isochrones résiduelles tout en conservant l'écho de la surface ce qui facilite l'extraction de profil.

Cette méthode ne permet toutefois pas d'avoir de l'information supplémentaire. C'est-à-dire qu'une zone non détectée par le capteur ne sera pas mieux reconstruite après sur-échantillonnage du capteur.



# Annexe B

## Formation d'un artefact intra-mode

Un artefact intra-mode est formé lorsqu'il existe une coïncidence de temps de vol pour un ensemble de points tels que :

$$t_{ij}^{m,P_1} = t_{ji}^{m,P_2} \quad (\text{B.1})$$

Dans ce cas, un écho présent au point  $P_1$  sera également reconstruit au point  $P_2$  et ce au sein du même mode. Pour illustrer ce phénomène, il suffit de faire une reconstruction TFM avec la diagonale inférieure et une reconstruction avec la diagonale supérieure de la matrice inter-éléments selon les relations suivantes :

$$I^{m_1}(P) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N K_{ij}(t_{ij}^{m,P}) + K_{ji}(t_{ij}^{m,P}) \quad (\text{B.2})$$

$$I^{m_2}(P) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i K_{ij}(t_{ij}^{m,P}) + K_{ji}(t_{ij}^{m,P}) \quad (\text{B.3})$$

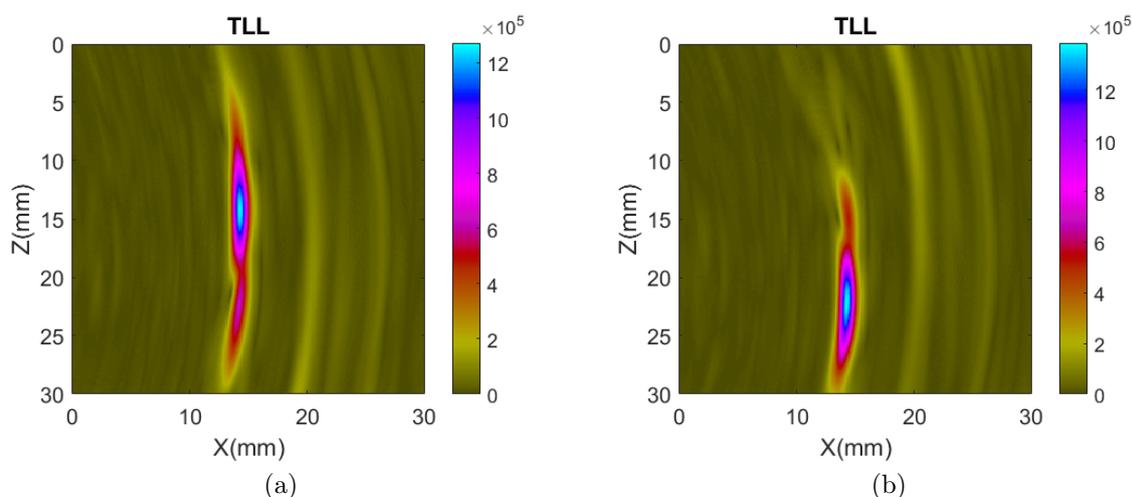


Fig B.1 – Images TFM pour lesquelles un seul trajet est considéré par couple d'éléments (a) $m_1$  et (b) $m_2$

L'écho reconstruit à la figure B.1(b) se trouvant à la position du défaut, on estime qu'il est l'écho pertinent, tandis que celui reconstruit à la figure B.1(a) est un artefact.

Il suffit alors d'appliquer la méthode MTE sur l'indication du mode  $m_2$  suivant le mode  $m_1$ . On retrouve l'image suivante :

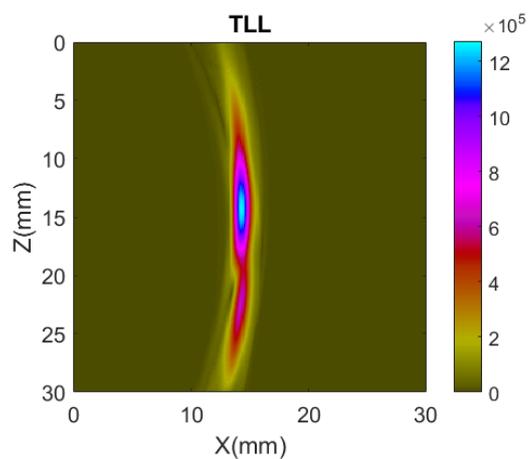


Fig B.2 – Image TFM reconstruite à partir de la matrice de l'indication reconstruite en  $m_2$  suivant le mode  $m_1$

Ainsi, l'écho reconstruit suivant le mode  $m_1$  est un artefact issu de l'écho reconstruit suivant le mode  $m_2$ .

# Annexe C

## Formation d'un artefact inter-modes

Soient les modes de reconstruction LLT et LTT. A partir de la méthode MTE décrit au chapitre 4, on montre que l'indication reconstruite suivant le mode LTT est issu du mode LLT.

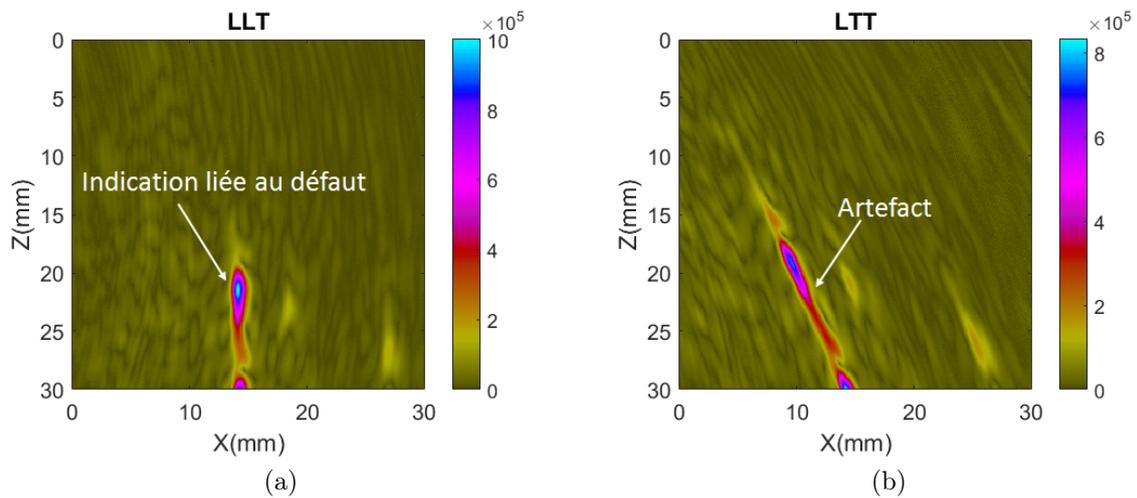


Fig C.1 – Reconstructions TFM suivant les modes (a) LLT et (b) LTT

L'indication du mode LLT est identifié par l'algorithme de croissance de région et la matrice associée  $K_d^{LLT}$  est générée. On reconstruit alors l'image TFM suivant le mode LTT à partir de ces signaux.

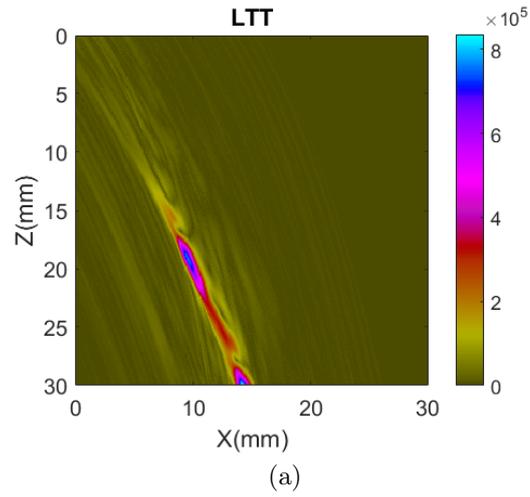


Fig C.2 – Images TFM reconstruit suivant le mode LTT à partir de la matrice  $K_d^{LLT}$

L'indication reconstruite suivant le mode LTT à partir de la matrice  $K_d^{LLT}$  montre que celui-ci est un artefact lié à l'écho du défaut reconstruit suivant le mode LLT, dû à une coïncidence de temps de vol entre les deux modes.

# Annexe D

## Algorithme d'atténuation de la diffraction

L'algorithme d'atténuation de la diffraction ou DA-TFM (Diffraction Attenuation TFM) est donnée par l'expression suivante :

$$I_{diff}^m(P) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (K_{ij}(t_{ij}^{m,P}) + K_{ji}(t_{ij}^{m,P})) \times f(\theta_{ij}) \right| \quad (D.1)$$

où

$$f(\theta_{ij}) = e^{-\frac{\theta_{ij}^2}{2\sigma^2}} \quad (D.2)$$

avec  $\theta_{ij} = \cos^{-1}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_{ij}^P)$

Cet algorithme permet d'atténuer les contributions aux grands angles  $\theta_{ij}$ , c'est à dire les potentielles contributions de diffraction.

Comme pour la SA-TFM, la DA-TFM ne permet pas d'atténuer la diffraction qui survient dans les trajets spéculaires et qui interfère avec la réflexion spéculaire.

Par ailleurs, l'introduction de cette fonction gaussienne va induire une dégradation de la résolution des images, la sommation entre les signaux n'étant plus optimale.

La Fig [D.1](#) montre l'image TFM et l'image DA-TFM pour le mode LLL ainsi que leur courbe échodynamique associée. Ces images ont été reconstruites à partir des données FMC simulées de la configuration illustrée en Fig [4.2](#).

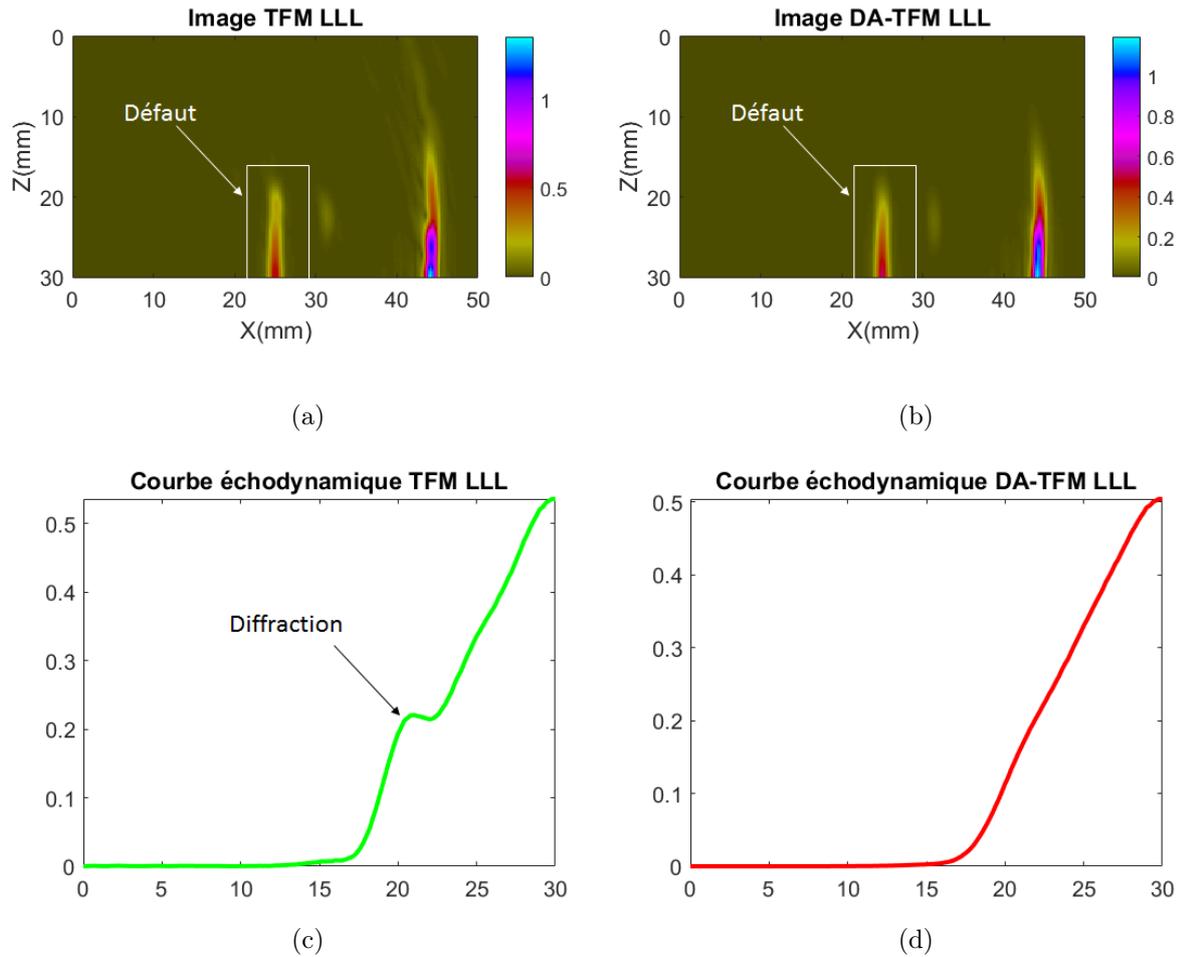


Fig D.1 – (a) Image TFM, (b) Image DA-TFM, (c) Courbe échodynamique suivant la colonne  $X = 15\text{mm}$  de l'image TFM et (d) Courbe échodynamique suivant la colonne  $X=25\text{mm}$  de l'image DA-TFM

Le pic de diffraction observée autour de  $Z = 20\text{mm}$  sur la courbe tracée pour l'image TFM disparaît pour la courbe tracée pour l'image DA-TFM.

# Dissémination des travaux

## I. Brevets

P. Brédif, E. Iakovleva, D. Lesselier, O. Roy, and K. Sy, “Procédé et dispositif de détection et de caractérisation d’un élément réflecteur dans un objet,” no. 01659860, Brevet déposé 12/10/2016.

## II. Articles de revues

### Soumis

K. Sy, Brédif, E. Iakovleva, O. Roy, and D. Lesselier, “Development of the Specular Echoes Estimator to predict relevant modes for Total Focusing Method imaging,” *NdT & E International*, en révision mineure, déc. 2017.

### Publiés et acceptés

K. Sy, Brédif, E. Iakovleva, D. Lesselier, and O. Roy, “Development of methods for the analysis defects of multi-mode TFM imaging,” *Journal of Physics: Conference Series*, 10pp, à paraître, 2018.

## III. Conférences

### Présentations orales

K. Sy, Brédif, E. Iakovleva, D. Lesselier, and O. Roy, “Development of methods for characterizing defects based on TFM multimode imaging,” *15th Anglo-French Physical Acoustics Conference (AFPAC 2016)*, Croydon, Janv. 2016. Proc., pp. 34-35.

### Présentations affiches

K. Sy, P. Brédif, E. Iakovleva, D. Lesselier, and O. Roy, “Caractérisation de défauts plans en bordure de soudure par imagerie TFM sélective,” *Journées Confédération Française des Essais Non Destructifs (COFREND) - COFREND Days*, Strasbourg, mai 2017.

K. Sy, P. Brédif, E. Iakovleva, D. Lesselier, and O. Roy, “Développement de méthodes de caractérisation de défauts plans basées sur les reconstructions FTP,” *Réunion Générale Interférences d’Ondes, GDR ONDES*, Lyon, oct. 2015.

**Titre :** Etude et développement de méthodes de caractérisation de défauts basées sur l'imagerie TFM

**Mots clés :** TFM, sélection des modes, fusion d'images, filtrage d'artefacts, estimation de l'orientation, dimensionnement

**Résumé :** En contrôle non destructif, dans la perspective de l'amélioration des images de défauts mais également dans le but de rendre leur interprétation plus simple par des opérateurs non spécialisés, de nouvelles méthodes d'imagerie ultrasonore telle que l'imagerie TFM (Total Focusing Method) sont apparues depuis quelques années comme une alternative aux méthodes d'imageries conventionnelles. Elles offrent des images réalistes des défauts et permettent à partir d'une même acquisition d'avoir un nombre important d'images chacune pouvant porter des informations différentes et complémentaires sur les caractéristiques d'un même défaut. Lorsqu'elles sont correctement sélectionnées,

ces images sont plus faciles à analyser, elles présentent moins de risques de mauvaise interprétation et permettent d'envisager des caractérisations de défauts plus rapides par des opérateurs moins spécialisés.

Pour une exploitation industrielle, il reste cependant nécessaire de renforcer la robustesse et la facilité de mise en œuvre de ces techniques d'imagerie. L'ensemble des travaux réalisés durant la thèse a permis de développer de nouveaux outils capables d'améliorer la caractérisation des défauts par les techniques d'imagerie TFM en termes de position, d'orientation et de dimensionnement

**Title :** Development of methods for defects characterization based on TFM imaging

**Keywords :** TFM imaging, modes selection, images fusion, artefacts filtering, orientation estimation, defect sizing

**Abstract :** In non-destructive testing, with a view to improving defect images but also to simplify their interpretation by non-specialized operators, new ultrasonic imaging methods such as TFM imaging (Total Focusing Method ) have appeared for some years as an alternative to conventional imaging methods. They offer realistic images of defects and allow from the same acquisition to have a large number of images each that can carry different and complementary information on the characteristics of the same defect. When properly selected, these

images are easier to analyze, they present less risk of misinterpretation and allow to consider faster fault characterizations by less specialized operators.

However, for an industrial operation, it remains necessary to strengthen the robustness and ease of implementation of these imaging techniques. All the work carried out during the thesis allowed to develop new tools to improve the characterization of defects by TFM imaging techniques in terms of position, orientation and sizing.

