



HAL
open science

Étude d'une méthode d'inversion basée sur la simulation pour la caractérisation de fissures détectées par ultrasons dans un composant revêtu

Guillaume Haïat

► **To cite this version:**

Guillaume Haïat. Étude d'une méthode d'inversion basée sur la simulation pour la caractérisation de fissures détectées par ultrasons dans un composant revêtu. Acoustique [physics.class-ph]. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2004. Français. NNT : . tel-00007345

HAL Id: tel-00007345

<https://theses.hal.science/tel-00007345>

Submitted on 9 Nov 2004

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.

THESE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITÉ PARIS 7 – D. DIDEROT

ECOLE DOCTORALE
DE PHYSIQUE MACROSCOPIQUE

Spécialité :
ACOUSTIQUE PHYSIQUE

présentée par :
Guillaume Haïat

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS 7

*Étude d'une méthode d'inversion basée sur
la simulation pour la caractérisation de
fissures détectées par ultrasons dans
un composant revêtu*

Soutenue le 09/03/2004
devant le jury composé de :

M. Pierre CALMON	Ingénieur de Recherche CEA, Saclay	Examineur
M. Frédéric COHEN-TENOUDJI	Professeur, Université Paris 7	Président
M. Gilles CORNELOUP	Professeur, Université Aix - Marseille II	Rapporteur
M. Jean-François DE BELLEVAL	Professeur, UTC de Compiègne	Rapporteur
M. Frédéric LASSERRE	Ingénieur Intercontrôle, Rungis	Examineur
M. Daniel ROYER	Professeur, Université Paris 7	Directeur de thèse

Résumé

Le travail effectué au cours de cette thèse porte sur l'inversion de données ultrasonores.

Le contexte industriel en est le contrôle non destructif des cuves de réacteurs à eau pressurisée. Ces contrôles visent à détecter et caractériser des fissures. Les données ultrasonores se présentent sous la forme d'échographies obtenues à l'aide d'un capteur fonctionnant en émission-réception. Les fissures sont détectées par diffraction de leurs arêtes. L'analyse des données obtenues est rendue difficile du fait de l'existence d'un revêtement dont la surface est irrégulière et dont le matériau diffère du matériau constitutif de la cuve. Une méthode est ici proposée pour localiser avec précision les arêtes diffractantes et donc permettre un dimensionnement des fissures à partir des échographies ultrasonores obtenues. Cette méthode s'appuie sur l'application d'outils de modélisation de la propagation et de la diffraction des ultrasons prenant en compte à la fois le caractère irrégulier de la surface et la nature hétérogène du composant. La méthode développée a fait l'objet d'une implémentation informatique et a pu être testée sur un ensemble de cas représentatifs. En particulier, ses performances ont été évaluées à partir de l'analyse de résultats expérimentaux. La précision obtenue en laboratoire sur les cas expérimentaux traités est conforme à la demande industrielle qui a motivé cette étude.

This work deals with the inversion of ultrasonic data.

The industrial context of the study is the non destructive evaluation of the internal walls of French reactor pressure vessels. Those inspections aim at detecting and characterizing cracks. Ultrasonic data correspond to echographic responses obtained with a transducer acting in pulse echo mode. Cracks are detected by crack tip diffraction effect. The analysis of measured data can become difficult because of the presence of a cladding, which surface is irregular. Moreover, its constituting material differs from the one of the reactor vessel. A model-based inverse method uses simulation of propagation and of diffraction of ultrasound taking into account the irregular properties of the cladding surface, as well as the heterogeneous nature of the component. The method developed was implemented and tested on a set of representative cases. Its performances were evaluated by the analysis of experimental results. The precision obtained in the laboratory on experimental cases treated is conform with industrial expectations motivating this study.

Remerciements

J'adresse mes premiers remerciements à Monsieur Philippe Benoist, chef du service SISC du CEA-LIST, qui m'a accueilli en tant que stagiaire et qui m'a ensuite proposé un sujet de thèse aussi complet. J'exprime ma reconnaissance à Monsieur Pierre Calmon, chef du LSUT, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire durant ces trois années de recherches passionnantes et pour avoir assuré la tâche d'encadrant de cette thèse. Ses conseils judicieux ainsi que son expérience scientifique m'ont été particulièrement utiles.

Je tiens à remercier Monsieur Frédéric Lasserre, pour le suivi de mes travaux qu'il a bien voulu effectuer. Son expérience des contrôles sur site m'a permis de me rendre compte des problèmes rencontrés lors d'inspections réelles.

Je veux aussi exprimer ma gratitude à Monsieur le Professeur Daniel Royer qui a été le directeur de cette thèse à l'université Paris 7 et qui a vivement encouragé ce travail.

Mes remerciements vont à Messieurs les Professeurs Gilles Corneloup et Jean-François de Belleval pour avoir accepté de rapporter ce manuscrit de thèse, et pour l'intérêt qu'ils ont témoigné vis à vis du travail réalisé.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur le Professeur Frédéric Cohen-Tenoudji qui a examiné cette thèse et qui a toujours su distiller son aide et ses conseils avec une extrême générosité depuis que j'ai eu l'honneur d'être son élève.

J'exprime ma plus profonde gratitude à toute l'équipe du LSUT pour leur aide quotidienne. A commencer par Alain Lhémery qui a été très présent aux moments importants. Et pas de façon homéopathique... Il constitue pour moi un vrai modèle à suivre en matière scientifique. Merci aussi à Sylvain Chatillon pour sa gentillesse et pour l'aide qu'il m'a apportée, notamment à un moment critique de ma thèse. Un grand merci à Daniel Lobjois, Stéphane Leberre, Arnaud Lévesque, Michel Cardoso, Philippe Ribier, Pierre Lenestour pour leur conseils en informatique, et à Laurent Le Ber, Nicolas Gengembre, Raphaëlle Raillon-Picot, Michel Darmon, Estelle Kerbrat, Marc Wojtowicz pour leur aide en modélisation.

Je tiens à remercier tout spécialement Jacques Petitgand pour sa grande connaissance et son expérience immense en matière d'expérimentation. Il m'a aidé à apprivoiser la chaîne d'acquisition qui avait parfois tendance à n'en faire qu'à sa tête... J'ai appris tellement à son contact qu'il est impossible de tout énumérer ici. Merci! Mes remerciements vont également à toute l'équipe du LMUS, et notamment à Olivier Roy et Alain Viard pour

leur aide qui a contribué à débloquer plus d'une situation délicate.

Je remercie chaleureusement Madame Marie-Odile Bourdeau pour son aide quotidienne.

Merci aussi à Nicolas, Pépeye, Orland, Julien, Sébastien, Nizaaar, Karim, Antoine, Didi, Sif, Gildas, Mireille. Quelle belle équipe! Merci également à Chantal qui me doit 100 balles.

Je tiens à remercier le Professeur Guy Demoment pour l'aide qu'il a su m'apporter pendant ce travail de thèse.

Je souhaite ici remercier tout spécialement Etienne Barthel pour avoir contribué à m'apprendre le métier de chercheur par les travaux que nous avons mené sur le contact visco-élastique en présence d'adhésion.

Et puis il y a les miens. Je remercie aussi Hi-Hat toujours présent. Big up à Régis, Ton's, Defré, Oliv, PY. La musique notre mission. Merci aussi dans le désordre le plus complet à Amo, Catherine, Ed, Thomas, Clara, Lounès, Kais, Lolo, Pierre, Marie, Benji, Jérôme, Rémi, Yomgui, Alex, Raph, Tus, Florence, Gaël, Manu, Sarah, Anne-Laure, JD, Typh. Merci surtout à Jah pour me guider chaque jour.

Merci à Catherine Fretz pour sa gentillesse, et à Paulette Fretz pour sa grande connaissance orthographique.

Mes remerciement les plus tendre vont enfin à ma famille, ma grand mère, mes frères Régis et Jérôme, à mon Père et ma Mère sans qui je n'en serais pas là, et bien sur à Boubou que j'aime du plus profond de mon être.

Table des matières

Introduction	9
1 Positionnement du problème	11
1.1 Contrôle non destructif par ultrasons	11
1.2 Contrôle non destructif par ultrasons appliqué aux centrales nucléaires.	11
1.3 Configuration de contrôle	13
1.4 Mode de représentation des données ultrasonores obtenues .	15
1.5 Dépôt d'un revêtement	16
1.6 Les outils de modélisation	17
1.7 Analyse des effets du revêtement sur le résultat d'un contrôle.	19
1.7.1 Interface irrégulière	19
1.7.2 Couche anisotrope	25
1.8 Stratégie de traitement du problème inverse	30
1.8.1 Problème à caractère mal posé	32
1.8.2 Techniques usuelles de résolution de problèmes inverses mal posés	33
1.8.3 Stratégie d'inversion	33
2 Extraction des profils et positionnement du capteur	37
2.1 Simulation des échos de surface	37
2.1.1 Introduction	37
2.1.2 Description du modèle	38
2.1.3 Validation expérimentale de la méthode de calcul d'écho	39
2.2 Extraction des paramètres géométriques du revêtement . . .	40
2.2.1 Méthode simple de détermination du profil	41
2.2.2 Méthode complète de détermination du profil	46
2.2.3 Contrôle de l'épaisseur de la couche	47
2.3 Procédure de positionnement du traducteur	48
2.3.1 Positionnement du traducteur $L0^\circ$	49
2.3.2 Positionnement du traducteur $L63^\circ$	50
3 Description de la méthode de repositionnement d'un défaut	51
3.1 Pré-traitement des acquisitions	51
3.1.1 Étalonnage des traducteurs $L63^\circ$	51
3.1.2 Segmentation des indications $L63^\circ$	53

3.1.3	Choix des indications à prendre en compte pour le repositionnement d'un défaut	55
3.2	Calcul de champ	57
3.2.1	Configuration de calcul de champ	57
3.2.2	Algorithme de positionnement de la zone de calcul de champ	59
3.3	Post-traitement du champ ultrasonore simulé	61
3.3.1	Méthode "faisceaux"	62
3.3.2	Méthode "iso-temps"	65
3.3.3	Comparaison de la méthode "Iso-temps" et de la méthode "Faisceaux"	66
3.4	Choix final de l'emplacement du défaut	67
3.4.1	Simulation des échos renvoyés par les défauts	67
3.4.2	Méthode de comparaison de B-scan	70
3.4.3	Choix de la position optimale	72
3.4.4	Optimisations possibles de la méthode "Iso-temps"	74
3.4.5	Récapitulatif de la méthode	76
4	Validation, discussion, et application de la méthode	79
4.1	Validation expérimentale effectuée au laboratoire	79
4.1.1	Description de la configuration expérimentale	79
4.1.2	Étalonnage du traducteur L63°	87
4.1.3	Expérience menée sur le bloc homogène isotrope de surface complexe	90
4.1.4	Expérience menée sur un bloc revêtu à surface complexe	93
4.2	Résultats obtenus avec la platine de contrôle	95
4.2.1	Étalonnage temporel du traducteur L63°	95
4.2.2	Utilisation de la méthode de positionnement pour mesurer la désorientation cristallographique	95
4.2.3	Résultats obtenus sur le bloc revêtu meulé	97
4.2.4	Résultats obtenus sur le bloc revêtu brut de dépôt	97
4.3	Évaluation des incertitudes de la méthode	98
4.3.1	Erreur de positionnement du traducteur	98
4.3.2	Erreur sur les vitesses de propagation	101
4.3.3	Influence de l'erreur due aux échantillonnages	104
4.4	Évaluation de l'influence des différentes approximations	104
4.4.1	Validation de l'algorithme de recherche de points possibles	105
4.4.2	Validation du calcul de B-scan simulé	108
4.4.3	Validation de la méthode de comparaison de B-scan	111
4.5	Prise en compte simplifiée de l'influence du revêtement	114
4.5.1	Étude de l'influence du revêtement sur le positionnement de défaut	115
4.5.2	Remplacement du revêtement par un matériau isotrope	116
4.5.3	Interprétation par l'acoustique géométrique : Modèle "rayon"	117

Conclusion	121
Annexes :	138
A Caractéristiques mécanique nominales du revêtement	139
B Influence d'une variation locale de la surface de la pièce contrôlée sur l'angle de réfraction	141
C Abaque de la vitesse des ultrasons dans l'eau en fonction de la température	143
D Propagation des ondes planes dans un milieu anisotrope : surface des lenteurs	145
D.1 Définitions	145
D.2 Détermination de la vitesse d'énergie	145
D.3 Passage d'une interface.	146
E La procédure de segmentation	147
E.1 Détermination des points sur un tir	147
E.2 Formation des segments	147
E.3 Choix de l'indication associée au segment	148
F Traducteurs utilisés	149
F.1 Le traducteur L0°	149
F.2 Le traducteur L63°	149

Introduction

L'objet de cette thèse a consisté à proposer et évaluer une méthode d'inversion des données ultrasonores dans le contexte du contrôle non destructif des cuves de réacteur à eau pressurisée (REP). Dans un réacteur à eau pressurisée, la cuve contient l'eau sous pression dans laquelle est plongé le combustible produisant la chaleur nécessaire à la production de vapeur. Du fait de conditions de pression, de température et de rayonnement très agressives favorisant des phénomènes de corrosion, un revêtement en acier inoxydable (austénitique) est déposé sur la surface interne de la cuve. Le contrôle de la paroi interne de la cuve est effectué par ultrasons et a pour objectif de rechercher puis dimensionner et positionner d'éventuelles fissures localisées à proximité de la surface et donc susceptibles de présenter un danger pour l'intégrité du composant. La position en profondeur de la fissure est un paramètre critique qu'il est souhaitable de pouvoir évaluer avec précision. Cependant la présence du revêtement induit des phénomènes perturbateurs qui rendent cette évaluation délicate. En effet le dépôt est effectué par passes circonférentielles et la surface obtenue présente des irrégularités notamment autour des zones de recouvrement de passes. En outre les caractéristiques élastiques du revêtement austénitique différentes (anisotropes) de celles de l'acier de coeur (isotropes) confèrent au composant inspecté un caractère hétérogène.

L'objectif de la thèse est donc de proposer une méthode d'analyse des acquisitions ultrasonores permettant de positionner les fissures détectées en prenant en compte ces phénomènes par l'utilisation d'outils de modélisation existants au laboratoire.

Dans un premier chapitre les considérations précédentes sont précisées. Le contexte industriel est rappelé, puis la configuration de contrôle des cuves est détaillée. Les fissures, considérées comme des défauts plans, sont recherchées à l'aide de transducteurs ultrasonores fonctionnant en immersion et conçus pour focaliser des ondes longitudinales dans la zone inspectée (les vingt-cinq premiers millimètres) avec un angle de réfraction de 63° après traversée d'une interface eau/acier cylindrique régulière. Les fissures recherchées ont deux orientations privilégiées, parallèle ou perpendiculaire à l'axe de révolution de la cuve. Ainsi la platine de contrôle contient quatre capteurs identiques positionnés dans deux plans perpendiculaires. Les outils de modélisation ultrasonore utilisés au cours de la thèse sont décrits. A l'aide de ces modèles, les effets induits par la présence du revêtement sur les échos ultrasonores est explicitée de façon détaillée. A l'issue de ce chapitre nous

sommes à même de décrire la stratégie de traitement du problème inverse adoptée.

La méthode développée au cours de la thèse s'appuie sur la mesure du profil réel rencontré par le capteur au cours de son déplacement. L'existence d'un cinquième transducteur sur la platine fonctionnant en incidence normale donne accès à une mesure de ce profil. Dans le deuxième chapitre l'exploitation des acquisitions obtenues à l'aide de ce transducteur est détaillée. Deux informations distinctes en sont déduites : le profil de la surface, ainsi que la position exacte de la platine relativement à celui-ci. La détermination du profil constitue en elle-même un problème inverse dont une solution est proposée.

Le troisième chapitre est consacré à la description de la méthode de positionnement proprement dite. Cette méthode peut se décomposer en deux étapes principales : Au cours de la première, à partir de la connaissance de la position du capteur correspondant à la détection de l'écho traité et d'un calcul du champ ultrasonore transmis après traversée du revêtement, on identifie un ensemble de positions susceptibles d'être le lieu de l'extrémité diffractante responsable de l'écho. La deuxième étape permet de sélectionner dans cet ensemble la position optimale. Pour ce faire on effectue successivement autant de simulations qu'il y a de positions candidates. Une pseudo-distance dans l'espace des échos est proposée. La position finalement retenue est la position qui minimise cette pseudo-distance.

Cette méthode ayant été implémentée, elle a été utilisée sur un ensemble de cas expérimentaux à des fins de validation. Nous présentons au chapitre 4 les résultats obtenus. Des expériences ont été réalisées au laboratoire sur différents blocs dans le but de découpler les effets de surface irrégulières et d'anisotropie de la couche. On montre que sur ces cas expérimentaux, la précision de la méthode répond à la demande industrielle qui motivait ce travail. On s'attache à évaluer les différentes sources d'imprécision de la méthode. Chaque algorithme constituant la méthode d'inversion est étudié individuellement et l'influence des approximations effectuées sur le résultat final de la méthode est discutée.

Chapitre 1

Positionnement du problème

1.1 Contrôle non destructif par ultrasons

Le contrôle non destructif (CND) joue un rôle fondamental dans tous les domaines où les exigences de sécurité sont importantes, comme l'industrie nucléaire, aéronautique, automobile, ferroviaire... Les techniques utilisées sont diverses (ultrasons, courants de Foucault, rayons X, radiographie, ressuage, inspections visuelles...). Elle dépendent à la fois de la nature du matériau, de la précision requise et de la géométrie à contrôler.

Le CND par ultrasons est couramment utilisé pour rechercher des défauts dans des pièces métallurgiques. Il se base sur le principe suivant : un signal électrique est envoyé au transducteur ultrasonore, qui émet dans la structure à contrôler une onde élastique dont la propagation sera influencée par la présence d'éventuels défauts (fissures, inclusions...). Après avoir traversé la partie à contrôler, l'onde est détectée par un récepteur ultrasonore, souvent confondu à l'émetteur. Cette onde est alors convertie en signal électrique, que l'on peut mesurer facilement. Cette mesure et son interprétation doivent permettre de déduire la présence ou non de défaut, ainsi que leur nature et leur dimension. Ce principe simple met en jeu des phénomènes physiques tels que la diffraction de la source, la réflexion / réfraction aux différentes interfaces, l'interaction de l'onde avec le défaut, qui peuvent rendre l'interprétation des mesures difficiles, *a fortiori* pour une analyse de dimensionnement.

1.2 Contrôle non destructif par ultrasons appliqué aux centrales nucléaires.

Dans cette étude, on s'intéresse au contrôle des cuves des réacteurs à eau pressurisée, ainsi qu'au contrôle des tubulures dont la représentation schématique est donnée figure 1.1. On doit ainsi s'assurer que les structures mises en place résistent aux agressions dues à l'environnement, ainsi qu'aux contraintes mécaniques pendant le fonctionnement. On cherche donc à obtenir des informations sur l'état physique des matériaux constitutifs de ces pièces et plus précisément à détecter d'éventuelles fissures et, le cas

1.2. CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR ULTRASONS APPLIQUÉ AUX CENTRALES NUCLÉAIRES.

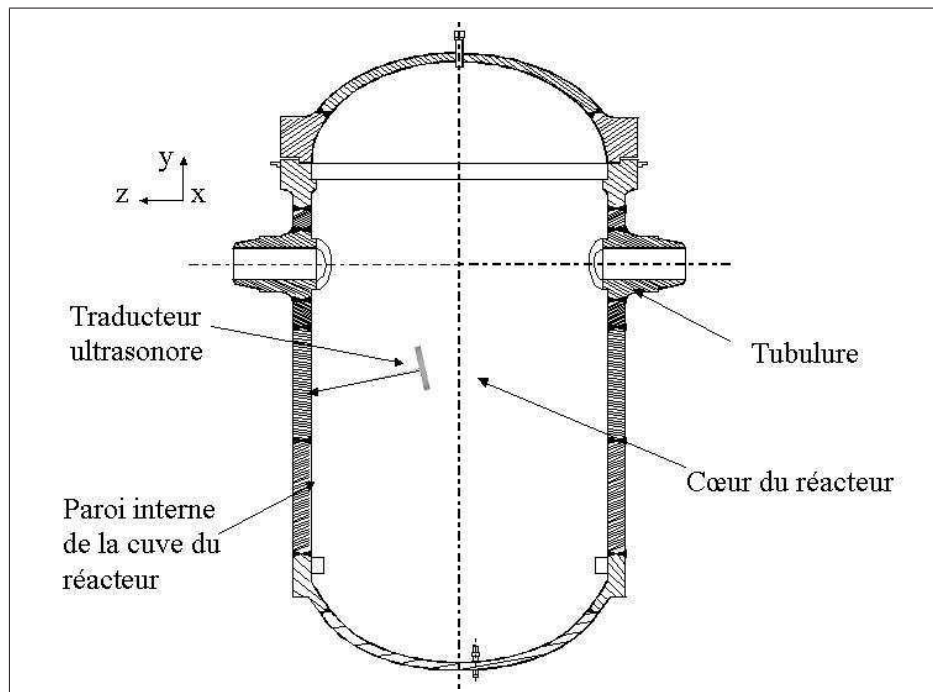


FIG. 1.1 – Représentation schématique d'une cuve de REP.

échéant, à les localiser et à en déterminer la taille. Il revient aux ingénieurs spécialisés en mécanique de la rupture (voir [1]) de déterminer des critères concernant la nocivité du défaut et s'il risque de mettre en cause la tenue mécanique de la pièce ou de l'assemblage auquel elle appartient. Les méthodes de CND par ultrasons permettent de former des pseudo images de l'intérieur des pièces en faisant interagir un faisceau d'ondes ultrasonores avec la pièce et les éventuels défauts. Dans le cas de l'interaction de fissures avec le faisceau ultrasonore direct, celles-ci sont détectées grâce aux phénomènes de diffraction se produisant en leurs extrémités. Le contrôle détecte donc chacun des extrémités de la fissure et l'on souhaite les positionner dans le matériau, afin de déterminer la taille et la localisation de la fissure. Ainsi, par simplification, on appellera par la suite "défaut" une des extrémités de la fissure à évaluer. On s'intéresse ici plus particulièrement à la profondeur de ces défauts, car c'est cette coordonnée et non la position en abscisse ou en ordonnée qui détermine la dangerosité d'une fissure. Intercontrôle est une entreprise réalisant les contrôles sur site. Leur objectif est ici d'obtenir une précision concernant la profondeur du défaut de l'ordre du millimètre. L'étude pouvant être utilisée dans un cadre plus générale que l'application nucléaire, on s'attachera tout de même à être aussi précis que possible dans le positionnement selon l'axe des abscisses ou des incréments.

Les opérations étant réalisées lors des phases d'arrêt du réacteur, il est indispensable de disposer d'une méthode aussi rapide que possible. On s'est donc attaché à réaliser des approximations que l'on justifie, afin de réduire au maximum les temps de calcul nécessaires à l'application de la méthode.

1.3 Configuration de contrôle

Dans le domaine du CND par ultrasons, différents types de traducteurs peuvent être utilisés : en immersion ou au contact, mono ou multi-élément. Pour l'application qui nous intéresse, des traducteurs mono-élément focalisés fonctionnant en immersion qui sont utilisés industriellement. La forme de leur pastille est conçue pour engendrer dans la pièce un faisceau d'ondes longitudinales focalisées. Ce type de contrôle (par immersion) est compatible avec une vitesse de déplacement de la platine de contrôle élevée, rendant possible un gain de temps précieux. On obtient une tache focale réduite, surtout dans la direction du faisceau, ce qui permet de disposer d'une meilleure précision dans la zone de détection : entre 10 mm et 25 mm. La grande ouverture permet d'intégrer le passage de l'interface sur une grande distance. Ainsi, on est moins sensible aux accidents locaux du profil de la pièce. Les principaux inconvénients des traducteurs focalisés sont leur sensibilité à la température de l'eau, ainsi que l'apparition de problèmes de positionnement. Ces deux inconvénients sont pris en compte dans la méthode développée (paragraphe 2.3). Toutes les expériences ont été réalisées à l'aide des mêmes traducteurs, ceux utilisés sur site, dont les caractéristiques sont décrites dans l'annexe F. Néanmoins, la méthode de repositionnement développée au chapitre 3 peut être appliquée avec n'importe quel type de traducteur, y compris au contact. La précision de la méthode dépend néanmoins des caractéristiques des traducteurs utilisés.

Ceux-ci sont montés sur la machine d'inspection en service (MIS) elle-même immergée à l'intérieur de la cuve du réacteur. La platine est composée de cinq traducteurs, comme on le voit sur la figure 1.2.

Le traducteur $L0^\circ$ tire perpendiculairement à la surface. Il est utilisé pour connaître la géométrie de l'interface eau-solide et pour le positionnement de la platine par rapport à la paroi interne de la cuve contrôlée. Quatre traducteurs sont positionnés de part et d'autre du $L0^\circ$ et tirent avec un angle d'incidence de $12,94^\circ$ dans deux directions perpendiculaires et dans les deux sens. Cet angle correspond à l'angle nominal (au sens des lois de Snell-Descartes) correspondant à la génération d'un faisceau dont l'angle de réfraction est de 63° . Du fait de l'ouverture du traducteur, l'angle du faisceau ainsi engendré dans la pièce est de l'ordre de 60° dans la zone d'étude. Ils sont conçus pour engendrer un faisceau d'angle de réfraction de 63° dans l'acier de construction, et sont donc appelés traducteurs $L63^\circ$. La largeur à mi-hauteur du faisceau dans la zone d'intérêt est de l'ordre de 10 mm.

On s'intéresse dans cette étude au contrôle des parois des réacteurs. Ainsi, on peut considérer en première approximation que la géométrie de la cuve est un cylindre creux, à l'intérieur duquel a été placée la platine. Deux traducteurs tirent donc dans le plan de la courbure de la cuve (on les appelle traducteurs "selon courbure") et deux autres tirent dans le plan d'incidence contenant une génératrice de la cuve (traducteurs "selon génératrice"). Chacun de ces deux groupes de traducteurs sont utilisés pour détecter des fissures contenues dans le plan perpendiculaire au plan d'inci-

1.3. CONFIGURATION DE CONTRÔLE

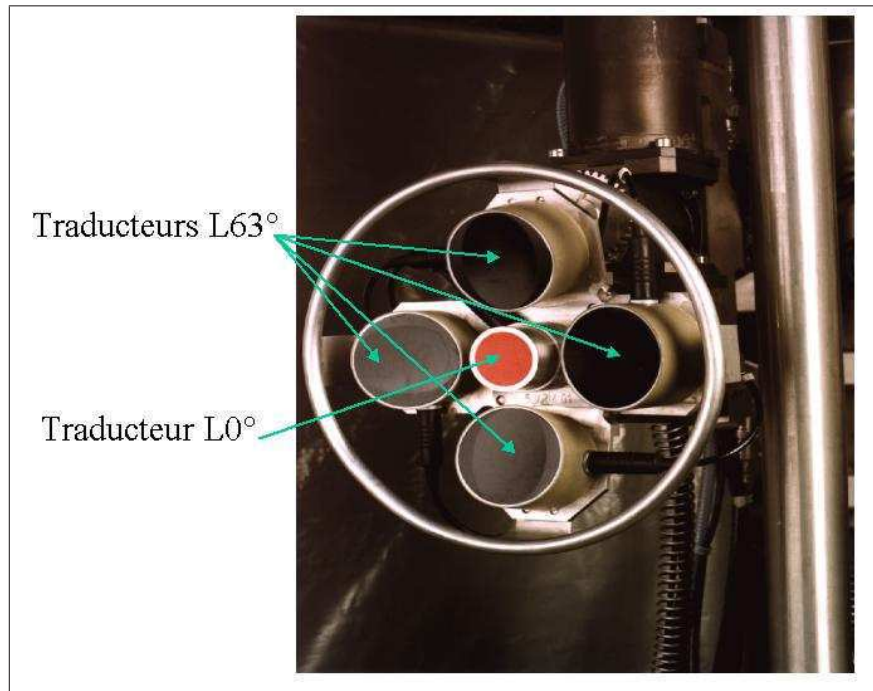


FIG. 1.2 – Platine de contrôle.

dence du traducteur. On montre figure 1.3 des représentations schématiques en vue de dessus et en coupe de la configuration de contrôle. La génératrice du réacteur se situe selon l'axe \vec{y} ; la courbure selon l'axe \vec{x} . L'axe \vec{z} correspond à l'axe de la profondeur. Ces conventions seront adoptées pour le reste de l'étude. La figure 1.4 montre les vues en perspective des deux configura-

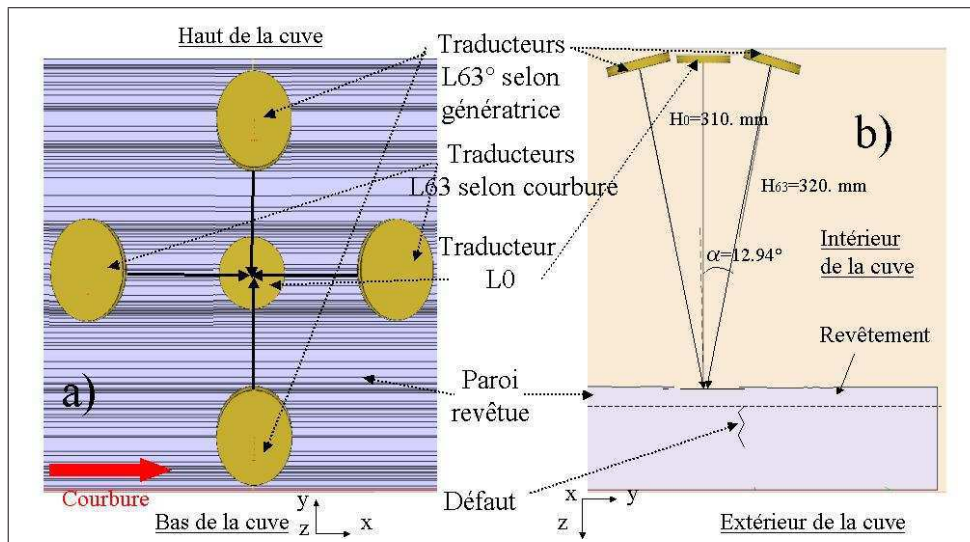


FIG. 1.3 – a) Vue schématique de dessus de la configuration de contrôle de dessus utilisée pour la détection de défauts dans les cuves de réacteur. b) Vue en coupe. Les deux schémas ne sont pas à l'échelle.

tions de tir, obtenues grâce aux outils de visualisation 3D développés dans CIVA. Lors du contrôle de cette partie de la cuve, on impose à la platine un

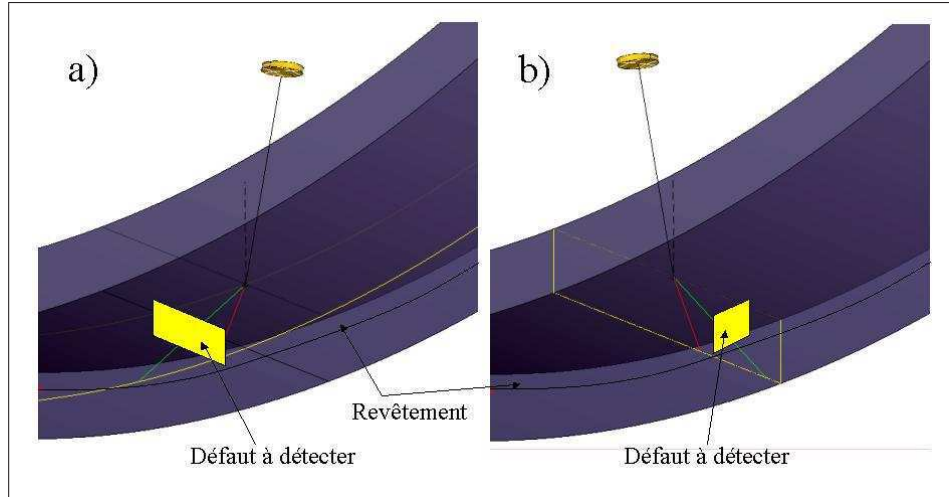


FIG. 1.4 – a) Représentation en perspective de la configuration de contrôle selon courbure. b) Même chose pour la configuration selon génératrice.

déplacement parallèle à la surface de la cuve. Celui-ci peut être décomposé en deux. Un déplacement rectiligne selon la génératrice de la cuve constitue le déplacement selon l'axe dit des génératrices. De plus, la platine effectue un mouvement de rotation dont le centre est situé sur l'axe de symétrie de la cuve et de rayon égal à la différence entre le rayon de la cuve et la hauteur d'eau H_0 moyenne du traducteur $L0^\circ$. Cette rotation correspond au déplacement selon l'axe des incréments de la platine. La direction associée à ce déplacement est appelée par la suite direction selon courbure. De plus, la platine est positionnée de manière à obtenir une hauteur d'eau de 320 mm pour les traducteurs $L63^\circ$. Le logiciel de simulation CIVA est capable de simuler ce déplacement de traducteur, ainsi que de prendre en compte la géométrie cylindrique de la cuve.

1.4 Mode de représentation des données ultrasonores obtenues

Le contrôle consiste donc à déplacer la platine en effectuant un suivi de la surface de la cuve. A chaque position du capteur, on effectue un tir ultrasonore. On décrit ici le mode de représentation des données associé à ce type de contrôle.

- ☞ L'A-Scan est la représentation d'un signal en fonction du temps.
- ☞ Le B-scan résulte de la juxtaposition de l'ensemble des A-Scans selon une ligne de balayage.
- ☞ La cartographie C-Scan code en chaque tir et donc en chaque position du traducteur l'amplitude maximale du signal reçu : en abscisse est représenté le balayage et en ordonnée l'incrément.

1.5 Dépôt d'un revêtement

Les conditions de température et de pression dans un réacteur en fonctionnement sont extrêmes. La température est de l'ordre de 300°C , pour une pression d'environ 150 bars. De plus, la radioactivité y est conséquente. Ces éléments favorisent la corrosion de l'acier constituant la cuve, surtout aux endroits proches du combustible. Afin de remédier à ce problème, un revêtement d'une dizaine de millimètres d'épaisseur en acier inoxydable (aussi appelé acier austénitique) a été déposé par passes circonférentielles sur les parois de la cuve du réacteur. Ce matériau est utilisé pour ses excellentes qualités de résistance à la corrosion et pour ses bonnes performances mécaniques à haute température. L'acier austénitique est un matériau anisotrope, (voir l'annexe A). Les constantes élastiques de l'acier utilisé pour le revêtement de la cuve ont été mesurées par Intercontrôle. Elles sont données en annexe A.

Le procédé de dépôt par passes d'environ soixante millimètres de large, dans le sens circonférentiel induit des irrégularités de surface, notamment à la jonction de deux passes de revêtement, comme on le voit sur la figure 1.6. Du fait du mode de dépôt, on peut considérer en première approximation les irrégularités de surface comme invariantes dans la direction de la génératrice de la cuve. La figure 1.5 montre l'allure d'un revêtement posé selon le même procédé que celui utilisé sur site sur une pièce plane servant de maquette. On y distingue clairement les traces des différentes passes. La figure 1.6 montre

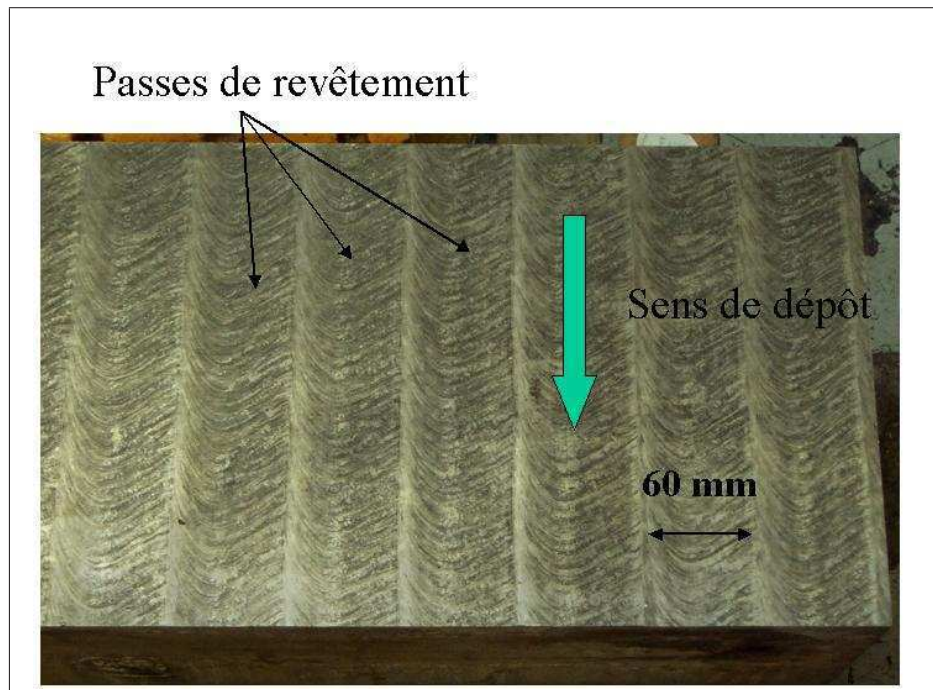


FIG. 1.5 – Photo de la surface d'une maquette revêtue.

une forme caractéristique de surface du revêtement. Ce schéma n'est pas dessiné à l'échelle. On y distingue les passes de revêtement, déposées dans

le plan perpendiculaire à la figure.

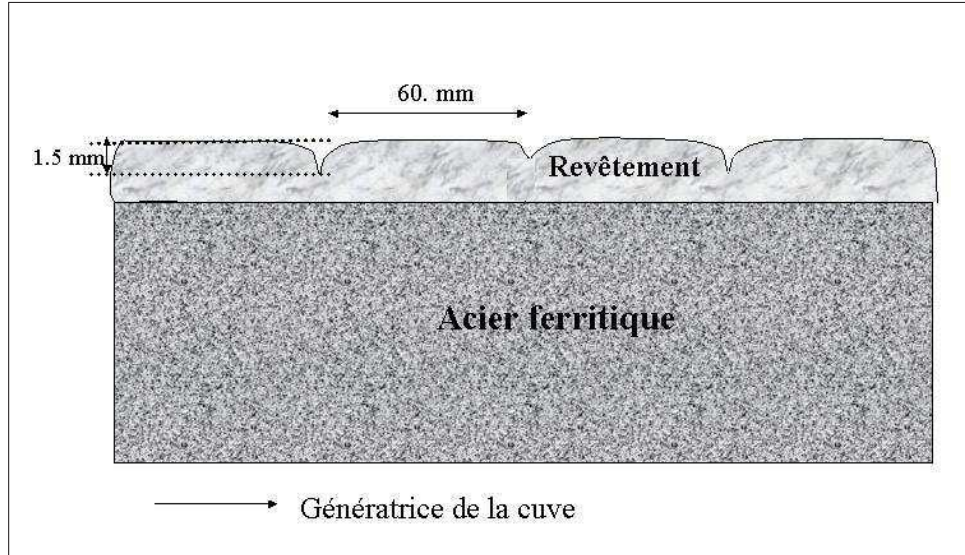


FIG. 1.6 – Représentation schématique du revêtement.

La présence du revêtement, de part son caractère anisotrope et les irrégularités de sa surface compliquent l'analyse des indications ultrasonores acquises au cours d'un contrôle. Ces deux phénomènes peuvent parfois mener à de mauvais positionnements des fissures. La société Intercontrôle a donc confié au CEA une étude dont l'objectif est de proposer une méthode d'inversion capable de prendre en compte la présence du revêtement, pour déterminer la position du défaut à partir de l'ensemble des acquisitions. Cette méthode de caractérisation s'appuie sur l'utilisation de la simulation ultrasonore. On décrit et on met en perspective dans le paragraphe suivant les différents modèles de calcul de champ ultrasonore.

1.6 Les outils de modélisation

La modélisation d'un contrôle sert à prédire les résultats de mesure associés à une configuration donnée, permettant ainsi de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu, afin de pouvoir exploiter les résultats d'une acquisition. Elle sert également à établir les configurations les plus favorables (choix du transducteur) en fonction de la nature de la pièce et des régions à contrôler. Pour ces raisons, la modélisation ultrasonore est un thème de recherche prépondérant en CND depuis que les moyens informatiques permettent d'effectuer des calculs de plus en plus précis. Le Laboratoire de Simulation Ultrasonore et de Traitement (LSUT) du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), travaille depuis plusieurs années à la réalisation d'un logiciel de CND, appelé CIVA [2], comprenant une partie modélisation du contrôle par ultrasons, incluant elle-même plusieurs modules. Méphisto est dédié à la simulation d'échos engendrés par divers défauts. On dispose également de module d'imagerie et de traitement du

signal et de Champ-Sons, dédié au calcul de champ ultrasonore émis par toutes sortes de traducteurs dans des pièces variées.

Parmi les méthodes classiques de résolution de problèmes de propagation d'ondes élastiques ou acoustiques, figurent les méthodes numériques de résolution par éléments finis, différences finies, ou éléments finis aux frontières. On peut citer le code EFIT (Elastodynamic Finite Integration Technique), utilisé par exemple par Fellingner et al [3], qui discrétise les équations de l'élastodynamique en éléments finis. Langenberg ([4]) l'utilise pour effectuer des simulations de champs ultrasonores dans l'acier austénitique, en vue du contrôle de défauts présents dans le revêtement. Les B-scan obtenus sont alors comparés qualitativement. Ce code est également utilisé par Halkjaer et al[5], où la structure de grains possède une symétrie isotrope transverse. EFIT est utilisé dans le but de déterminer et d'optimiser les procédures d'inspection ultrasonore [6]. Chassignole ([7]) utilise le code ULTSON 2D en élément finis en espace et en différences finies en temps, afin de modéliser le faisceau entièrement. On peut également citer le code de calcul Athena [8, 9], capable de simuler le champ ultrasonore ainsi que l'interaction d'un faisceau et de certains défauts.

Ces méthodes, très performantes à basse fréquence, exigent un nombre de points de discrétisation très important lorsque l'on travaille à haute fréquence (1 -5 MHz), car le maillage spatial doit être de l'ordre d'une fraction de la longueur d'onde. Ceci entraîne des temps de calcul trop longs, surtout pour les modèles tri-dimensionnels. Les approches faisant appel partiellement ou totalement à des solutions analytiques sont souvent mieux adaptées aux objectifs de simulation de CND. Parmi celles-ci, les modèles de calcul de champ par superposition de faisceaux gaussiens sont couramment utilisés pour des milieux isotropes [10] ou anisotropes [11]. Spies et Kröning [12] ont mis en oeuvre cette méthode pour des soudures inhomogènes d'acier austénitique.

Le modèle de calcul de champ développé au laboratoire est un modèle semi-analytique tri-dimensionnel développé directement dans l'espace physique. On modélise le champ rayonné par un traducteur comme la superposition de sources ponctuelles le constituant. Le calcul fournit la réponse impulsionnelle, de sorte que le résultat est obtenu par convolution avec le signal émis par le traducteur. Ce calcul est basé sur le suivi de la propagation de pinceaux [13], rayons dotés de propriétés différentielles permettant de décrire l'évolution des deux rayons de courbure principaux du front d'onde local au pinceau. Ce formalisme a été développé par exemple dans le cas de matériau isotropes hétérogène et pour l'électromagnétisme par Deschamps [14]. Il a été étendu à des géométries particulières par Lee *et al*[15]. Il a été adapté au contexte de l'élastodynamique au laboratoire au cours de la thèse de Gengembre [16]. Ce formalisme permet de traiter aisément tous les types de traducteurs (en immersion, au contact, mono-élément, ou multi-éléments [17]. On peut ainsi modéliser la propagation d'ondes dans un milieu isotrope [18, 19, 20] ou anisotrope [21], homogène ou hétérogène [22]. Des milieux hétérogènes comportant des parties anisotropes peuvent également être modélisés [23]. De plus, le franchissement d'interfaces complexes déterminées

par des outils CAO (voir [24]) peut également être pris en compte par ce modèle [25, 26]. Toutefois, le modèle ne prend pas en compte la génération des ondes de surface, ou des ondes de tête, engendrées à l'interface et donc leur rayonnement dans l'un ou l'autre milieu (pour une description des phénomènes, voir par exemple [27]). Ces phénomènes apparaissent néanmoins dans des conditions bien particulières et dans certaines régions uniquement. On est donc capable de modéliser des pièces réalistes, très proches de cuves réelles, ainsi que les traducteurs utilisés.

On dispose d'un outil de modélisation performant, que l'on utilise dans le cadre du développement de la méthode d'inversion, destinée à caractériser les défauts situés dans des pièces de géométrie et de composition complexes.

1.7 Analyse des effets du revêtement sur le résultat d'un contrôle.

Le revêtement perturbe le contrôle de défaut à cause de deux phénomènes bien distincts : les irrégularités de sa surface et la nature anisotrope du matériau le constituant.

1.7.1 Interface irrégulière

L'effet géométrique de l'interface irrégulière sur l'écho d'un défaut diffère selon la configuration de tir. Pour chacune des deux configurations, on s'intéresse à l'effet de la présence d'une interface irrégulière sur l'écho renvoyé par un défaut à travers une telle interface dans un matériau homogène. Les phénomènes observés sont expliqués par l'effet d'une telle surface sur le champ ultrasonore transmis dans le composant.

Configuration selon génératrice

Dans ce cas, le profil complexe est contenu dans le plan d'incidence du traducteur L63° considéré.

Conséquences sur l'écho du défaut. La figure 1.7 montre deux B-scan obtenus respectivement sur une pièce de surface non perturbée et sur une pièce dont la surface a été usinée selon un profil représentatif des profils rencontrés sur site. Les deux blocs contiennent chacun un trou génératrice situé à la même profondeur. Cette comparaison illustre les principaux effets d'une surface irrégulière dans la configuration selon génératrice sur les échos issus d'un fond de fissure.

En plus de la présence de l'écho principal détectant le défaut et impliquant un trajet dans l'acier longitudinal/longitudinal, on constate l'apparition d'échos supplémentaires : des échos issus de la surface et des échos impliquant un mode de propagation transversal. L'écho de surface n'est pas présent dans le cas d'une surface régulière car l'énergie est alors réfléchiée dans la direction opposée au traducteur. Lorsque la surface est irrégulière, le traducteur L63° reçoit un écho d'autant plus fort que l'orientation locale

1.7. ANALYSE DES EFFETS DU REVÊTEMENT SUR LE RÉSULTAT D'UN CONTRÔLE.

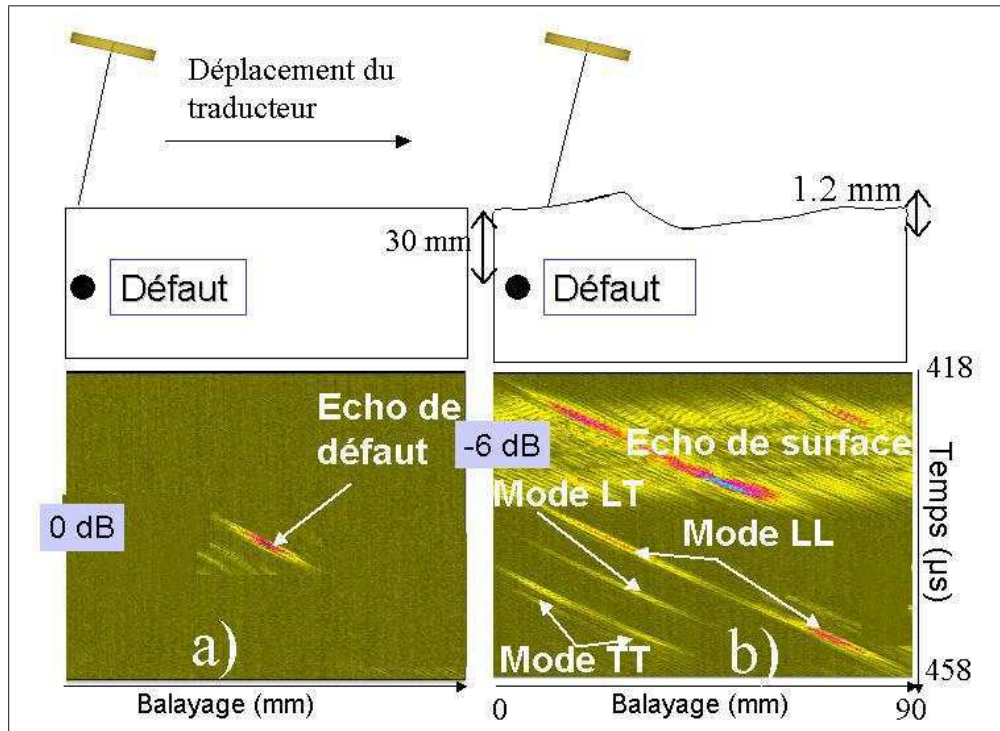


FIG. 1.7 – Acquisitions réelles correspondant aux échos renvoyé par un défaut placé dans une pièce. a) : L'interface est non perturbée, b) : elle est complexe. Les profils sont montrés au-dessus de chaque B-scan, avec une échelle verticale et horizontale différente. La position des défauts dans les blocs est indiquée par un cercle noire.

de la surface est proche de la direction spéculaire. On peut se reporter au paragraphe 2.1.3 pour une description quantitative de ces phénomènes.

Les échos issus de modes transverses sont également présents dans le cas d'une surface régulière, mais leur amplitude relative est alors beaucoup plus faible (dix fois plus faible pour un écho TT). Dans notre configuration, un défaut peut être détecté en mode LL, LT, ou TT. La première lettre correspond au mode de propagation de l'onde réfractée dans la pièce ; la deuxième correspond au mode de l'onde renvoyée par le défaut. Notons que les modes LT et TL ne sont pas différenciables car ils arrivent en même temps. Dans l'exemple de la figure 1.7b), l'amplitude de l'écho TT est sept fois moins important que celle de l'écho LL obtenu pour la même configuration. On peut se trouver dans des situations où l'on observe clairement les échos LT et TT. Les temps d'arrivée de chaque mode sur ce défaut sont tels que : $t_{LL} < t_{LT} < t_{TT}$. De plus, l'angle de réfraction d'un faisceau d'onde L étant plus important que pour un faisceau d'onde T, les échos issus des différents modes sont toujours placés de la même manière relativement pour un sens de tir donné. Dans le cas du sens de tir de la figure 1.7, les échos LL sont situés à gauche des échos LT, eux-mêmes placés à gauche des échos TT. Dans la plupart des cas de figures, il est donc possible de déterminer

le mode de détection de chaque écho, à partir du moment où aucun autre écho n'est situé dans la zone de détection.

L'écho principal issu du mode LL est également lui-même affecté par la présence de l'interface irrégulière. On constate en effet sur cet exemple une perte d'amplitude par rapport au cas non perturbé de 6 dB. Cela n'a d'effet que sur la détection de l'écho et non sur le positionnement du défaut. En revanche, le déplacement de l'écho principal peut entraîner une perte de précision concernant le positionnement du fond de fissure responsable de celui-ci si la surface n'est pas prise en compte. De plus, on constate que ce même écho est dédoublé, ce qui rend son analyse plus difficile, car les deux échos peuvent être interprétés comme issus de deux défauts différents. Sans prise en compte des irrégularités de la surface, ces deux fonds de fissures seraient tous deux mal positionnés.

Effets sur le champ ultrasonore. Pour étudier la perturbation du champ ultrasonore par une telle surface, on a effectué des calculs de champ transmis à travers une surface régulière (figure 1.8a) et à travers la surface représentée sur la figure 1.7b), pour différentes positions de traducteur (figure 1.8b-g). Les flèches indiquent les positions de balayage correspondant à l'intersection de la surface et de l'axe focal du traducteur $L63^\circ$. Les cartographies du champ ultrasonore représentent le maximum de l'amplitude du potentiel de vitesse de l'onde longitudinale en fonction de la position dans le matériau. On indique, pour chaque cartographie, la valeur du maximum en décibel par rapport au cas régulier. Le cercle noir indique la position réelle du défaut dans la pièce.

La comparaison entre la figure 1.8a et les figures 1.8b-g indique que le faisceau transmis est fortement affecté par la géométrie de la surface. La figure 1.8a montre que le champ transmis par le traducteur $L63^\circ$ est correctement focalisé et forme un faisceau concentrant l'amplitude. La présence d'une interface irrégulière perturbe le champ transmis dans la pièce, affectant donc le contrôle. La forme du champ transmis varie alors d'une position à l'autre du capteur en fonction de la forme de la surface rencontrée par l'onde incidente. Par exemple, on remarque sur les figures 1.8b et 1.8c, que le faisceau transmis est dédoublé en deux lobes principaux, séparés par une zone d'amplitude plus faible. Ce phénomène s'explique par la géométrie particulière de l'interface à cet endroit. En effet, la partie centrale du faisceau rencontre l'interface à un endroit où sa pente est défavorable. L'angle d'incidence local est alors supérieur à l'angle critique : il n'y a pas d'onde longitudinale transmise. Des deux côtés, la pente redevient favorable à la transmission de l'énergie sous forme de faisceaux, dont la direction dépend de l'orientation locale de l'interface. De manière plus générale, on constate que la direction des faisceaux réfractés dépend de façon attendue de la normale locale de l'interface. Ce phénomène est discuté dans l'annexe B. Il est responsable du déplacement d'échos sur le B-scan expérimental.

La perte d'amplitude des échos LL remarquée au paragraphe précédent est expliquée par les calculs de champ montrés sur la figure 1.8. En effet, on assiste à une défocalisation du faisceau induite par la présence de l'interface

1.7. ANALYSE DES EFFETS DU REVÊTEMENT SUR LE RÉSULTAT D'UN CONTRÔLE.

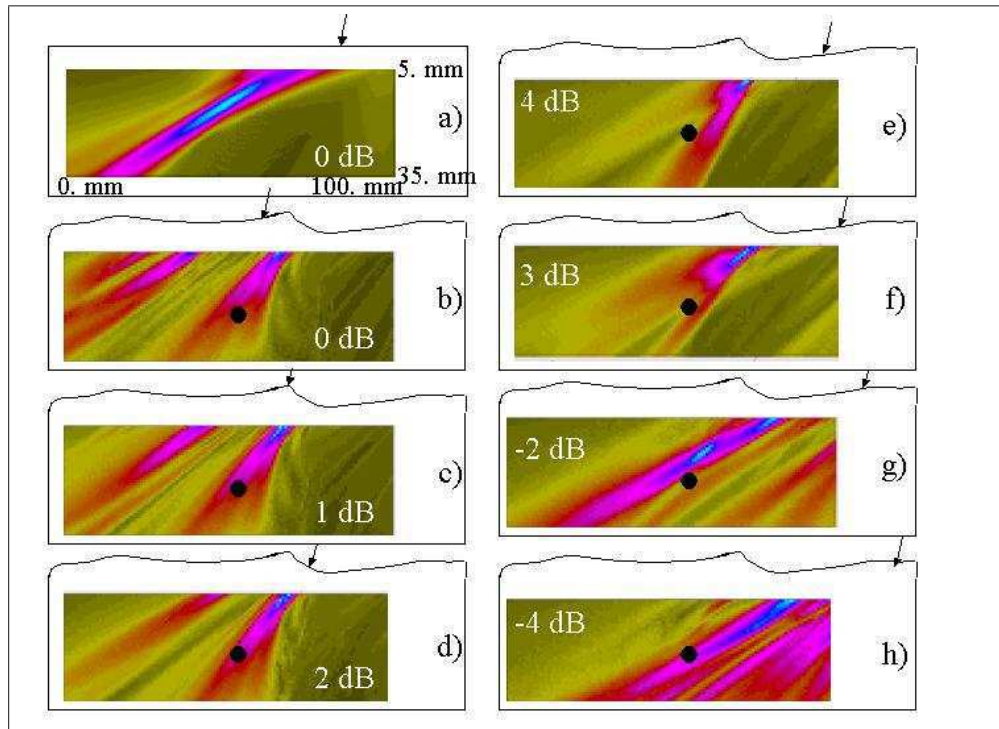


FIG. 1.8 – Effet des irrégularités de surface sur le faisceau transmis. Cartographies simulées obtenues à travers a) : une surface régulière et b), c), d), e), f), g), h) une surface irrégulière à différentes positions de traducteur.

irrégulière, se traduisant entre autre par des pertes d'amplitude. De manière générale, on constate que les zones de forte amplitude sont beaucoup plus réduites sur les figures 1.8b-g que dans le cas non perturbé. De plus, celles-ci se situent à faible profondeur, dans des zones où l'on ne cherche pas le défaut. La perte d'amplitude relative du champ ultrasonore transmis en ondes T sera comparativement moins importante, car le traducteur n'est pas conçu pour engendrer un champ transverse focalisé. L'influence des irrégularités est donc moins critique pour ce champ. Cela explique que la perte d'amplitude pour les modes transverse est moins importante que pour le mode LL et que l'on observe ces échos dans le cas d'une surface chahutée et pas pour une surface régulière.

Enfin le dédoublement d'écho LL constaté au paragraphe précédent est expliqué par les cartographies des figures 1.8b-g. En effet, l'amplitude du champ incident à la position du défaut varie en fonction de la position du traducteur $L63^\circ$. Celle-ci est importante aux positions b et g, tandis qu'elle diminue de manière importante entre les deux. Ces observations sont cohérentes avec le B-scan expérimental de la figure 1.7b car les deux maxima de l'écho correspondent aux positions des figures b et g.

Configuration selon courbure

Dans cette configuration, le profil irrégulier est situé dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence du traducteur. Dans toute notre étude, le plan d'incidence du traducteur $L63^\circ$ est défini par le plan contenant l'axe focal du traducteur $L63^\circ$, ainsi que le grand axe de l'ellipse constituant le traducteur $L63^\circ$.

Conséquence sur l'écho du défaut. On montre figure 1.9 les Cscan correspondant aux échos détectant un trou génératrice placé sous une surface non perturbée (figure 1.9a) et sous une surface usinée (figure 1.9b). L'écho expérimental obtenu sur une pièce de surface non perturbée ne varie

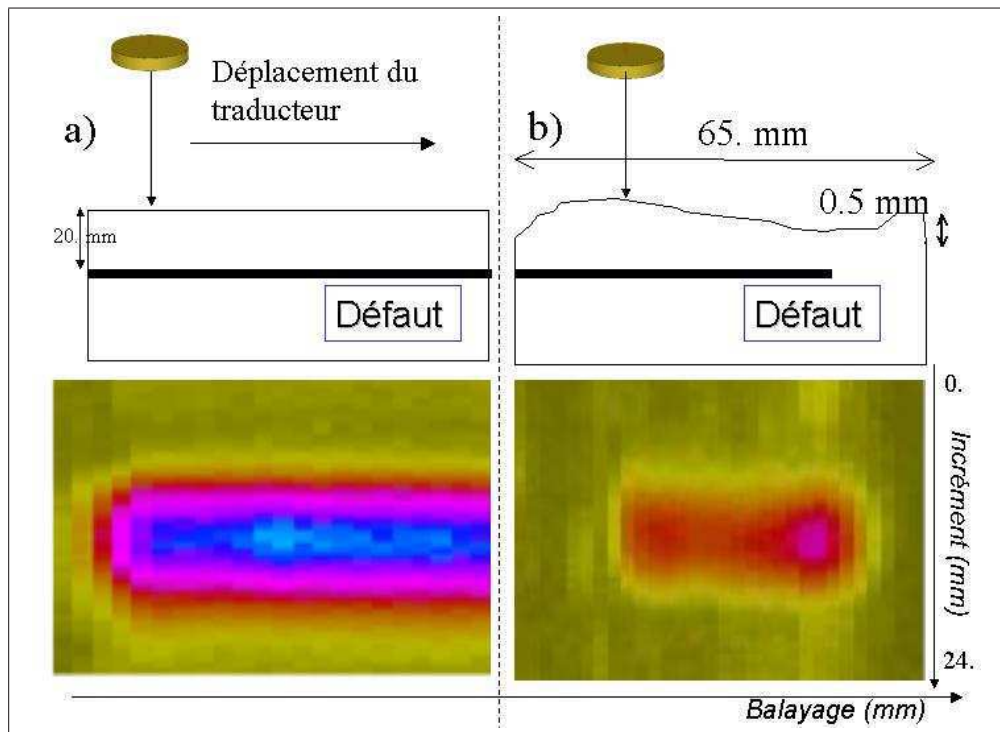


FIG. 1.9 – Acquisitions réelles (Cscan) correspondant aux échos provenant d'un défaut placé dans une pièce. a) : L'interface est régulière, b) : elle est complexe. Les profils sont montrés au-dessus de chaque B-scan, avec une échelle verticale et horizontale différente. La position des défauts dans les blocs est indiquée par un trait noir.

pas en fonction de la position du capteur. A gauche de la figure 1.9a, la décroissance de l'amplitude indique la fin de la pièce.¹ Dans le cas d'une surface irrégulière, on constate une forte atténuation de l'amplitude, d'environ -4,9 dB. De plus, on ne détecte aucun écho issu de la zone située à gauche de la figure 1.9b, alors que le transducteur se situe à la même abscisse que le trou. Il peut donc y avoir des zones où le défaut n'est pas détecté. On

¹Sur la droite de cette même figure, l'amplitude est constante car, sur la pièce réelle, le trou continue plus loin.

1.7. ANALYSE DES EFFETS DU REVÊTEMENT SUR LE RÉSULTAT D'UN CONTRÔLE.

constate également que l'amplitude n'est pas constante sur toute la zone de détection. Les positions du maximum de l'écho, ainsi que le temps de détection correspondant à cette position varient peu (respectivement 0,7 mm et 0,3 μs).

Ces effets peuvent être expliqués simplement par l'étude du champ ultrasonore transmis dans la pièce pour cette configuration.

Effet sur le champ ultrasonore. Pour expliquer l'origine de cette absence d'écho, on calcule le champ ultrasonore transmis à travers une surface régulière (figure 1.10a) et à travers une surface irrégulière (figure 1.10b). Le profil utilisé pour ce calcul est construit à partir de celui de la pièce de la figure 1.9b). A gauche des pointillés, on a accolé une zone plane, afin de visualiser correctement les effets de cette interface. Le traducteur L63° est placé à une position où aucun écho de défaut n'est détecté figure (1.9b). Afin de visualiser facilement les variations du faisceau, la zone de calcul est contenue dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence. On indique, pour chaque cartographie, la valeur du maximum d'amplitude en décibel par rapport au cas régulier. Le faisceau est dévié perpendiculairement au plan d'incidence. Celui-ci peut donc se trouver dédoublé dans cette direction. L'emplacement du défaut est indiqué dans les deux figures par un trait noir. L'intersection entre le défaut et les deux faisceaux incident s'effectue en deux endroits hors du plan d'incidence nominal. L'onde renvoyée par celui-ci ne revient donc pas vers le traducteur, ce qui explique l'absence d'écho.

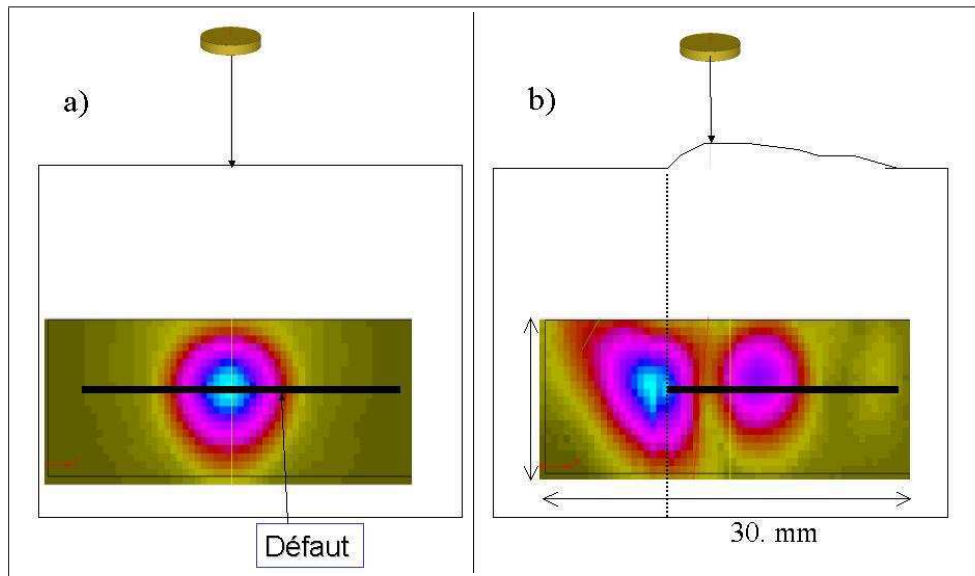


FIG. 1.10 – Effet des irrégularités de surface sur le faisceau transmis dans la configuration selon courbure. Cartographies simulées obtenues à travers a) : une surface régulière et b) une surface irrégulière. L'incidence du traducteur est oblique dans le plan perpendiculaire à l'image.

Une deuxième caractéristique liée à la présence de la couche va perturber

le contrôle. Il s'agit du caractère anisotrope de l'acier austénitique qui va modifier la propagation des ultrasons.

1.7.2 Couche anisotrope

L'étude de l'effet de la présence de la couche anisotrope est divisée en deux. On s'intéresse tout d'abord aux différents modes de détection du défaut, puis à l'effet qualitatif sur le positionnement du défaut.

Conversion de modes

Comme on l'a vu au paragraphe 1.7.1, les modes transverses sont en général assez énergétiques pour être détectables lorsque le défaut est situé dans une pièce homogène à surface irrégulière. Ce paragraphe est consacré à l'étude des différents modes possibles détectés lors du contrôle d'un défaut situé sous un revêtement. On s'intéresse aux conversions de mode au franchissement des deux interfaces : liquide/revêtement et revêtement/substrat.

Différents modes possibles. Lors du franchissement de ces deux interfaces, différents modes peuvent être créés(annexe D) : ondes QL, QT1 et/ou QT2 dans le revêtement. A la deuxième interface, chacun de ces trois modes peut à son tour donner naissance à une onde L ou T dans l'acier de construction de la cuve (isotrope). Six modes de propagation sont *a priori* possibles pour les ultrasons dans ce dernier matériau. Soit R le mode de propagation d'une onde dans le revêtement et S dans le substrat. Ce mode est noté : L/R/S. La notation "Ltr" indique que les ultrasons se propagent d'abord dans l'eau, donc en mode longitudinal, puis sont transmis dans le solide. L'ensemble des modes possibles est donc : L/QL/L, L/QL/T, L/QT1/L, L/QT1/T, L/QT2/L, L/QT2/T. Les aspects traitant des conversions de mode sur le défaut ne sont pas étudiés dans ce paragraphe, car on s'intéresse ici uniquement à l'amplitude des différents modes du champ incident, afin d'en déduire l'amplitude relative des échos.

Détermination des amplitudes par calcul de champ pour un revêtement régulier. Afin de connaître l'amplitude relative des différents modes de propagation d'onde dans le revêtement et dans le substrat, on calcule le champ ultrasonore tri-dimensionnel dans le revêtement et dans l'acier de la cuve aux profondeurs de détection potentielles de défaut. Ces calculs ont été réalisés pour les deux configurations de tir. On a effectué le même calcul dans une pièce plane isotrope. Le tableau 1.1 montre, pour chaque mode dans la couche et le revêtement, le rapport entre les amplitudes maximales du mode traité et celle du mode L dans une pièce isotrope de surface régulière. Ces valeurs sont données pour les deux directions de contrôle, selon génératrice et courbure. On remarque tout d'abord que l'ordre de grandeur des résultats obtenus est similaire dans les deux configurations, sauf pour la transmission L/QT1 et QL/T, où elles sont proches. On constate aussi que le mode QT1 est extrêmement faible par rapport aux deux autres modes

1.7. ANALYSE DES EFFETS DU REVÊTEMENT SUR LE RÉSULTAT D'UN CONTRÔLE.

	L/QL	L/QT1	L/QT2	QL/L	QL/T	QT2/L	QT2/T
Génératrice	0,63	0,013	0,31	0,99	0,1	0,045	0,35
Courbure	0,59	0,03	0,31	0,93	0,03	0,027	0,4

TAB. 1.1 – Valeurs du rapport d'amplitude maximale entre le mode considéré et une pièce de surface régulière isotrope en mode L.

dans le revêtement. Il sera négligé par la suite. Les modes issus de QT1 dans le substrat ne figurent pas dans le tableau 1.1. De même, on peut considérer que les phénomènes de conversion de mode à l'interface couche / substrat entraînent de manière attendue des champs d'amplitude négligeable par rapport aux ondes transmises sans changement de mode. On néglige donc par la suite ces conversions.

On peut donc se ramener au cas d'un bloc homogène, L/QL/L correspondant au mode de propagation L et L/QT2/T au mode T. Le défaut peut donc *a priori* être vu par trois modes de détection, comme dans le cas d'une pièce homogène : L/QL/L-L/QL/L, L/QL/L-T/QT2/L et L/QT2/T-T/QT2/L. Une analyse plus poussée du tableau 1.1 permet de comparer l'amplitude des modes responsables de la détection du défaut. Ainsi, le rapport d'amplitude entre le mode transverse pur et le mode longitudinal pur est de -9 dB et de -7,3 dB respectivement pour les configurations génératrice et courbure. On a effectué le même calcul dans le cas d'une pièce homogène, en comparant les amplitudes maximales des modes L et T. Ce rapport d'amplitude est alors de -6 dB. On en déduit qu'un des effets d'un revêtement de surface non perturbée est de diminuer l'amplitude des échos transverses, d'autant plus dans le cas courbure. De manière générale, les échos transverses de défauts situés sous un revêtement à surface irrégulière sont atténués de la même façon. En pratique, on n'utilise pas d'indications transverses pour positionner des défauts détectés sous un revêtement. Les deux paragraphes suivants sont destinés à l'explication et à l'illustration de ces phénomènes.

Calcul des coefficients de transmission et de réflexion en onde plane. Le but de ce paragraphe est d'expliquer les calculs effectués au paragraphe précédent en prenant en compte l'onde réelle. Pour cela, on considère que l'onde est plane, de direction égale à celle de l'axe focal du traducteur. Ainsi, on peut exploiter facilement les propriétés de la courbe des lenteurs décrite dans l'annexe D. La figure 1.11 montre les projections de la surface des lenteurs de l'acier austénitique dans chacun des plans d'incidence, pour les deux configurations de contrôle. La flèche noire pleine correspond à l'angle α d'incidence nominal du traducteur $L63^\circ$. On montre également les polarisations de l'onde transverse associée aux différentes branches des courbes des lenteurs. La polarisation horizontale correspond aux parties des courbes de lenteur formant une ellipse. La polarisation verticale correspond au complémentaire. De plus, on n'observe jamais de polarisation transverse horizontale au franchissement d'une interface liquide-solide.

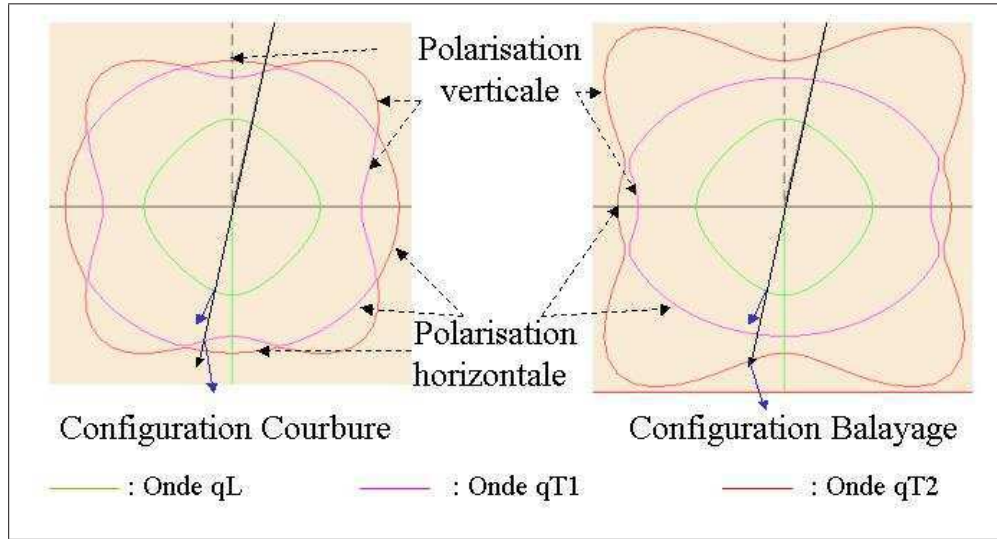


FIG. 1.11 – Courbes des lenteurs correspondant aux deux configurations de contrôle. Pour la configuration courbure, la désorientation du cristal est nulle.

Dans les deux configurations, l'intersection entre l'axe focal et la courbe des lenteurs associée à la polarisation verticale se situe sur la courbe QT2, ce qui explique que ce mode soit le plus énergétique. De plus, des ondes QT1 sont engendrées pour des angles supérieurs à $15,2^\circ$ dans le cas courbure. Cela explique que l'amplitude du mode QT1 dans la configuration selon courbure soit supérieure à celle obtenue pour la configuration génératrice, où la valeur obtenue est de l'ordre du bruit numérique du calcul.

Les flèches bleues de la figure 1.11, normales à la courbe des lenteurs, correspondent à la vitesse d'énergie du rayon réfracté. Dans le revêtement, l'énergie transportée par une onde plane QT2 issue d'une onde plane dans l'eau d'angle d'incidence α se propage donc dans le sens opposé au rayon incident. On montre figure 1.12 les résultats d'un calcul de champ effectué dans le revêtement illustrant ce phénomène. La figure 1.12a montre la variation du maximum du module du déplacement associé à l'onde QT2, indiqué par le code couleur. Le calcul n'a pas été effectué dans les deux premiers millimètres car le modèle n'est pas valable près de la surface, les ondes de tête n'étant pas prises en compte par le modèle pinceaux de calcul de champ. L'axe focal du traducteur $L63^\circ$ à la surface de la pièce est indiqué par une flèche noir. La figure 1.12b montre le champ ultrasonore en fonction de l'abscisse et du temps sur la ligne indiquée en noire sur la figure 1.12a. Ces deux figures illustrent bien les différences d'orientation entre vitesses d'énergie (visible figure 1.12a) et vitesse de phase (visible figure 1.12b).

Les calculs de champ effectués au paragraphe précédent utilisent les valeurs des coefficients de transmission et de réflexion en onde plane pour chaque pinceau traversant chaque interface. Ceux-ci traduisent la répartition de l'amplitude du déplacement entre les différentes ondes issues de l'interaction de l'onde incidente avec l'interface. On utilise les relations de

1.7. ANALYSE DES EFFETS DU REVÊTEMENT SUR LE RÉSULTAT D'UN CONTRÔLE.

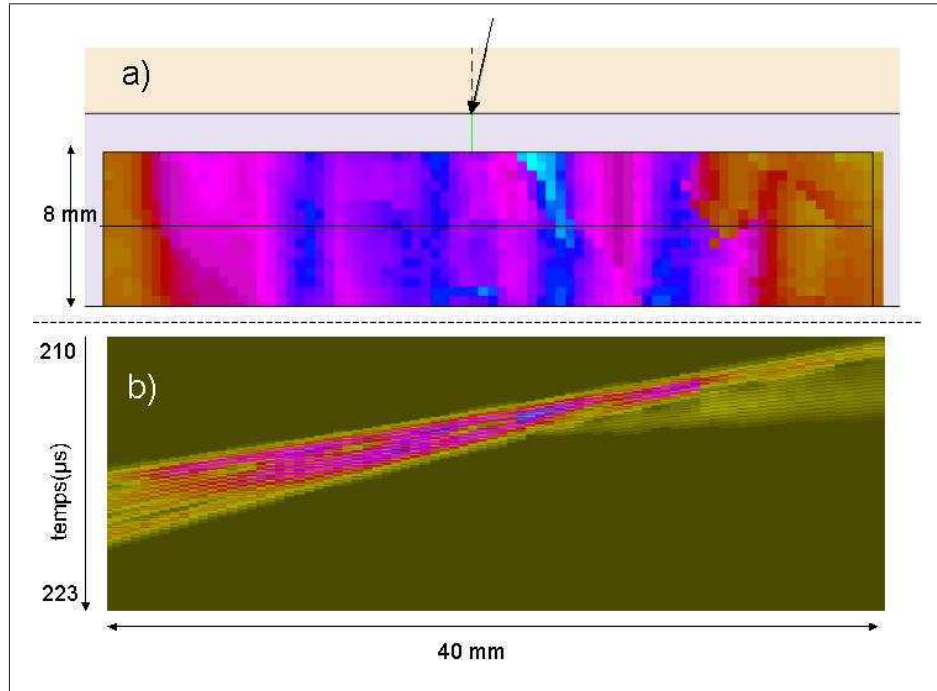


FIG. 1.12 – a) Valeur du maximum du module de déplacement de l'onde QT2 dans le revêtement. b) Valeur du même champ ultrasonore sur la ligne noire de a) en fonction du temps.

continuité aux interfaces (des déplacements et des contraintes normales) pour le calcul de ces coefficients. Ce problème est largement traité dans la littérature. Des expressions analytiques sont données pour le cas fluide/solide isotrope ou solide isotrope/fluide dans [28, 29] et pour le cas solide isotrope/solide isotrope dans [30]. En ce qui concerne les interfaces comportant des milieux anisotropes, Atalar [31, 32] a développé une méthode numérique permettant leur calcul. La complexité vient du fait qu'une onde incidente donne lieu potentiellement jusqu'à six ondes induites dans le cas d'une interface solide anisotrope/solide anisotrope. Toutes doivent être prises en compte simultanément. Rappelons enfin que ces coefficients peuvent être complexes, traduisant l'apparition d'onde évanescentes. Ce cas se produit pour un angle d'incidence supérieur à l'angle critique et n'est pas traité ici.

On montre figure 1.13 les valeurs de chacun de ces coefficients en fonction de l'angle d'incidence de l'onde plane.

Les valeurs des coefficients de transmission L/QL et L/QT2 pour un angle d'incidence de $12,94^\circ$ permettent d'expliquer dans les deux configurations celles obtenues au paragraphe précédent, l'écart le plus important étant de l'ordre de 10%.

On a également calculé les coefficients de réflexion en déplacement en onde plane des ondes QL se réfléchissant en onde QL pour les deux configurations. On montre les résultats sur la figure 1.14. La réflexion d'une onde plane n'est sensible que pour un angle d'incidence dans la couche de 70°

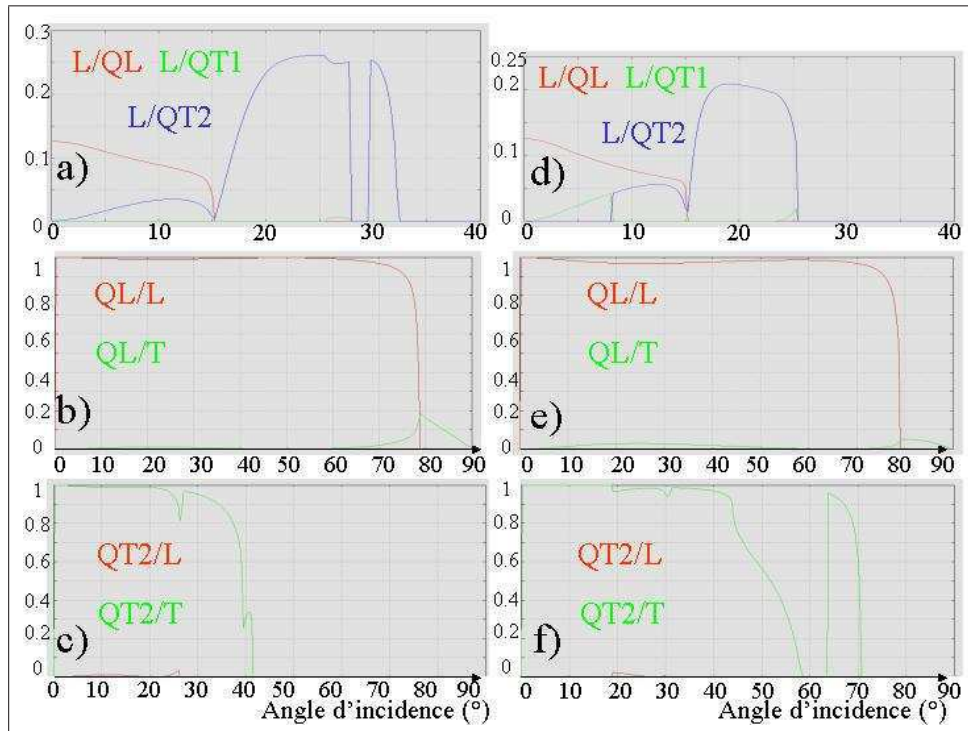


FIG. 1.13 – Coefficients de transmission en onde plane. a) A l'interface liquide - acier austénitique dans la configuration génératrice, b) A l'interface acier austénitique - acier de la cuve pour les ondes QL dans la configuration génératrice, c) A l'interface acier austénitique - acier de la cuve pour les ondes QT2 dans la configuration génératrice. d), e), f) Idem dans la configuration courbure.

environ. Or, l'angle d'incidence nominal de l'onde QL, issu de l'onde d'incidence $12,94^\circ$ dans l'eau est de $55,5^\circ$ dans le cas génératrice et de $55,4^\circ$ dans le cas courbure. On en déduit que les phénomènes de réflexion à l'interface couche / substrat sont négligeables pour les orientations considérées.

Effet sur un mode de détection

Afin de comprendre l'effet de la présence d'un revêtement de surface non perturbée sur le résultat d'un contrôle en mode L/QL/L, on peut considérer en première approximation que la propagation des ultrasons dans le revêtement s'effectue en onde plane. On peut associer un angle d'incidence et une vitesse d'énergie à la propagation des ondes dans la couche. Cela permet d'assimiler son effet à la présence d'un matériau "bicouche". A la sortie du revêtement, le faisceau garde le même angle de réfraction que pour un milieu homogène isotrope, mais est décalé spatialement. Cet effet est illustré par la figure 1.15, où le mode longitudinal est considéré. Les figures 1.15a) et b) montrent respectivement le résultat d'un calcul de champ effectué dans une pièce de surface non perturbée homogène et revêtue. On constate que l'effet induit par la présence du revêtement est de décaler le faisceau de quelques

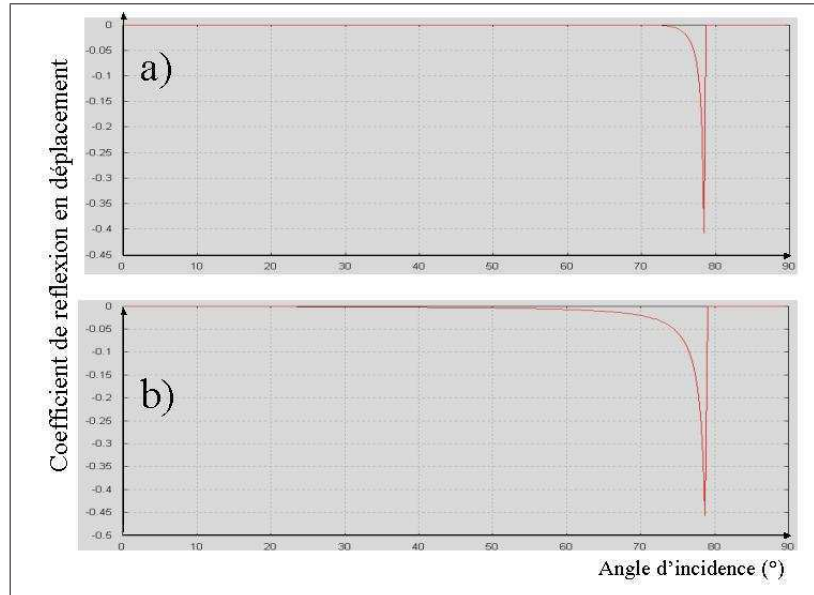


FIG. 1.14 – Coefficients de réflexion en onde plane QL à l’interface acier austénitique - acier de la cuve. a) Configuration génératrice, b) Configuration courbure.

millimètres vers la gauche. Cela est dû à l’écart entre les vitesses d’énergie et les angles de réfraction de l’acier austénitique et de l’acier de la cuve. De plus, cet écart entraîne un décalage temporel de l’onde ultrasonore qui n’est pas visible sur la figure 1.15. Afin de le visualiser, on a placé sur chacun des faisceaux la position de l’onde à un temps arbitraire, indiqué par un point noir. Cette position correspond à la position d’un défaut détecté à ce temps, comme on le verra dans la description de la méthode. La présence d’un revêtement induit donc une modification de la position de défaut de l’ordre de quelques millimètres en abscisse et en profondeur. On comprend donc la nécessité de prendre en compte ces phénomènes afin de positionner correctement le défaut à l’origine de l’écho traité.

La méthode de repositionnement développée dans le cadre de cette étude devra permettre de repositionner correctement un défaut situé dans une pièce revêtue et ce dans les deux configurations de tir. On doit prendre en compte l’ensemble des phénomènes décrits dans ce paragraphe. On expose maintenant la stratégie de traitement que on a utilisé pour prendre en compte tous ces phénomènes, dans le but d’évaluer correctement la position et la taille d’une éventuelle fissure dans un composant revêtu.

1.8 Stratégie de traitement du problème inverse

L’objectif est d’estimer les grandeurs caractéristiques du défaut non accessibles par la mesure directe. On ne dispose pour cela que des informations issus des acquisitions ultrasonores. On peut donc considérer ce problème

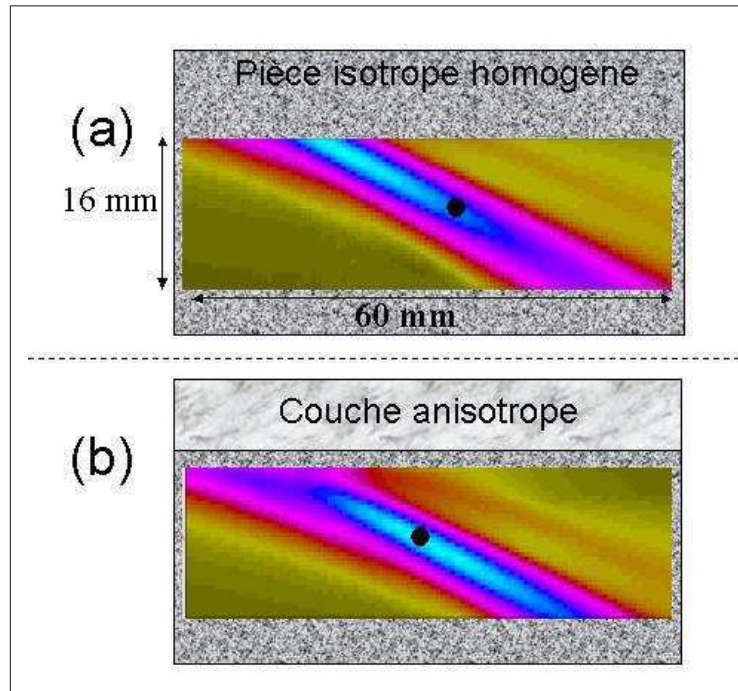


FIG. 1.15 – a) Calcul de champ ultrasonore transmis dans un composant homogène isotrope de surface régulière. b) Calcul de champ ultrasonore transmis dans un composant revêtu de surface non perturbée. Les points noirs correspondent à la position de l’onde à un temps identique.

comme un problème inverse car on détermine ces paramètres par une mesure indirecte. Pour remonter aux grandeurs d’intérêt à partir des grandeurs observées (différentes acquisitions issues de la platine de contrôle), il faut naturellement connaître la relation de dépendance les liant. Cette logique implique l’existence de deux grandes étapes dans la résolution de tout problème inverse :

- La construction et le développement d’un modèle direct représentatif de la réalité physique et adapté à des fins d’inversion.
- L’inversion des grandeurs observées en s’appuyant sur la résolution de ce modèle direct.

La figure 1.16 ci-dessous représente de manière générale le schéma d’étude de tout problème inverse. Les problèmes inverses constituent un domaine très vaste du CND par ultrasons. On peut citer par exemple des problèmes de diffraction inverse, ou de reconstruction de phase. Parmi les questions les plus proches de notre problématique, Schmerr et al ([33]) s’est intéressé au problème inverse de connaître la taille de défauts détectés par ultrasons, en utilisant des méthodes basées sur le rayon effectif du défaut et sur l’approximation de Born et de Kirchoff. Il prend en compte des défauts volumiques. Une autre différence avec cette étude réside dans le fait que l’on dimensionne la taille de la fissure par la localisation de ces extrémités uniquement.

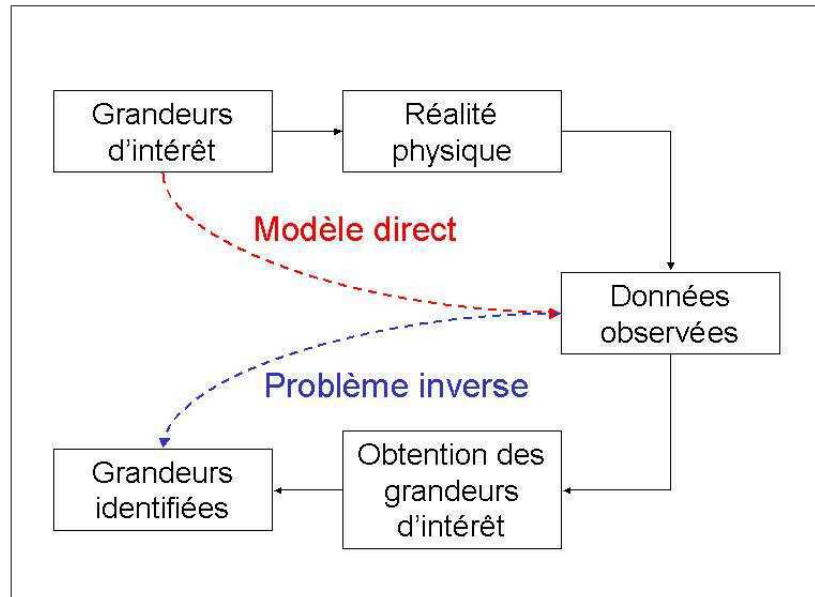


FIG. 1.16 – Schéma d'étude général d'un problème inverse.

1.8.1 Problème à caractère mal posé

On dit qu'un problème est mal posé au sens d'Hadamard s'il ne remplit pas une des trois conditions suivantes :

- Existence d'une solution (Solubilité) pour toute donnée d'entrée,
- Unicité de la solution (non ambiguïté),
- Stabilité de la solution.

Le non respect des trois conditions précédemment énoncées peut provenir de causes diverses et variées, par exemple :

- Données observées fausses,
- Données observées ne contenant pas assez d'informations utiles (données non pertinentes),
- Erreurs de modélisation ou approximation grossière de la réalité physique,
- Choix inadéquat de l'espace de représentation des données...

La condition d'existence ne pose en pratique pas de problème, car on recherche celle-ci dans un espace bien déterminé. En revanche, les conditions d'unicité et de stabilité ne sont pas toujours assurées. La condition de stabilité stipule que la solution doit être une fonction continue des données alors que, pour la plupart des problèmes inverses, une faible perturbation de ces données peut engendrer des bouleversements rédhibitoires sur la solution.

Le problème qui nous est posé répond à ces critères. En effet, comme on le verra au paragraphe 2.2.2, la reconstruction de la forme du profil correspond à un problème de déconvolution, qui constitue un exemple typique de problème mal posé. De plus, le positionnement du défaut est également mal posé, car on n'est pas assuré *a priori* de l'unicité de la solution. De plus, du fait des variations du profil qui peuvent être assez rapides (voir

figure 1.6), le champ ultrasonore transmis dans la pièce peut subir de fortes modifications avec la position du traducteur L63°. On comprend ainsi que deux défauts très proches peuvent engendrer des réponses échographiques relativement différentes.

1.8.2 Techniques usuelles de résolution de problèmes inverses mal posés

Dans le domaine du problème inverse, on distingue deux types de méthodes de résolution. La première s'appuie sur une résolution analytique du phénomène physique, qui permet une inversion par le calcul. Cette méthode ne peut pas être utilisée dans notre cas de figure car il existe à notre connaissance aucun modèle analytique du problème direct. La deuxième utilise une résolution purement numérique. Ces stratégies de régularisation classiques de problèmes mal posés sont décrites notamment dans [34]. Elles nécessitent l'obtention d'une application linéaire de l'espace des inconnues P dans l'espace des données D :

$$\begin{array}{ccc} M_h : P & \longrightarrow & D \\ p \in P & \longrightarrow & y = M_h(p) \in D \end{array}$$

où $M_h(p)$ représente les données synthétiques prédites par le modèle. Il s'agit en fait de la simulation du problème direct. Le problème à étudier est alors la détermination de p solution, pour $y \in D$ données par l'expérience. Il convient alors de déterminer l'application inverse M_h^{-1} , permettant de résoudre le problème. Les techniques usuelles de régularisation sont issus des travaux de Tikhonov [35] et sont décrits en détail dans [36]. Des informations *a priori* sur la solution recherchée sont utilisées dans la résolution de problèmes utilisant un cadre bayésien [37].

La méthode de repositionnement de défaut proprement dite n'utilise pas ces techniques car il est apparu extrêmement difficile d'établir explicitement l'application linéaire $M_h(p)$, compte tenu de la complexité des phénomènes et de l'espace des données extrêmement étendu, puisqu'il s'agit de l'espace des B-scan. De plus, le problème direct présente des caractéristiques non-linéaires². En supposant cette application déterminée, l'établissement de l'application inverse nous paraît également très délicate et très coûteuse en temps de calcul.

1.8.3 Stratégie d'inversion

La résolution de ce problème est réalisée en deux étapes bien distinctes et indépendantes et ne faisant pas appel aux mêmes procédures de traitement. Dans les deux cas, il s'agit ici d'extraire des acquisitions les informations pertinentes.

²Le B-scan obtenu dépend de la position du défaut de manière non-linéaire.

Traitement de l'acquisition L0°

La première étape consiste à utiliser les acquisitions issues du traducteur L0°, afin de remonter à la forme du profil, ainsi qu'à la position de la platine de contrôle par rapport à la cuve. La résolution du problème d'extraction de profil s'appuie sur un modèle extrêmement simplifié de l'interaction entre l'onde incidente et la surface. Cette simplification permet de résoudre simplement le problème, sans utiliser de technique d'inversion proprement dite. Une méthode de déconvolution est également proposée, mais n'a pas été implémentée, faute de temps. Ces aspects sont abordés en détail au chapitre 2.

Traitement de l'acquisition L63°

Disposant de ces informations, on applique alors la méthode de repositionnement de défaut proprement dite, en effectuant un traitement des acquisitions issues de chaque traducteur L63°. La figure 1.17 illustre les différentes étapes de la méthode de positionnement proprement dite, décrite en détail dans le chapitre 3. Le point de départ de l'algorithme est un B-scan expérimental, montré figure 1.17a). On lui applique un algorithme de segmentation (voir partie 3.1.2), ce qui permet de déterminer des indications ultrasonores, comme on le voit sur la figure 1.17b). A partir de chacune d'entre elles, on effectue alors un calcul de champ ultrasonore dans le matériau (voir figure 1.17c)), en positionnant le traducteur L63° à partir de la position donnée par l'indication ultrasonore. On utilise alors l'information temporelle de celle-ci pour établir un premier sous espace de positions de défaut solutions du problème inverse, comme on le voit sur la figure 1.17d). Comme dans tout problème d'inversion, la résolution du problème direct joue un rôle fondamental. On a utilisé pour cela les outils de simulation ultrasonores développés dans CIVA pour simuler la réponse échographique de chaque position possible de défaut (voir figure 1.17e)). L'établissement d'une pseudo-distance dans l'espace des B-scan permet alors de déterminer la position la plus proche de la solution exacte (figure 1.17f)), à partir de la résolution du problème direct pour chacune de ces positions de défaut candidates. Il s'agit donc d'une stratégie d'inversion pragmatique, permettant de résoudre le problème posé en un minimum de temps.

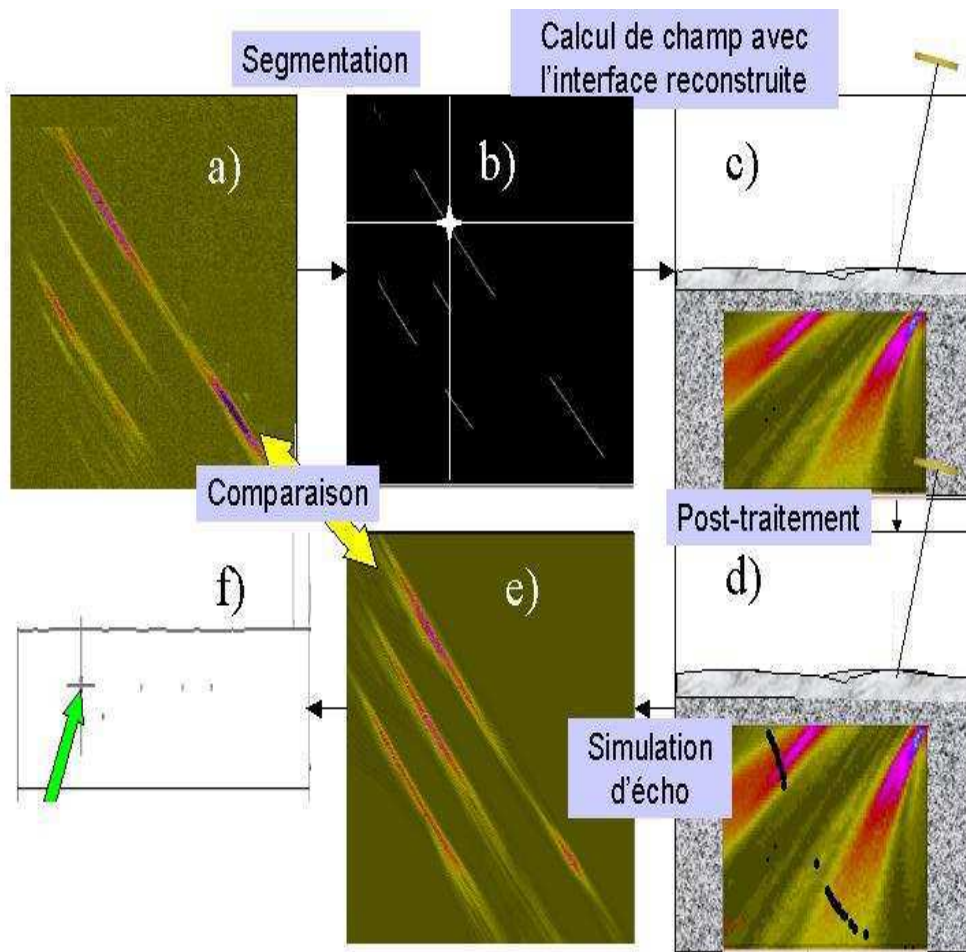


FIG. 1.17 – Schéma récapitulatif de la stratégie d'inversion.

1.8. STRATÉGIE DE TRAITEMENT DU PROBLÈME INVERSE

Chapitre 2

Extraction des profils et positionnement du capteur

Dans ce chapitre, on s'intéresse aux informations que l'on peut tirer des acquisitions effectuées avec le traducteur $L0^\circ$. La première partie est consacrée à la simulation du problème direct, c'est à dire à la simulation des échos de surface à partir de la connaissance de son profil. On s'est attaché à mener à bien cette simulation pour le traducteur $L0^\circ$, ainsi que pour les traducteurs $L63^\circ$.¹ On utilise la simulation des échos obtenus en $L0^\circ$ pour mettre au point et valider la méthode d'extraction du profil, qui fait l'objet de la deuxième partie. Enfin, la procédure de positionnement de la platine par rapport à la cuve, effectuée par mesure de temps de vol avec le traducteur $L0^\circ$ est décrite.

2.1 Simulation des échos de surface

2.1.1 Introduction

Ce chapitre porte sur la simulation de l'écho réfléchi par une surface irrégulière sur un traducteur focalisé en immersion, dont l'angle d'incidence β par rapport à la surface non perturbée est quelconque. En pratique, ce traducteur peut être soit le traducteur $L0^\circ$, auquel cas $\beta = 0$ soit le traducteur $L63^\circ$ et $\beta = \alpha$, angle d'incidence nominal du traducteur $L63^\circ$. Afin de décrire simplement les phénomènes observés on effectue l'approximation d'une onde incidente plane à la surface du matériau. Ainsi, son angle d'incidence à l'interface liquide - solide est de β . L'amplitude de l'onde réfléchie par la surface et reçue par le traducteur dépend fortement de l'angle entre la normale à la surface et le vecteur d'onde incident dans l'eau.

La réflexion du faisceau incident sur la surface du revêtement est traitée à l'aide de l'approximation de Kirchhoff [38]. Il s'agit d'une approximation haute fréquence utilisée pour modéliser la diffraction d'un objet de courbure faible par rapport à la longueur d'onde [39]. Chaque point de la surface est

¹Ce modèle, initialement développé pour les acquisitions $L0^\circ$ peut aussi être utile pour prédire les échos de surface obtenus avec le traducteur $L63^\circ$, car ceux-ci peuvent dans certains cas gêner la détection d'échos de défaut (voir paragraphe 3.1.3).

2.1. SIMULATION DES ÉCHOS DE SURFACE

alors considéré comme s'il appartenait à un plan infini coïncidant avec le plan tangent local en ce point et rayonne dans le demi-espace fluide. On néglige donc en particulier les phénomènes de réflexions multiples sur la surface. Dans notre problème, la profondeur des irrégularités de surface est de l'ordre de la longueur d'onde, ou supérieure à celle-ci, ce qui permet de l'utiliser. L'approximation de courbure faible est justifiée partout, sauf très localement, aux intersections de passes de revêtement. Chaque source secondaire rayonne de manière déphasée, en fonction de sa position dans le faisceau incident. Lorsque le champ diffracté qui résulte de l'interférence de toutes ces sources est observé dans la direction pour laquelle elles apparaissent en phase, l'écho est alors maximum car les interférences sont constructives. Pour calculer numériquement l'écho de surface, on se limite à la zone effectivement insonifiée. Le modèle développé s'appuie sur les travaux de J. Nadal [40].

2.1.2 Description du modèle

Comme le profil est invariant selon la direction de la courbure, on a choisi de développer un modèle en deux dimensions. Notons que son extension en trois dimensions ne poserait pas de difficultés sur le plan théorique. L'équation 2.2 a été établie dans la thèse de J. Nadal [40]. De plus amples informations sur les détails du calcul peuvent y être trouvés. La procédure est illustrée sur la figure 2.1.

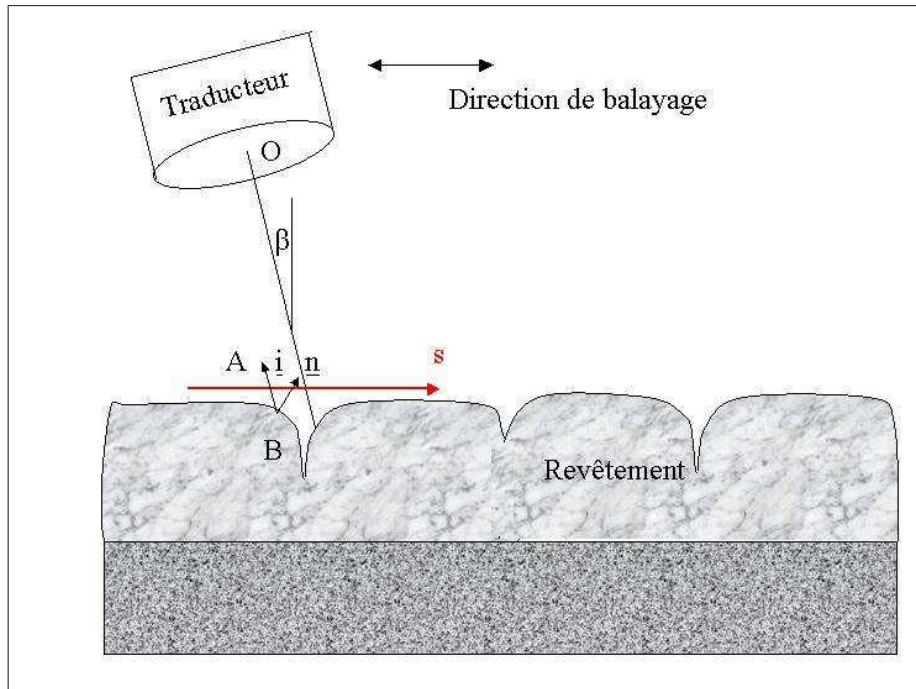


FIG. 2.1 – Représentation schématique de la configuration de calcul de l'écho de surface.

La première étape consiste à calculer le champ ultrasonore (potentiel

de vitesse) $\Phi_1(A, t)$ sur une ligne horizontale, située au-dessus de tous les points de la surface. A représente un point courant de cette ligne d'abscisse s . Ce calcul est effectué une fois pour toutes à l'aide du logiciel CIVA et est réutilisé à chaque position du traducteur, car le champ ne dépend pas de la position de balayage. On calcule alors l'auto-convolution de ce champ, afin de prendre en compte l'émission - réception. On obtient alors :

$$\Phi_2(A, t) = \Phi_1(A, t) \otimes \Phi_1(A, t). \quad (2.1)$$

Le signal $p(X, t)$ reçu par le traducteur en une position de balayage X est alors donné par :

$$p(X, t) = -\frac{\rho_{eau} \cos(\beta)}{c_L} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_S \cos(\underline{n}(s), \underline{i}) \Phi_2(A(s), t - \frac{2|A(s)B(s)|}{c_{eau}}) ds, \quad (2.2)$$

où S représente la surface de la pièce, β l'angle d'incidence nominal, $\underline{n}(s)$ la normale locale à la surface et \underline{i} le vecteur correspondant à l'axe focal du traducteur. On considère donc une propagation en onde plane au niveau de la surface et le déphasage entre les points A et B est calculé à partir de la distance mesuré selon la direction de \underline{i} . On calcule ensuite numériquement cette intégrale en échantillonnant la surface de la pièce en éléments de longueur de l'ordre du dixième de la longueur d'onde.

2.1.3 Validation expérimentale de la méthode de calcul d'écho

Afin de valider ce modèle, une expérience de mesure d'écho de surface sur une pièce revêtue dont la surface est représentative de celles présentes sur site (figure 2.2a) a été réalisée. La figure 2.2 montre la comparaison entre l'acquisition réalisée avec le traducteur $L0^\circ$ (figure 2.2b) et la simulation (figure 2.2c). La figure 2.2d montre la comparaison entre les échodynamiques du B-scan simulé et expérimental. On constate un bon accord entre théorie et expérience. Les échos reçus par le traducteur $L0^\circ$ après le maximum du signal correspondent à un mauvais amortissement de ce traducteur qui n'est pas pris en compte dans la simulation. Les deux échodynamiques se correspondent bien, sauf aux niveau des ruptures de pente. Cela est dû au fait que l'approximation de Kirchhoff n'est alors plus valable, car elle exige une surface à faible courbure. Notons que l'amplitude n'est pas utilisée dans la méthode d'extraction de profil, contrairement à l'information sur le temps de vol. La superposition exacte de ces courbes échodynamiques n'est donc pas indispensable pour l'inversion.

La figure 2.3b montre le B-scan expérimental provoqué par la surface dont le profil est montré sur la figure 2.3a obtenu avec un traducteur $L63^\circ$. La figure 2.3c montre la simulation, d'après le modèle décrit plus haut. On constate un bon accord entre la simulation et l'expérience. Les différences sont dues à trois phénomènes. On a d'abord effectué l'approximation que le champ ultrasonore ne comporte qu'un seul front d'onde, négligeant ainsi des phénomènes tels que les ondes de bord (figure 2.4). De plus, la rugosité de la surface de la pièce n'a pas été prise en compte. Ce facteur est surtout

2.2. EXTRACTION DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DU REVÊTEMENT

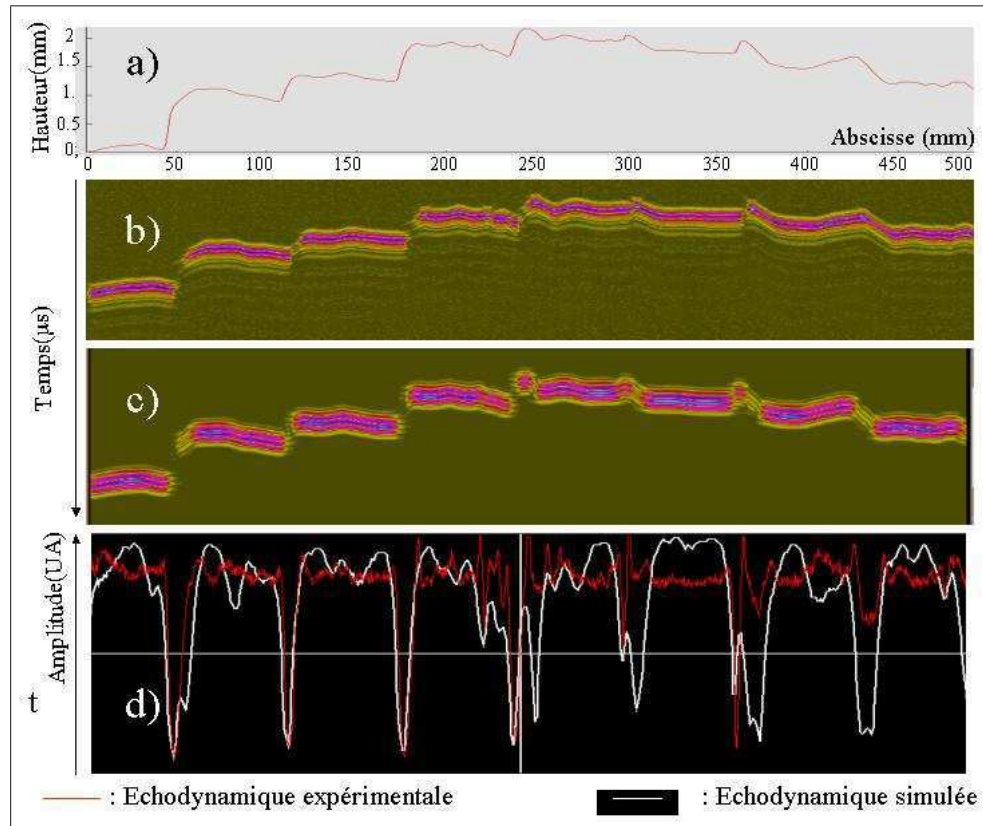


FIG. 2.2 – a) Profil de la pièce utilisée pour l’acquisition $L0^\circ$, b) B-scan réalisé avec le traducteur $L0^\circ$, c) B-scan simulé, d) Superposition des courbes échodynamiques du B-scan expérimental (en rouge) et du B-scan simulé (en blanc).

important dans les zones de faible écho. On obtient alors un écho expérimental plus important à cause de cette propriété, car une surface rugueuse en incidence rasante renvoie plus d’énergie vers le traducteur qu’une surface parfaitement plane comme on l’a supposé (voir [41] ou [42] par exemple). Enfin, on a considéré que l’angle du faisceau était constant dans toute la zone d’étude.

Il est donc possible de simuler correctement des échos renvoyés par la surface d’une pièce revêtue de profil connu. Intéressons-nous maintenant au problème inverse, c’est à dire la détermination des caractéristiques géométriques de la couche grâce à l’acquisition $L0^\circ$.

2.2 Extraction des paramètres géométriques du revêtement

Comme on l’a vu dans la partie introductive de l’étude, le traducteur $L0^\circ$ sert notamment à déterminer le profil de l’interface. Ce profil est ensuite entré en paramètre dans la méthode de positionnement de défaut sous forme

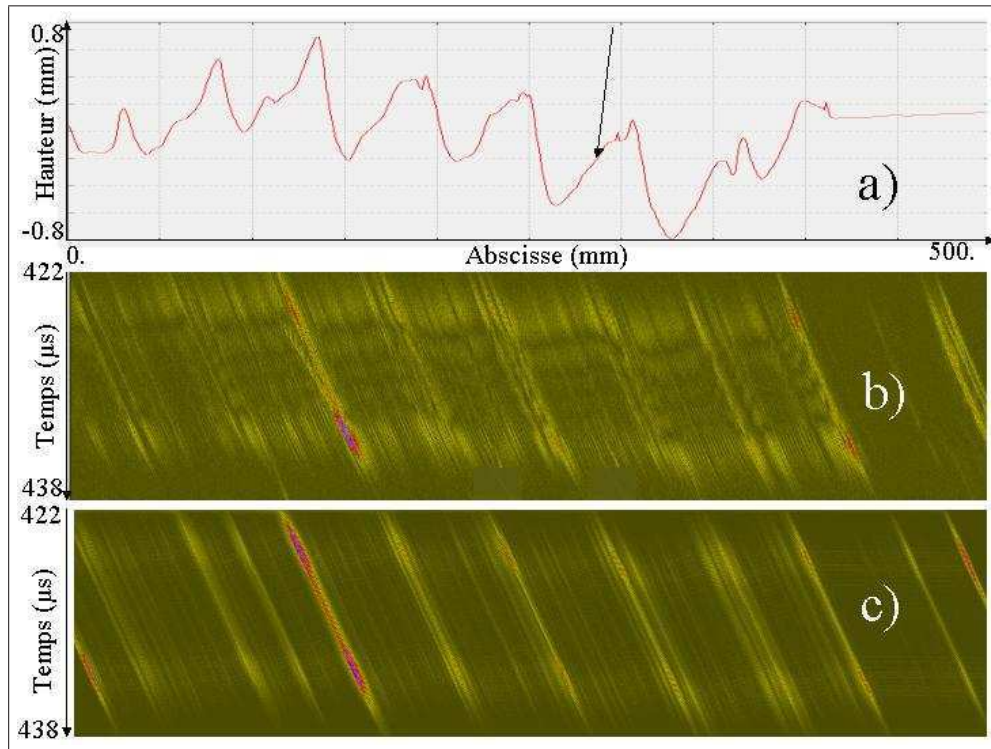


FIG. 2.3 – a) Profil de la surface. La flèche indique le sens de tir du traducteur $L63^\circ$. b) Écho expérimental engendré par la surface et détecté par le traducteur $L63^\circ$. c) Écho simulé.

d'un fichier CAO modélisant le bloc réel, afin d'effectuer des calculs de champ et d'échos. On présente tout d'abord dans cette partie la méthode utilisée pour remonter au profil de la pièce revêtue. Ensuite, on expose une méthode alternative plus précise qui n'a pas pu être implémentée. Enfin, on expose la méthode de calcul permettant de remonter à l'épaisseur du revêtement.

2.2.1 Méthode simple de détermination du profil

Une méthode simple et robuste a donc été développée afin de remonter au profil de la pièce. L'acquisition est effectuée dans le sens de la génératrice correspondant au profil irrégulier. Le point de départ de l'algorithme est un B-scan indiquant le signal reçu par le traducteur $L0^\circ$ en fonction de la position de balayage.

Approximations

La méthode développée utilise l'approximation qu'un faisceau infiniment fin correspondant à l'axe focal du traducteur $L0^\circ$ est réfléchi par l'interface, pour revenir sur le traducteur. On montre figure 2.4 l'allure réelle du champ à l'interface. On reconnaît les ondes de bord issues du traducteur $L0^\circ$, dues aux phénomènes de diffraction sur le traducteur. Celles-ci sont négligées

2.2. EXTRACTION DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DU REVÊTEMENT

dans le cadre de cette étude car on ne considère qu'un front d'onde unique. On peut se reporter à [43, 44, 45] pour de plus amples informations sur l'origine physique de celle-ci. Ainsi, en chaque position de balayage X , on

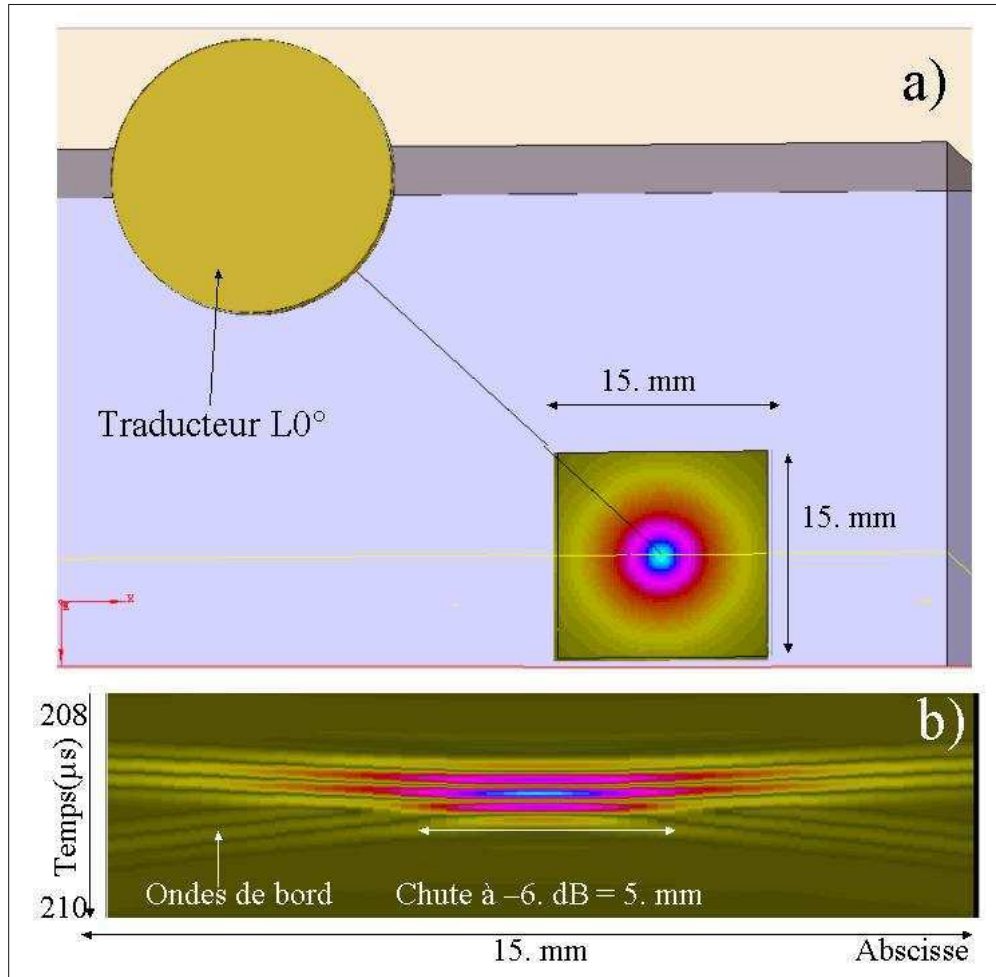


FIG. 2.4 – a) Vue en perspective de la configuration de contrôle en $L0^\circ$. La couleur dans la zone de calcul code l'amplitude maximale du signal en fonction de la position. b) B-scan du champ ultrasonore au centre de la zone à la surface de la pièce.

effectue une mesure de la hauteur d'eau localement, à la position considérée. Soit $S(X, t)$ le signal reçu par le transducteur $L0^\circ$ à la position X . En chaque position du transducteur, le temps de vol correspondant à l'écho de surface est mesuré si le maximum du signal est supérieur à un seuil S_0 . Ce seuil est destiné à s'affranchir du bruit. Le temps de vol est obtenu par calcul du temps du maximum de l'enveloppe du signal reçu. On obtient donc une fonction $T(X)$ correspondant au temps de vol de l'écho de surface en fonction de la position de balayage. Soit X_1 une position où l'amplitude du signal reçu par la surface du bloc est inférieur à S_0 . Cela signifie que, localement, l'angle formé par la tangente au profil et l'horizontale est trop important :

l'onde est réfléchi hors du traducteur. On ne dispose donc pas d'information sur la surface. $T(X_1)$ est déterminé par interpolation linéaire à partir des deux plus proches valeurs $T(X)$ non nulles. On dispose donc d'un signal $T(X)$ régulièrement échantillonné. Connaissant la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans l'eau, il est possible de déterminer la fonction $Z(X)$, correspondant au profil avant traitement de la surface par $Z(X) = \frac{c_{eau}T(X)}{2}$. Soit \bar{Z} la valeur moyenne de $Z(X)$. On choisit par convention de retrancher \bar{Z} à $Z(X)$ afin de travailler avec un profil de moyenne nulle.

La description de la surface est effectuée sous forme de segments reliant l'ensemble des points mesurés de la surface. Plus le nombre de segments est important, plus les temps de calcul de champ et d'échos effectués sont longs. On cherche donc à réduire le nombre de facettes, tout en conservant une description correcte du profil.

Méthode de réduction du nombre de facettes

On expose dans ce paragraphe les différents algorithmes utilisés afin de réduire le nombre de segments retenu par l'algorithme.

Lissage. La première étape du traitement est un lissage de la fonction $Z(X)$. Le filtre utilisé est un filtre de Hamming de fréquence spatiale de coupure k_c . On obtient alors la fonction $Z_{lisse}(X)$.

Facétisation. Un algorithme de facétisation est alors appliqué à $Z_{lisse}(X)$. Son but est de diminuer le nombre de facettes décrivant le profil. Son fonctionnement est illustré figure 2.5. Il s'agit d'un algorithme récursif, admettant deux paramètres en entrée : un angle γ et une distance H_0 . L'algorithme débute par le traitement de la première facette $[AB]$ sur la figure 2.5. Cet algorithme est inspiré de celui développé dans [46].

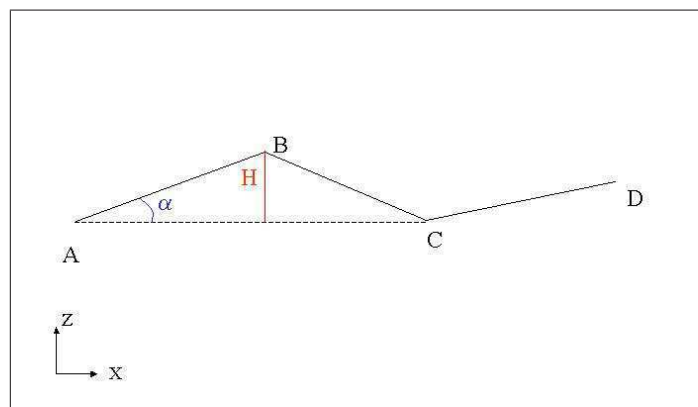


FIG. 2.5 – Représentation schématique de la méthode de facétisation. Les traits noirs représentent les facettes initiales. Le trait rouge représente la flèche.

2.2. EXTRACTION DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DU REVÊTEMENT

Celle-ci est conservée si la flèche H indiquée figure 2.5 est supérieure à H_0 ou si l'écart d'angle maximal entre les anciennes facettes $[AB]et[BC]$ et $[AC]$ est supérieur à γ . Si $[AB]$ est conservée, l'algorithme continue en effectuant le traitement de $[BC]$. Sinon, on considère que $[AB]et[BC]$ peuvent être remplacées par $[AC]$. L'algorithme se poursuit alors, en tentant de remplacer $[AC]et[CD]$ par $[AD]$. Les mêmes critères sont alors utilisés. La flèche maximale est déterminée par la distance entre $[AD]$ et le point du profil initial le plus éloigné de $[AD]$ (entre B et C). On compare alors de même la borne supérieure de l'écart angulaire entre tous les segments intermédiaires et le segment $[AD]$, à l'angle γ . On itère ainsi l'algorithme jusqu'à traiter tous les points du profil. On construit alors un fichier CAO représentant le composant virtuel, dont la surface est celle calculée par la méthode. Le format de fichier construit permet également de prendre en compte la nature hétérogène du matériau.

Ainsi, on est certain que l'écart en distance entre les points du profil initial et final n'est pas supérieur à H_0 . On souhaite que ces deux profils donnent des calculs de champs identiques. L'ordre de grandeur que l'on doit imposer à la valeur maximale de la flèche doit donc être plus petit que la longueur d'onde λ dans l'eau à la fréquence nominale du traducteur L63°. On a donc choisi $H_0 = \frac{\lambda}{10}$.

Choix des paramètres. Deux paramètres n'ont pas encore été déterminés : il s'agit de k_c et de γ . Il est difficile d'utiliser des critères physiques pour choisir ces paramètres. Seul une expérimentation numérique sur un ensemble varié de configurations permet de les déterminer. Il s'agit plutôt ici d'établir un compromis entre le fait d'avoir un trop grand nombre de facettes et le fait de perdre en précision de calcul. Plusieurs inversions de profil ont été réalisées en utilisant des jeux de paramètres (k_c, γ) différents. Les valeurs finalement retenues sont de $k_c = 0,3k_{max}$, où $k_{max} = \frac{2\pi}{L}$ correspond à la fréquence d'échantillonnage spatiale typique utilisée sur site et $\gamma = 1^\circ$. L correspond aux longueurs typique de bloc traité (300 mm). On va maintenant appliquer la méthode précédemment décrite sur un exemple concret.

Validation expérimentale de la méthode d'extraction de profil

On a effectué au laboratoire une acquisition L0° sur une pièce homogène à profil irrégulier représentatif de profils réels. Le traducteur L0° a donc été déplacé à hauteur d'eau constante, avec un pas de déplacement de 1 mm. Les détails concernant le matériel utilisé lors des expériences sont donnés au paragraphe 4.1.1. De plus, on a réalisé indépendamment un relevé par profilométrie mécanique du profil de la pièce. La pointe utilisée a un rayon de courbure de 0.5 mm et le pas d'étalement du relevé est de 1 mm. La précision verticale lors de cette mesure est de 10 μm . On montre figure 2.6a) le B-scan expérimental obtenu. La figure 2.6b) montre la comparaison entre le profil relevé par profilométrie mécanique et le profil calculé à partir de l'acquisition. On constate sur cet exemple que la différence entre les deux

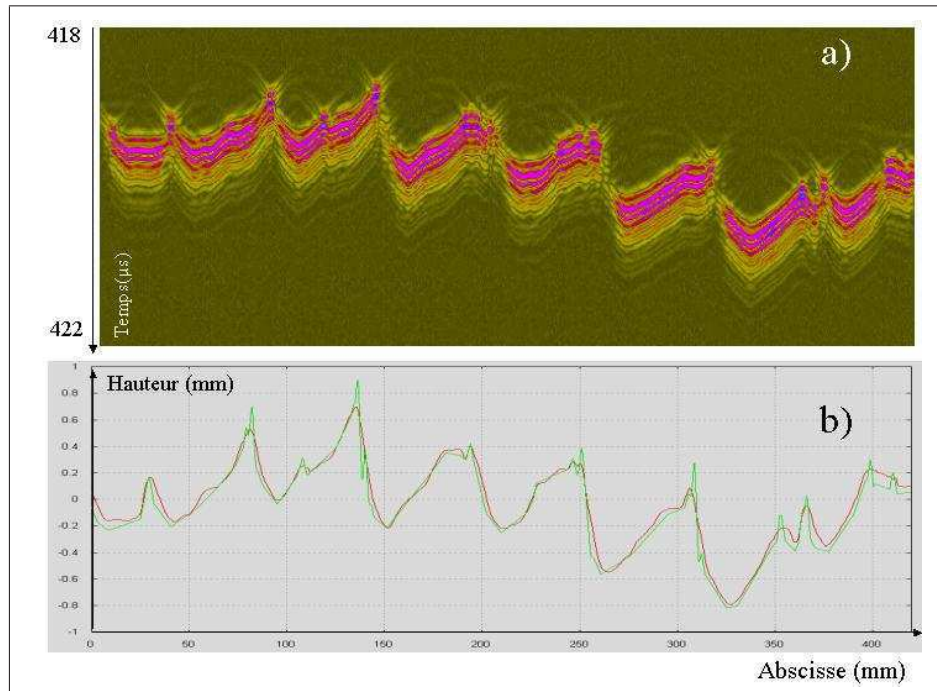


FIG. 2.6 – a) B-scan $L0^\circ$ expérimental correspondant à l'acquisition de la surface d'un bloc. b) En rouge : Profil mesuré par profilométrie mécanique de ce bloc. En vert : Profil Inversé obtenu à partir de l'acquisition montrée a.

profils n'excède pas 0.15 mm, ce qui représente moins de 10% de l'amplitude totale.

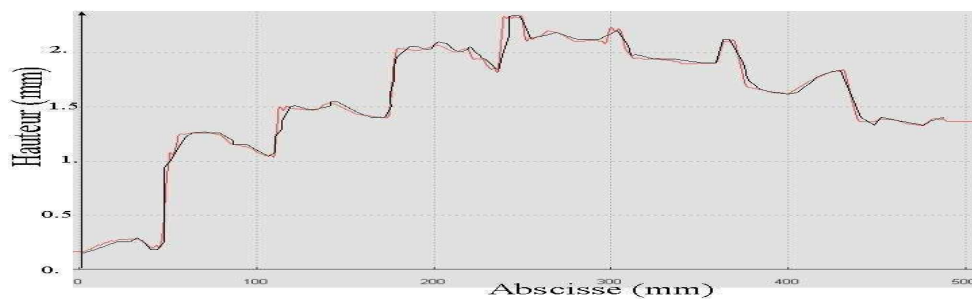


FIG. 2.7 – En rouge : profil de la pièce CAO utilisé pour la simulation d'écho. En noir : profil extrait de la simulation d'écho $L0^\circ$.

Il n'est pas suffisant de comparer les deux profils obtenus. Pour valider la méthode, il faut déterminer les écarts de positionnement engendrés par la différence entre les profils réel et inversé. Un des intérêts d'avoir développé la méthode de simulation d'écho de surface décrite au paragraphe 2.1 est de pouvoir appliquer la méthode d'extraction de profil à l'écho renvoyé par n'importe quelle surface. On peut alors comparer le profil original (profil A)

2.2. EXTRACTION DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DU REVÊTEMENT

et le profil ainsi inversé (profil B), puis appliquer la méthode de positionnement d'écho à des pièces virtuelles ayant comme profil A, puis B. On a donc utilisé l'écho de surface simulé montrée sur la figure 2.2c à partir du profil d'une pièce réelle dont le profil est montré en rouge figure 2.7. On applique à cet écho l'algorithme de reconstruction de profil, dont on montre le résultat en noir figure 2.7. On constate un bon accord entre le profil reconstruit à partir de la simulation d'écho et le profil original de la pièce. Ce module permet donc de tester par simulation les performances de l'algorithme de reconstruction.

De plus, on a appliqué la méthode de repositionnement qui sera décrite dans la partie 3 à cinq défauts présents dans la pièce, en utilisant le profil calculé puis le profil mesuré. Le tableau 2.1 montre les positions obtenues, ainsi que leurs écarts.

	Coordonnées avec le profil mesuré(mm)	Coordonnées avec le profil inversé(mm)	ΔX (mm)	ΔZ (mm)
Défaut 1	(111,6 ;31,6)	(110,5 ;31,4)	1,1	0,2
Défaut 2	(160,1 ;30,45)	(158,9 ;30,45)	1,2	0
Défaut 3	(229,1 ;18,8)	(229,7 ;21)	-0,6	-2,2
Défaut 4	(296,5 ;21,6)	(294,7 ;21,4)	0,8	0,2
Défaut 5	(332,3 ;21,35)	(330,2 ;20,75)	2,1	0,6

TAB. 2.1 – Résultats de la méthode de repositionnement utilisant le profil reconstruit et le profil réel. On montre les écarts entre les deux positions obtenues.

Comme on le verra au paragraphe 4.1.3, la méthode de positionnement ne fonctionne pas bien pour le défaut 3 à cause du mélange des échos de surface et des échos de défauts. Cette perturbation entraîne une difficulté dans le positionnement de ce défaut. On ne le prend pas en compte pour la validation de l'extraction de profil. On rappelle que l'information recherchée par la méthode est la profondeur du défaut. Le plus grand écart obtenu étant de 2,1 mm en abscisse et de 0,6 mm en ordonnée, on considère que la méthode d'extraction de profil est validée, puisqu'elle n'occasionne que de petites variations en profondeur concernant les positions finalement obtenues. Dans cette partie, on ne se préoccupe que de la validation du relevé de profil. On se reportera à la partie 4 pour prendre connaissance de la validation de la méthode de positionnement elle-même.

2.2.2 Méthode complète de détermination du profil

Les différences observées entre profil réel et inversé par la méthode décrite au chapitre précédent pourraient être diminuées en prenant en compte l'interaction entre l'ensemble du faisceau incident et la surface afin de réduire les imprécisions dues à la mesure du profil. On souhaite pour cela effectuer des approximations permettant d'écrire l'équation 2.2 sous forme d'une convolution. En effet, l'effet de la largeur du faisceau est de "moyen-

ner" les temps de vol obtenus en chaque point de la surface. Pour cela, on effectue l'approximation suivante : $\cos(\underline{n}, \underline{i}) = 1$, justifiée car le traducteur tire perpendiculairement à la surface. De plus, les variations de la normale à la surface sont presque partout au maximum de l'ordre de quelques degrés par rapport à \underline{i} ; elles seront donc négligées. On a donc :

$$p(X, t) = -\frac{\rho_{eau} \cos(\beta)}{c_L} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_S \Phi_2(X - x, t - \frac{2|A(x)B(x)|}{c_{eau}}) dx, \quad (2.3)$$

où x est la valeur de l'abscisse de la facette traitée. La deuxième approximation effectuée est de remplacer la double dérivée partielle par ω^2 , où ω est la fréquence centrale du signal large bande utilisé. On obtient donc :

$$p(X, t) = \frac{\rho_{eau} \cos(\beta) \omega^2}{c_L} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_2(X - x, t - \frac{2|A(x)B(x)|}{c_{eau}}) dx. \quad (2.4)$$

Or la fonction $|A(x)B(x)|$ est, à une constante près, la hauteur du profil en fonction de l'abscisse. On note $f(x) = \frac{2|A(x)B(x)|}{c_{eau}}$ la fonction inconnue du problème, qui permet de remonter simplement à la forme du profil. On a donc :

$$\begin{aligned} p(X, t) &= \frac{\rho_{eau} \cos(\beta) \omega^2}{c_L} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_2(X - x, t - f(x)) dx \\ &= \frac{\rho_{eau} \cos(\beta) \omega^2}{c_L} \Phi_2(X, t) * K(X, t), \end{aligned} \quad (2.5)$$

où $K(x, t)$ est une distribution égale à $\delta(t - f(x))$, où δ est la distribution de dirac. $*$ représente la convolution bidimensionnelle, définie par :

$$A(x, t) * B(x, t) = \int_{\tau=-\infty}^{\tau=\infty} \int_{u=-\infty}^{u=\infty} A(X - u, t - \tau) B(u, \tau) du d\tau. \quad (2.6)$$

La fonction Φ_2 est connue car elle a été calculée par CIVA. Notons que la méthode développée au paragraphe 2.2.1 revient à considérer ϕ_2 comme un dirac spatial. $p(X, t)$ est donné par l'acquisition. Il ne reste donc plus qu'à effectuer la déconvolution de noyau Φ_2 . Pour cela, de nombreuses techniques de régularisation sont à notre disposition : (voir [36]).

Le résultat de cette déconvolution est une fonction de deux variables. Le profil inversé est alors obtenu en choisissant la valeur maximale pour chaque position. Par manque de temps, on n'a pas pu implémenter ce modèle prometteur. De plus, la méthode plus simple décrite dans le prochain paragraphe est assez précise et permet de remonter à un profil assez bien décrit pour les besoins de l'étude.

2.2.3 Contrôle de l'épaisseur de la couche

On s'intéresse enfin à l'utilisation de l'écho reçu par le traducteur $L0^\circ$ pour estimer l'épaisseur du revêtement. On réalise la même acquisition $L0^\circ$, avec un gain plus fort (+40 dB environ). En effet, l'interface austénitique - de la cuve, renvoie un écho du fait des différences d'impédance des deux

2.3. PROCÉDURE DE POSITIONNEMENT DU TRADUCTEUR

milieux. On peut se reporter au paragraphe 1.7.2 pour connaître les valeurs des coefficients de réflexion en onde plane. Connaissant les constantes élastiques de la couche, il est possible de déterminer la vitesse d'énergie dans la direction perpendiculaire à la surface (annexe D) et ainsi de remonter à l'épaisseur locale de la couche pour chaque position de traducteur. La figure 2.8 montre une acquisition effectuée avec un gain fort et faible. Notons que le signal issu de l'interface est assez mal défini. On peut estimer l'erreur maximale commise à cause de ce phénomène de l'ordre de 0,5 mm. Cette erreur est due à la mauvaise définition du signal provenant de la deuxième interface en raison de la faible rupture d'impédance. De plus, l'épaisseur du revêtement sur site peut varier avec la position entre 7,5 et 12,5 mm. Dans les modèles développés, on prend en compte un revêtement d'épaisseur constante.

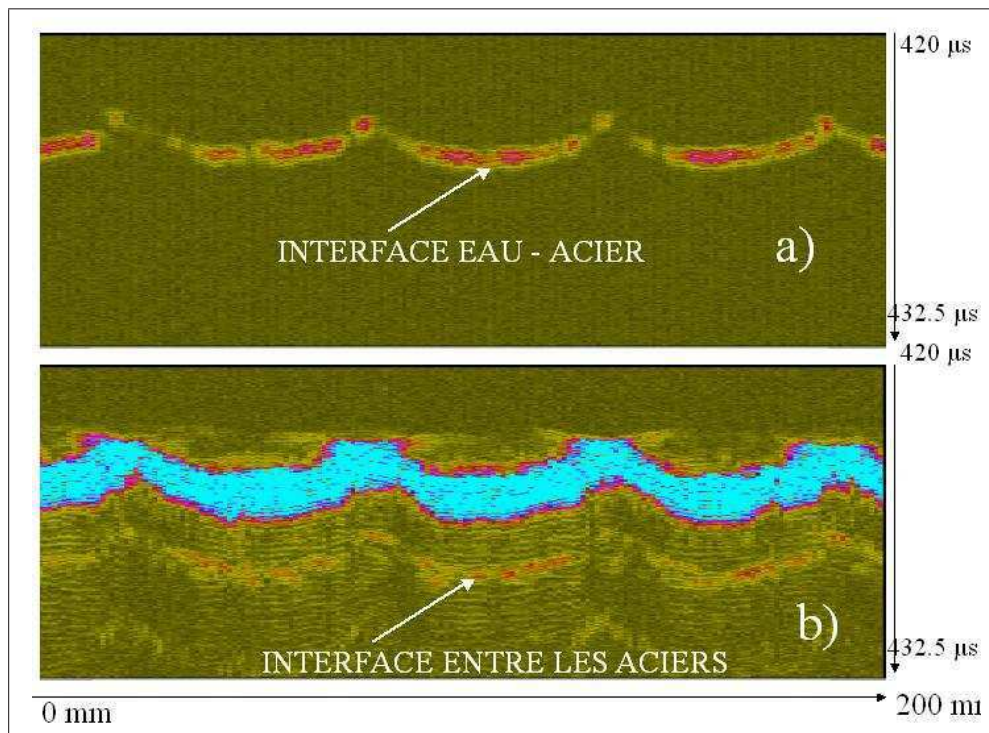


FIG. 2.8 – a) Acquisition L0° contrôlant l'interface eau-acier à gain faible. b) Acquisition L0° contrôlant l'interface acier austénitique-acier de la cuve à gain fort.

2.3 Procédure de positionnement du traducteur

Outre la profilométrie de la surface, une autre information peut être extraite de l'acquisition L0°. Il s'agit du positionnement de la platine relativement à la surface. On suppose ici le profil de la surface connu et on va montrer comment positionner les traducteurs par rapport à celle-ci. Le

but ce positionnement est d'être capable de les placer lors du lancement des calculs de simulation. La première étape de la procédure consiste donc à positionner le traducteur $L0^\circ$ par rapport à la surface, pour en déduire ensuite la position de chacun des traducteurs de la platine. Notons que dans cette partie, on positionne le centre de la pastille des traducteurs.

2.3.1 Positionnement du traducteur $L0^\circ$

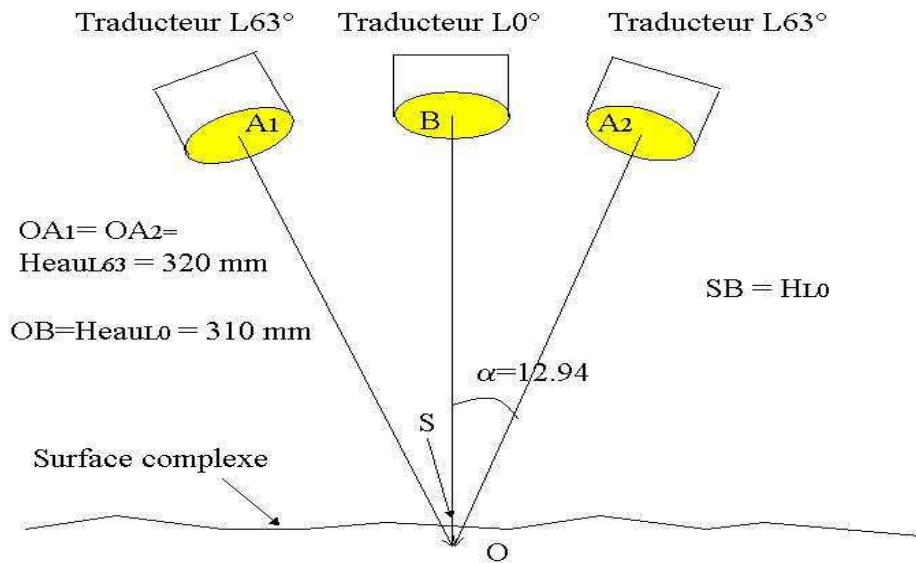


FIG. 2.9 – Représentation schématique de la platine et positions relatives des traducteurs.

Cette étape intervient à chaque fois que l'on désire positionner le traducteur à une valeur d'incrément que l'on n'a pas encore traitée. En effet, on sait que le déplacement d'un traducteur est rectiligne lorsque l'on reste sur un même incrément. Il suffit donc de connaître la distance entre le traducteur $L0^\circ$ et la surface à un endroit quelconque du déplacement, pour en déduire par translation la position du traducteur $L0^\circ$ à n'importe quel endroit du balayage. Pour cela, on va s'aider de l'écho de surface. Il convient d'effectuer une mesure de hauteur d'eau sur une portion de surface à peu près plane, afin de minimiser les erreurs potentielles issues d'un étalement du signal à cause du rebond sur une surface trop irrégulière. On ne peut pas se baser sur le seul écho de surface, car l'origine des temps de l'acquisition ne correspond pas obligatoirement au temps d'émission du signal par la surface de la lentille du traducteur. En effet, l'origine temporelle des signaux émis par les traducteurs ne correspond pas au moment d'émission et est une inconnue. Ce retard dépend de l'électronique d'acquisition et des réponses temporelles des traducteurs. Pour connaître la hauteur d'eau, on relève le temps T_1 de l'écho de surface, ainsi que le temps T_2 du deuxième

2.3. PROCÉDURE DE POSITIONNEMENT DU TRADUCTEUR

écho de surface. Cet écho provient de l'onde qui, réfléchi une première fois par la surface, est renvoyé par le traducteur puis réfléchi à nouveau par l'interface pour être enfin détecté par le traducteur. La distance D entre la surface et le traducteur à la position choisie est donnée par :

$$SB = \frac{(T_2 - T_1)}{2c_{eau}} \quad (2.7)$$

Soit H_{surf} l'ordonnée de la surface à la position sélectionnée. H_{surf} est connu car on connaît le profil à tout endroit. La hauteur H_{L0} du traducteur $L0^\circ$ est donc :

$$H_{L0} = D + H_{surf} = \frac{(T_2 - T_1)}{2c_{eau}} + H_{surf} \quad (2.8)$$

De la position du traducteur $L0^\circ$, on va déduire la position des autres traducteurs.

2.3.2 Positionnement du traducteur $L63^\circ$

La géométrie de la platine de contrôle est connue et identique pour les deux plans de contrôle. La position des centres des traducteurs (X_{trad}, Z_{trad}) s'obtient par les formules :

$$X_{trad} = X_{A_{1,2}} = X_{bal} \pm Heau_{L63} \sin(\alpha) \quad (2.9)$$

$$Z_{trad} = Z_{A_{1,2}} = H_{L0} - Heau_{L0} + \cos(\alpha)Heau_{L63}, \quad (2.10)$$

où X_{bal} est la position de balayage à laquelle on désire déterminer les positions de traducteurs. On est donc capable de positionner tous les traducteurs en n'importe quel emplacement de la platine.

Après avoir exploité les informations fournies par l'acquisition $L0^\circ$, nous décrivons la façon de traiter les indications $L63^\circ$, afin de repositionner correctement le défaut détecté dans le bloc.

Chapitre 3

Description de la méthode de repositionnement d'un défaut

Dans ce chapitre, on expose les différentes étapes de la méthode permettant de trouver la position d'un défaut détecté à travers un revêtement. On connaît, grâce au chapitre précédent, toutes les caractéristiques de la configuration du contrôle. On s'attache ici à la description des actions effectuées lors du lancement de la méthode de repositionnement. Les justifications des approximations faites et les validations des modèles seront menées à bien au chapitre 4. On commence par décrire le pré-traitement des acquisitions, permettant de lancer les calculs à partir des informations pertinentes, pour exposer ensuite le calcul de champ visant à positionner l'énergie dans la pièce. Un algorithme de post-traitement du résultat utilise l'information temporelle de détection. Enfin, le modèle direct sera exploité afin de remonter à la position du défaut. Un schéma récapitulatif de la méthode est montré sur la figure 3.10, et le lecteur pourra s'y référer tout au long de la description de cette méthode.

3.1 Pré-traitement des acquisitions

Le but de cette partie est de déterminer la façon dont on va interpréter les données ultrasonores afin d'obtenir des informations nécessaires pour lancer la méthode. Tout d'abord, il faut procéder à l'étalonnage temporel des traducteurs L63°. Ensuite, on s'attache à synthétiser les informations présentes sur le B-scan expérimental, afin de retenir les informations permettant d'effectuer un calcul de champ ultrasonore. Enfin, un mode de regroupement des différentes indications provenant d'un même écho et d'un même mode sera proposé.

3.1.1 Étalonnage des traducteurs L63°

Objectifs

On ne connaît pas précisément l'origine temporelle des signaux détectés par le traducteur L63°. Le retard est fonction de l'électronique liée à

la chaîne d'acquisition et des caractéristiques physiques de réponse du traducteur. Il convient donc de recalibrer en temps les acquisitions par rapport à la simulation, afin de travailler dans les deux cas avec la même origine temporelle car la méthode de positionnement des défauts est basée sur une comparaison entre les temps de vol mesurés et calculés. Dans le but de déterminer cette inconnue, une procédure préliminaire d'étalonnage temporelle de la simulation est effectuée successivement pour chaque traducteur utilisé. Elle est décrite dans ce chapitre.

Acquisitions

On effectue une acquisition sur un bloc contenant un ensemble de trous génératrices de profondeurs différentes placés dans un bloc étalon de surface régulière et de caractéristiques connues. Un relevé de la température de l'eau est effectué afin de déduire la vitesse du son. On peut se référer à l'annexe C pour connaître ces valeurs. De plus, on mesure la vitesse de propagation des ondes L dans le bloc étalon par une mesure de temps de vol dans le matériau. Cette dernière procédure sera décrite au chapitre 4.1.1. Toutes les vitesses de propagation sont donc déterminées avec précision. On souhaite calculer l'écho produit par l'ensemble des trous génératrices traités, afin de comparer l'expérience à la simulation, dans le but de déterminer les inconnues.

Calcul des échos provenant d'un trou génératrice dans un bloc homogène de surface régulière

On décrit dans ce paragraphe les approximations utilisées, pour calculer l'écho provenant d'un trou génératrice. La description détaillée de toutes les étapes du calcul se trouve dans [18]. La première étape est le lancement d'un calcul de champ ultrasonore dans une zone entourant le trou génératrice, dont la surface est échantillonnée en facettes de taille inférieure à la plus petite longueur d'onde des modes. Pour chaque échantillon s de la surface du trou et chaque mode de détection (émission ou réception), on calcule par interpolation linéaire l'amplitude $A(s)$ du maximum du signal, ainsi que le temps de vol $t(s)$. Le vecteur d'onde incident \vec{F} à la surface de la génératrice est supposé constant, et orienté suivant la direction calculée en appliquant la loi de Snell-Descartes à la réfraction de l'axe focal du capteur. Un tracé de rayon au point d'impact du traducteur L63°, permet de calculer son axe focal \vec{F} dans la pièce. On détermine alors la normale \vec{n} de chaque facette du défaut déterminée, à laquelle on associe ainsi un angle d'incidence de l'onde sur le défaut : $\theta = (\vec{F}, \vec{n})$. L'interaction élasto-dynamique faisceau-défaut est traitée par l'approximation de Kirchhoff [47, 48]. On peut ainsi exprimer le champ diffracté en sommant de manière indépendante les contributions de chacun des éléments de la surface insonifiée du trou. Les ondes de surface sont ainsi négligées, ainsi que les réflexions multiples à la surface du défaut. On considère enfin que l'intérieur du trou génératrice est constitué d'air.

On peut donc sommer les contributions des facettes du défaut :

$$S(X_{bal}, Y_{inc}, t) = \int \int_{Def} D(\theta(s)) A_{emi}(s) A_{rec}(s) \phi(t - t_{emi}(s) - t_{rec}(s)) ds \quad (3.1)$$

$A_{emi}(s)$ et $t_{emi}(s)$ sont l'amplitude et le temps de vol de l'onde émise en s et $A_{rec}(s)$ et $t_{rec}(s)$ celle de l'onde reçue. Ces valeurs sont calculées à partir de l'interpolation décrite plus haut. $\phi(t)$ est le signal rentré en paramètre du calcul. $D(\theta(s))$ prend en compte les déformations et modification du signal lors des réflexions et réfractions associées au trajet considéré, ainsi que lors de l'interaction faisceau-défaut. Il est donc possible de simuler l'écho renvoyé par un trou génératrice situé dans une pièce à surface régulière.

Détermination du décalage temporel

Pour chaque défaut traité, on simule l'écho en prenant en compte l'angle d'incidence nominal : α . On relève la position correspondant au maximum de l'écho simulé après lissage, ainsi que le signal à cette position $s_{simu}(t)$ renvoyé par le trou. On calcule alors le temps du maximum de l'enveloppe de $s_{simu}(t)$: t_{simu} . On compare ce temps au temps de l'écho expérimental t_{exp} relevé à la position correspondant au maximum d'amplitude de détection du trou sur l'écho expérimental. On obtient un écart temporel $\Delta t = t_{exp} - t_{simu}$ pour chaque trou traité.

L'écart temporel final retenu entre la simulation et l'expérience est la moyenne des Δt obtenus pour tous les trous traités. Il faut retrancher cette valeur à tous les temps expérimentaux issus du traducteur L63° dont on effectue l'étalonnage. On montre dans les tableaux 3.1 et 3.2 les écarts temporels obtenus pour chaque traducteur de la platine de contrôle (respectivement pour les traducteurs L63° selon courbure et selon génératrice). Pour chaque configuration, les résultats ont été obtenus à partir de deux trous génératrices de 15 et 25 mm de profondeur, à deux positions d'incrément différentes. Ces deux positions en incrément sont indiquées dans ce qui suit par les lettres A et B, notifiant deux positionnements des traducteurs L63° par rapport aux irrégularités de profil. On constate que la valeur moyenne du décalage retenue diffère selon le traducteur traité, ce qui s'explique par des différences dans les composants électroniques et dans les caractéristiques des traducteurs L63°. De plus, l'écart type maximal du décalage temporel est dans ce cas de l'ordre de 0,2 (μs). Cela indique que l'incertitude portant sur la connaissance des temps est de cet ordre de grandeur. L'imprécision sur le positionnement du défaut associé est de 0,2 mm en profondeur et de 0,3 mm en position de balayage.

3.1.2 Segmentation des indications L63°

La première étape du traitement de l'acquisition L63° est le choix de la ligne de tir sur laquelle on effectue l'analyse de l'écho considéré, c'est à dire de l'incrément dans le cas selon génératrice, ou du balayage dans le cas selon courbure. Ce choix est effectué de la même manière dans les deux

3.1. PRÉ-TRAITEMENT DES ACQUISITIONS

Profondeur du trou (mm)	Incrément	Sens de tir	Ecart temporel obtenu(μs)
15	A	+	2,58
15	B	+	2,83
25	A	+	2,6
25	B	+	2,87
15	A	-	2,02
15	B	-	2,06
25	A	-	2,02
25	B	-	2,07

TAB. 3.1 – Décalage temporel obtenu pour chaque trou génératrice, à deux positions de capteur, pour la configuration selon courbure.

Profondeur du trou (mm)	Incrément	Sens de tir	Ecart temporel obtenu(μs)
15	A	+	1,6
15	B	+	1,63
25	A	+	1,48
25	B	+	1,57
15	A	-	2,28
15	B	-	2,01
25	A	-	2,31
25	B	-	1,9

TAB. 3.2 – Décalage temporel obtenus pour chaque trou génératrice, à deux positions de capteur, pour la configuration selon génératrice.

configurations de tir. La seule contrainte est de se placer à une position où l'ensemble du faisceau ultrasonore dans la direction perpendiculaire au plan d'incidence interagit avec le défaut, afin de s'affranchir des effets de bord. Pour connaître la largeur maximale du faisceau dans cette direction, on a calculé le champ dans un plan vertical, dans le cas d'une surface régulière, à plusieurs profondeurs de détection du défaut. La largeur à mi-hauteur maximale du champ est de 12 mm. On extrait un B-scan à la ligne ainsi déterminée, que l'on va s'appliquer à traiter.

Afin de simplifier les informations présentes dans l'acquisition, on peut donc effectuer une transformation du B-scan en B-scan segmenté. On décrit dans l'annexe E la procédure utilisée pour effectuer cette segmentation.

On obtient donc un ensemble de segments, que l'on traite en associant à chacun une indication ultrasonore, c'est à dire un couple (position de balayage, temps) par la détermination du maximum d'amplitude sur chaque segment traité. La position de balayage correspond à l'abscisse de l'intersection entre l'axe focal du traducteur L63° et la surface de la pièce. Préalablement, un lissage de l'échodynamique doit être effectué, afin de s'affranchir

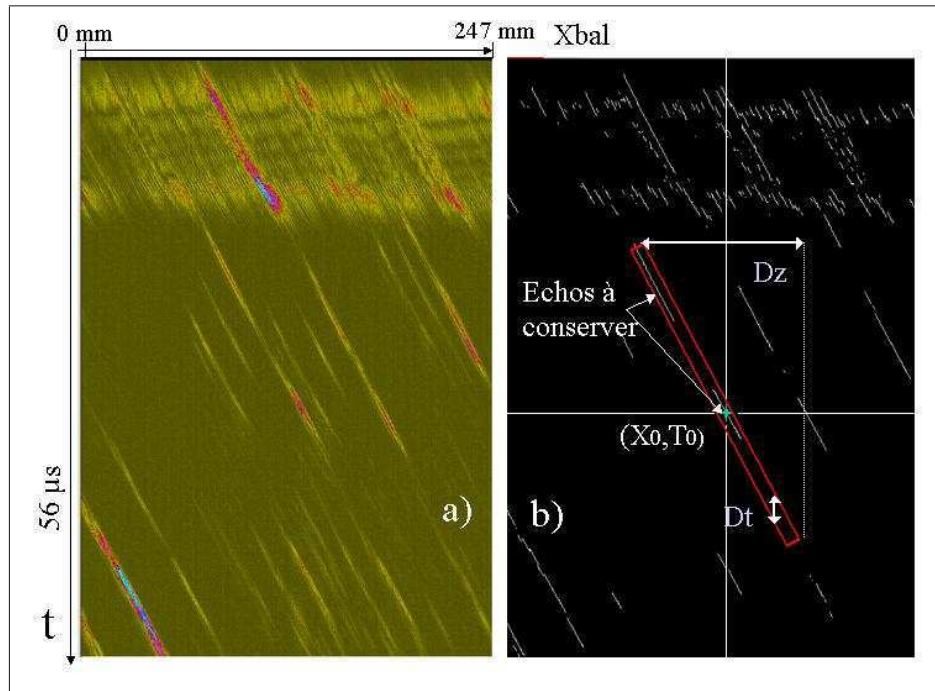


FIG. 3.1 – a) B-scan expérimental montrant plusieurs défauts. b) B-scan segmenté. La boîte déterminant les segments issus du même mode et du même défaut est dessinée en rouge.

de l'influence du bruit. Cette opération est destinée à retenir une information synthétisée du segment, afin de pouvoir appliquer la méthode de repositionnement au segment tout entier.

3.1.3 Choix des indications à prendre en compte pour le repositionnement d'un défaut

Comme on le verra au paragraphe 3.4.2, la méthode de repositionnement d'un défaut s'appuie sur la comparaison entre les B-scan expérimentaux et simulés. On doit être capable d'isoler l'ensemble des indications ultrasonores de même mode renvoyés par le défaut que l'on souhaite repositionner, ainsi que de déterminer le mode en question. En effet, la méthode permet de positionner un seul défaut à la fois (correspondant à un fond de fissure), détecté avec un seul mode. Si ce défaut est détecté avec plusieurs modes, il faut alors appliquer la méthode à chacun d'entre eux. Un algorithme prenant en entrée une indication ultrasonore (X_0, t_0) que l'on désire traiter a donc été développé dans l'optique de déterminer toutes les indications ultrasonores issues du même défaut et du même mode que (X_0, t_0) .

Calcul d'une zone contenant les échos issus du même mode

Pour cela, on détermine automatiquement, comme on le montre sur la figure 3.1, une zone dans laquelle peuvent être situées les indications ultrasonores associées à (X_0, t_0) . L'angle d'incidence de l'onde sur la pièce varie peu avec la position du traducteur, car la normale à la surface varie également faiblement¹. Or l'angle r_s par rapport à l'axe \vec{X} dans l'espace des échos d'un segment issu d'un défaut est directement lié à l'angle r du faisceau détectant le défaut par la relation : $r_s = \arctan(\frac{2 \sin(r)}{c})$. La constante c correspond à la vitesse de propagation en fonction du mode (voir notations). Ainsi, les angles des segments issus d'un même défaut sont proches et ceux-ci sont donc quasiment alignés. Cette observation permet de considérer que l'ensemble des échos associés à une indication (X_0, t_0) sont inclus dans une zone rectangulaire parallèle au segment traité et centrée sur l'indication associée au segment que l'on peut construire. Sa largeur selon l'axe des temps est choisie de l'ordre de grandeur de quelques durées du signal.² En pratique, on a choisi de prendre $Dt = 3\mu s$ sur la figure 3.1. La longueur selon le balayage correspond à deux fois la largeur totale du champ calculée à la surface : $Dz = 160mm$ sur la figure 3.1. Le défaut que l'on souhaite positionner peut *a priori* être détecté de part et d'autre de l'indication de X_0 , sur un balayage de l'ordre de la largeur du champ à la surface. Cette valeur est déterminée une fois pour toutes car elle dépend faiblement de la hauteur d'eau, seul paramètre qui varie. Tous les segments dont l'indication est située dans cette zone sont retenus.

Cette procédure constitue une aide à l'opérateur pour le choix des indications à prendre en compte. Notons qu'elle n'évite pas d'éventuelles erreurs de prise en compte de segments, notamment concernant la prise en compte de l'écho de surface. L'expertise de l'opérateur est donc dans cette optique déterminante.

Limites de la méthode

Dans le cas de défauts trop proches les uns des autres, les échos issus de deux défauts différents peuvent interférer. Il se peut que l'on conserve dans la zone précédemment calculée des indications issues d'un autre défaut, ce qui risque de conduire à des erreurs de positionnement dues à la comparaison entre des B-scan simulés et un B-scan expérimental erroné.

Les échos de défauts peuvent aussi dans certains cas être mêlés aux échos issus de l'interface complexe. Il devient alors difficile de connaître précisément l'origine d'un écho et donc de déterminer quelles indications retenir pour lancer la méthode. L'expertise de l'opérateur, aidé par une simulation de l'écho de surface en $L63^\circ$ décrite en 2.1.3 est nécessaire pour éliminer ces échos de surface, tout en conservant les échos de défaut, avant de construire la zone précédemment décrite. Cette expertise est aussi essentielle dans la détermination de l'origine de chaque écho. La méthode suppose que

¹De l'ordre de quelques degrés

²Ce paramètre doit prendre en compte d'éventuelles variations d'angle de réfraction

l'on connaisse l'origine de tous les échos traités.

Il est maintenant possible de grouper les indications ultrasonore issues du même défaut et du même mode et lancer la méthode de repositionnement à partir de chaque segment trouvé.

3.2 Calcul de champ

Nous utilisons le logiciel CIVA pour calculer le champ ultrasonore engendré par le traducteur dans la pièce à la valeur X_0 de l'indication issue du défaut. Cette position du traducteur relativement à la pièce est calculée par la méthode du 2.3.2.

En X_0 , on détecte un signal provenant du défaut. Celui-ci est donc situé dans une zone insonifiée par le traducteur. Le but est donc de déterminer les emplacements possibles du défaut, en localisant les zones où le champ ultrasonore est conséquent. Cela signifie que celui-ci est "suffisamment" insonifié.

On expose d'abord, pour chaque configuration, la manière dont le calcul de champ doit être mené pour fournir les informations pertinentes, tout en modélisant correctement la configuration de calcul. Un algorithme permettant de positionner de manière optimale la zone de calcul dans la pièce est ensuite détaillé.

3.2.1 Configuration de calcul de champ

On détaille les paramètres utilisés pour effectuer les calculs de simulation pour les deux configurations que l'on doit traiter, selon génératrice et selon courbure.

Configuration "selon génératrice"

Le profil irrégulier se trouve dans le plan d'incidence et la courbure de la pièce se situe dans la direction perpendiculaire au plan d'incidence (voir figure 1.4b). La zone de calcul de champ est située dans le plan d'incidence du traducteur, le faisceau n'étant pas dévié dans la direction perpendiculaire. On recherche donc la position du défaut dans ce plan. De plus, on néglige la courbure de la pièce. Cette approximation est légitime car la largeur à mi-hauteur du champ à la surface de la pièce dans la direction perpendiculaire au plan d'incidence (10 mm environ) est négligeable par rapport au rayon de la cuve (1994 mm). Pour estimer l'influence de la courbure, on a appliqué la méthode de repositionnement à un défaut détecté sous une surface régulière et sous une surface cylindrique de rayon 1994 mm, le calcul étant effectué en trois dimensions. La différence entre les deux résultats est de 0,05 mm en profondeur et 0,15 mm en abscisse. Cette approximation est donc retenue car elle permet un gain de temps de calcul important, en modifiant les résultats de manière négligeable.

Afin de gagner encore en temps de calcul, le calcul de champ est effectué en deux dimensions. Plus précisément, les pinceaux tirés entre le traducteur

et le point de calcul sont alors uniquement contenus dans le plan d'incidence. On néglige donc l'ouverture du traducteur dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence, celui-ci étant considéré comme un capteur filaire situé dans le plan d'incidence. Lors d'un calcul effectué en trois dimensions, les pinceaux sont tracés dans l'espace entre le traducteur et le point de calcul. Les résultats obtenus avec un calcul en deux et trois dimensions sont comparés au paragraphe 4.4.1.

Configuration "selon courbure"

Dans cette configuration, le profil complexe est situé dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence. La courbure étant située dans le plan d'incidence du traducteur, on ne pourra pas la négliger car elle entraîne des modifications importantes sur le champ transmis. Le calcul de champ doit être tri-dimensionnel.

Comme pour la configuration selon génératrice, la zone de calcul est contenue dans le plan d'incidence. On cherche donc la position de l'intersection de l'arête diffractante de la fissure avec ce plan. En effet, si un écho a été reçu pour la position du traducteur considérée, cela signifie que le faisceau transmis dans la pièce n'a pas subi de désorientation hors du plan d'incidence trop importante, car, si c'était le cas, l'incidence oblique de l'onde ultrasonore sur l'arête de la fissure entraînerait un écho faible. L'énergie serait alors renvoyée hors du traducteur.

Options des calculs du champ ultrasonore

Pour les deux configurations, on simule la réponse d'un défaut ponctuel situé dans le plan d'incidence du traducteur L63°. On néglige l'extension perpendiculaire du défaut, considérant que le fond de fissure est assimilable à un défaut ponctuel, rayonnant dans l'espace de manière isotrope. La directivité de la réponse du défaut est négligée. Moyennant cette approximation, la réponse d'un défaut situé en \vec{X} , à la position de traducteur X_0 est la convolution du champ ultrasonore émis et reçu. Soit ER le mode de détection du défaut que l'on cherche à repositionner. En chaque point \vec{X} de la zone de calcul, on calcule donc le signal $S(\vec{X}, t)$ simulant la réponse d'un défaut en cette position par :

$$S(\vec{X}, t) = s_E(\vec{X}, t) \otimes s_R(\vec{X}, t). \quad (3.2)$$

Les quantités calculées $s_E(\vec{X}, t)$ et $s_R(\vec{X}, t)$ dépendent du mode de détection du défaut ER supposé connu, où E est le mode d'émission et R le mode de réception. Pour chaque point de la zone de calcul, on a donc simulé la réponse d'un éventuel défaut placé à cet endroit.

On obtient donc une évaluation du temps de vol correspondant à un écho engendré par un défaut quasi-ponctuel placé à chaque point de la zone de calcul de champ.

Connaissant la position du traducteur, ainsi que toutes les options de calcul utilisées, il ne reste plus qu'à déterminer la taille et la position de la zone dans laquelle on effectue le calcul du champ.

3.2.2 Algorithme de positionnement de la zone de calcul de champ

Les calculs de champ sont effectués dans une zone rectangulaire. Celle-ci doit contenir l'emplacement réel inconnu du défaut et être la plus petite possible afin de réduire les temps de calcul. Dans cette perspective, un algorithme permettant d'optimiser le positionnement de la zone de calcul a été développé. On distingue le cas "selon génératrice" et "selon courbure".

Algorithme de positionnement de zone pour le cas "selon génératrice"

Pour positionner et dimensionner la zone de calcul de champ ultrasonore, on utilise une méthode de tracé de rayon qui fournit très rapidement les positions possibles du défaut.

Calcul du temps de vol à la surface de la pièce. La première étape de l'algorithme est le calcul du champ ultrasonore dans l'eau à l'altitude nulle, qui est à l'altitude moyenne de la surface (voir paragraphe 2.2). Sur la figure 3.2, cette zone correspond au segment rouge. Notons que la figure n'est pas à l'échelle pour des raisons de clarté. Ce calcul est destiné à connaître le temps d'arrivée de l'onde à la surface de la pièce. L'information que l'on retient de ce calcul de champ est le temps de vol de l'onde en fonction de l'abscisse. Le profil de la surface de la pièce est ensuite échantillonné en facettes.

Afin de remonter au temps de vol sur chaque facette de la surface, on utilise une approximation de propagation d'onde plane au voisinage de la surface ayant pour angle d'incidence $12,94^\circ$.³ Le temps d'arrivée de l'onde au point A (voir figure 3.2), milieu de la facette est déduit du calcul de champ précédent. Le point B correspond à la projection de A sur la ligne d'altitude nulle selon la direction d'incidence nominale. On trace le segment $[AB]$ d'angle $12,94^\circ$ par rapport à la verticale, puis on relève le temps t_B d'arrivée de l'onde en B obtenu par calcul de champ. On a alors : $t_A = t_B \pm \frac{2AB}{c_{eau}}$, selon que A est situé au-dessus ou en-dessous de B. On peut donc calculer à moindre coût le temps d'arrivée de l'onde en chaque position de l'interface. De plus, le calcul du champ à la surface n'est effectué qu'une fois pour un balayage donné, car la configuration ne dépend ni de l'interface, ni de la position de balayage.

Positionnement du point correspondant au segment traité. Pour chaque facette traitée par l'algorithme, l'angle de réfraction r est calculé à

³On néglige donc les ondes de bord issues du traducteur $L63^\circ$.

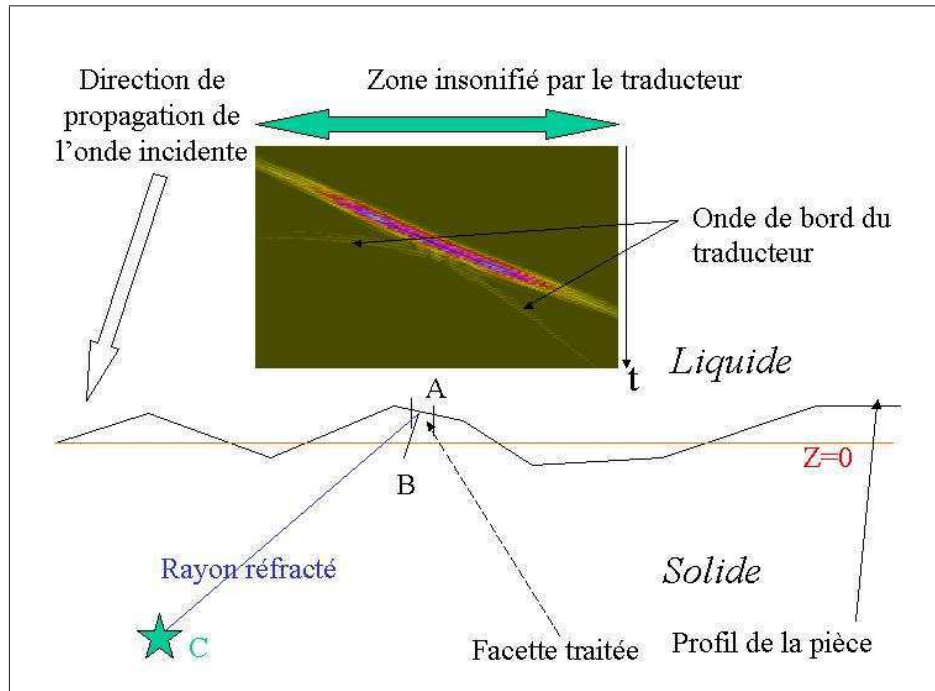


FIG. 3.2 – Représentation schématique de la configuration correspondant au développement de l'algorithme du positionnement de zone de calcul dans le cas selon génératrice.

partir des lois de Snell-Descartes. La vitesse de propagation c du solide prise en compte dépend du mode de détection de l'indication traitée.

- mode de détection LL, $c = c_L$.
- mode de détection TT, $c = c_T$.
- mode de détection LT, $c = c_{LT}$.

Si l'angle local d'incidence est supérieur à l'angle critique, l'onde ne passe pas par la facette traitée. Dans le cas contraire, on trace le rayon $[AC]$ d'angle de réfraction r et de longueur $(\frac{T_i}{2} - t_A)c_L$, où T_i est le temps de l'indication ultrasonore traitée. On obtient donc une position C, représenté par l'étoile dans la figure 3.2, correspondant à l'emplacement du rayon passant par la facette considérée à T_i .

La construction de la zone. On réitère la procédure pour chaque facette insonifiée par le transducteur et on obtient un ensemble de positions susceptibles de correspondre à la position de l'onde au temps T_i . La zone de calcul de champ finalement choisie devra donc contenir tous les points ainsi déterminés.

Prise en compte de l'anisotropie de la couche. La prise en compte de la traversée de la couche anisotropie de la couche ne présenterait pas de difficulté particulière, car on connaît la surface des lenteurs de l'acier austénitique et l'on peut donc déterminer les angles de réfraction et vitesses

de propagation pour la direction considérée, comme ce qui sera faite au paragraphe 4.5.3. On peut donc suivre les rayons aux traversées des interfaces liquide - revêtement et revêtement - acier isotrope. Néanmoins, il est plus rapide et suffisant de prendre en compte le revêtement en décalant simplement la zone de calcul obtenue d'environ 2 mm en profondeur et latéralement. Ces valeurs correspondent aux observations faite sur l'influence de la couche anisotrope au chapitre 4.5.1. Enfin, pour être sur de ne manquer la position du défaut dans aucune situation, on augmente *a posteriori* la taille de la zone de 2 mm dans chaque direction.

Traitement du cas "selon courbure"

Le positionnement de la zone de calcul dans le sens selon courbure est beaucoup plus aisé car la trace du faisceau dans le plan d'incidence du traducteur L63° est supposé ne pas être déviée, les irrégularités de surface se situant dans le plan perpendiculaire. On se contente donc de calculer le temps de vol de l'onde à la surface au point d'impact géométrique du traducteur et de tracer le rayon issu de ce point, dans le plan d'incidence du traducteur L63°. On détermine alors de la même façon le point correspondant à t_i , qui est le centre de la zone. Celle-ci est de taille constante (16 mm de large et 8 mm de haut). Ces valeurs ont été obtenues à partir d'un compromis entre une zone assez petite pour diminuer les temps de calcul et assez grande pour contenir la région insonifiée.

Validation de l'algorithme de positionnement de zone

L'algorithme a été validé sur un ensemble de cas représentatifs, dont on montre ici un exemple. On l'a appliqué à un défaut situé dans un bloc homogène de surface irrégulière. La figure 3.3 montre les positions trouvées par l'algorithme, ainsi que la position réelle du défaut et la zone de calcul résultant de l'algorithme.

On constate un bon accord entre les points obtenus par l'algorithme de positionnement de zone et la position réelle du défaut, ce qui signifie que l'on est capable de déterminer correctement la position et la taille de la zone de calcul. Notons que plus la surface est irrégulière, plus la zone ainsi déterminée sera grande.

Dans cette partie, on a utilisé l'information sur la position du traducteur (X_0), afin de positionner le traducteur L63° et effectuer le calcul de champ ultrasonore transmis dans la pièce. On va maintenant utiliser l'information temporelle. Le fait que le défaut ait été détecté à un certain temps de vol réduit substantiellement les positions possibles du défaut dans la pièce.

3.3 Post-traitement du champ ultrasonore simulé

On a développé deux méthodes différentes visant à déterminer les positions possibles du défaut. Elles prennent toutes les deux en entrée le résultat du calcul de champ ultrasonore effectué au paragraphe précédent.

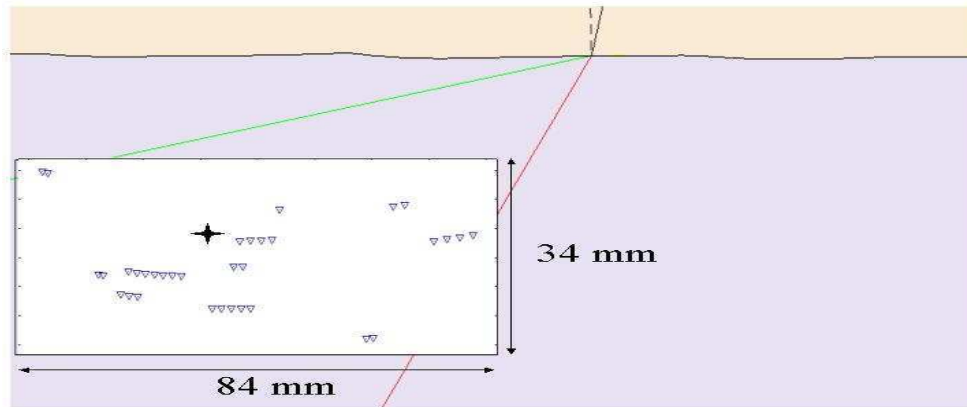


FIG. 3.3 – Exemple d'application de l'algorithme de positionnement de zone. Les triangles bleus représentent les points obtenus par l'algorithme. La zone tracée correspond au résultat de l'algorithme. L'étoile noire correspond à la position réelle du défaut.

3.3.1 Méthode "faisceaux"

La méthode repose sur le fait que, même lorsque la surface est perturbée, le champ se présente sous forme de lobes secondaires d'allure typique (faisceau(x)). Une méthode de traitement d'image, proche des techniques de détermination de ligne de crête a été développée dans l'optique de les caractériser automatiquement. On suppose alors que le défaut est situé sur l'axe d'un des faisceaux détecté par l'algorithme. Cette approximation est valable dans les configurations selon courbure et selon génératrice dans le cas d'une surface régulière, car le faisceau est alors invariant avec le déplacement du traducteur. Elle peut être mise en défaut lorsque le profil est irrégulier dans la configuration selon génératrice, car les caractéristiques du ou des faisceau(x) varient avec la position de balayage. Le défaut peut alors ne pas être placé sur l'axe d'un faisceau ultrasonore pour la position du traducteur L63° détectant un maximum local d'écho. Dans ce cas, on peut tout de même appliquer cette méthode pour obtenir rapidement un résultat. Les performances de repositionnement de défaut s'en trouveront dégradées, comme on le verra au paragraphe 4.1.3. Dans ce paragraphe, on décrit le fonctionnement de la méthode faisceaux.

Détermination des faisceaux

Pour que l'algorithme fonctionne correctement, la zone de calcul doit avoir une taille suffisante, c'est à dire contenir au moins un faisceau, ce qui est le cas grâce à l'algorithme de positionnement de zone. L'échantillonnage spatial doit être assez fin : au minimum une douzaine de lignes de calcul pour une vingtaine de points selon l'axe des abscisses. Pour déterminer automatiquement l'ensemble des faisceaux visibles sur le champ, on traite

l'image correspondant au maximum de l'onde en fonction de la position dans la zone.

Calcul des maxima locaux. On effectue d'abord un lissage bidimensionnel de l'image et un seuillage, afin de s'affranchir du bruit numérique. Celui-ci est dû à la conjonction de deux phénomènes : les imprécisions du calcul numérique et les approximations effectuées quant au nombre de pincesaux utilisés dans le calcul. Pour chaque ligne de calcul de champ, on relève les positions correspondant à des maxima locaux du champ lissé. On obtient un ensemble de points, qu'il faut relier entre eux afin de trouver l'emplacement des faisceaux. Il convient de noter que, malgré le lissage effectué, tous les points ainsi retenus n'appartiennent pas forcément à un faisceau. Il faudra être capable de les éliminer par la suite.

Description de l'algorithme de construction de faisceau. Soit N le nombre de lignes du calcul de champ. Sur chaque ligne, on peut avoir plusieurs points correspondant à des maxima locaux. Notons $A_{i,j}$ le j^{eme} point en partant de la gauche de la i^{eme} ligne. Soit $t_{i,j}$ le temps du maximum de l'enveloppe du signal en $A_{i,j}$ et $(X_{i,j}, Y_{i,j})$ les coordonnées de $A_{i,j}$. L'algorithme débute du bas de la zone, car le champ est en général moins perturbé à cet endroit et il est donc plus facile de reconnaître un faisceau. On considère donc le point $A_{N,0}$. La première phase de l'algorithme est la détermination du point situé sur la ligne $N-1$ et sur le même faisceau que le point initial. Déterminons donc le point le plus susceptible de correspondre à ce critère. Cette phase correspond à l'initiation du faisceau. Pour chaque point $A_{N-1,j}$, on calcule l'expression :

$$\Delta_j = (t_{N,0} - t_{N-1,j}) - \frac{2|A_{N,0}A_{N-1,j}|}{c}, \quad (3.3)$$

où c est la vitesse des ondes considérées dans le matériau en fonction du mode de détection de l'écho traité. Δ_j correspond à la différence entre l'écart de temps d'arrivée de l'onde réelle entre les deux points d'une part et l'écart de temps d'arrivée de l'onde entre les deux points dans le cas où l'onde se

propage avec un vecteur d'onde parallèle à $\overrightarrow{A_{N,0}A_{N-1,j}}$. Dans le cas où $A_{N,0}$ et $A_{N-1,j}$ se situe sur le même faisceau, Δ_j sera quasi-nul car la direction de propagation de l'onde est parallèle localement à l'axe d'un faisceau. Plus généralement, on retiendra le point A_{N-1,j_0} minimisant ce critère. Il correspond donc au point de la ligne $N-1$ le plus proche d'un faisceau passant par $A_{N,0}$.

La phase d'initiation étant terminée, on passe maintenant à la description de la phase de continuation de la construction de faisceau. Pour cela, on cherche sur la ligne $N-2$ le point $A_{N-2,j}$ minimisant la rupture de pente entre $[A_{N,0}A_{N-1,j_0}]$ et $[A_{N-1,j_0}A_{N-2,j}]$. On cherche donc à minimiser le coefficient fonction de j :

$$RuptPente_j = \frac{X_{N-2,j} - X_{N-1,j_0}}{Y_{N-2,j} - Y_{N-1,j_0}} - \frac{X_{N-1,j_0} - X_{N,0}}{Y_{N-1,j_0} - Y_{N,0}} \quad (3.4)$$

3.3. POST-TRAITEMENT DU CHAMP ULTRASONORE SIMULÉ

Soit A_{N-2,j_1} le point minimisant ce critère, de telle sorte que :

$$\underbrace{\min}_{i \in [0..j]} (RuptPente_i) = RuptPente_{j_1}. \quad (3.5)$$

Lorsque $RuptPente_{j_1} > 3$, le faisceau se termine. Cette valeur est le fruit d'un compromis entre des faisceaux obtenus trop courbes et l'arrêt prématuré dans la construction de certains. On considère alors que tous les points du faisceau ont été traités par l'algorithme. Ceux-ci peuvent donc être retirés de la liste de points initiale. Si $RuptPente_{j_1} < 3$, on continue la construction du faisceau à la ligne supérieure. La valeur limite correspondant à la rupture de pente de 3 est le fruit d'un compromis entre la nécessité de prendre en compte une courbure de faisceau, tout en étant capable de discriminer des faisceaux différents. On itère alors ce processus jusqu'à ce qu'on arrive à une terminaison de faisceau, ou à la première ligne de calcul de champ. Alors, on recommence la recherche de faisceaux en partant du point suivant de la dernière ligne : $A_{N,1}$. Si il n'y a plus de points restant sur cette ligne, on choisit des points sur la ligne du dessus. On itère alors ce processus, jusqu'à ce que tous les points aient été traités par l'algorithme. La dernière étape correspond à l'élimination de faisceaux issus du bruit. Deux critères vont permettre d'éliminer des faisceaux "non physiques", donc dus au bruit numérique. Le premier est le nombre de points du faisceaux. Plus grand est le nombre de points trouvés pour un faisceau, plus il est probable que ce faisceau soit réel. On choisit donc d'éliminer en premier lieu les faisceaux constitués de moins de 4 points. Le deuxième critère de sélection d'un faisceau est son écart par rapport à la droite effectuant l'approximation linéaire de la position des points du faisceau. En effet, si l'on peut admettre qu'un faisceau puisse ne pas être rectiligne,⁴ un faisceau ne peut physiquement pas avoir une allure courbe *exagérée*, ou décrire un chemin chaotique.

On a construit un paramètre C prenant en compte ces deux critères, afin d'éliminer les faisceaux trop petits ou trop courbes. Pour chaque faisceau, on calcule :

$$C = \frac{r}{N^2}, \quad (3.6)$$

où r est l'écart type entre les points du faisceau et la droite $X(Z)$ effectuant son approximation linéaire. Plus l'allure du faisceau est régulière, plus la valeur de r est faible. N est le nombre de points du faisceau traité. Si $C > C_{lim}$, le faisceau n'est pas retenu. Il l'est dans le cas contraire. La valeur de C_{lim} a été choisie égale à 0,1. Cette valeur a été obtenue après de nombreux essais sur différents champs. Elle correspond à un compromis entre la nécessaire élimination des faisceaux non physiques et la conservation de faisceaux visibles.

On a donc déterminé tous les faisceaux présents dans la zone de calcul de champ. Il convient maintenant, pour chacun d'entre eux, de déterminer la position atteinte par l'onde à l'instant T_i .

⁴C'est d'ailleurs le cas de faisceaux transmis par le traducteur à travers une surface non perturbée à cause de l'ouverture du traducteur voir référence [49]

Détermination de la position correspondant à un faisceau

On va utiliser les lois de positionnement calculées pour chaque faisceau, comme cela a été décrit en [49]. Il s'agit de relations liant la profondeur, le temps et l'abscisse de l'axe du faisceau, que l'on peut obtenir par analyse du calcul de champ. Soit M le nombre de points du faisceau traité. On peut déterminer un ensemble de M triplets (X_j, Z_j, t_j) , $j \in [1..M]$ correspondant à l'abscisse, la profondeur et le temps de chaque point constituant le faisceau. On effectue une régression polynomiale d'ordre 2, pour trouver les polynômes du deuxième degré $X(t)$ et $X(Z)$ approximant respectivement l'ensemble des couples (t_j, X_j) et (X_j, Z_j) . La courbure naturelle du faisceau est ainsi prise en compte. La position cherchée sera alors $(X(T_i), Z(X(T_i)))$. En appliquant cette procédure pour tous les faisceaux trouvés par l'algorithme, on obtient en sortie autant de points possibles que de faisceaux trouvés. Ces points correspondent à des positions possibles pour le défaut recherché. On montrera au chapitre 3.4 la façon dont on choisira la position la plus proche du défaut parmi toutes les positions possibles. La figure 3.4b montre un exemple d'application de l'algorithme "faisceau" sur un résultat de calcul de champ. Les points en rouge correspondent au maxima locaux du champ ultrasonore. On montre les sept faisceaux détectés par l'algorithme, ainsi que les positions des points correspondants situés dans la zone de calcul de champ. Les points rouges qui ne sont pas situés sur un faisceau ont été éliminés par la méthode.

3.3.2 Méthode "iso-temps"

Le but de cette méthode est de déterminer l'ensemble des positions tel que le signal ultrasonore correspondant au champ en émission-réception (voir plus haut) soit maximal au temps T_i , en s'affranchissant de toute hypothèse concernant les faisceaux. Pour cela, on commence par effectuer un seuillage en amplitude, afin de ne considérer que les points où le champ incident est d'amplitude suffisante. On choisit de prendre comme critère de seuil le dixième de l'amplitude maximale relevée sur la zone de calcul. En chaque point de calcul $A_{j,k}(X_k, Y_j)$ (ligne j et colonne k de la zone de calcul) conservé par le seuillage, on calcule l'enveloppe du signal dont on relève le temps $t_{j,k}$ du maximum. Pour chaque ligne j de calcul d'ordonnée Y_j , on recherche si il existe k_0 tel que : $t_{j,k_0} < T_i < t_{j,k_0+1}$, ou $t_{j,k_0} > T_i > t_{j,k_0+1}$. Dans ce cas, le point retenu par l'algorithme est d'abscisse : $X_{k_0} + X_{k_0+1} \frac{T_i - t_{j,k_0}}{t_{j,k_0+1} - t_{j,k_0}}$, calculé par interpolation linéaire. On traite ainsi deux à deux tous les points successifs de la ligne considérée, puis toutes les lignes de calcul. On obtient finalement une liste de points, qui constituent l'ensemble des points possibles pour l'emplacement du défaut. La courbe reliant ces points sera appelée par la suite courbe "iso-temps". Notons que l'échantillonnage spatial vertical de la zone de calcul constitue une limite inférieure de précision de la méthode, car la profondeur d'un point trouvé sera forcément la profondeur d'une ligne de calcul. Cette limite inférieure n'est pas liée à la méthode, mais à la façon de choisir les points possibles. On

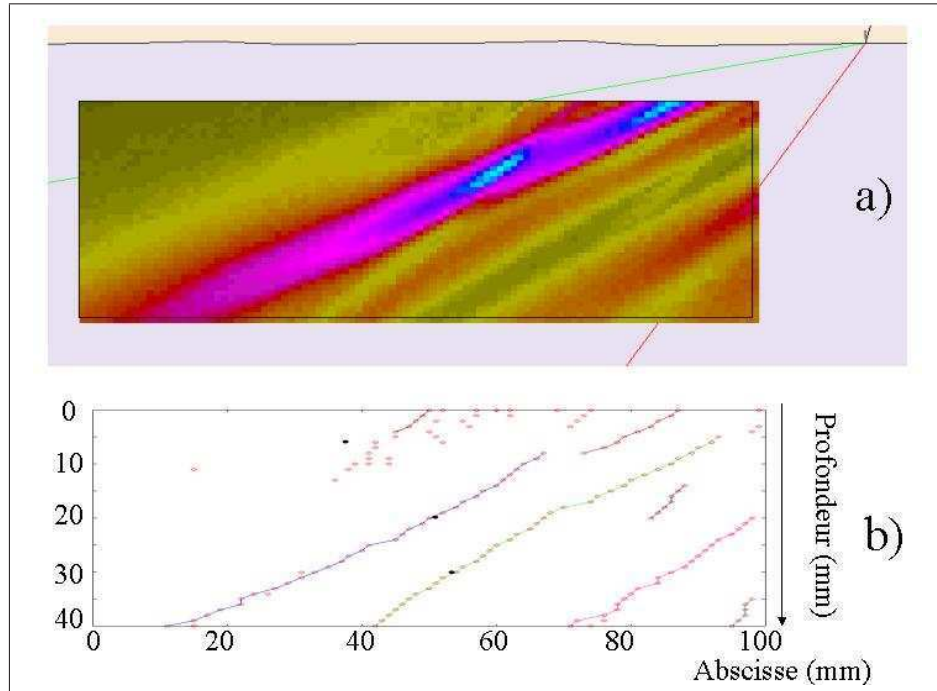


FIG. 3.4 – a) résultat de calcul de champ ultrasonore. b) Résultat de l'algorithme "faisceau". On a relié les points situés sur les mêmes faisceaux. Les positions du défaut associées à chaque faisceau sont représentées par des points noirs.

pourrait sans problème contourner cette difficulté en effectuant une interpolation des points choisis. La figure 3.5 montre un exemple d'application de l'algorithme "iso-temps". La figure 3.5a montre le résultat de calcul de champ auquel est appliqué l'algorithme. La courbe "iso-temps" est calculée pour différents temps de vol, correspondant chacun à une couleur (figure 3.5b). On remarque la propagation de l'onde ultra-sonore dans le matériau.

3.3.3 Comparaison de la méthode "Iso-temps" et de la méthode "Faisceaux"

On souhaite comparer les résultats respectifs des deux méthodes appliquées à la même indication expérimentale et vérifier sur cet exemple que, après implémentation, la méthode "Faisceaux" donne des résultats inclus dans l'ensemble des points résultants de la méthode "Iso-temps". La figure 3.6 montre les résultats des deux méthodes appliquées au résultat d'un même calcul de champ effectué en onde L. La distance maximale obtenue entre les points issus de la méthode faisceau et la courbe "iso-temps" est ici de 0,1 mm. On constate donc un bon accord entre les deux résultats trouvés.

L'une ou l'autre méthode fournit un ensemble de points possibles pour l'emplacement du défaut recherché. Si le nombre de positions est supérieur

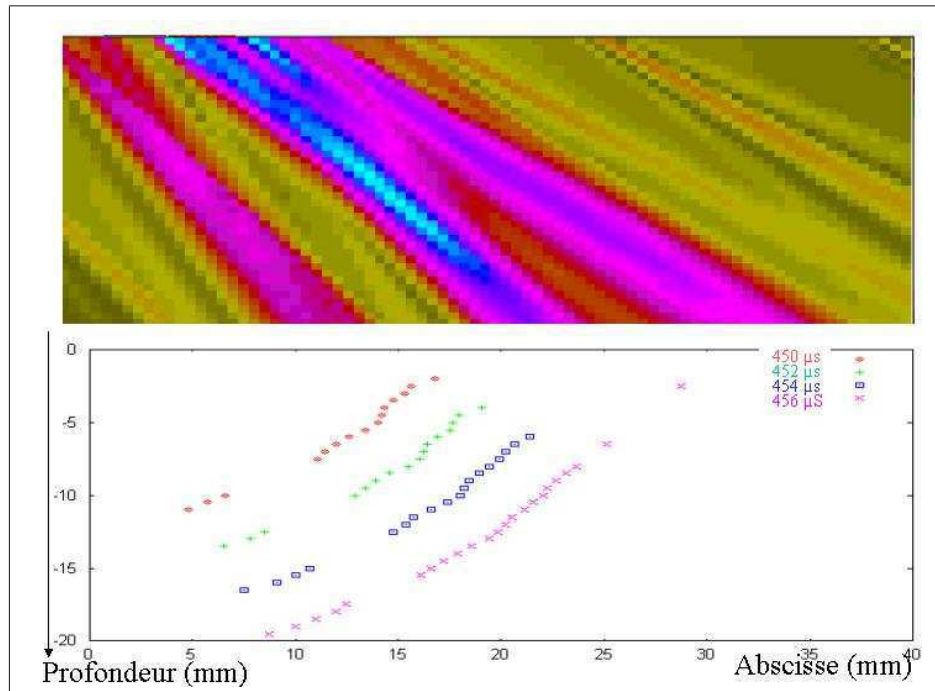


FIG. 3.5 – a) Résultat d'un calcul de champ ultrasonore. b) Points "iso-temps" pour différents temps de vol.

à 1, ce qui est systématiquement le cas avec la méthode "iso-temps", on devra choisir parmi cet ensemble. On montre dans le chapitre suivant la manière dont on va déterminer le point le plus proche du défaut réel. Une simulation d'écho sera utilisée, afin de pouvoir trancher parmi les différentes possibilités en effectuant une comparaison entre le B-scan expérimental et le B-scan simulé.

3.4 Choix final de l'emplacement du défaut

La première étape de ce choix est la simulation de l'écho que renverrait un défaut placé en chacun des points obtenus à l'issue de la phase précédente. Il s'agit de la simulation du problème direct. Ensuite, on exposera la fonctionnelle développée qui permet de comparer les B-scan simulés au B-scan expérimental. Le résultat de l'algorithme correspond à la position de défaut donnant le B-scan simulé le plus proche du B-scan expérimental.

3.4.1 Simulation des échos renvoyés par les défauts

Principe de la simulation

On déplace le traducteur et pour chaque position, on calcule l'écho renvoyé par un défaut placé au point possible. Il s'agit de la simulation du

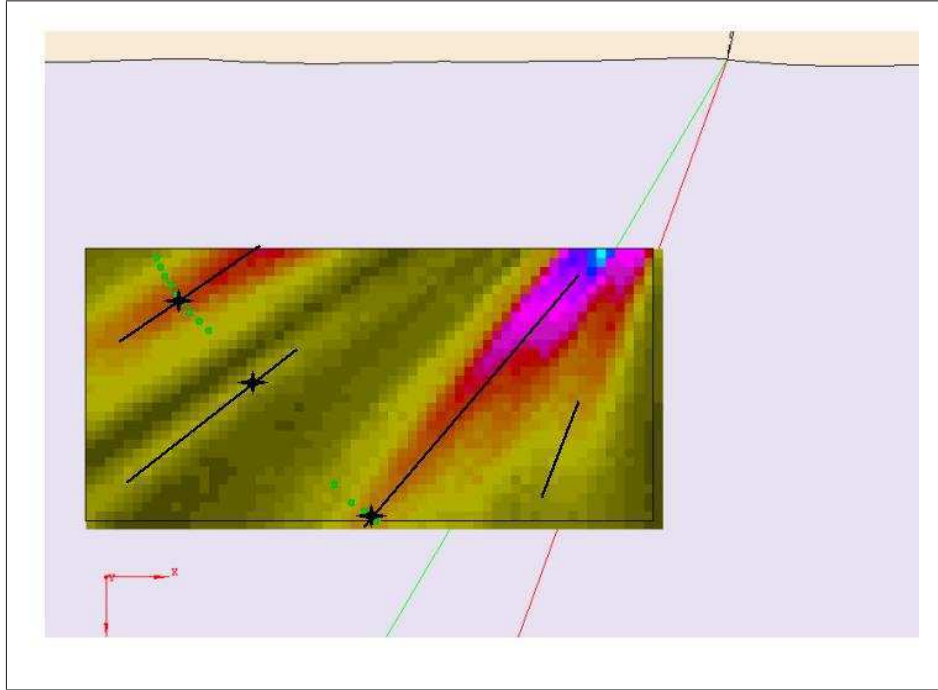


FIG. 3.6 – Comparaison des résultats de l'algorithme "faisceau" et "iso-temps" appliqué à un champ ultrasonore. En vert : algorithme "iso-temps". En noir : algorithme faisceau. Les traits noirs correspondent aux faisceaux détectés par l'algorithme.

problème direct, pour lequel il est nécessaire de disposer d'un modèle rapide et performant.

Le balayage du transducteur doit couvrir l'ensemble de la zone où le défaut est détecté, afin de ne manquer aucune information. La zone de balayage du transducteur $L63^\circ$ est déterminée à partir de la connaissance de toutes les indications ultrasonores associées au mode et au défaut traité. Soit X_{min} et X_{max} respectivement les positions de transducteur $L63^\circ$ associées à ces indications. On impose au transducteur $L63^\circ$ un balayage tel que le point d'impact du transducteur $L63^\circ$ soit compris entre $X_{min} - 30\text{mm}$ et $X_{max} + 30\text{mm}$. La valeur de 30 mm de marge dans la prise en compte de possibles variations de la simulation par rapport à l'expérience est due au fait que celle-ci peut être effectuée avec des positions de défaut différentes. Le pas de déplacement du transducteur $L63^\circ$ en simulation doit être réduit au maximum afin de ne pas rajouter d'erreurs supplémentaires (voir chapitre 4.3.3). On choisit un pas de 0,3 mm.

Approximations effectuées

On a choisi de modéliser dans un premier temps la fissure que l'on cherche à positionner par une fissure droite, perpendiculaire au plan d'incidence du transducteur $L63^\circ$ considéré.

On cherche à simuler l'écho engendré par un défaut correspondant à une extrémité de fissure considérée comme rectiligne et perpendiculaire au plan d'incidence. Le modèle utilisé couramment pour la prise en compte de l'interaction faisceau-défaut dans ce cas de figure est la théorie de la GTD (Geometrical Theory of Diffraction) dont on peut trouver des références détaillées dans [50, 51]. Le modèle GTD permet de considérer seulement l'arête diffractante. Dans les calculs, on a choisi de simplifier le modèle GTD, afin de gagner en temps de calcul. Ce point est crucial, car pour chaque indication, on peut être amené à traiter un grand nombre de points possibles⁵. On peut se reporter à la thèse de J. Nadal ([40]) pour de plus amples informations concernant cette modélisation. Décrivons les approximations successives effectuées.

Directivité de la réponse. La directivité de la réponse du défaut dans le plan d'incidence est négligée et on ne prend pas en compte la théorie de la GTD. Cette approximation a surtout une répercussion sur les amplitudes relatives des échos, ce qui ne pose pas de problème car la méthode de comparaison de B-scan n'est pas basée sur ce critère. On modélise donc le défaut considéré comme une "*ligne brillante*", d'extension perpendiculaire au plan d'incidence. La réponse échographique $S(t)$ du défaut est alors la somme des contributions des sources ponctuelles la constituant :

$$S(t) = \int_{Ligne} s_E(l, t) \otimes s_R(l, t) dl, \quad (3.7)$$

Les quantités calculées $s_E(l, t)$ et $s_R(l, t)$ dépendent du mode de détection ER supposé connu de l'indication traitée (E le mode d'émission et R le mode de réception). l correspond à la position du point courant sur la ligne brillante. On peut se référer à [52] pour plus de détails concernant ce modèle.

Remplacement du défaut par un point. Une approximation supplémentaire est le remplacement de la ligne brillante, par un point, situé dans le plan d'incidence du traducteur $L63^\circ$. On néglige alors les contributions hors du plan d'incidence. Dans le cas selon génératrice, cette approximation est justifiée par le fait que l'énergie envoyée par le traducteur $L63^\circ$ est maximale dans le plan d'incidence. De plus, en effectuant une approximation d'onde plane au voisinage du défaut, les contributions de la réponse de la fissure reviennent en phase autour de l'intersection de celle-ci et du plan d'incidence. Dans le cas selon courbure, l'approximation consistant à remplacer la ligne par un point est justifiée au paragraphe 3.2.1. On a alors :

$$S(t) = s_E(0, t) \otimes s_R(0, t), \quad (3.8)$$

où $s_E(0, t)$ et $s_R(0, t)$ sont les champs ultrasonores en émission et en réception dans le plan d'incidence du traducteur $L63^\circ$.

⁵typiquement une trentaine

Calcul en deux dimensions. Une dernière approximation concerne seulement le cas selon génératrice : on adopte un mode bidimensionnel, comme pour le calcul du champ ultrasonore. Toutes les approximations décrites ici seront discutées au paragraphe 4.4.2. On étudiera aussi les erreurs dues à ces simplifications.

3.4.2 Méthode de comparaison de B-scan

Pour chaque position possible trouvée par les algorithmes de post-traitement de champ, on calcule donc un B-scan simulé correspondant à la réponse échographique d'un défaut ponctuel placé à cet endroit. Afin de pouvoir comparer les B-scan simulés au B-scan expérimental, on a développé une pseudo-distance dans l'espace des B-scan. Cette fonctionnelle définie de l'espace des échos vers les réels positifs peut être assimilée à une fonction coût, définissant un critère de ressemblance entre les B-scan simulés et le B-scan expérimental. Cette fonctionnelle permet donc de déterminer le point résultant de l'algorithme de repositionnement de défaut.

On a voulu développer une méthode robuste et rapide capable d'effectuer des comparaisons entre deux B-scan. La première idée était de calculer la fonction d'intercorrélation des deux B-scan comparés. Le minimum de cette fonction donnerait le décalage moyen entre les B-scan, en position et en temps. Cette méthode s'est avérée peu efficace car trop sensible aux écarts existants entre les résultats simulés et expérimentaux. Il a donc paru plus judicieux de développer une méthode basée sur la comparaison deux à deux des indications données par les positions des maxima locaux d'échodynamique, car c'est cette donnée qui est le plus souvent correctement simulée. L'analyse des résultats a montré que la position des maxima locaux se révèle être un bon critère pour la comparaison des échos. Même si l'on est en présence d'écart sur les amplitudes relatives des différents maxima, leur position est correctement reproduite par la simulation simplifiée décrite plus haut. Dans cette optique, on commence par décrire la procédure pour comparer deux indications ultrasonores. On s'intéressera ensuite au choix des indications traitées sur le B-scan simulé.

Méthode de comparaison de deux indications

Soit (X_1, t_1) et (X_2, t_2) deux indications ultrasonores que l'on désire comparer. Il n'est pas possible de le faire en mélangeant variables d'espace et de temps. On a donc développé une procédure remplaçant les indications dans la pièce. Pour cela, on s'est inspiré de la transformation dite B-scan vrai, utilisée en CND pour repositionner les indications détectées à travers une surface régulière. On utilise donc cette hypothèse uniquement pour repositionner les indications dans l'espace, afin de pouvoir les comparer. L'influence du revêtement est donc ici négligée. La position (x_1, z_1) associée à la première indication est donc telle que :

$$x_1 = X_1 \pm \frac{ct_1}{2} \sin(r) + x_0 \quad (3.9)$$

$$z_1 = \frac{ct_1}{2} \cos(r) + z_0, \quad (3.10)$$

où c est la vitesse acoustique correspondant au mode traité, x_0 et z_0 sont deux constantes ne dépendant que de la hauteur d'eau du traducteur L63° et r l'angle de réfraction du faisceau considéré. Le signe du deuxième terme du membre de droite de la première équation dépend du sens de tir. On n'a pas besoin de déterminer x_0 car on calcule des différences entre les positions obtenues pour les deux indications traitées. En effet, la distance entre les deux indications ultrasonores est donnée par :

$$D_{1,2} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (3.11)$$

On est donc capable de comparer deux indications ultrasonores. Notons que si celles-ci sont égales, leur distance sera nulle. Il reste maintenant à les déterminer. On connaît déjà les indications issues du B-scan expérimental, car elles correspondent par définition aux indications ultrasonores des segments calculés par la segmentation. De plus, on a vu au paragraphe 3.1.3 que l'on est capable d'isoler les échos issus d'un défaut du même mode. Il faut donc calculer les positions des maxima locaux des B-scan simulés et les associer deux à deux avec les indications du B-scan expérimental précédemment déterminées.

Détermination des maxima locaux des B-scan simulés par lissage adaptatif

Le but de cet algorithme est de déterminer les indications du B-scan simulé à prendre en compte pour les comparer à celles du B-scan expérimental. Les indications déterminées correspondent aux maxima d'amplitude le long de la courbe échodynamique de l'écho traité. Pour cela, une procédure de lissage dit adaptatif a été développée. Afin de prendre en compte les maxima locaux de l'échodynamique du B-scan simulé, il faut préalablement effectuer un lissage de la courbe, afin de ne pas prendre en compte les maxima liés au bruit numérique. Il convient de ne pas lisser trop fortement, car on risquerait alors d'éliminer des maxima qui correspondent à des maxima réels. On doit enfin laisser à l'algorithme la possibilité de retenir dans un premier temps des positions supplémentaires par rapport au cas réel.

Lissage adaptatif. Soit P le nombre de maxima du B-scan expérimental pour le mode considéré et M celui du B-scan simulé traité avant lissage. Le principe de cette procédure est d'accepter au plus $P+2$ maxima locaux. On laisse donc la possibilité à l'algorithme de déterminer deux maxima de plus que le B-scan expérimental. Le fait de se limiter à deux maxima correspond à un compromis entre le risque d'avoir trop de maxima, ce qui complique l'analyse et le risque de ne pas prendre en compte de maxima physiques. Les indications superflues sont éliminées par la suite. Plusieurs situations peuvent se produire :

3.4. CHOIX FINAL DE L'EMPLACEMENT DU DÉFAUT

- Si $M < P$. Plusieurs cas de figure peuvent expliquer cette situation. Le défaut pris en compte dans la simulation peut être trop éloigné de sa position réelle, de sorte que son écho ne comporte pas le même nombre d'indications. Une erreur dans la prise en compte des indications expérimentales peut également s'être produite, à cause de la présence d'échos de surface ou d'échos provenant d'autres défauts. Dans ce cas, on supprime les $P - M$ indications du B-scan expérimental dont la distance aux indications simulées les plus proches est maximale. On n'effectue alors la comparaison de B-scan que sur une partie du B-scan expérimental et la méthode est fortement dégradée. La distance entre les deux B-scan sera alors majorée, afin de signifier que le B-scan simulé trouvé ne ressemble pas au B-scan expérimental.
- Si $P \leq M \leq P + 2$, on garde alors tous les maxima en l'état.
- Si $M \geq P + 2$, on dispose de trop de maxima locaux du B-scan simulé. Pour remédier à cette situation, on effectue un lissage de son échodynamique. L'échodynamique est lissée à l'aide d'un filtre de plus en plus large, jusqu'à ce qu'on soit dans la situation : $P \leq M \leq P + 2$.

Élimination des indications superflues du B-scan simulé. Dans tous les cas, on aboutit donc à : $P \leq M \leq P + 2$. Pour comparer le B-scan expérimental et les B-scan simulés, il nous faut associer à chaque indication ultrasonore expérimentale une indication simulée. Dans cette optique, il convient de déterminer le meilleur arrangement parmi les A_M^P arrangements possibles des M indications simulées et des P expérimentales. Pour ce faire, on évalue la distance entre les deux B-scan pour chacun des A_M^P arrangements possibles. L'arrangement finalement retenu est celui minimisant cette somme. On associe deux à deux ces indications, puis on les compare. La distance finale retenue par la comparaison de B-scan est le minimum de la moyenne arithmétique des distances élémentaires calculé sur chacun des couples composés d'une indication expérimentale et simulée.

La figure 3.7a montre le B-scan simulé et les indications ultrasonores calculées par la méthode décrite plus haut. Dans ce cas, on dispose de deux indications de plus pour le B-scan simulé. On montre figure 3.7b quelles indications seront supprimées : il s'agit de celles qui sont éloignées des indications du B-scan expérimental. Les indications comparées entre elles sont entourées en blanc.

On est donc capable de comparer deux B-scan. La fonctionnelle développée n'est pas exactement une distance car on peut théoriquement avoir deux B-scan différents donnant une fonctionnelle nulle. Néanmoins, pour l'application envisagée, elle répond à la question posée car elle permet de choisir parmi un ensemble de B-scan simulé celui qui est le plus proche du B-scan expérimental.

3.4.3 Choix de la position optimale

Le résultat final de l'algorithme traitant un segment est donc la position du défaut rendant le B-scan simulé le plus proche du B-scan expérimental.

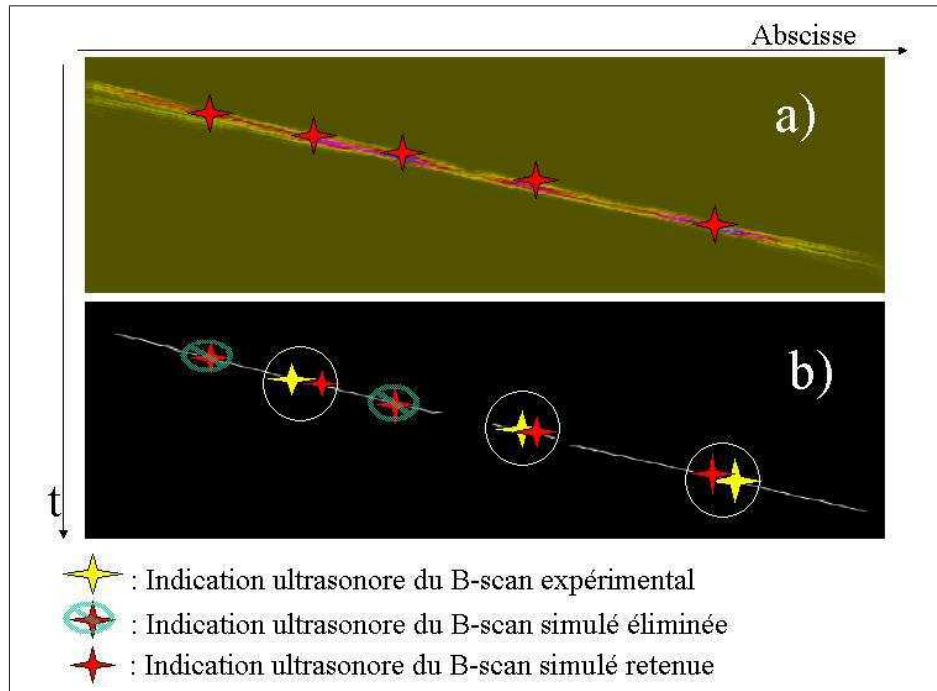


FIG. 3.7 – a) B-scan simulé et indications retenues par le lissage adaptatif. b) B-scan segmenté expérimental et indications ultrasonores associées ; les indications ultrasonores du B-scan simulé sont reportées et on montre celle qui sont éliminées.

Pour cela, on effectue la comparaison du B-scan expérimental avec tous les B-scan simulés. On retient alors le B-scan le plus proche du B-scan expérimental. Le cas échéant, on relance alors la méthode complète de positionnement de défaut à partir des autres échos issus du même défaut et du même mode. Pour chacune des indications, on va obtenir un ensemble de points possibles et on choisit le meilleur de la même façon. On obtient donc un résultat par segment traité. Le résultat final de la méthode de repositionnement de défaut pour le mode de détection traité est obtenu en choisissant la position qui engendre le B-scan simulé le plus proche parmi les résultats issus de tous les échos issus du même défaut.

La valeur de la distance entre le B-scan simulé optimal et le B-scan expérimental constitue un indicateur de la précision de la méthode. Cette distance est exprimée en millimètre, puisqu'on a replacé les indications ultrasonores dans l'espace réel. Celle-ci est *a priori* d'autant meilleure que le B-scan simulé est proche du B-scan expérimental. Elle ne correspond pas forcément à une évaluation de la précision du positionnement puisque dans certains cas, l'erreur commise par la méthode de repositionnement peut être inférieure à la distance entre le B-scan simulé optimal et le B-scan expérimental. Cela se produit pour les configurations où les différentes approximations et erreurs expérimentales entraînent un écart important entre le B-scan expérimental et le B-scan simulé obtenu en plaçant un défaut à

l'emplacement du défaut (problème direct). Dans ce cas, la méthode choisit la position donnant le B-scan simulé le plus proche du B-scan expérimental. La distance entre la position obtenue par la méthode et la position réelle du défaut peut alors être inférieure à la distance entre le B-scan expérimental et le B-scan simulé correspondant.

On dispose donc de la position calculée d'une indication ultrasonore, correspondant à un fond de fissure. On applique alors à nouveau la méthode à l'autre extrémité de la fissure. On peut donc caractériser celle-ci complètement. Les fissures recherchées sont en pratique souvent verticales. Leur dangerosité dépend donc directement des positions en profondeur de leurs extrémités. L'information la plus importante est donc la profondeur des indications. On échantillonnera suffisamment la zone de calcul de champ, afin d'obtenir une précision suffisante dans cette direction.

3.4.4 Optimisations possibles de la méthode "Iso-temps"

Intersection de courbes "Iso-temps"

Dans le cas où l'on dispose de plusieurs échos expérimentaux, on peut réduire le nombre de points possibles en ne considérant que les points situés dans une zone déterminée par l'intersection des courbes "iso-temps". On montre figure 3.8 les résultats de la méthode "Iso-temps" issus du traitement de chacune des deux indications d'un défaut renvoyant un écho double. La mise en parallèle de ces deux résultats permet de ne conserver pour traitement par la méthode de comparaison de B-scan que les points proches de l'intersection des deux courbes. On peut ainsi réduire le nombre de points traités par la méthode et donc gagner en temps de calcul.

Optimisation automatique par l'utilisation de la méthode de Brent à une dimension

Dans le cas d'un défaut détecté par une seule indication, on ne dispose que d'une courbe "iso-temps" et on ne peut appliquer la méthode précédente. Une méthode de minimisation peut alors être appliquée, car il s'agit en fait de minimiser une fonction : la distance entre le B-scan simulé et le B-scan expérimental. N'ayant pas accès aux dérivées de la fonction, on ne peut pas utiliser de méthode différentielles comme la méthode du gradient conjuguée. On peut en revanche appliquer la méthode de Brent, dont on peut trouver la description dans [53, 54]. Pour cela, on modifie la distance entre deux B-scan définie au paragraphe 3.4.2, en l'élevant au carré. Ainsi, la méthode de comparaison de B-scan revient à rechercher le minimum d'une fonction théoriquement égale à une parabole. La méthode de Brent permet de trouver ce minimum en réduisant le nombre de points possibles sur lesquels on effectue la simulation du B-scan. La figure 3.9 illustre la méthode. La courbe en trait plein représente la distance entre le B-scan simulé et le B-scan expérimental en fonction de la position sur la courbe "iso-temps". On effectue d'abord le calcul de cette distance aux extrémités de la courbe "iso-temps" et en son milieu, respectivement aux points 1, 3 et 2 de la fi-

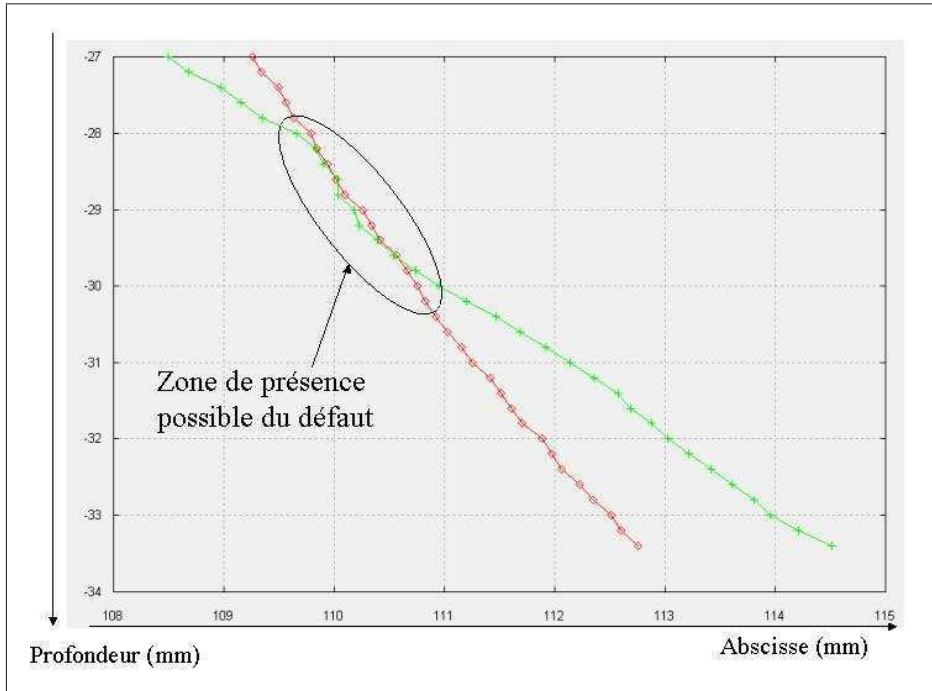


FIG. 3.8 – Comparaison des courbes "iso-temps" issues des deux indications du défaut n°1 détecté en mode LL.

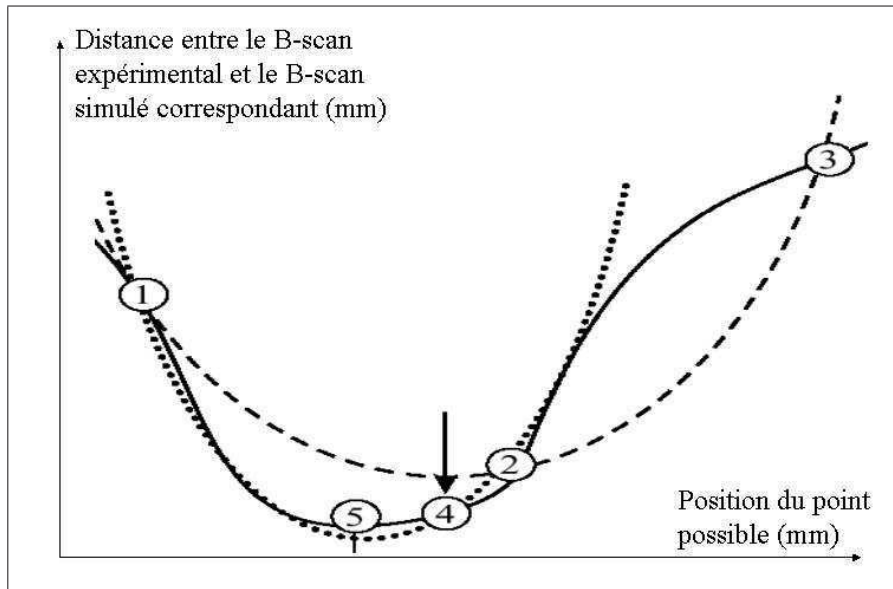


FIG. 3.9 – Illustration du fonctionnement de la méthode de Brent. La courbe noire représente la valeur de la distance trouvée par l'algorithme en fonction de la profondeur du point possible. Figure partiellement extraite de [53].

On effectue alors une interpolation parabolique des trois distances trouvées, représentée par la courbe en traits pointillés. On obtient la position du point 4, minimum de cette parabole. On calcule alors la distance

en ce point et on recommence l'interpolation parabolique en utilisant les points encadrant le point 4, dans le cas de la figure 3.9, les points 1 et 2. On itère alors la méthode jusqu'à obtenir des variations de distance infimes. La méthode a été implémentée et appliquée sur une courbe "iso-temps" de 50 points. Le nombre de points nécessaires auxquels on effectue la simulation puis la comparaison de B-scan est de 6, ce qui constitue un gain de temps important. Néanmoins, l'utilisation de la méthode exige d'avoir une idée *a priori* de la position du défaut recherché, afin de ne pas obtenir de minimum local dans les cas de figures problématiques.

3.4.5 Récapitulatif de la méthode

La figure 3.10 montre un résumé schématique de la méthode de repositionnement dans le cas où plus d'une position possible est trouvée, le cas où une seule position possible étant trivial (configuration selon courbure, ou selon génératrice dans le cas d'une surface non chahutée). Les parallélogrammes correspondent aux données, les rectangles aux résultats de calculs, et les formes arrondies aux étapes de calcul. Les abréviations UI correspondent à "indication ultrasonore". Ainsi, l'algorithme effectue une double boucle : d'abord sur les indications expérimentales, puis sur les points possibles.

La méthode permet en principe de repositionner une indication détectée à travers un revêtement. Elle fonctionne avec des indications détectées dans tous les modes. Grâce à la simulation, on a en quelque sorte appliqué une migration des indications ultrasonores en prenant en compte par l'utilisation de la simulation les phénomènes perturbatifs dus à la présence du revêtement. Il reste à la valider expérimentalement ainsi qu'à évaluer ses erreurs.

CHAPITRE 3. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE REPOSITIONNEMENT D'UN DÉFAUT

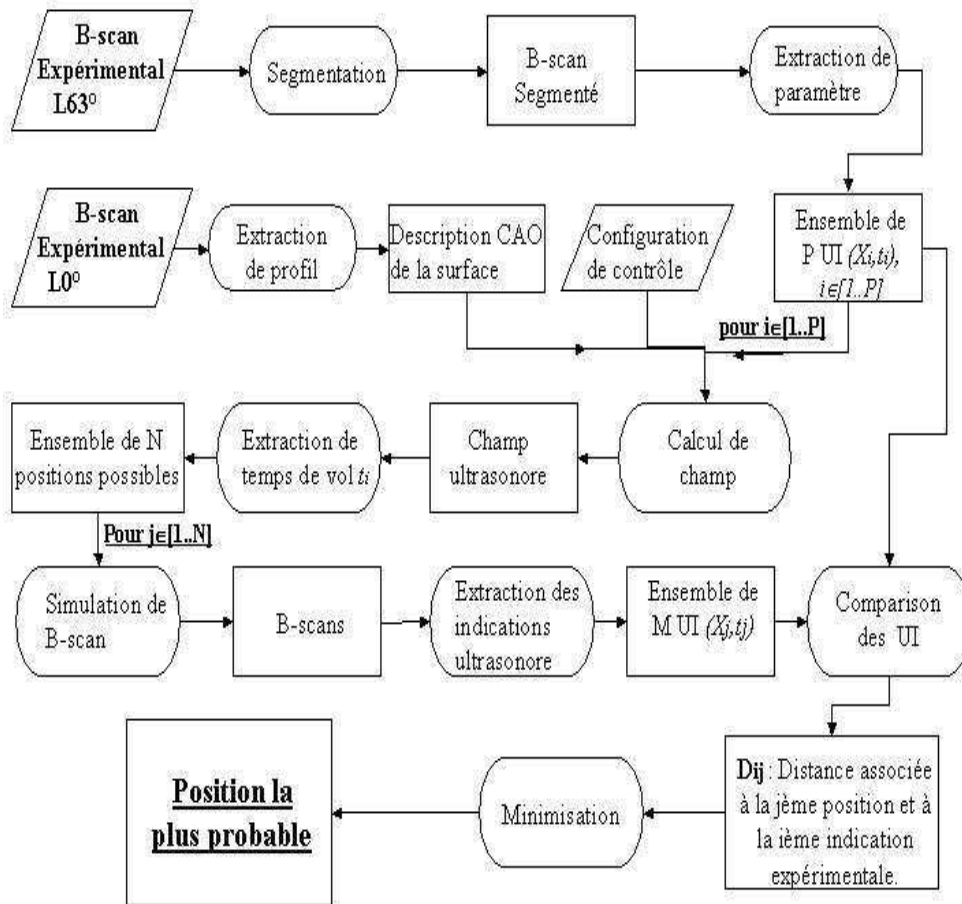


FIG. 3.10 – Schéma récapitulatif de la stratégie d'inversion.

3.4. CHOIX FINAL DE L'EMPLACEMENT DU DÉFAUT

Chapitre 4

Validation, discussion, et application de la méthode

Les expériences décrites ont pour but de valider la méthode exposée au chapitre précédent et de connaître ses imprécisions et ses limitations. Ne disposant pas au laboratoire de la platine de contrôle complète, nous avons dû mettre au point un protocole expérimental afin de se ramener à des conditions similaires à celles rencontrées sur site. La première section est consacrée à ces expériences et des résultats obtenus sur différents blocs. La deuxième section traite des résultats de la méthode obtenus à partir d'acquisitions effectuées avec la platine de contrôle dans l'environnement industriel. On évalue successivement toutes les incertitudes liées à l'application de la méthode, pour enfin étudier les conséquences des approximations effectuées.

4.1 Validation expérimentale effectuée au laboratoire

Cette partie est consacrée à la description des expériences réalisées au laboratoire, ainsi que du matériel utilisé. On a réalisé les acquisitions $L0^\circ$ et $L63^\circ$ au laboratoire indépendamment, afin de simuler les acquisitions réalisées sur site avec la platine de contrôle. On détaille ici la configuration expérimentale utilisée, pour ensuite décrire la procédure d'étalonnage qui dérive de celle utilisée avec la platine de contrôle. Les résultats obtenus par l'application de la méthode décrite au chapitre précédent, respectivement avec des blocs homogène et revêtu, tous deux à surface complexe, sont rapportés puis discutés.

4.1.1 Description de la configuration expérimentale

Caractéristiques de la chaîne d'acquisition

Les traducteurs utilisés lors des expériences menées au laboratoire sont identiques à ceux utilisés sur site (voir annexe F). La configuration expérimentale est représentée sur la figure 4.5. Les déplacements des traducteurs

4.1. VALIDATION EXPÉRIMENTALE EFFECTUÉE AU LABORATOIRE

sont contrôlés par ordinateur à l'aide d'un système de déplacement micro-contrôle ITL 09, relié par liaison GPIB à l'ordinateur. Le traducteur se déplace dans un plan horizontal. Un générateur d'ultrasons Sofranel applique une impulsion électrique réglable au traducteur. Le gain est choisi lors de chaque acquisition de manière à obtenir partout un signal non saturé. Le signal reçu par le traducteur est enregistré par l'intermédiaire d'un oscilloscope numérique Lecroy 9361, relié à un ordinateur par une liaison GPIB. La fréquence d'échantillonnage du signal est de 50 MHz, pour un pas de déplacement du traducteur $L63^\circ$ de 0,3 mm. La température de l'eau a été relevée pour chaque acquisition, donnant ainsi accès à la célérité du son (voir annexe C).

Description des blocs utilisés

Lors des expériences réalisées au laboratoire, trois blocs ont été utilisés. Le premier est le bloc d'étalonnage. Il s'agit d'un composant de géométrie plane homogène en acier de la cuve, comportant des trous génératrices à différentes profondeurs. Le second est un bloc homogène en acier similaire à celui de la cuve réelle dont la surface a été usinée de manière à obtenir un profil représentatif d'un revêtement réaliste (figure 4.1).

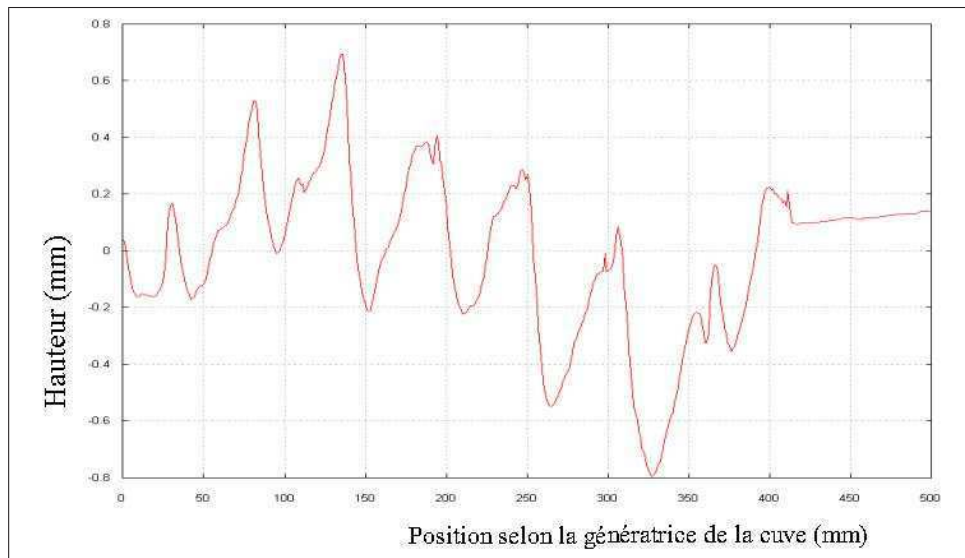


FIG. 4.1 – Forme représentative de l'interface eau - acier austénitique.

Cinq trous génératrices de diamètre 2 mm ont été percés dans ce bloc dans la direction perpendiculaire au profil irrégulier : trois à 20 mm de profondeur et deux à 30 mm. On ne s'intéresse ici qu'à la configuration selon génératrice.

Le troisième bloc est un bloc revêtu à surface irrégulière. Un revêtement similaire à celui présent sur site a été déposé à la surface d'un bloc régulier d'acier de la cuve. Quatre trous génératrices de diamètre 2 mm ont été percés parallèlement à la direction de dépôt des passes de revêtement, deux à une profondeur de 20 mm et deux à 30 mm. Deux trous de diamètre 1

mm ont été percés dans la direction perpendiculaire, à 15 mm et 25 mm de profondeur.

Prise en compte de l'interaction entre le faisceau et le trou génératrice. On modélise l'interaction entre le faisceau incident et un trou génératrice comme ponctuelle et isotrope. La zone échogène est alors localisée sur une ligne brillante et rayonne de manière isotrope dans l'espace. Compte tenu de l'approximation bidimensionnelle des calculs, on peut se limiter à la considération d'un point brillant. Pour trouver la position de celui-ci, on effectue l'approximation qu'une onde plane d'angle de réfraction r interagit avec le trou génératrice. r est calculé à partir de l'angle d'incidence réel du traducteur et des vitesses dans les milieux, selon le mode traité. On néglige les perturbations du faisceau dues à l'interface pour ce calcul. Le rayon du trou étant faible, l'influence de la perturbation du champ ultrasonore sur la position du point brillant est négligeable¹. On montre figure 4.2 la façon de déterminer le point brillant d'un trou génératrice. On considère donc que la position du défaut ponctuel équivalent au trou génératrice est celle du point brillant. On peut remarquer que le point brillant dépend du mode

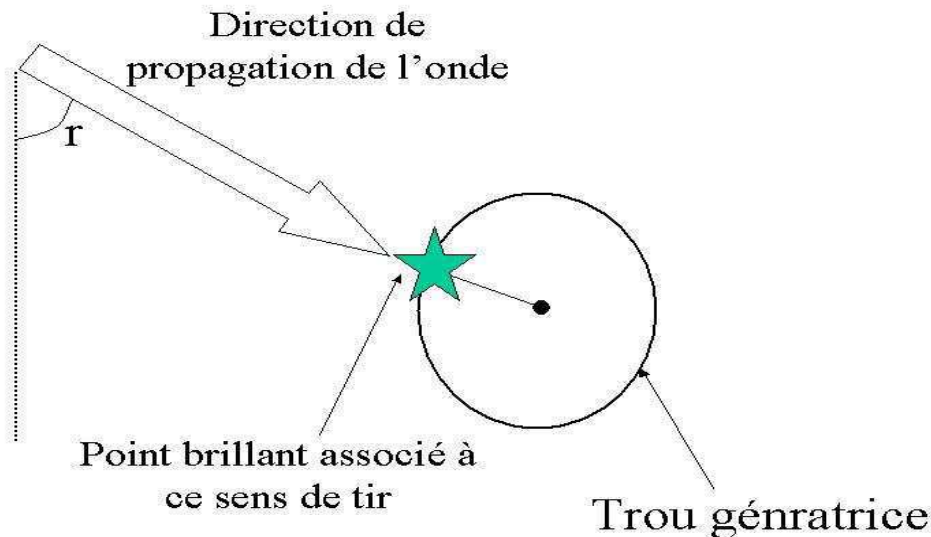


FIG. 4.2 – Procédure de positionnement du point brillant pour un trou.

de détection, de l'angle de réfraction, ainsi que du sens de tir. La méthode de positionnement calcule la position du point brillant du trou génératrice. On peut donc ensuite remonter facilement à la position du centre du trou génératrice.

Le but des expériences réalisées est de tester l'efficacité de la méthode

¹L'erreur commise est au plus de l'ordre de quelques dixièmes

4.1. VALIDATION EXPÉRIMENTALE EFFECTUÉE AU LABORATOIRE

sur ces défauts. Dans le cadre de ces travaux et à des fins de validation, les valeurs des constantes élastiques du revêtement entrées dans la simulation ont été déterminées expérimentalement à partir d'un échantillon de revêtement découpé sur le bloc d'essai. La mesure part de l'hypothèse que la symétrie de l'acier austénitique ainsi déposé est orthorhombique, ce qui est observé classiquement.

Mesure des propriétés mécaniques du revêtement

La méthode utilisée est plus efficace lorsqu'on connaît les plans de symétrie du matériau. Il est donc nécessaire de les déterminer préalablement aux mesures des constantes élastiques.

Détermination des axes de symétrie du cristal. Pour cela, on doit déterminer l'orientation des dendrites (voir annexe A). On a découpé l'échantillon afin de l'analyser. Toutes les passes ayant été déposées dans le même sens, on considère que les plans de symétrie sont les mêmes partout. Une attaque acide a été réalisée sur chaque face découpée de l'échantillon correspondant aux plans d'incidence dans les configurations courbure et génératrice, afin de les polir. On a alors observé au microscope chacune d'elle (figure 4.3).

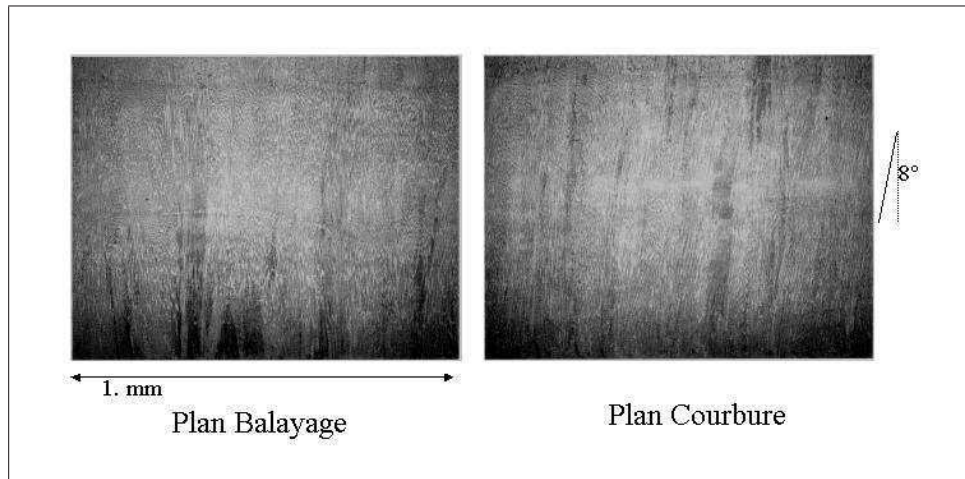


FIG. 4.3 – Macrographie des sections de revêtement dans les deux sens de découpe.

On constate que l'orientation dendritique est verticale dans le plan correspondant au plan d'incidence de la configuration selon génératrice. Dans le plan courbure, celles-ci font un angle avec la verticale d'environ 8° par rapport à la normale à la surface de l'échantillon. La précision de cette mesure est de l'ordre du degré. Ces résultats correspondent à ce qui est classiquement observé pour ce type d'échantillon. On connaît pour cet échantillon, la désorientation des dendrites et donc les plans de symétrie de l'échantillon.

Un parallélépipède rectangle a été découpé de façon à ce que chaque facette soit parallèle à un plan de symétrie.

Détermination des constantes élastiques par une méthode de chronométrie. L'échantillon a été envoyé au Laboratoire de Mécanique Physique de Bordeaux afin de l'analyser par une méthode de mesure de temps vol (chronométrie). Tous les détails de la technique utilisée peut être trouvés dans la thèse d'Aristégui [55, 56] ainsi que dans [57, 58]. Le principe de cette méthode repose sur des mesures en transmission du temps de vol dans l'échantillon d'une onde engendrée par un transducteur focalisé en immersion et par un transducteur au contact. Le transducteur au contact est un transducteur plan permettant d'envoyer une onde considérée comme plane dans le plan de l'échantillon. Le transducteur en immersion est conçu pour engendrer une onde focalisée dans l'échantillon. On fait varier l'angle d'incidence de ce dernier de façon à effectuer des mesures de la vitesse de propagation dans le matériau pour différentes directions de propagation. A partir de la mesure des temps de vol pour chaque angle d'incidence, on détermine, pour les modes de propagation longitudinaux et transverses, la célérité de l'onde dans les différentes directions. On remonte donc à l'allure de la courbe des lenteurs pour les angles d'incidences que l'on peut atteindre expérimentalement. Un algorithme d'inversion permet de remonter aux constantes élastiques du matériau, ainsi que d'obtenir une estimation de l'erreur. Une telle méthode a déjà été utilisée par El Guerjouma ([59]) caractériser l'anisotropie d'une soudure austénitique.

Le tableau 4.1 montre les résultats obtenus. Ces valeurs sont donc en-

Constante élastique	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{22}	C_{23}	C_{33}	C_{44}	C_{55}	C_{66}
Valeur	221	96	137	212	135	236	111	109	65,2
Incertitude	6	4	3	3	4	4	5	4	1

TAB. 4.1 – Valeur des constantes élastiques (en GPa) mesurée et incertitudes.

trées en paramètre dans les calculs de simulation ultrasonores effectués dans le cadre de la méthode. Après avoir mesuré les propriétés mécaniques du revêtement, il convient de mesurer également les vitesses de propagation dans l'acier de la cuve.

Mesure de la vitesse des ondes dans l'acier de la cuve

La figure 4.4 illustre la méthode utilisée pour mesurer la vitesse de propagation des ondes L dans un bloc d'acier isotrope. On mesure l'écart de temps $t_2 - t_1$ entre l'écho de surface et l'écho de fond de la pièce (figure 4.4a)), relevé sur le B-scan acquis avec le transducteur $L0^\circ$ (figure 4.4b)). Pour cela, on choisit une partie plane du profil, de façon à ce que la propagation des ondes dans le matériau soit plane et perpendiculaire à l'interface.

4.1. VALIDATION EXPÉRIMENTALE EFFECTUÉE AU LABORATOIRE

Connaissant l'épaisseur H de la pièce à cet endroit, la vitesse c_L des ondes L est donnée par :

$$c_L = \frac{2H}{t_2 - t_1} \quad (4.1)$$

Si la profondeur du bloc inspecté est trop importante, on utilise un tra-

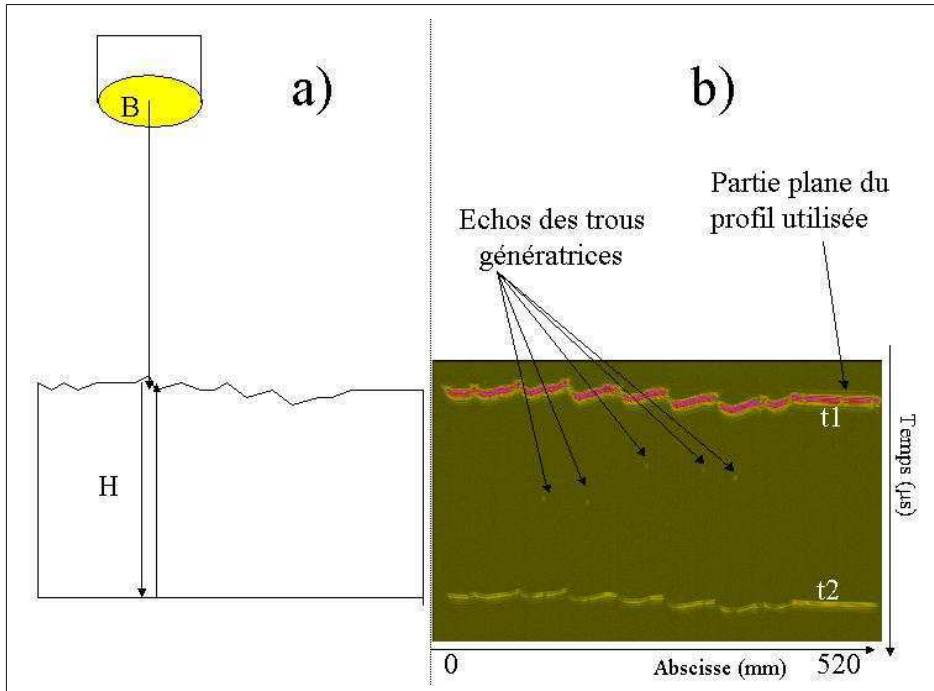


FIG. 4.4 – a) Schéma du montage expérimental pour mesurer la vitesse des ondes L dans le matériau. b) B-scan obtenu.

ducteur de plus basse fréquence, afin de diminuer l'atténuation du signal. Dans le cas d'une surface revêtue, on utilisera la même méthode, mais en mesurant le temps de vol sur la tranche du bloc afin de s'affranchir de la propagation dans la couche. Notons que cette procédure n'est pas utilisable sur site.

Cas des ondes transverses. La valeur de la vitesse des ondes transverses ne peut pas être mesurée aussi facilement. De plus, cette valeur n'est importante que pour les défauts détectés en mode LT ou TT. On utilisera pour ces ondes les vitesses données par la bibliographie : [60] (respectivement 5900 et 3230 ms^{-1}).

Résultats et calculs d'erreur. Le tableau 4.2 montre les résultats obtenus pour les trois blocs inspectés au laboratoire : le bloc d'étalonnage, le bloc homogène et le bloc revêtu. Évaluons l'erreur commise sur la mesure de vitesse ainsi réalisée :

$$\frac{\Delta c_L}{c_L} = \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta T}{T}, \quad (4.2)$$

Nature du bloc	Bloc Étalonnage	Bloc Homogène	Bloc revêtu
Vitesse des ondes L(ms^{-1})	5940.	5960.	5860.

TAB. 4.2 – Vitesse des ondes L de l’acier de la cuve calculées par la méthode de chronométrie dans les différents blocs.

où H est l’épaisseur mesurée du bloc et T le temps de vol dans la pièce ($t_1 - t_2$). La précision sur la profondeur du bloc est de l’ordre de 0,5 mm, pour une profondeur totale de 100 mm. Celle sur la mesure du temps est de l’ordre de quelques échantillons temporels ($0,04 \mu s$) pour chacune des deux mesures et le temps séparant les deux échos est de l’ordre de $40 \mu s$. On a donc : $\frac{\Delta H}{H} \cong \frac{0,5}{100} + \cong \frac{0,08}{40} \cong 0,01$. La vitesse peut donc être déterminée avec une erreur relative de 1%, soit une précision de $60 ms^{-1}$ environ.

Positionnement des blocs dans l’eau

Plusieurs séries d’expériences ont été menées à l’aide les blocs. Les seuls paramètres qui varient sont le sens de tir, la nature du bloc testé et le positionnement relatif de ceux-ci. La figure 4.5 montre le schéma du montage expérimental. Pour chaque sens de tir correspondant à une acquisition, on

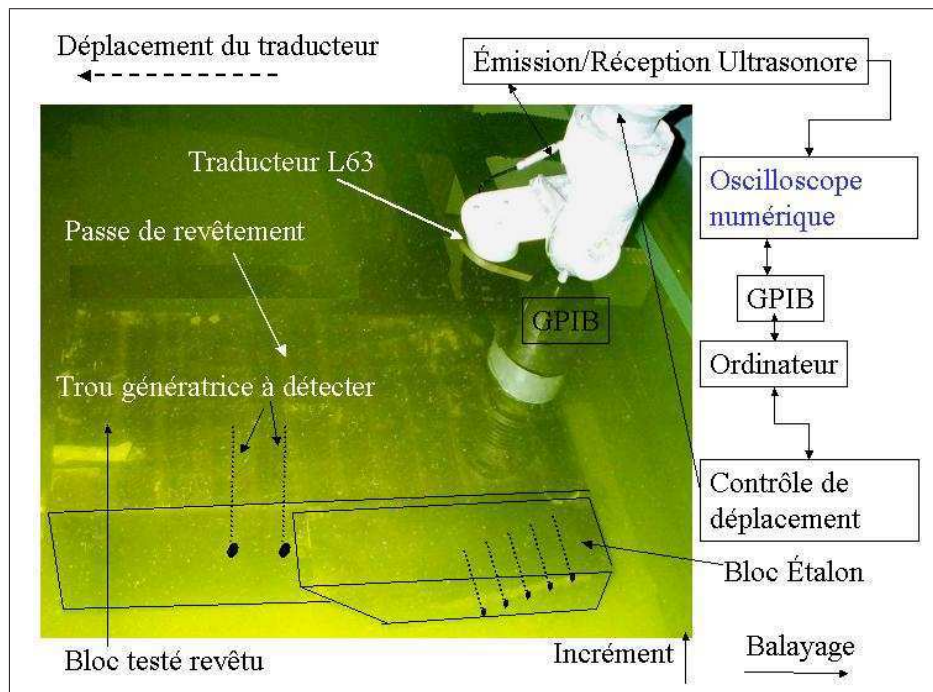


FIG. 4.5 – Représentation schématique du montage expérimental dans le cas d’un contrôle selon génératrice.

place le bloc d’étalonnage à côté du bloc testé, de façon à orienter l’axe des

trous génératrices perpendiculairement au plan d'incidence du traducteur L63°. On mesure précisément le positionnement relatif des deux blocs, dans les deux directions. De plus, on dispose les deux blocs de façon à ce que leur surfaces soient à peu près à la même hauteur moyenne. On effectue d'abord une acquisition à l'aide du traducteur L0°, puis du traducteur L63° dans le sens de tir considéré. Cette procédure est inutile lorsque l'on travaille avec la platine de contrôle industrielle car on connaît à la fois le positionnement des blocs et de tous les traducteurs en toute position. Par convention, pour les expériences réalisées au laboratoire, la direction de déplacement du traducteur L63° perpendiculaire à l'axe des trous génératrices du bloc d'étalonnage est appelée direction de balayage. La direction de l'axe de ces mêmes trous génératrices est appelé axe des incréments.

Contrôle de surface des blocs par un traducteur L0°. La première étape de la procédure expérimentale est le relevé L0° de la surface du bloc d'étalonnage et du bloc testé. La hauteur d'eau du traducteur L0° est choisie égale à 310 mm, comme pour la configuration industrielle. On effectue des acquisitions sur chacun des deux bloc, sur deux lignes de balayage distantes de 30 mm environ. On est capable ainsi de contrôler très précisément l'horizontalité des deux blocs et ce dans les deux directions.

On souhaite de plus connaître précisément les altitudes relatives des surfaces du bloc d'étalonnage et du bloc testé. En effet, le déplacement du traducteur entre le bloc étalon et le bloc testé est réalisé à altitude constante. La connaissance des différences d'altitude entre les deux blocs en tout point donne une information sur les paramètres de simulation liés à la hauteur du traducteur à entrer dans les calculs, (paragraphe 4.1.1). Il suffit de comparer les temps de vol de l'écho de surface du bloc d'étalonnage et de celui du bloc reconstruit à la position voulue. Connaissant la vitesse dans l'eau, on détermine les différences exactes d'altitude entre la surface du bloc étalon et celle du bloc traité.

Après avoir étudié le positionnement des blocs, on expose la façon de positionner le traducteur L63° par rapport à ceux-ci.

Positionnement du traducteur L63°

L'angle d'incidence du traducteur L63° de 12,94° par rapport au bloc d'étalonnage est fixé grâce à un clinomètre. De plus, on règle la hauteur du centre de la pastille de façon à obtenir une hauteur d'eau sur ce même bloc de 320 mm. Connaissant la différence d'altitude entre le bloc d'étalonnage et la moyenne du profil dans le sens des balayages et sachant que le déplacement du traducteur s'effectue à altitude constante, on détermine la hauteur du traducteur par rapport au profil de la pièce.

On ne mesure pas explicitement la position de balayage initiale du traducteur L63°. Celle-ci est choisie de manière à effectuer un balayage couvrant toute la zone où des échos sont reçus par le traducteur L63°. C'est la procédure d'étalonnage, décrite ci-dessous, qui permet d'obtenir cette information.

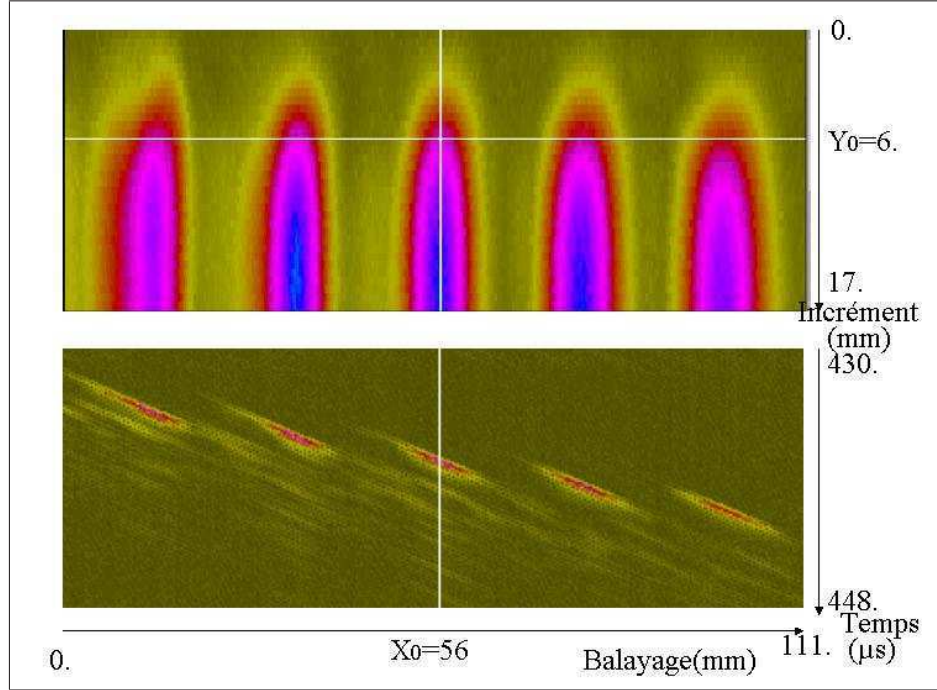


FIG. 4.6 – a) Cscan de l'acquisition du bloc étalonnage. b) B-scan correspondant à l'incrément Y_0 .

La position de référence selon l'incrément du traducteur est déterminée par la mesure de la chute à mi-hauteur de l'amplitude de l'écho d'un trou génératrice du bloc étalonnage, (figure 4.6). On choisit le trou génératrice de plus forte amplitude. On se place au balayage X_0 correspondant à ce maximum de détection A_0 et on effectue un déplacement en incrément du traducteur jusqu'à obtenir un écho d'amplitude $\frac{A_0}{2}$, à l'incrément Y_0 . Cet incrément correspond à la fin du trou génératrice, que l'on connaît par ailleurs. On peut ainsi recalibrer les positions en incrément du traducteur $L63^\circ$ et des blocs. Comme on le verra au paragraphe 4.3.1, il est primordial d'obtenir une bonne précision de cette mesure, surtout dans la configuration selon courbure, car elle détermine la position du point d'impact du traducteur $L63^\circ$ selon l'axe des perturbations du profil. Dans le cas selon génératrice, cette précision est moins critique car le problème est invariant dans la direction des incréments. On montre figure 4.6 un Cscan correspondant à la détection des trous génératrices du bloc étalonnage, ainsi que le B-scan correspondant à l'incrément de la fin des trous génératrices.

4.1.2 Étalonnage du traducteur $L63^\circ$

Dans le cadre des expériences réalisées au laboratoire, la procédure d'étalonnage vise à déterminer, outre le décalage temporel entre la simulation et l'expérience, l'angle d'incidence réel du traducteur $L63^\circ$, ainsi que sa position selon l'axe des abscisses.

4.1. VALIDATION EXPÉRIMENTALE EFFECTUÉE AU LABORATOIRE

Cette procédure, qui s'appuie sur la simulation ultrasonore, est effectuée avant le traitement de chacun des deux blocs et pour chaque sens de tir. Les grandes lignes de la méthode d'étalonnage ont été décrites au paragraphe 3.1.1 pour le cas d'acquisitions réalisées avec la platine de contrôle. Outre le décalage temporel, on souhaite utiliser cette procédure également dans le but de déterminer de manière très précise l'angle d'incidence réel du traducteur L63°, ainsi que sa position selon l'axe des abscisses. Ces paramètres sont considérés comme connus lorsque l'on dispose de la platine. On montre ici les résultats correspondant aux plus grands écarts obtenus avec les valeurs nominales de hauteur d'eau et d'angle d'incidence.

Principe de la méthode

On effectue une acquisition des échos renvoyés par les trous génératrices du bloc d'étalonnage. On se sert de la comparaison entre les positions des maxima de ces échos obtenus en simulation et expérimentalement. La vitesse des ondes ultrasonores dans l'eau et dans le bloc d'étalonnage, sa géométrie et la position des trous génératrices (de diamètre 2 mm) étant connues, on simule l'écho en déplaçant le traducteur parallèlement à la surface. On étudiera au paragraphe 4.3.1 l'influence d'une erreur sur la hauteur d'eau retenue. L'angle d'incidence entré en paramètre de la simulation est celui mesuré : 12,94°. Ainsi, on dispose d'un premier B-scan simulé modélisant l'expérience. On peut calculer le décalage en abscisse entre la simulation et les données expérimentales et ce pour chaque trou utilisé. Les résultats obtenus pour chaque trou sont indiqués dans la première colonne du tableau 4.3.

Profondeur du trou(mm)	ΔX (mm) $\alpha = 12,94^\circ$	ΔX (mm) $\alpha = 12,84^\circ$	ΔX (mm) $\alpha = 12,74^\circ$	ΔX (mm) $\alpha = 12,64^\circ$
16	6,3	5,2	4,1	3,5
20	6,6	5,5	4,4	3,2
24	7,2	6,4	4,9	3,5
28	7,9	6,7	5,2	3,5
32	7,9	6,7	5,2	3,5

TAB. 4.3 – Décalage en abscisse (ΔX) entre les maxima des échos simulés et expérimentaux pour différents angles d'incidence

Mesure de l'angle d'incidence réel. On constate que le décalage en abscisse entre expérience et simulation dépend de la profondeur, ce qui signifie que l'angle d'incidence α utilisé dans la simulation n'est pas correct. Dans l'optique de déterminer plus précisément l'angle d'incidence réel du traducteur, on relance un calcul d'écho des trous génératrices en utilisant un angle différent, jusqu'à obtenir un écart entre simulation et expérience non monotone. Cette méthode permet donc de déterminer précisément l'angle d'incidence du traducteur L63°. On constate que l'écart avec les simulations

se réduit, pour être pratiquement constant pour un angle $\alpha = 12,64^\circ$. On considère donc que l'angle d'incidence réel dans ce cas est de $12,64^\circ$. Cette écart de $0,3^\circ$ par rapport à la valeur nominale est due à un alignement imparfait des pièces fixant le traducteur. Elle correspond au plus grand écart obtenu pour toutes les expériences menées. La figure 4.7 montre la comparaison entre ce B-scan simulé (a) et le B-scan expérimental (b). La figure 4.7c montre la comparaison des courbes échodynamiques du B-scan simulé en blanc et du B-scan expérimental en rouge, une fois recalés en abscisse. Les lignes de faible amplitude reçues à des temps légèrement supérieurs aux échos principaux correspondent aux échos transverses provenant des trous génératrices.

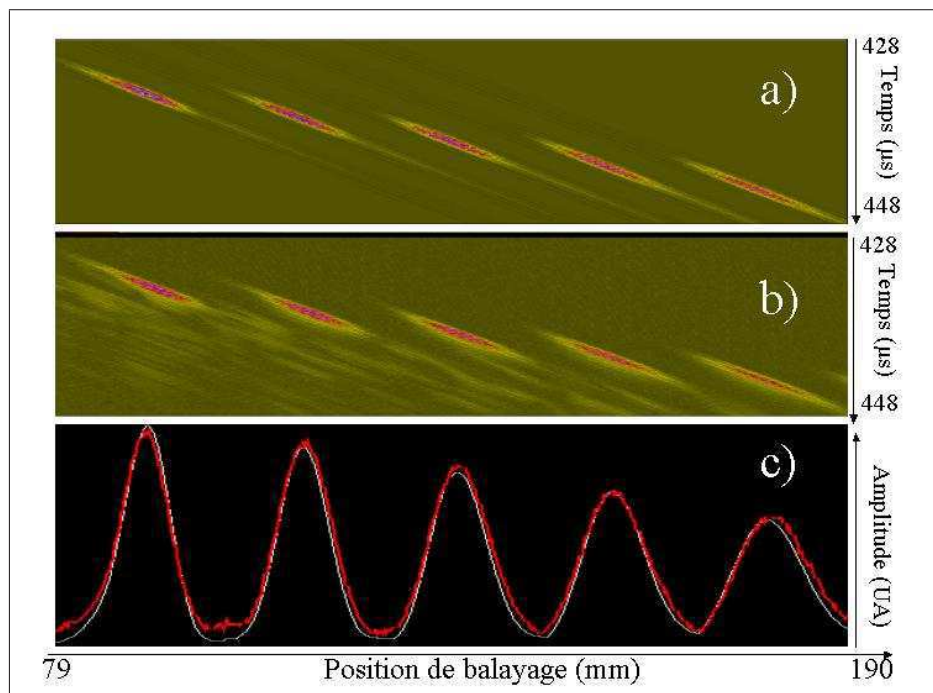


FIG. 4.7 – a) B-scan simulé des échos du bloc étalonnage. b) B-scan expérimental des échos du même bloc. c) Comparaison des courbes échodynamiques du B-scan simulé (en blanc) et du B-scan expérimental (en rouge).

Recalage spatial du traducteur. On utilise l'écart moyen entre simulation et expérience obtenu en utilisant le bon angle d'incidence pour la simulation. Dans le cas des résultats du tableau 4.3, le décalage à appliquer aux acquisitions pour les comparer aux simulations est de 3.46 mm. Connaissant les positions relatives du bloc d'étalonnage et du bloc testé, on détermine l'abscisse du traducteur sur le bloc d'étalonnage et on en déduit sa position sur le bloc testé.

On connaît donc maintenant le véritable angle d'incidence du traducteur à prendre en compte dans tous les calculs lancés ultérieurement. On connaît également le décalage en abscisse entre le point d'impact indiqué

4.1. VALIDATION EXPÉRIMENTALE EFFECTUÉE AU LABORATOIRE

par l'acquisition et le point d'impact réel. Il ne reste plus qu'à déterminer le décalage temporel du traducteur, de la même manière qu'avec la platine de contrôle (voir paragraphe 3.1.1).

Calcul du décalage temporel du traducteur L63°

Le décalage temporel est l'écart entre les temps expérimentaux et simulés (voir paragraphe 3.1.1). Cet écart est dû au fait que l'on ne connaît pas précisément l'origine temporel des signaux. On peut se reporter au pour plus de détails concernant cette grandeur. Ce décalage temporel est obtenu en effectuant la différence entre les temps expérimentaux et simulés des maxima des échos de chaque défaut traité. La simulation est effectuée avec l'angle d'incidence déterminé précédemment (12,64°). On montre les résultats obtenus au tableau 4.4.

Profondeur du trou(mm)	Ecart temporel (μs)
16	2,29
20	2,32
24	2,3
28	2,25
32	2,28

TAB. 4.4 – Décalage en temps entre les maxima des échos simulés et expérimentaux

La valeur choisie pour le décalage temporel est dans ce cas de $2,29\mu s$. La valeur moyenne des écarts temporels trouvés est de $\pm 0,04$. Connaissant à la fois la position du traducteur et le décalage temporel, on peut exploiter les résultats expérimentaux obtenus sur le bloc testé. On montre dans la partie suivante le traitement par la méthode de repositionnement d'un bloc homogène à surface complexe.

4.1.3 Expérience menée sur le bloc homogène isotrope de surface complexe

On cherche ici à appliquer la méthode sur un bloc de surface complexe, en s'affranchissant de l'anisotropie. Dans cette partie, toutes les expériences ont été réalisées dans la configuration selon génératrice. La figure 4.8 montre de façon schématique les résultats obtenus pour le sens de tir considéré. La figure 4.8a) montre une représentation schématique du bloc homogène. Notons que les échelles verticales et horizontales ne sont pas les mêmes. La figure 4.8b) montre le B-scan obtenu lors du déplacement du traducteur L63° , celui-ci étant orienté de la droite vers la gauche.

Résultats de la méthode de repositionnement

On a appliqué la méthode complète aux acquisitions effectuées avec ce bloc homogène isotrope. On a appliqué les méthodes "iso-temps" et "fais-

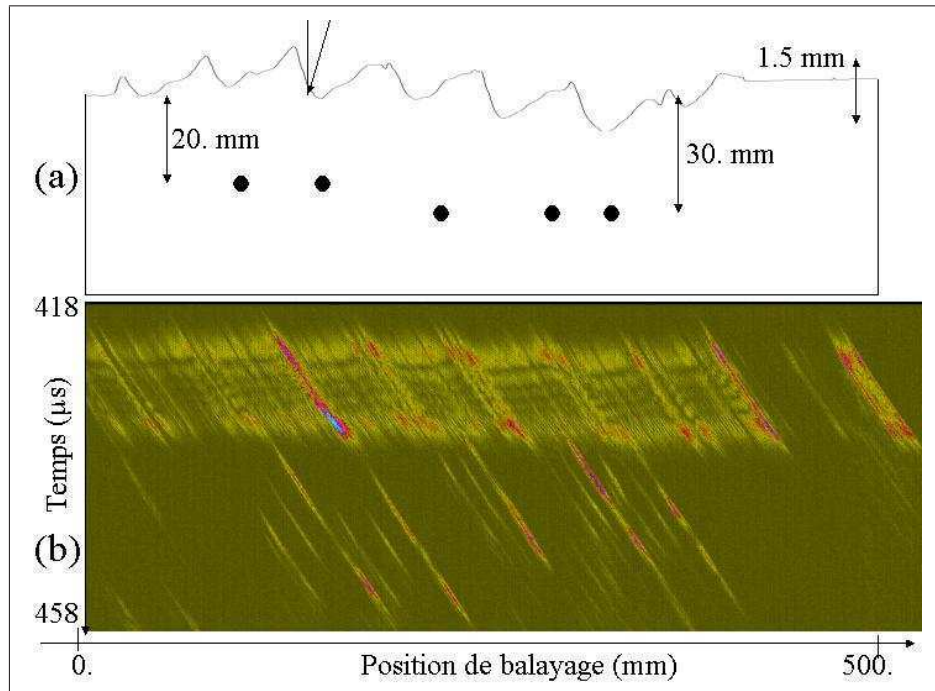


FIG. 4.8 – a) Représentation schématique du bloc homogène isotrope homogène incluant les positions des trous génératrices. b) B-scan expérimental obtenu.

ceau". L'échantillonnage spatial de la zone de calcul de champ est de 0,2 mm. On ne pourra donc pas s'attendre à une précision meilleure en profondeur. De plus, le contrôle a été réalisé dans les deux sens de tir. Le sens de tir donnant les échos les plus chahutés est traité. On montre les résultats dans les tableaux 4.5, 4.6, 4.7, ci-dessous, où l'on donne pour chaque défaut et chaque mode détecté (respectivement le mode LL, TT et LT), le nombre de segments obtenus, ainsi que l'écart en abscisse ΔX et en profondeur ΔZ entre la position réelle et celle obtenue par la méthode.

Numéro et profondeur du défaut (mm)	Nombre de segments	ΔX iso-temps (mm)	ΔZ iso-temps (mm)	ΔX Faisceau (mm)	ΔZ Faisceau (mm)
Défaut n°1 ; 30,15	2	-0,1	1	-0,7	0,5
Défaut n°2 ; 30	3	-0,6	0	-0,3	0,1
Défaut n°3 ; 20,15	2	-1,6	-1,8	3,1	4,1
Défaut n°4 ; 20,35	2	-0,2	0,8	-0,1	0,2
Défaut n°5 ; 20,3	2	-0,5	0,6	-0,6	0,6

TAB. 4.5 – Résultat de la méthode de repositionnement pour les 5 génératrices du bloc détectées en mode LL.

4.1. VALIDATION EXPÉRIMENTALE EFFECTUÉE AU LABORATOIRE

Numéro et profondeur du défaut (mm)	Nombre de segments	ΔX iso-temps (mm)	ΔZ iso-temps (mm)	ΔX Faisceau (mm)	ΔZ Faisceau (mm)
Défaut n°1 ; 30,15	2	0,1	0,2	-1,1	-0,4
Défaut n°2 ; 30	2	-0,8	-0,8	-1,3	-0,9
Défaut n°3 ; 20,15	2	-1,5	-0,6	1	0,7
Défaut n°4 ; 20,35	1	-1,6	-0,8	-3,7	-1,6
Défaut n°5 ; 20,3	2	1	1	-0,2	-0,1

TAB. 4.6 – Résultat de la méthode de repositionnement pour les 5 génératrices du bloc détectées en mode TT.

Numéro et profondeur du défaut (mm)	Nombre de segments	ΔX iso-temps (mm)	ΔZ iso-temps (mm)	ΔX Faisceau (mm)	ΔZ Faisceau (mm)
Défaut n°1, 30,15	1	0,4	1	0,7	0,4
Défaut n°2, 30	1	1,2	1,2	-1,5	1
Défaut n°3, 20,15	2	1,2	0,8	-0,6	0,9
Défaut n°4, 20,35	1	-2	-0,8	1,3	0,8
Défaut n°5, 20,3	1	2,2	2	1,4	0,6

TAB. 4.7 – Résultat de la méthode de repositionnement pour les 5 génératrices du bloc détectées en mode LT.

Discussion

On rappelle que, dans le cadre de l'application industrielle, on vise une précision de l'ordre de 1 à 2 mm. On constate que la méthode "Iso-temps" permet de satisfaire ces exigences compatibles dans les conditions d'essais effectives, sauf concernant le positionnement de l'écho LL du défaut n°3, ainsi que pour celui de l'écho LT du défaut 5. Le mauvais positionnement du défaut 3 détecté en mode LL est dû à l'interaction entre l'écho de surface et un des segments issu de ce défaut et de ce mode, comme on le montre au paragraphe suivant. Cette interprétation est corroborée par le fait que le positionnement de ce défaut en mode LT et TT est correct.

De plus, la méthode de positionnement des échos issus de modes transverses donne de bons résultats, même s'ils sont moins précis qu'en mode LL. Notons que, du fait de l'atténuation des ondes transverses dans le revêtement (voir paragraphe 1.7.2), les modes transverses sont de faible amplitude.

La méthode de repositionnement a été appliquée en considérant que l'écho proche de la surface fait partie de l'écho de surface. On a donc mis en oeuvre la méthode en considérant que l'écho du défaut n°3 en mode LL ne donne qu'un seul écho. L'écart de positionnement obtenu est alors de -1,3 mm en profondeur et de -0,8 mm en abscisse. De manière attendue, le fait de ne pas prendre en compte l'écho problématique améliore de manière sensible les performances de l'algorithme.

La précision obtenue avec la méthode iso-temps est généralement meilleure qu'avec la méthode faisceau, ce qui constitue un résultat attendu. On rappelle que la méthode "Faisceaux" suppose que le maximum de l'écho correspond à une portion du capteur pour laquelle le défaut intercepte l'axe des maxima du faisceau. Les cas où la précision de la méthode "Faisceaux" est moins bonne que la méthode "Iso-temps" correspondent aux cas où cette hypothèse n'est pas vérifiée. Cela se produit lorsque la surface induit des variations importantes du faisceau transmis d'une position à l'autre du capteur. Plus rarement, on peut aussi obtenir une précision de la méthode meilleure avec la méthode "Faisceaux" qu'avec la méthode "Iso-temps". Cela peut être expliqué par les erreurs et approximations effectuées par la méthode (voir paragraphe 4.3 et 4.4). On confirme ainsi que l'utilisation de la méthode "faisceau" à des cas où la surface n'est pas régulière est dangereuse, car elle peut mener à des erreurs importantes.

Dans le paragraphe suivant, on explique le mauvais positionnement du défaut 3 en mode LL par le mélange de l'écho de surface et de l'écho du défaut.

Influence de l'écho de surface

On montre figure 4.9 les acquisitions liées à la détection du défaut 3 (situé à 20 mm sous la surface du revêtement). La figure 4.9a) montre que le B-scan expérimental du défaut 3 est situé en partie dans une zone où l'écho de surface est important. La ligne blanche horizontale correspond à la limite temporelle de présence possible de l'écho de surface. La figure 4.9b compare les B-scan segmentés expérimentaux, simulés en 3D avec une ligne brillante (en rouge) et en 2D à l'aide d'un défaut ponctuel (en vert). On constate que les temps de vol sont reproduits convenablement. Enfin, la figure 4.9c compare les échodynamiques des deux B-scan simulés, ainsi que du B-scan expérimental. On constate que la simulation ne rend pas compte correctement de l'écho expérimental. La comparaison entre les résultats 2D et 3D montre que l'approximation bidimensionnelle n'est pas en cause. Si la position de l'écho principal est prédite avec une erreur de l'ordre du millimètre, l'écho secondaire est positionné avec une erreur de 5 mm. Cela est dû aux interférences pouvant se produire dans la zone située au-dessus du trait blanc. Cette zone correspond à la partie située aux abscisses inférieures à X_0 . Le modèle direct étant mal prédit, l'erreur commise lors du choix du point sera donc importante.

4.1.4 Expérience menée sur un bloc revêtu à surface complexe

Dans cette partie, on montre les résultats de la méthode appliquée au bloc revêtu, de surface irrégulière. Les acquisitions ont été réalisées dans les deux configurations (selon courbure et selon génératrice) et pour les deux sens de tir.

Comme on l'a vu au paragraphe 1.7.2, on ne dispose pas d'échos issus de mode transverse. On traite donc ici uniquement les défauts détectés en mode

4.1. VALIDATION EXPÉRIMENTALE EFFECTUÉE AU LABORATOIRE

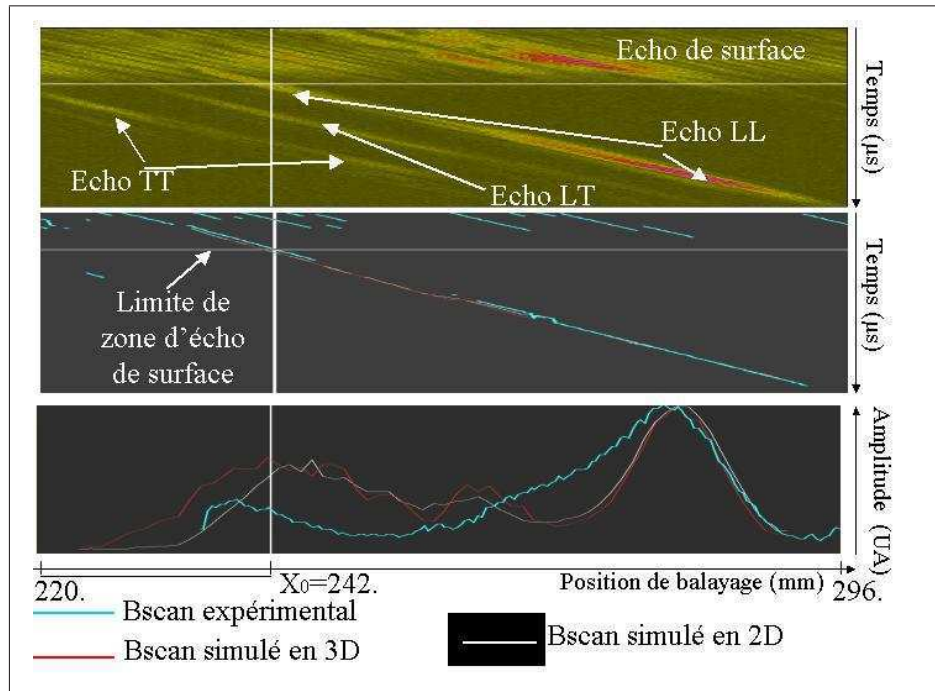


FIG. 4.9 – a) B-scan expérimental du défaut 3. b) Comparaison des B-scan segmentés correspondant au B-scan expérimental et aux B-scan simulés en 2 et 3 dimension. c) Comparaison des courbes échodynamiques de ces mêmes B-scan.

LL. Les tableaux 4.8 et 4.9 montrent les erreurs commises sur chacun des trous génératrices et ce dans les deux sens de tir et les deux configurations. Dans la configuration selon génératrice, on a utilisé la méthode "Iso-temps". Dans le cas d'un contrôle selon courbure, on n'a pas indiqué le nombre d'écho car il n'y en a qu'un à chaque fois. Dans cette configuration, le contrôle dépend de la position du capteur par rapport au profil irrégulier. On a donc lancé la méthode pour deux positions différentes, indiquées dans le tableau 4.9 par les notations Bal1 et Bal2.

Numéro et profondeur du défaut (mm)	Nombre d'échos sens +	ΔX (mm)	ΔZ (mm)	Nombre d'échos sens -	ΔX (mm)	ΔZ (mm)
Défaut A, 20	1	0,6	0,2	1	1,4	-0,5
Défaut B, 20	1	0,6	0,4	2	1,2	-0,3
Défaut C, 30	2	0,1	-0,2	1	-0,2	-0,3
Défaut D, 30	2	-0,2	-0,5	1	-0,5	-0,1

TAB. 4.8 – Résultat de la méthode de repositionnement pour les 4 génératrices du bloc détectée en mode LL dans la configuration selon génératrice.

On constate que dans les deux cas de figure, les résultats donnés par la

Numéro, profondeur et balayage du défaut(mm)	ΔX	ΔZ	ΔX	ΔZ
	(mm) Sens +	(mm) Sens +	(mm) Sens -	(mm) Sens -
Défaut E, 15 mm,Bal1	0,4	-0,2	1,1	0,2
Défaut F, 25 mm,Bal1	0,7	-0,3	0,4	-0,3
Défaut E, 15 mm,Bal2	0,2	-0,3	1,1	0,2
Défaut F, 25 mm,Bal2	-1	-0,7	-0,1	-1,2

TAB. 4.9 – Résultat de la méthode de repositionnement pour les 4 génératrices du bloc détectée en mode LL dans la configuration selon courbure, à deux positions de balayage distinctes (Bal1 et Bal2).

méthode sont proches des positions réelles des trous génératrices.

4.2 Résultats obtenus avec la platine de contrôle

Des acquisitions ont été réalisées sur deux blocs cylindriques de rayon 1994 mm, à l'aide de la platine de contrôle complète, de façon à reproduire exactement la configuration de contrôle sur site. La surface d'un des deux blocs a été meulée afin de supprimer les irrégularités dues au dépôt. On dispose ainsi de résultats sur un bloc de surface régulière et irrégulière. On s'intéresse dans cette partie tout d'abord aux résultats obtenus lors de l'étalonnage des traducteurs L63°. La méthode utilisée pour déterminer l'orientation cristallographique du revêtement est ensuite exposée. On présente les résultats de la méthode obtenus sur les deux blocs.

4.2.1 Étalonnage temporel du traducteur L63°

On a lancé la procédure d'étalonnage en se servant de plusieurs défauts situés dans un bloc de référence : deux trous génératrices à 10 et 25 mm de profondeur ainsi qu'une fente électro-érodée (FEE) de 12 mm de profondeur, dont on a exploité l'écho à plusieurs incréments (Y_0, Y_1, Y_2). Cette procédure a été appliquée aux quatre capteurs, et le cas donnant les plus mauvais résultats en terme d'écart type est détaillé au tableau 4.10. Il s'agit du cas le plus défavorable. Pour ces acquisitions effectuées dans le cadre de la phase de validation, un décalage en abscisse déterminé par la procédure du paragraphe 4.1.2 a dû être appliquée. La valeur d'étalonnage retenue est la valeur moyenne : $5,99 \mu s$; l'écart type concernant cette valeur est de $0,12 \mu s$.

4.2.2 Utilisation de la méthode de positionnement pour mesurer la désorientation cristallographique

La méthode de positionnement de défaut utilise des calculs faisant intervenir la modélisation de la propagation de l'onde dans le revêtement.

4.2. RÉSULTATS OBTENUS AVEC LA PLATINE DE CONTRÔLE

Nature du défaut et profondeur (mm)	Ecart temporel (μs)
FEE ,12, Y_0	6,08
FEE ,12, Y_1	5,9
FEE ,12, Y_2	5,95
Trou ,10	5,91
Trou ,25	6,12

TAB. 4.10 – Décalage en temps entre les maxima des échos simulés et expérimentaux

La propagation dans ce milieu dépend des constantes élastiques le caractérisant, ainsi que de son orientation cristallographique qui peut varier de $+15^\circ$ à -15° par rapport à la verticale (voir annexe A), dans le plan perpendiculaire aux irrégularités de surface ². Lors des contrôles effectués sur site, l'orientation cristallographique est inconnue et on suppose connues les constantes élastiques du matériau (données par le tableau A.1 de l'annexe A). On se propose de déterminer cette orientation, ne pouvant pas effectuer de prélèvement du revêtement sur site pour la mesurer en laboratoire. Cette technique s'appuie sur le positionnement d'un défaut effectué dans les deux sens de tir, dans la configuration selon courbure ³ La connaissance de la position réelle du défaut n'est pas ici nécessaire. On lance la méthode de repositionnement, en prenant en compte différentes orientations cristallines possibles (entre 15° et -15°). On obtient donc, pour chaque sens de tir et chaque orientation du cristal, une position de défaut. On a testé cette méthode à partir d'acquisitions réalisées sur le bloc revêtu traité au paragraphe 4.1.4, dans le but de tester sa précision sur un bloc dont l'orientation cristalline est connue. Le tableau 4.11 montre les différences de position obtenues entre les deux sens de tir, pour le traitement d'un trou génératrice (localisé par l'étoile bleue) de ce bloc dans la configuration selon courbure. La vraie orientation du cristal minimise l'écart entre les deux positions obtenues pour chaque sens de tir.

$\alpha(^\circ)$	14°	11°	8°	5°	2°	-1°	-4°	-7°	-11°	-14°
D(mm)	1,7	1,1	0,5	0,5	0,7	1,5	1,8	2,5	3,2	3,5

TAB. 4.11 – Distance entre les positions obtenues pour les deux sens de tir en fonction de la désorientation cristallographique de la couche.

Sur l'exemple considéré, on trouve une orientation cristalline de $6,5^\circ \pm 3^\circ$, ce qui est en bon accord avec le résultat de la mesure de 8° (voir paragraphe 4.1.1). Cette information peut de plus être moyennée sur plusieurs défauts, afin de réduire l'erreur effectuée.

²Voir paragraphe 4.5 pour une étude de l'influence de ce paramètre sur le positionnement de défaut

³Seule cette configuration est sensible à l'orientation cristallographique.

4.2.3 Résultats obtenus sur le bloc revêtu meulé

La méthode de positionnement a été appliquée à des acquisitions réalisées sur un bloc revêtu dont la surface a été meulée dans la configuration "selon courbure". Les défauts présents dans le composant sont ici des fentes électro-érodiées (FEE) d'épaisseur 0,3 mm. Les fentes ont été contrôlées à plusieurs incréments et dans les deux sens de tir. On montre les résultats respectivement obtenus pour la configuration selon génératrice et selon courbure dans les tableaux 4.12 et 4.13. La surface du composant étant non perturbée, la différence entre ces deux configurations réside dans la différence d'orientation cristallographique du matériau. Chaque tableau montre les écarts de positionnement en profondeur entre la profondeur réelle de la fente et celle donnée par la méthode. L'interface liquide-solide étant régulière, on a utilisé dans toute cette partie la méthode faisceau. La méthode est capable de

Profondeur de la fente(mm)	ΔZ (mm)	ΔZ (mm)
	Sens +	Sens -
12	-0,8	0,1
18	0,1	-0,2
25	-1,2	-0,5

TAB. 4.12 – Écart entre les résultats de la méthode de repositionnement et les positions réelles de trois FEE détectées sous un revêtement de surface non perturbée dans la configuration selon génératrice.

Profondeur de la fente(mm)	ΔZ (mm)	ΔZ (mm)
	Sens +	Sens -
18	-0,5	0,3
25	-0,5	-0,3

TAB. 4.13 – Écart entre les résultats de la méthode de repositionnement et les positions réelles de trois FEE détectées sous un revêtement de surface non perturbée dans la configuration selon courbure.

prendre en compte l'influence du bi-couche régulier dans les deux directions. L'effet de la couche anisotrope est donc correctement pris en compte.

4.2.4 Résultats obtenus sur le bloc revêtu brut de dépôt

Le même contrôle a été effectué sur un bloc revêtu à surface complexe. Les défauts contenus dans le bloc sont également des fentes électro-érodiées dont la profondeur est indiquée avec les résultats dans les tableaux 4.14 et 4.15.

On a donc évalué la précision de la méthode sur des exemples tirés d'acquisitions réalisées dans des conditions réalistes. Les écarts avec les profondeurs réelles sont inférieurs au besoin de l'industriel (1,5 mm).

4.3. ÉVALUATION DES INCERTITUDES DE LA MÉTHODE

Profondeur de la fente(mm)	ΔZ (mm)	ΔZ (mm)
	Sens +	Sens -
18	-0,65	1,1
25	1,25	0,4

TAB. 4.14 – Écart entre les résultats de la méthode de repositionnement et les positions réelles de trois FEE détectées sous un revêtement à surface irrégulière dans la configuration selon génératrice.

Profondeur de la fente(mm)	ΔZ (mm)	ΔZ (mm)
	Sens +	Sens -
18	-0,2	-0,8
25	0,9	1,2

TAB. 4.15 – Écart entre les résultats de la méthode de repositionnement et les positions réelles de trois FEE détectées sous un revêtement à surface irrégulière dans la configuration selon courbure.

Dans la partie suivante, on souhaite évaluer les différentes sources d'incertitude de la méthode.

4.3 Évaluation des incertitudes de la méthode

Dans ce chapitre, on va étudier les différentes sources d'incertitude de la méthode de positionnement de défaut. On s'intéresse tout d'abord aux conséquences des erreurs expérimentales de positionnement du traducteur $L63^\circ$ par rapport au bloc, pour ensuite déterminer l'influence de l'erreur sur les vitesses de propagation. Enfin, les erreurs liées aux pas d'échantillonnage spatial et temporel sont décrites. Dans toute cette partie, la démarche générale pour évaluer l'influence de chaque paramètre est de déterminer tout d'abord l'incertitude sur sa connaissance. On évalue ensuite l'erreur induite par cette incertitude sur un défaut particulier : le défaut n°1 détecté en mode LL du bloc homogène, repositionné au paragraphe 4.1.3. La méthode est successivement lancée en prenant en entrée les deux valeurs extrêmes sur l'intervalle d'incertitude du paramètre. Les erreurs de positionnement sont ainsi estimées en appliquant la méthode à ce défaut et à ce mode en faisant varier le paramètre considéré. On applique cette démarche à l'ensemble des paramètres.

4.3.1 Erreur de positionnement du traducteur

Afin de tester la sensibilité de la méthode à d'éventuelles erreurs de positionnement du traducteur $L63^\circ$ par rapport au composant, on a étudié leur influence sur les résultats de la méthode de positionnement.

Erreur effectuées lors de l'étalonnage

Une erreur lors de l'étalonnage d'un traducteur L63° implique que toutes les mesures réalisées par la suite par le traducteur L63° sont erronées. On décrit les trois sources d'erreur possibles : sur le temps, sur l'angle d'incidence et la position de balayage.

Erreur sur le temps. On souhaite avoir un ordre de grandeur de la sensibilité de la méthode à la précision du calage temporel de la simulation. Une erreur de Δt sur l'écart de temps entre simulation et expérience entraîne un décalage du défaut de \vec{v} ($c\Delta t \sin(r)$, $c\Delta t \cos(r)$), où c est la vitesse du mode considéré dans le bloc et r est l'angle de refraction nominal. Selon le tableau 4.10, lors d'expérience réalisées avec la platine de contrôle, $\Delta T \cong 0,12\mu s$. Dans ce cas, l'erreur de positionnement est de 0,18 mm en ordonnée et de 0,31 mm en abscisse. Concernant l'étalonnage réalisé au laboratoire, l'erreur maximale que nous avons constaté sur le temps correspondant à l'étalonnage du traducteur L63° au paragraphe 4.1.2 est de $0,03\mu s$, valeur du pas d'échantillonnage temporel expérimental. Dans ce cas, l'erreur de positionnement dû à cette incertitude est de l'ordre de 0,04 mm en ordonnée et de 0,08 mm en abscisse.

Erreur sur l'abscisse. On a voulu étudier l'influence d'une erreur concernant ce paramètre sur les résultats de la méthode. Pour cela, on calcule la position du défaut n°1, en décalant le traducteur de 0,3 mm. Cette valeur correspond à l'ordre de grandeur de l'imprécision de la mesure, donné par l'échantillonnage spatial de la mesure. Le décalage du positionnement du défaut obtenu est de 0,25 mm en abscisse et de 0,2 mm en profondeur, cette valeur dépendant du profil. De manière générale, l'erreur commise sur le positionnement en abscisse du traducteur L63° implique un erreur du même ordre sur le positionnement du défaut. La distance entre le B-scan expérimental et le B-scan simulé correspondant au point retenu est plus grande (0,63) lors de ce calcul que lors du calcul effectué avec le bon positionnement (0,33). Cela signifie que le point obtenu ainsi est moins proche de la position réelle que le point obtenu avec le bon positionnement, ce qui est logique.

Erreur sur l'angle d'incidence du traducteur L63°. D'après le tableau 4.3, la précision de mesure de l'angle d'incidence est de l'ordre de $0,1^\circ$. On a donc relancé la méthode de positionnement de défaut pour le trou génératrice n°1, en utilisant les valeurs de l'étalonnage obtenues avec l'angle d'incidence de $12,74^\circ$. Le décalage du positionnement du défaut obtenu est de 0,5 mm en abscisse et de 0 mm en ordonnée. Cette erreur est donc très faible et ne remet pas en cause la validité du calcul.

Erreur liée au positionnement du traducteur L63° avec la platine de contrôle

L'objectif est de déterminer la sensibilité de la méthode par rapport à la hauteur d'eau du traducteur d'eau mesurée par le traducteur L0°. On considère que la vitesse des ultrasons dans l'eau est parfaitement connue. Cette erreur entraîne une méconnaissance du positionnement vertical du traducteur L63° (paragraphe 2.3). Cette mesure de hauteur d'eau est réalisée par l'intermédiaire de deux mesures de temps de vol, effectuées par la méthode du maximum de l'enveloppe. Pour chaque signal, l'incertitude portant sur la détermination du temps est de l'ordre de $0,06 \mu s$. La précision estimée de la mesure de temps est donc de $0,13 \mu s$, ce qui correspond à une erreur de hauteur d'eau de l'ordre de $0,1 \text{ mm}$. Une modification de l'ordonnée (il s'agit de la distance entre le traducteur L63° et l'altitude moyenne de la surface) du traducteur L63° de $0,1 \text{ mm}$ entraîne une modification du résultat de la méthode de $0,35 \text{ mm}$ en abscisse et de $0,18 \text{ mm}$ en profondeur. La méthode est extrêmement sensible à ce paramètre. En effet, une erreur sur la hauteur de la colonne d'eau est amplifiée car la vitesse dans l'eau est environ quatre fois plus faible que dans le solide. Il en résulte une mauvaise prise en compte des temps de vol entraînant un décalage de la courbe "iso-temps" qui ne passe plus par le défaut et donc un mauvais positionnement.

Erreur liée au positionnement du traducteur L63° sans la platine de contrôle

Erreur de positionnement vertical. Lors des expériences réalisées au laboratoire, la hauteur du traducteur L63° est déterminé par une mesure manuelle de son altitude par rapport au bloc d'étalonnage. On peut donc s'attendre à ce que la précision de cette mesure soit de l'ordre du millimètre. On cherche dans cette partie à déterminer les conséquences d'une erreur de mesure de cette altitude de $\Delta Z = 1 \text{ mm}$ sur le positionnement de défaut. Pour cela, on relance la méthode de positionnement complète du défaut 1 en prenant en compte un tel changement de hauteur du traducteur L63°. Les écarts en abscisse obtenus lors de la phase d'étalonnage sont alors décalés de $\Delta Z \tan(\alpha) \cong 0,22 \text{ mm}$ en moyenne. Le traducteur L63° ainsi repositionné aura donc le même point d'impact que celui positionné avec la bonne hauteur d'eau. De plus, les écarts en temps de vol sont modifiés de $\frac{2\Delta Z}{c \cos(\alpha)} \cong 1,38 \mu s$, correspondant à une variation de hauteur d'eau de $\frac{\Delta Z}{\cos(\alpha)}$. Cette erreur de positionnement vertical n'engendre pas de variation significative de la forme du champ dans la pièce car la hauteur d'eau totale du traducteur est de $320 \text{ mm} \gg 1 \text{ mm}$. Lors du calcul de repositionnement, cette différence de hauteur d'eau est compensée par la différence en temps de vol obtenues lors de la procédure d'étalonnage. On peut donc s'attendre à ce que l'effet d'une telle erreur soit très faible. L'application de la méthode de repositionnement pour le défaut n°1 détecté en mode LL prenant en compte une telle erreur, mène à une erreur de positionnement de $0,15 \text{ mm}$ en abscisse et de $0,2 \text{ mm}$ en ordonnée. On considère donc que la procé-

dure expérimentale ne dépend pas sensiblement de la mesure de l'altitude du traducteur L63°.

Erreur de positionnement selon les incréments. L'axe des incréments correspond ici à la direction perpendiculaire au profil irrégulier. Comme on l'a vu au paragraphe 4.1.1, le positionnement du traducteur L63° selon l'axe des incréments est critique uniquement dans le cas selon courbure. La précision de cette mesure est de l'ordre de grandeur de l'échantillonnage spatial de l'acquisition dans cette direction : 0.3 mm. La modification occasionnée par cet incertitude dépend du degrés de perturbation du profil de la surface autour du point d'impact considéré. On a modifié de 0.3 mm l'incrément de détection d'un défaut observé dans la configuration selon courbure. On a choisi un point d'impact situé dans une zone où le profil est très irrégulier. On observe dans ce cas un déplacement du point résultat de la méthode de 0.05 mm en abscisse et de 0.04 mm en profondeur. Cette différence est due à la variation de hauteur d'eau entre les deux incréments considérés, du fait de la surface irrégulière.

Après s'être intéressé aux erreurs liées au positionnement de traducteur proprement dit, on étudie les erreurs provoquées par une mauvaise connaissance des vitesses de propagation des ondes.

4.3.2 Erreur sur les vitesses de propagation

On traite successivement les erreurs liées à la méconnaissance de la vitesse dans le couplant (l'eau), puis dans le bloc inspecté.

Erreur sur la vitesse dans l'eau

Étudions les conséquences d'une erreur sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans l'eau de $3ms^{-1}$, correspondant à une erreur sur la mesure de la température de 1°C.

Erreur sur le positionnement du capteur. Lors de l'application de la méthode de repositionnement avec la platine de contrôle, une erreur sur la mesure de la température de l'eau entraîne un mauvais positionnement vertical du traducteur L63° de l'ordre de 0,6 mm. L'erreur sur le positionnement de défaut est alors de l'ordre de 2,1 mm en abscisse et de 1,1 mm en ordonnée (chapitre 4.3.1).

Erreur liée au calcul de champ et d'écho. Une erreur sur la vitesse dans l'eau engendre une modification des temps de vol dans l'eau, ainsi qu'une mauvaise prise en compte des phénomènes de réfraction à l'interface du fait de l'erreur sur la différence d'impédance acoustique de l'eau et de la pièce. Afin d'évaluer l'erreur due à ces phénomènes indépendamment de l'effet sur le positionnement du capteur, on a réalisé deux séries de calcul, en faisant varier la vitesse dans l'eau de $3ms^{-1}$, sans modifier la position du traducteur. La différence de positionnement observée est de -2 mm en

4.3. ÉVALUATION DES INCERTITUDES DE LA MÉTHODE

abscisse et de -1,2 mm en ordonnée. Une augmentation de la vitesse de propagation dans l'eau entraîne un déplacement vers le bas du défaut détecté, du fait de la réduction du temps de parcours dans l'eau.

Cumul des deux erreurs. On peut donc penser que ces deux erreurs se compensent. Afin de connaître précisément l'influence de la température sur le résultat, on a effectué un calcul de repositionnement en prenant en compte les deux phénomènes simultanément. On a modifié la position du capteur, tout en changeant la vitesse de propagation des ondes dans l'eau. Le positionnement du défaut est alors de (111,4 ; 31,6) au lieu de (111,6 ; 31,6). On constate donc que la précision de la mesure de la température de l'eau n'est pas critique lors de l'utilisation de la méthode, ce qui constitue un avantage. Néanmoins, celle-ci devra être mesurée très précisément lors de l'étalonnage du traducteur L63°, sous peine de commettre d'importantes erreurs de l'ordre celles décrites au paragraphe précédent. Le résultat ne dépend pas de la mesure de température car le trajet de l'onde dans l'eau pour les deux traducteurs est presque égal (310 et 320 mm respectivement pour le traducteur L0° et le traducteur L63°). Positionner un traducteur à une hauteur d'eau de H, avec une célérité du son de c est équivalent à le positionner à une hauteur d'eau de H', avec une célérité $\frac{cH}{H'}$.

Erreur sur la vitesse dans le bloc

Cas du bloc homogène. Dans ce paragraphe, on étudie l'influence d'une erreur concernant la vitesse des ondes ultra-sonores dans l'acier de la cuve sur le positionnement d'un défaut dans un bloc homogène. L'influence de ce paramètre croît bien entendu avec la profondeur du défaut recherché. On a choisi d'étudier son influence sur un défaut situé à 30 mm de profondeur (toujours le défaut 1). On a aussi effectué un calcul de repositionnement en diminuant la vitesse de propagation des ondes L de 60 ms^{-1} , ordre de grandeur de l'incertitude (voir paragraphe 4.1.1). Le défaut n°1 détecté dans un bloc homogène est alors positionné en (111,9 ; 31,2), au lieu de (111,6 ; 31,6). Le contrôle étant effectué de la droite vers la gauche, il est logique de constater que diminuer la vitesse conduit à sous estimer la profondeur du défaut, ainsi que le décaler vers la droite.

Cas du bloc revêtu. Étudions l'influence d'une erreur sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans l'acier de la cuve pour des pièces revêtues. On a simulé la position du défaut pour la configuration selon courbure, en utilisant une pièce régulière revêtue et on a fait varier ce paramètre entre 5800 et 6000 ms^{-1} . Pour les mêmes raisons que celles du paragraphe précédent, on a choisi une indication relativement profonde (autour de 24 mm). Le traducteur tire ici de la gauche vers la droite. La figure 4.10 montre en vert les résultats de positionnement de défaut pour chacune des valeurs de vitesse choisies. De manière surprenante à première vue, on remarque que la profondeur du défaut croît lorsque la vitesse augmente. Afin d'expliquer ce paradoxe, on a utilisé l'approximation de l'acoustique géométrique,

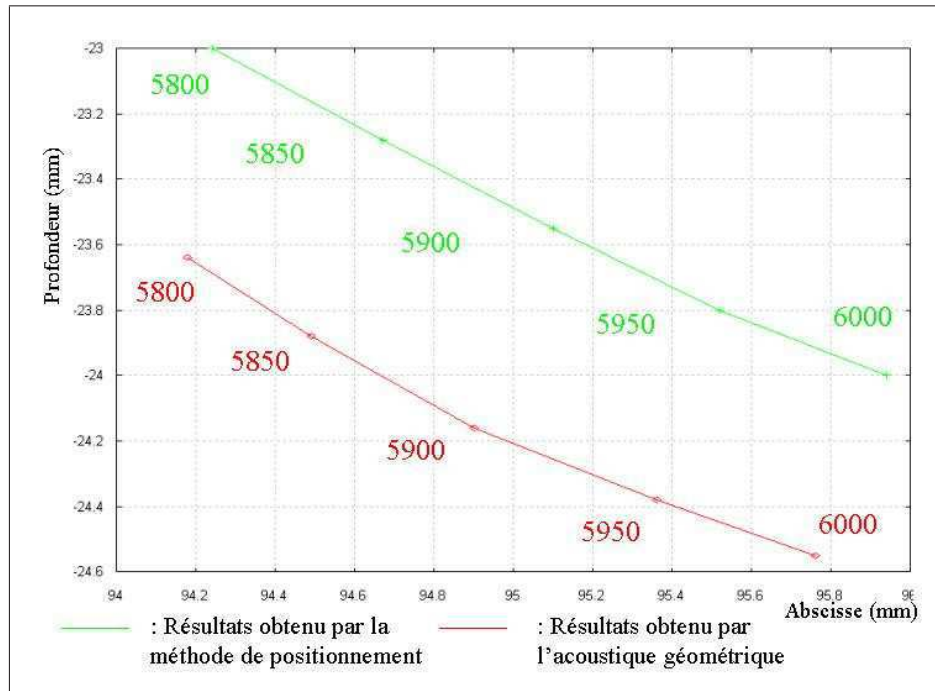


FIG. 4.10 – En vert : Position de défaut trouvé par la méthode dans une pièce revêtue en fonction de la vitesse dans le substrat. En rouge : Position trouvée par l'acoustique géométrique.

en effectuant le suivi d'un rayon acoustique lors de sa propagation dans la couche, puis dans le substrat. Plus de détails sur la méthode considérée peuvent être obtenus au paragraphe 4.5.3. Les variations des positions obtenues en faisant varier la vitesse du substrat correspondent à la variation observée lors des calculs. On a ainsi pu vérifier que ce phénomène est en fait dû à la diminution de l'angle de réfraction dans le substrat lorsque la vitesse dans le substrat diminue.

Erreur sur les caractéristiques du revêtement

Erreur sur l'épaisseur de la couche. La mesure de l'épaisseur de la couche est imprécise en raison de la faiblesse de l'écho à l'interface acier austénitique- acier de la cuve (paragraphe 2.2.3). Afin d'évaluer l'influence de ce paramètre sur le positionnement d'un défaut, on a effectué des calculs de repositionnement d'un défaut détecté à travers une surface non perturbée dans le cas selon génératrice en modifiant l'épaisseur de la couche jusqu'à 1 mm (ordre de grandeur de l'imprécision de mesure). Ces calculs ont été effectués dans la configuration génératrice, en utilisant des pièces munies d'un revêtement de surface régulière d'épaisseur comprise entre 9 et 11 mm. Le traducteur L63° tire de la droite vers la gauche. Le tableau 4.16 montre les variations du positionnement du défaut trouvé en fonction de l'épaisseur de la couche. On peut remarquer que la variation ne dépend pas de la profondeur du défaut recherché.

4.4. ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES DIFFÉRENTES APPROXIMATIONS

Épaisseur du revêtement (mm)	Position en abscisse(mm)	Position en profondeur(mm)
9	199,3	12,95
9,5	199,35	13,1
10	199,4	13,35
10,5	199,4	13,5
11	199,25	13,7

TAB. 4.16 – Position du défaut trouvé par la méthode dans une pièce revêtu en fonction de l'épaisseur du revêtement.

Erreur sur les constantes élastiques du revêtement. On a donné au paragraphe 4.1.1 les incertitudes associées à la mesure des constantes élastiques du revêtement. Afin d'évaluer l'ordre de grandeur de l'imprécision de positionnement causée par ces erreurs, on a effectué un calcul de positionnement pour un défaut, en utilisant les valeurs minimales et maximales des constantes élastiques trouvées. La différence de positionnement entre les deux résultats obtenus est de 0,15 mm en abscisse et de 0,65 mm en profondeur.

4.3.3 Influence de l'erreur due aux échantillonnages

Intéressons-nous aux erreurs entraînées par l'incertitude sur le choix de l'indication ultrasonore, en position de traducteur et en temps, du fait de l'échantillonnage spatial et temporel des acquisitions. En effet, malgré le lissage effectué concernant le choix de l'indication ultrasonore associée à un segment, les incertitudes portant sur la position de balayage et le temps sont de l'ordre respectivement de échantillonnage spatial et temporel. Afin de déterminer la sensibilité de la méthode à ces paramètres, on a effectué la méthode de positionnement sur le défaut 1, en modifiant les positions de balayage, puis les temps d'un échantillon respectivement spatial (0,3 mm) et temporel (0,025 μs). Une erreur sur le temps de détection de 0,025 μs entraîne une modification des résultats de 0,05 mm en profondeur et de 0,1 mm en abscisse. Comme on l'a vu au paragraphe 4.3.1, une erreur sur la position de balayage de 0.3 mm sur les deux indications issues du défaut 1 entraîne une modification des résultats de 0.25 mm en abscisse et de 0.2 mm en profondeur. De plus, les erreurs dues à l'échantillonnage lors de l'expérience et lors de la simulation s'additionnent. C'est pourquoi il est important de réduire les échantillonnages dans les deux cas de figure.

4.4 Évaluation de l'influence des différentes approximations

Cette partie est consacrée à l'étude de l'influence des différentes approximations effectuées lors de la méthode de positionnement de défaut. Dans ce

chapitre comme dans le précédent, on évalue les erreurs commises en utilisant le défaut n°1 détecté en mode LL du bloc homogène, repositionné au paragraphe 4.1.3. On s'intéresse tout d'abord à la validation de la première étape de la méthode, destinée à exhiber un ensemble de points candidats. La sélection de la solution dans cet ensemble s'appuie sur la comparaison entre le B-scan expérimental et les B-scan simulés aux différentes positions possibles. On commence par évaluer la fiabilité des B-scan simulés, puis celle de la procédure de comparaison de B-scan.

4.4.1 Validation de l'algorithme de recherche de points possibles

Étudions maintenant les performances de l'algorithme de recherche de points possibles. Il s'agit de la première étape de la méthode, composée du calcul de champ et de l'application de la méthode "iso-temps". On s'intéressera à l'influence de toutes les approximations effectuées sur les positions résultats obtenues.

Comparaison entre les positions possibles et réelle

On cherche ici à évaluer dans quelle mesure l'algorithme de recherche des points possibles remplit correctement sa fonction qui est de fournir un ensemble de positions possibles pour le défaut dans la pièce incluant la position réelle du défaut. Autrement dit, on cherche à évaluer dans quelle mesure la courbe "iso-temps" passe par la position possible du défaut. On souhaite dans un premier temps évaluer la méthode en s'affranchissant de l'approximation bidimensionnelle du calcul de champ. Pour cela, un calcul de champ tri-dimensionnel a été réalisé (figure 4.11b). La figure 4.11c) montre la comparaison entre les iso-temps ainsi obtenus et la position réelle du défaut, pour le traitement d'un des deux échos issu du défaut n°1 détecté en mode LL. La distance entre la courbe iso-temps obtenue par la méthode (en rouge) et la position réelle du défaut est de 0,34 mm. Les différences observées proviennent de l'ensemble des erreurs décrites au chapitre 4.3.

Validation de l'approximation bidimensionnelle du calcul de champ

On souhaite évaluer l'influence de l'approximation bidimensionnelle effectuée dans le calcul de champ pour le cas selon génératrice, afin d'accélérer le calcul (paragraphe 3.2.1). Dans un premier temps, on compare sur les figures 4.12a et b les résultats obtenus dans une pièce de surface régulière homogène, en effectuant un calcul 2D et 3D. La couleur code le maximum du signal en fonction de la position dans la pièce. On a appliqué à ces deux champs l'algorithme faisceau (figure 4.12c et d). On compare les interpolations polynomiales d'ordre 2 des lois de positionnement $Z(X)$ et $Z(T)$, correspondant, pour chaque profondeur Z , à la position X et au temps du maximum d'amplitude. On constate une bonne correspondance entre les deux résultats jusqu'à une profondeur de 30 mm environ. Les défauts re-

4.4. ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES DIFFÉRENTES APPROXIMATIONS

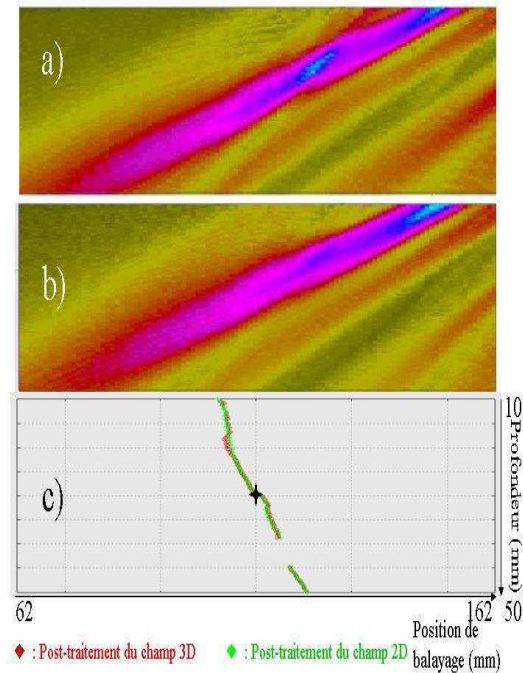


FIG. 4.11 – a) Amplitude du champ ultrasonore en fonction de la position obtenu avec un calcul 2D. b) calculé en 3D. c) Comparaison des iso-temps issus des deux champs. L'étoile noire indique la position réelle du défaut.

cherchés sont compris entre 5 mm et 30 mm, donc cette approximation est justifiée dans le cas d'une surface non perturbée.

En effectuant un calcul du champ dans une zone calculée par l'algorithme de positionnement de zone, la différence de positionnement obtenue entre le cas 2D et 3D est de seulement 0,01 mm en profondeur et de 0,08 mm en abscisse.

Pour évaluer les erreurs dues à cette approximation en présence d'une surface irrégulière (bloc homogène) on calcule le champ en deux et trois dimensions calculé pour une des deux positions associée au défaut n°1. On applique ensuite l'algorithme "iso-temps" à ces deux champs et on compare les positions des points obtenus (figure 4.11a et 4.11b). On constate que le calcul en 2D modifie très peu la courbe iso-temps, puisque la distance moyenne entre les points des deux courbes iso-temps est de 0,1 mm.

Enfin, on évalue l'approximation bidimensionnelle dans le cas revêtu. On montre figure 4.13 la comparaison entre le résultat d'un calcul de champ 2D (figure 4.13a) et 3D (figure 4.13b). La comparaison des courbes "iso-temps" issues des deux champs est donnée figure 4.13c. Dans ce cas, la distance moyenne entre les points des deux courbes "iso-temps" est de 0.25 mm.

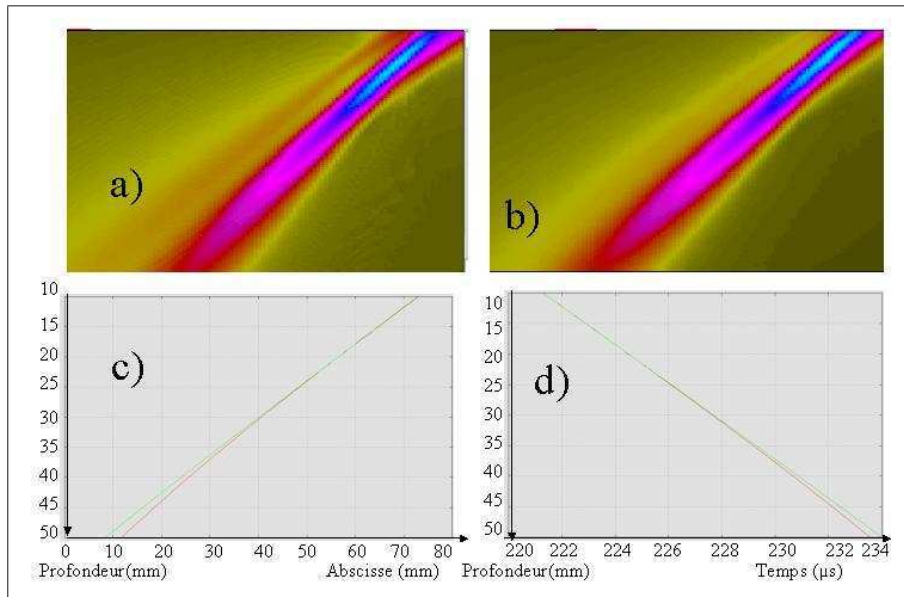


FIG. 4.12 – a) Champ ultrasonore généré par le transducteur L63° à travers une surface non perturbée calculé en 2D. b) calculé en 3D. c) Comparaison de la loi de positionnements $Z(X)$ issues du calcul 2D (en rouge) et 3D (en vert). d) pour $Z(T)$.

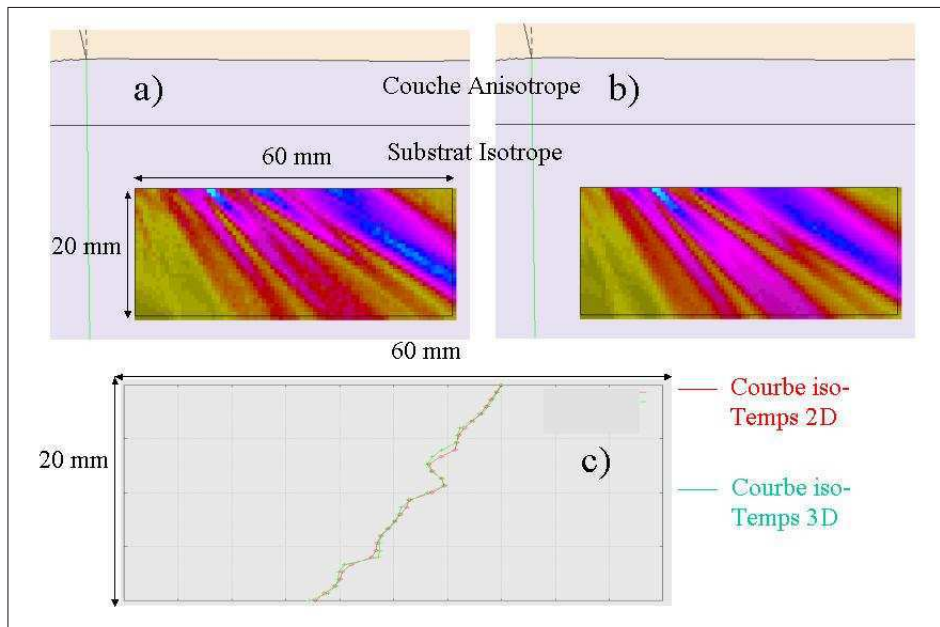


FIG. 4.13 – a) Champ ultrasonore engendré par le transducteur L63° à travers un revêtement de surface complexe calculé en 2D. b) calculé en 3D. c) Courbes "iso-temps" résultat du post-traitement du calcul 2D et 3D.

4.4.2 Validation du calcul de B-scan simulé

Dans cette partie, on montre d'abord qu'un calcul effectué en trois dimensions sur une ligne brillante est capable de simuler correctement l'écho d'un défaut dont on connaît la position. La validation du modèle direct a été effectuée en utilisant des défauts de type trous génératrice. On s'attachera ensuite à évaluer les conséquences des approximations supplémentaires faites dans le cadre de l'application de la méthode.

Validation dans le cas tridimensionnel

Ce paragraphe vise à évaluer les écarts obtenus entre les résultats expérimentaux et simulés en effectuant un calcul d'écho tri-dimensionnel utilisant une ligne brillante positionnée à l'emplacement du défaut considéré. Trois résultats expérimentaux obtenus au laboratoire sont considérées. Le défaut n°1 (paragraphe 4.1.3) est placé dans un bloc homogène à surface irrégulière ; le défaut A et F (paragraphe 4.1.4) sont situés dans un bloc revêtu dont l'état de surface est irrégulier. Les défauts 1 et A sont détectés dans la configuration selon génératrice et le défaut F dans la configuration selon courbure. Ces trois défauts sont des trous génératrices. L'ensemble des figures 4.14 à 4.16 présentées dans ce paragraphe et dans le suivant sont destinées à détailler la comparaison entre deux B-scan. Pour cela, on a choisi à chaque fois de montrer la comparaison entre les échodynamiques (figure a), ainsi qu'entre les B-scan segmentés (figure b).

La figure 4.14 montre la comparaison des échos du mode LL du défaut 1 expérimental et simulé. L'écart temporel moyen le long des segments est de l'ordre de $0,03 \mu s$. La distance entre le B-scan expérimental et le B-scan simulé obtenu est de $0,39 \text{ mm}$. Cette distance correspond à l'erreur causée par les approximations de la réponse d'une génératrice par une ligne brillante, cumulée avec les imprécisions détaillée à la section 4.3. On constate que l'erreur de simulation porte surtout sur les valeurs d'amplitude, ce qui est logique car on a effectué une simplification dans le mode de calcul d'écho (pas de directivité de la réponse de la fissure). Cette erreur sur les amplitudes n'est pas critique pour l'application de la méthode de comparaison de B-scan car celle-ci ne prend pas en compte les valeurs relatives d'amplitude. Elle se base sur les positions des maxima locaux de l'échodynamique, qui elles sont bien simulées.

Les figures 4.15 et 4.16 montrent les différences entre les échos simulés et expérimentaux respectivement du défaut A, détecté dans la configuration selon génératrice (voir tableau 4.8) et du défaut F, détecté dans la configuration selon courbure (voir tableau 4.9). L'erreur temporelle, obtenu par l'écart temporel moyen entre le B-scan simulé et le B-scan expérimental est de $0,12 \mu s$ pour le défaut A et de $0,05 \mu s$ pour le défaut F. La distance entre le B-scan simulé et le B-scan expérimental est respectivement de $1,97 \text{ mm}$ et de $0,42 \text{ mm}$. L'écart entre simulation et expérience obtenu pour le défaut A est assez importante. Néanmoins, l'erreur finale réalisée lors de l'application de la méthode complète pour ce défaut est de $0,5 \text{ mm}$ en profondeur pour ce sens de tir. Cette erreur est inférieure à la distance entre le

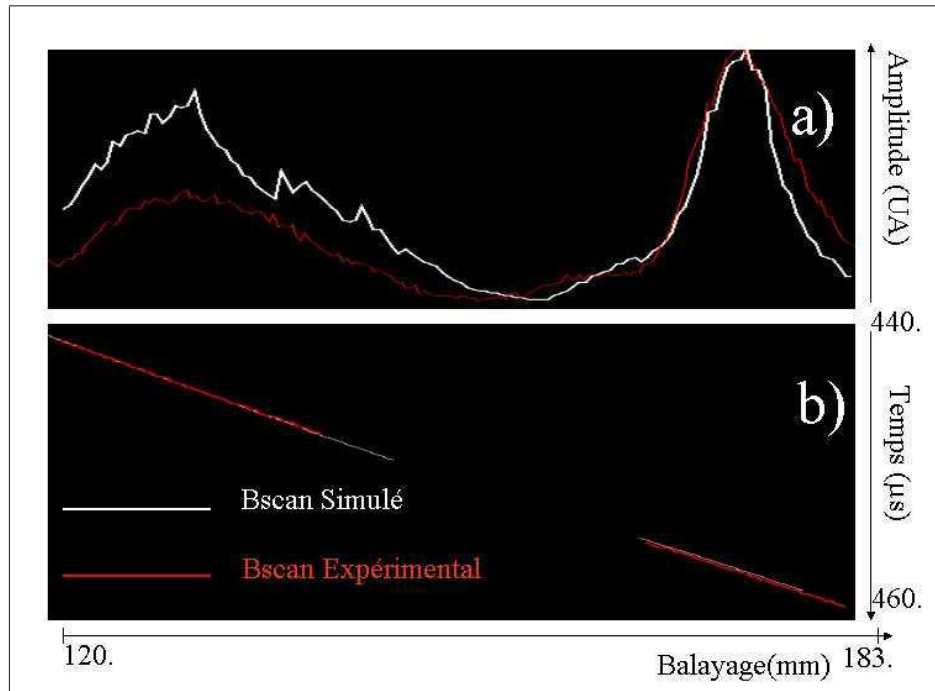


FIG. 4.14 – a) Comparaison des échodynamiques du B-scan expérimental (en blanc) et simulé (en rouge) du défaut n°1 détecté en mode LL. b) Comparaison des B-scan segmentés

B-scan simulé et le B-scan expérimental, car la méthode choisit la position donnant le B-scan le plus proche par rapport à ces voisins.

On va maintenant s'intéresser à l'influence des approximations supplémentaire effectuées sur le calcul d'écho lors de l'application de la méthode.

Conséquences des approximations effectuées

Approximation bidimensionnelle de l'interaction. La première approximation considérée ici consiste à négliger l'extension latérale du défaut, en remplaçant la génératrice ou l'arête de la fissure par sa trace dans le plan d'incidence. On néglige donc l'effet tridimensionnel de l'interaction. La figure 4.17 montre la superposition de deux B-scan simulés obtenus en effectuant en chaque position du traducteur un calcul d'écho obtenu respectivement sur une ligne brillante et sur sa trace dans le plan d'incidence. On constate que la différence entre les deux B-scan, aussi bien en temps de vol qu'en amplitude est faible. L'écart temporel maximal entre les deux résultats est de l'ordre de $0,04 \mu s^4$, les temps du B-scan simulé avec une ligne étant plus élevés. Cela est logique car les temps de vol des rayons hors du plan d'incidence sont légèrement plus élevés ceux situés dans ce plan. Cette approximation est donc valide.

⁴Quelques échantillons temporels

4.4. ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES DIFFÉRENTES APPROXIMATIONS

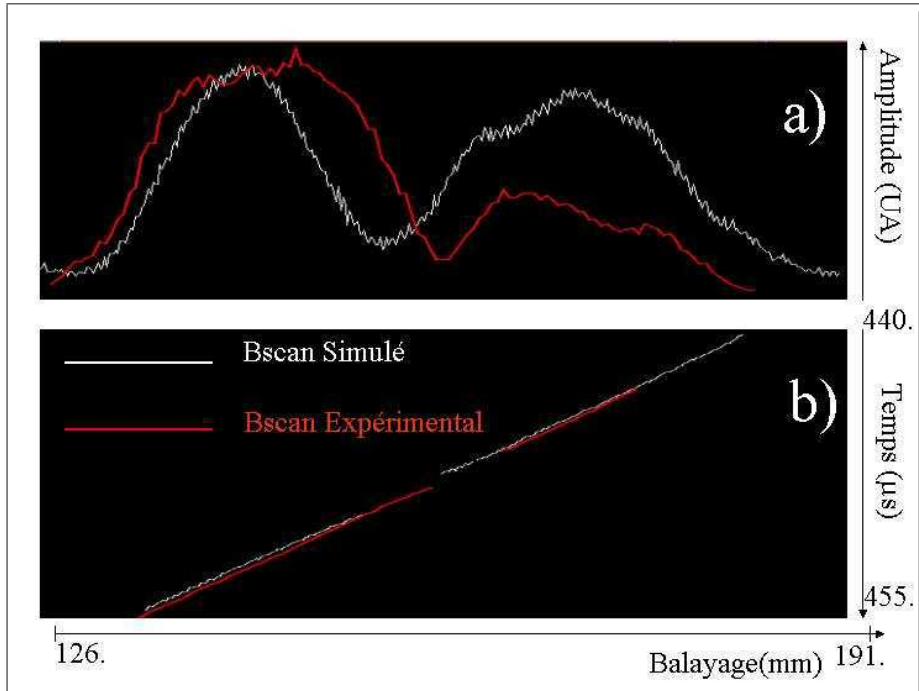


FIG. 4.15 – a) Comparaison des échodynamiques du B-scan expérimental (en blanc) et simulé (en rouge) du défaut A détecté en mode LL. b) Comparaison des B-scan segmentés

Approximation bidimensionnelle pour le champ incident. La deuxième approximation utilisée lors de la simulation d'écho consiste en la réalisation des calculs de champ bidimensionnel en chaque position de transducteur. On souhaite ici évaluer l'effet de cette approximation. Pour cela, on compare (figure 4.18) les résultats de simulation d'échos obtenus d'une part par un calcul 3D sur une ligne brillante et d'autre part par un calcul 2D en un point. La distance entre le B-scan simulé en 2D et le B-scan expérimental est de 0,54 mm, ce qui est légèrement supérieur au cas tri-dimensionnel. La différence temporelle moyenne entre les deux échos est de $0,07 \mu s$.

Conséquences sur le positionnement de défaut. On a cherché à connaître l'effet de chacune des approximations sur le résultat de la méthode de positionnement de défaut. On a donc relancé celle-ci à partir des indications du défaut 1 détecté en mode LL en prenant en compte différents niveaux d'approximation pour le calcul des B-scan simulés. L'approximation n°1, la plus précise, prend en compte un calcul 3D sur une ligne brillante. L'approximation n°2 considère un défaut ponctuel, les calculs étant toujours effectués en 3D. Enfin, l'approximation n°3 prend en compte un défaut ponctuel et un calcul en 2D. Le tableau 4.17 montre les précisions obtenues pour chacune de ces approximations. Notons que le rapport en temps de calcul entre les approximations n°1 et 2 d'une part et 2 et 3 d'autre part est respectivement de 90 et 20.

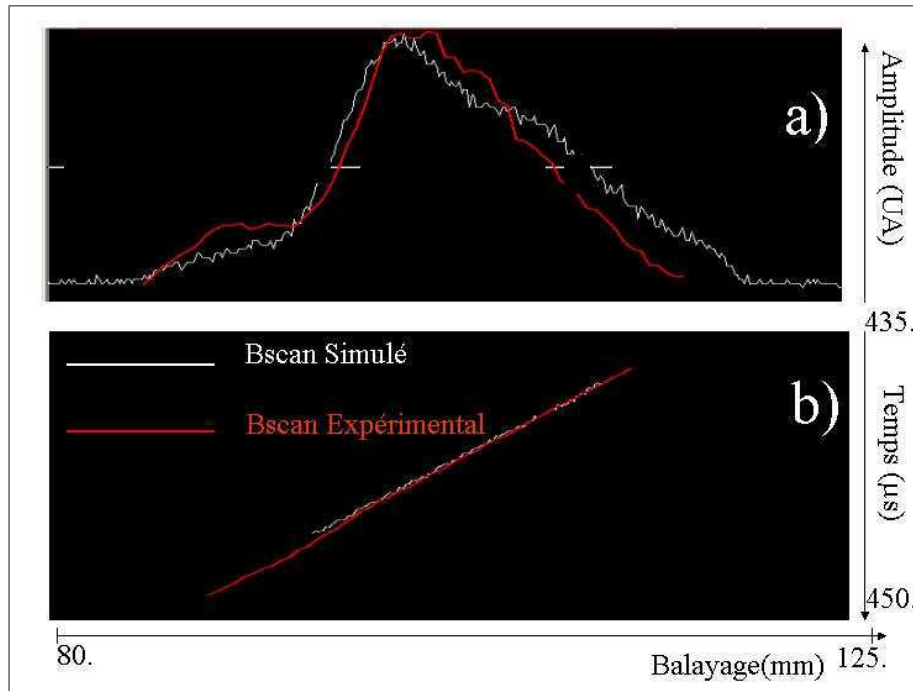


FIG. 4.16 – a) Comparaison des échodynamiques du B-scan expérimental (en blanc) et simulé (en rouge) du défaut F détecté en mode LL. b) Comparaison des B-scan segmentés

Approximation n°	Écart en abscisse(mm)	Écart en profondeur(mm)
1	0,3	0,2
2	0,4	0,6
3	0,1	1

TAB. 4.17 – Écart entre la position réelle du défaut n°1 détecté en mode LL et la position trouvée par la méthode en fonction du degrés d'approximation.

Après avoir validé le calcul de B-scan, on désire valider la méthode de comparaison de B-scan.

4.4.3 Validation de la méthode de comparaison de B-scan

Validation de la méthode sur une pièce plane.

L'objectif est de montrer que la méthode de comparaison de B-scan est capable, dans le cas d'une pièce de surface régulière homogène, de remonter correctement à la distance entre deux positions de défaut dont on a calculé le B-scan simulé. Pour cela, on effectuée la simulation d'écho d'un défaut R placé en (100,20) dans un bloc de surface non perturbée. L'échantillonnage spatial choisi est de 0,1 mm et l'échantillonnage temporel de 50 MHz. Soit S et T deux défauts placés respectivement en (101,20) et en (100,21). On a calculé les B-scan simulés issus des défauts S et T. La distance entre les

4.4. ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES DIFFÉRENTES APPROXIMATIONS

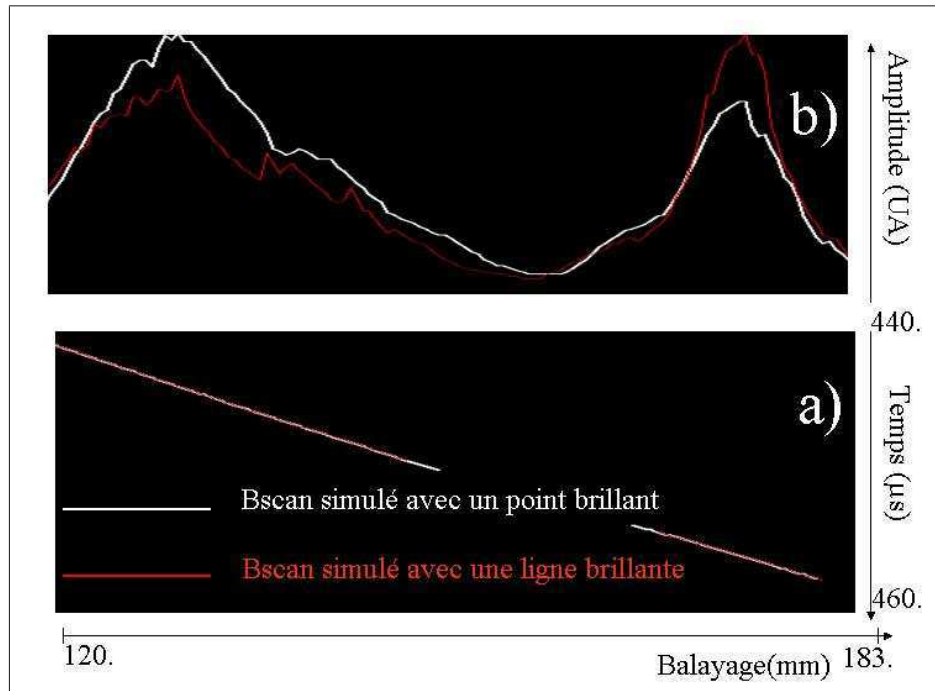


FIG. 4.17 – a) Comparaison des échodynamiques du B-scan simulé avec une ligne brillante (en rouge) et un point brillant (en blanc) du défaut n°1 détecté en mode LL. b) Comparaison des B-scan segmentés

B-scan simulés issus de R et de S trouvée par l'algorithme est de 1,04 mm et celle entre les B-scan simulés issus de R et de T est de 0,95 mm. On constate que l'algorithme permet de remonter à la distance entre deux défauts dont on calcule l'écho. Les différences observées entre les valeurs réelles et calculées correspondent aux erreurs dues à l'échantillonnage spatial, la précision de la méthode ne pouvant en effet pas être meilleure que celui-ci.

Évaluation des performances de la méthode sur des données simulées.

Afin de tester les performances de la méthode on a comparé l'un des B-scan simulés issu d'une position de référence A_{ref} de la courbe "iso-temps" à tous ceux issus de chaque point M de la même courbe. La figure 4.19 montre la distance obtenue en fonction de la distance réelle des points générant ces B-scan, comptée positivement. Celle-ci est positive si la profondeur de M est supérieure à celle de A_{ref} et négative dans le cas contraire. La méthode de comparaison de B-scan doit pouvoir comparer deux positions. La courbe obtenue doit donc être décroissante, puis croissante. Cette pseudo-distance a été construite de manière à être équivalente à la distance euclidienne dans l'espace. Idéalement, la courbe obtenue devrait donc être la courbe valeur absolue (tracée en vert). On constate que les résultats obtenus sont proches de cette fonction, surtout pour les faibles valeurs. La pseudo-distance in-

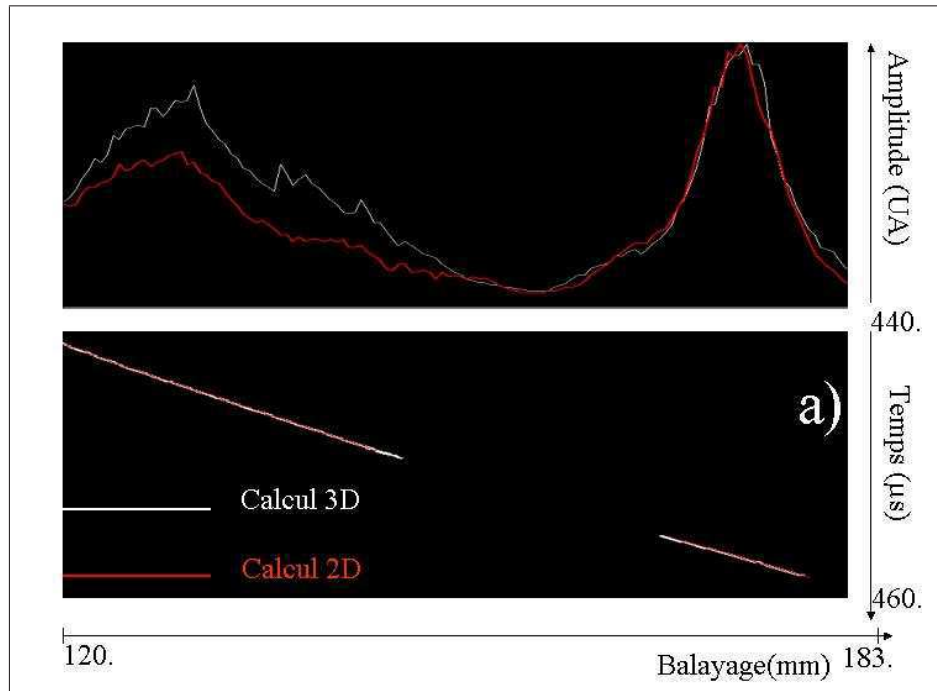


FIG. 4.18 – a) Comparaison des échodynamiques du B-scan simulé en 3 dimensions en prenant en compte une ligne (en blanc) et en deux dimensions (en rouge) du défaut n°1 détecté en mode LL. b) Comparaison des B-scan segmentés

roduite est donc capable de comparer efficacement des B-scan proches. La méthode de comparaison de B-scan se révèle légèrement moins efficace lorsque l'on compare des positions éloignées (à partir de 2 mm).

Exemple d'application de la méthode sur un B-scan expérimental

Comme on peut le voir sur la figure 4.20b, la courbure des lignes "iso-temps" (obtenu sur le défaut n°1 en mode LL du paragraphe 4.1.3) est faible⁵, de sorte que l'on peut considérer que, dans le cas général, un seul point de la courbe sera le plus proche du défaut réel. Cela doit transparaître dans les résultats obtenus avec la comparaison de B-scan. On cherche donc ici à montrer sur un exemple concret la capacité de la méthode de comparaison de B-scan à déterminer la position sur la courbe "iso-temps" la plus proche du défaut réel. Pour cela, on montre (figure 4.20b) la courbe "iso-temps" issue d'une des indications du défaut n°1. On a appliqué la méthode de comparaison de B-scan à chaque B-scan simulé obtenu en positionnant le défaut en chaque point de cette courbe. On montre (figure 4.20a) l'allure de cette distance en fonction de la profondeur du point traité. On constate que cette courbe possède un minimum absolu, correspondant au point d'abscisse 111,9 et de profondeur 30,8, la position réelle du défaut indiquée par une

⁵Car l'onde est localement plane

4.5. PRISE EN COMPTE SIMPLIFIÉE DE L'INFLUENCE DU REVÊTEMENT

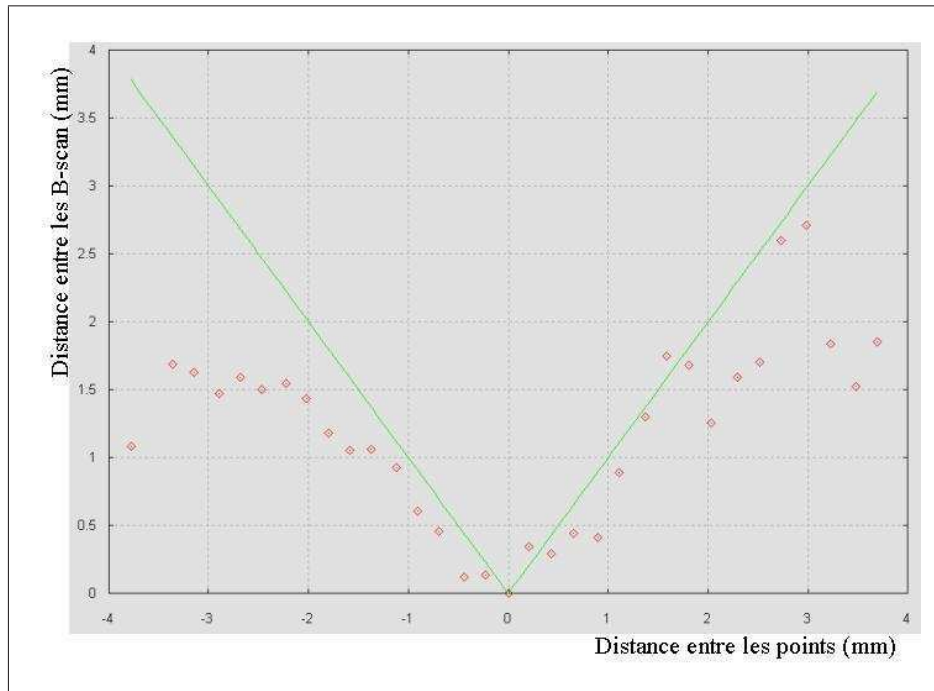


FIG. 4.19 – Distance entre les B-scan simulés issus de chaque point M de la courbe "iso-temps" et un B-scan issu d'un point de référence A_{ref} de cette même courbe en fonction de la distance $A_{ref}M$. La courbe verte représente la valeur théorique.

étoile sur la figure 4.20b étant de (111,6 ;30,4). De plus, dans ce cas, la valeur minimale de cette courbe (0,51 mm) est du même ordre de grandeur que la distance entre la position réelle et inversée du point. Il arrive que ceci ne soit pas vrai, comme pour l'exemple de la figure 4.15. La courbe verte de la figure 4.20a) représente la distance entre la position de défaut correspondant à la simulation et la position réelle. On constate un bon accord entre la courbe théorique et expérimentale, sauf autour de la position du défaut.

4.5 Prise en compte simplifiée de l'influence du revêtement

Dans cette partie, on souhaite savoir si la bonne compréhension des phénomènes de propagation d'onde dans l'acier austénitique permet de se passer des calculs de champ et d'échos en milieu anisotrope, plus coûteux en temps qu'en milieu isotrope. Dans cette optique, une première partie est consacrée à l'analyse détaillée de l'influence de la présence du revêtement sur le positionnement de défaut détecté dans une pièce de surface régulière dans les deux configurations. Afin de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu et de les exploiter dans le cadre d'une méthode permettant de se dispenser de calcul en milieu anisotrope, on a développé un modèle simple

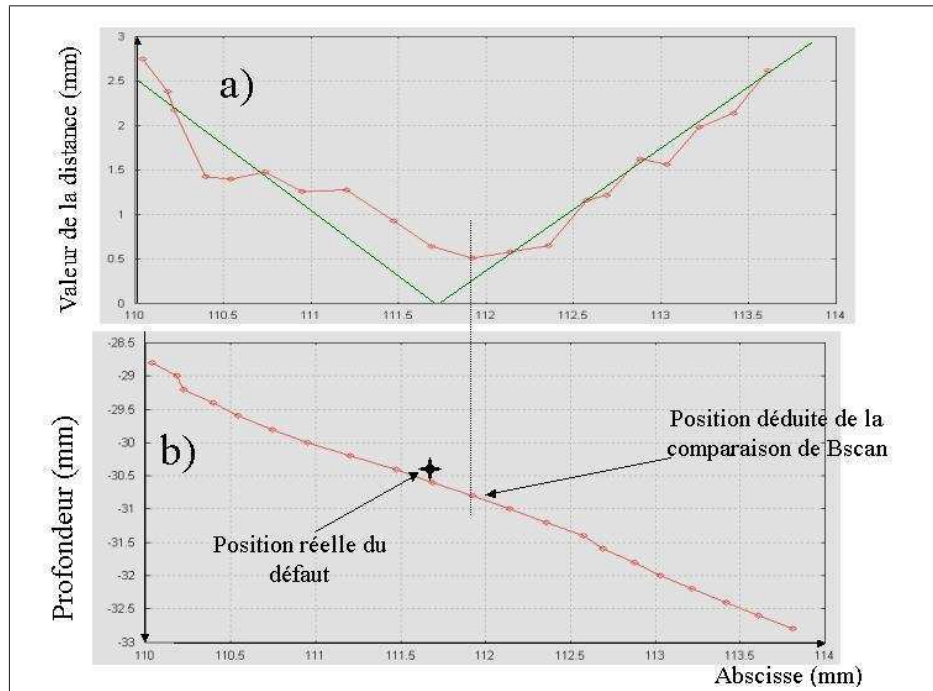


FIG. 4.20 – a) Distance entre le B-scan expérimental et les B-scan simulés obtenus en positionnant le défaut au point de la courbe Isotemps correspondant. b) Courbe "iso-temps" correspondante.

de tracé de rayon, capable de prendre en compte l'effet du revêtement sur le champ ultrasonore.

4.5.1 Étude de l'influence du revêtement sur le positionnement de défaut

On a déjà décrit au paragraphe 1.7.2 l'effet qualitatif de la présence du revêtement sur le positionnement de défaut. Afin de comprendre l'influence quantitative de la présence du revêtement, on a effectué des calculs de positionnement d'une indication dans deux pièces de surface régulière⁶ respectivement revêtue et homogène isotrope. Le sens de tir considéré est orienté de la gauche vers la droite. Les calculs ont été réalisés en trois dimensions.

Comme on le décrit dans l'annexe A, l'orientation cristallographique du revêtement dans le plan d'incidence de la configuration selon courbure est inconnue. De manière attendue, celle-ci n'a pas d'effet sur le positionnement de défaut dans le cas génératrice. Tous les calculs menés avec des orientations allant de $+15^\circ$ à -15° ont donné le même résultat, à quelques centièmes de millimètres près. La position trouvée de cette indication en effectuant le calcul avec la pièce homogène isotrope est (66,4;18,7), contre (66,1;20,6)

⁶Les pièces étant de surface non perturbée, la méthode faisceau a été utilisée.

4.5. PRISE EN COMPTE SIMPLIFIÉE DE L'INFLUENCE DU REVÊTEMENT

avec la pièce revêtue. On a vérifié que l'approximation bidimensionnelle ne modifie pas le positionnement du défaut.

Dans la configuration courbure, l'orientation cristallographique influe sur le contrôle car la vitesse de groupe de l'onde ultrasonore dans la couche dépend de celle-ci. Afin de connaître l'influence de ce paramètre, des calculs de repositionnement ont été réalisés en utilisant un bloc de surface régulière revêtu, dont l'orientation dendritique varie entre -15° et 15° . On montre figure 4.21 en traits pleins rouges les résultats de la méthode de positionnement en fonction de l'orientation cristalline. On constate que l'orientation

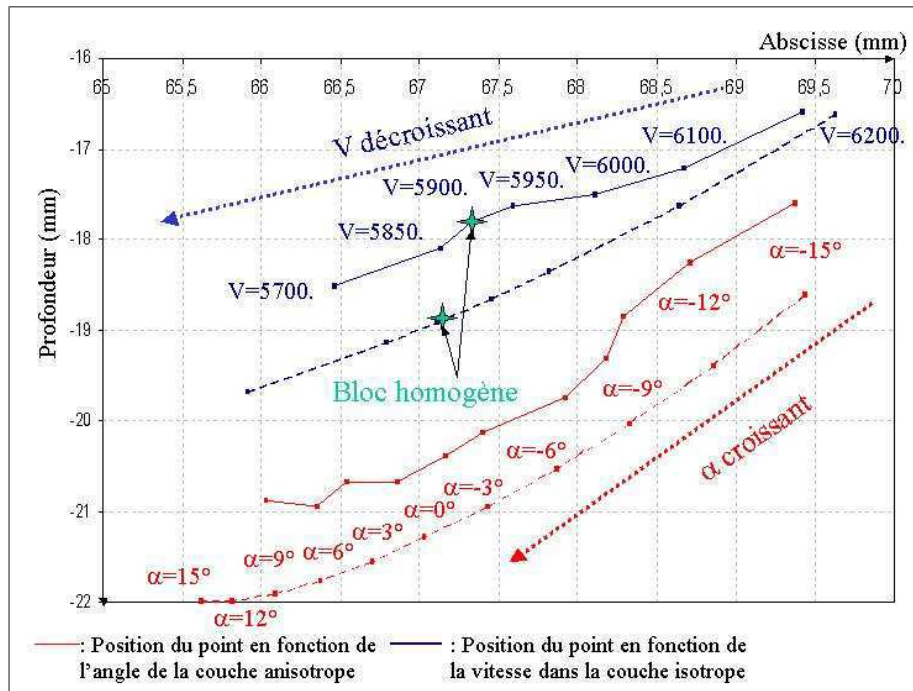


FIG. 4.21 – Position de défaut trouvée par la méthode faisceau (en rouge) et par la méthode rayon (en bleu), en fonction de la nature de revêtement.

cristalline constitue un paramètre important dans le positionnement de défaut, car elle induit une modification de la position pouvant aller jusqu'à 3,3 mm en profondeur.

4.5.2 Remplacement du revêtement par un matériau isotrope

Une première idée permettant de se passer des calculs en milieu anisotrope est de considérer le revêtement comme un matériau isotrope, de vitesse à déterminer. Nous avons réalisé des calculs de repositionnement de la même indication ultrasonore, mais en utilisant un matériau revêtu d'une couche isotrope dans laquelle on a fait varier la vitesse de propagation. Les résultats sont montrés en traits pleins bleus sur la figure 4.21. On constate qu'aucune vitesse de propagation ne permet de prendre en compte correctement le revêtement, puisque, les positions de défauts ainsi obtenues sont

éloignées de celles résultant du calcul effectué avec une pièce anisotrope. On expliquera plus loin comment analyser cette observation.

4.5.3 Interprétation par l'acoustique géométrique : Modèle "rayon"

Le but de cette partie est de construire un modèle capable de prendre en compte rapidement, sans calcul de champ en milieu anisotrope, la position d'un défaut détecté dans une pièce revêtue. On a utilisé pour cela un modèle de tracé de rayon. La technique de tracé de rayon dans des matériaux anisotropes a été réalisés par Ogilvy et al ([61]) ou plus récemment par Shmitz et al ([62]). Il s'agissait néanmoins de tracer une multitude de rayons pour le traducteur considéré.

Description de la méthode

On considère dans toute cette partie que le traducteur L63° génère une onde plane dans toute la zone d'étude. La figure 4.22 illustre l'algorithme. Cette figure n'est pas réalisée à l'échelle pour des raisons de clarté. Le but de l'algorithme est de déterminer une position correspondant à un temps de détection T_i et à une position de traducteur L63° X_i . Soit O le point

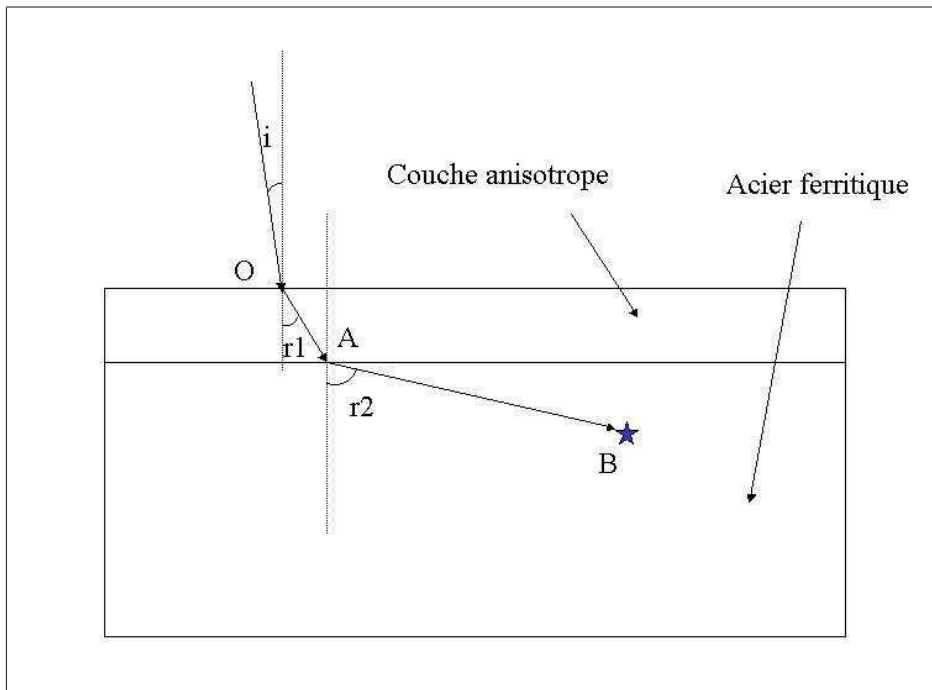


FIG. 4.22 – Description schématique du fonctionnement du modèle de rayon.

d'impact d'abscisse de l'axe focal principal du traducteur L63°. On cherche la position B du rayon correspondant à cet axe au temps T_i . On raisonne ici en terme d'aller simple. On effectue donc un tracé de rayon dans la pièce,

4.5. PRISE EN COMPTE SIMPLIFIÉE DE L'INFLUENCE DU REVÊTEMENT

afin de déterminer la position de celui-ci au temps $\frac{T_i}{2}$. On effectue donc un calcul de champ dans l'eau, afin de déterminer le temps de vol T_O en O. On calcule ensuite à partir de la courbe de lenteur de l'acier austénitique, l'angle de réfraction r_1 dans la couche anisotrope pour la direction d'incidence du rayon, ainsi que la vitesse d'énergie V_g . Dans ce cas, l'angle de réfraction est calculé par les lois de Snell-Descartes. On est donc ainsi capable de déterminer la position du point A, intersection entre le rayon réfracté et l'interface anisotrope-isotrope, ainsi que le temps de vol t_A à ce point.

- Si $t_A > \frac{t_i}{2}$, cela signifie que le défaut recherché est situé dans la couche anisotrope. On obtient le point B en traçant le segment $[OB]$ de longueur $(\frac{t_i}{2} - t_O)V_g$ et d'angle de réfraction r_1 . Notons que ce cas de figure n'est pas courant, car les défauts recherchés sont situés dans l'acier de la cuve.
- Si $t_A < \frac{t_i}{2}$, le point B est alors recherché dans l'acier de la cuve. On utilise alors les propriétés d'un matériau bicouche. Selon les lois de Snell-Descartes, quel que soit le matériau de la couche, l'angle de réfraction r_2 du rayon dans le matériau isotrope est le même. On aura donc, pour toutes les caractéristiques de couche, $r_2 = 63^\circ$. Le point B est alors obtenu en traçant le segment $[AB]$ d'angle de réfraction r_2 et de longueur $(\frac{t_i}{2} - t_A)V_L$, où V_L est la vitesse de propagation des ondes L dans le matériau anisotrope.

On effectue tout d'abord un positionnement de défaut par la méthode décrite dans la partie 3 en utilisant une pièce homogène. Ensuite, on applique à l'indication la méthode de tracé de rayon en utilisant une pièce homogène et revêtue, dans le but de déterminer une différence de positionnement induite par la présence du revêtement. Cette modification est appliquée à la position trouvée par la méthode, afin d'obtenir une position de défaut dans une pièce hétérogène.

Utilisation de la méthode

L'algorithme de tracé de rayons a été appliqué aux deux configurations de tir. Les résultats obtenus par la méthode rayon dans la configuration selon génératrice sont portés au tableau 4.18 et comparé aux résultats obtenus pour la même indication avec la méthode de positionnement de défaut.

	Méthode de Positionnement(mm)	Méthode Rayon(mm)
Bloc Homogène	(66,4 ;18,7)	(67,1 ;19,3)
Bloc Revêtu	(66,1 ;20,6)	(66,6 ;21,3)

TAB. 4.18 – Position de défaut pour le traitement de la même indication dans deux blocs de surface régulière (homogène et revêtu) par la méthode de positionnement et par la méthode rayon.

On constate dans un premier temps que les résultats obtenus avec l'algorithme de rayon sont décalés en profondeur par rapport aux résultats de

la méthode de positionnement. Cela est dû à la courbure du faisceau réel, du fait de l'ouverture du traducteur $L63^\circ$. Le but de cet algorithme n'est pas de prédire une position de défaut, mais de déterminer un décalage entre les deux configurations, revêtue et homogène isotrope. Cet algorithme est capable de prendre en compte correctement des écarts de positionnement entre ces deux configurations puisque l'écart obtenu en simulation est de $(0,3;-1,9)$ et celui obtenu par la méthode est de $(0,5;-2)$. On peut donc, dans la configuration non perturbée selon génératrice, effectuer un repositionnement à l'aide d'une pièce homogène isotrope et recalculer ensuite le point trouvé de l'écart trouvé par la méthode rayon. Cet écart peut de plus être calculé une fois pour toute car il ne dépend pas de la profondeur du défaut recherché. L'erreur induite par l'utilisation de la méthode rayon pour positionner le défaut est alors de 0,2 mm en abscisse et de 0,1 mm en ordonnées et les temps de calcul sont divisés par quatre.

Les mêmes calculs ont été effectués pour la configuration courbure, pour différentes orientations cristallographiques. La figure 4.21 montre en pointillé rouge les résultats de l'algorithme de tracé de rayon obtenus dans la configuration courbure en fonction l'orientation cristallographique. On constate que les résultats obtenus avec l'algorithme de rayon sont décalés par rapport aux résultats de la méthode de positionnement d'environ 0.7 mm en profondeur, comme pour le cas génératrice. Le décalage *a posteriori* du résultat obtenu avec une pièce régulière pourra être effectué de la même manière que pour le cas génératrice. L'erreur la plus importante commise en utilisant la méthode rayon pour effectuer le positionnement de défaut est de 0.5 mm en abscisse et de 0.2 mm en profondeur.

On peut donc considérer que lorsque le revêtement est régulier, on peut utiliser la méthode rayon dans le but de prendre en compte l'influence du revêtement, ce calcul pouvant être réalisé une fois pour toute.

On a également voulu appliquer la méthode rayon aux cas d'un revêtement isotrope. Les résultats obtenus sont montrés en pointillé bleu figure 4.21. On constate de manière attendue que cette configuration est également bien prédite par l'algorithme.

L'application de la méthode rayon à un cas de figure permet aussi d'expliquer le fait qu'aucun résultat obtenu avec la couche isotrope n'est proche avec ceux obtenus avec une couche anisotrope. On montre au tableau 4.19 les angles de réfraction et vitesses de propagation d'énergie obtenus pour les deux types de revêtement considérés, dans la configuration courbure. L'angle d'incidence de l'onde est donc de $12,94^\circ$. On note γ l'orientation cristallographique considérée. On constate que, à vitesse de propagation identique, les angles de réfraction obtenus pour l'acier austénitique sont moins importants que ceux obtenus par l'application de lois de Snell-Descartes, ce qui explique qu'aucun matériau isotrope ne puisse remplacer convenablement ce type de milieu.

Enfin, l'application de la méthode rayon à des configurations à surface complexe n'a pas permis d'obtenir des résultats satisfaisant. Les écarts obtenus entre les résultats de la méthode de positionnement dans une pièce hétérogène et ceux donnés par l'application de la méthode à une pièces ho-

4.5. PRISE EN COMPTE SIMPLIFIÉE DE L'INFLUENCE DU REVÊTEMENT

	Vitesse d'énergie (ms^{-1})	Angle de réfraction ($^{\circ}$)
Couche Isotrope	5700	59,4
Couche Isotrope	5850	62,05
Couche Isotrope	5900	63
Couche Isotrope	6000	64,95
Couche Isotrope	6100	67,
Couche Isotrope	6200	69,4
Couche Anisotrope $\alpha = 15^{\circ}$	5990	49,8
Couche Anisotrope $\alpha = 0^{\circ}$	6180	55,3
Couche Anisotrope $\alpha = -15^{\circ}$	6290	64,6

TAB. 4.19 – Vitesse d'énergie et angle de réfraction dans différents matériaux isotropes et dans l'acier austénitique dans la configuration courbure pour différentes orientations cristallographiques.

mogène et recalé par la méthode rayon peuvent aller jusqu'à 3 mm. On ne pourra donc malheureusement pas appliquer la méthode au cas d'un revêtement à surface irrégulière. On peut expliquer ces différences de positionnement par le fait que cette surface irrégulière va entraîner des ondes dont l'écart à la planéité est important. On ne se situe alors plus dans le cadre des hypothèses effectués lors du développement de la méthode rayon.

Conclusion

L'objectif de cette thèse était de développer une méthode d'inversion permettant de positionner précisément les défauts à l'origine d'échos ultrasonores détectés lors du contrôle non destructif des cuves de REP. Le problème à résoudre provenait de la présence du revêtement austénitique déposé sur la surface interne du composant et comportait deux difficultés principales : la prise en compte du caractère anisotrope de la couche austénitique différente de l'acier de coeur et la traversée par l'onde ultrasonore d'une surface irrégulière.

Dans un premier temps, la modélisation de la configuration de contrôle a permis de caractériser les phénomènes perturbateurs induits par la présence du revêtement. Nous avons montré comment les irrégularités de surface modifient les caractéristiques du champ ultrasonore transmis. En particulier l'existence de plusieurs faisceaux lorsque l'onde ultrasonore rencontre un recouvrement de passes a été mise en évidence. Ces propriétés du champ incident expliquent les observations faites sur les échographies obtenues après diffraction de l'onde sur l'arête d'une fissure. Par ailleurs l'effet de la présence de la couche anisotrope a pu être évalué et se traduit essentiellement par un décalage spatial et temporel des échos.

Cette analyse montre que la modélisation est indispensable pour remonter à la position des défauts dans une telle configuration. Ainsi la méthode qui a été développée s'appuie sur l'utilisation de modèles existants au laboratoire. La platine de contrôle contient un traducteur fonctionnant en incidence normale. Une phase préliminaire à la méthode consiste à déterminer le profil rencontré par l'onde ultrasonore au cours du déplacement de la platine à partir de l'acquisition effectuée par ce traducteur. L'exploitation de cette acquisition consiste à extraire de la mesure du temps de vol de l'écho de surface détecté une " altitude " de la surface en chacune des positions de la platine. L'ensemble des temps de vol ainsi obtenu est converti, moyennant un certain nombre de traitements, en un fichier CAO qui est entré en données de la modélisation.

La méthode de positionnement proprement dite étant conçue pour pouvoir s'appliquer dans un environnement industriel, on s'est efforcé à toutes les étapes de mettre en oeuvre des approximations permettant de réduire le temps de calcul tout en conservant une bonne précision des résultats obtenus. L'influence de ces différentes approximations sur la précision des positionnements obtenus a été évaluée. Ainsi, il a été montré au cours de la thèse qu'une représentation bidimensionnelle des phénomènes donne des

4.5. PRISE EN COMPTE SIMPLIFIÉE DE L'INFLUENCE DU REVÊTEMENT

résultats satisfaisants dans la configuration considérée.

La première étape de la méthode consiste tout d'abord à associer à l'écho dont on souhaite localiser l'origine une position du capteur et un temps de détection. Un calcul de champ est alors effectué en la position de capteur relevée. De ce calcul on déduit un ensemble de points susceptibles d'être le lieu de l'extrémité diffractante de la fissure responsable de l'écho considéré. La sélection d'une localisation finale dans cet ensemble est effectuée par comparaison entre l'échographie expérimentale et les échographies obtenues en positionnant un défaut en chacun des points de l'ensemble. Pour ce faire une pseudo-distance dans l'espace des échographies a été proposée.

Au cours de la thèse un ensemble d'expériences a été réalisé afin de valider la méthode et d'estimer la précision des positionnements obtenus. Afin d'appréhender successivement l'influence des différents phénomènes la méthode a ainsi été mise en oeuvre sur un bloc dont la surface a été usinée pour être représentative des surfaces rencontrées sur site, sur un bloc revêtu de surface plane et finalement sur un bloc revêtu de surface irrégulière. Les résultats obtenus montrent que l'ensemble des phénomènes perturbateurs sont correctement pris en compte et la précision obtenue en laboratoire sur ces essais est conforme à la demande industrielle qui motivait cette étude. A l'issue de cette étude, la méthode a donné lieu au développement d'un logiciel dédié, prévu pour une utilisation sur site en cours des prochaines années. Ce logiciel est aujourd'hui en cours de qualification industrielle.

La méthode d'inversion de données ultrasonores proposé dans ce mémoire a été développée dans le contexte d'une application spécifique qui est le contrôle non destructif des cuves de REP. Cependant les principes qu'elle utilise pourraient être appliqués dans un autre contexte puisque le problème qui a été traité ici consiste à prendre en compte les phénomènes induits par la traversée d'une surface irrégulière et d'un matériau anisotrope pour repositionner un objet diffractant responsable d'un écho ultrasonore.

Table des figures

1.1	Représentation schématique d'une cuve de REP.	12
1.2	Platine de contrôle.	14
1.3	a) Vue schématique de dessus de la configuration de contrôle de dessus utilisée pour la détection de défauts dans les cuves de réacteur. b) Vue en coupe. Les deux schémas ne sont pas à l'échelle.	14
1.4	a) Représentation en perspective de la configuration de contrôle selon courbure. b) Même chose pour la configuration selon génératrice.	15
1.5	Photo de la surface d'une maquette revêtue.	16
1.6	Représentation schématique du revêtement.	17
1.7	Acquisitions réelles correspondant aux échos renvoyé par un défaut placé dans une pièce. a) : L'interface est non perturbée, b) : elle est complexe. Les profils sont montrés au-dessus de chaque B-scan, avec une échelle verticale et horizontale différente. La position des défauts dans les blocs est indiquée par un cercle noire.	20
1.8	Effet des irrégularités de surface sur le faisceau transmis. Cartographies simulées obtenues à travers a) : une surface régulière et b), c), d), e), f), g), h) une surface irrégulière à différentes positions de traducteur.	22
1.9	Acquisitions réelles (Cscan) correspondant aux échos provenant d'un défaut placé dans une pièce. a) : L'interface est régulière, b) : elle est complexe. Les profils sont montrés au-dessus de chaque B-scan, avec une échelle verticale et horizontale différente. La position des défauts dans les blocs est indiquée par un trait noir.	23
1.10	Effet des irrégularités de surface sur le faisceau transmis dans la configuration selon courbure. Cartographies simulées obtenues à travers a) : une surface régulière et b) une surface irrégulière. L'incidence du traducteur est oblique dans le plan perpendiculaire à l'image.	24
1.11	Courbes des lenteurs correspondant aux deux configurations de contrôle. Pour la configuration courbure, la désorientation du cristal est nulle.	27

TABLE DES FIGURES

1.12	a) Valeur du maximum du module de déplacement de l'onde QT2 dans le revêtement. b) Valeur du même champ ultrasonore sur la ligne noire de a) en fonction du temps.	28
1.13	Coefficients de transmission en onde plane. a) A l'interface liquide - acier austénitique dans la configuration génératrice, b) A l'interface acier austénitique - acier de la cuve pour les ondes QL dans la configuration génératrice, c) A l'interface acier austénitique - acier de la cuve pour les ondes QT2 dans la configuration génératrice. d), e), f) Idem dans la configuration courbure.	29
1.14	Coefficients de réflexion en onde plane QL à l'interface acier austénitique - acier de la cuve. a) Configuration génératrice, b) Configuration courbure.	30
1.15	a) Calcul de champ ultrasonore transmis dans un composant homogène isotrope de surface régulière. b) Calcul de champ ultrasonore transmis dans un composant revêtu de surface non perturbée. Les points noirs correspondent à la position de l'onde à un temps identique.	31
1.16	Schéma d'étude général d'un problème inverse.	32
1.17	Schéma récapitulatif de la stratégie d'inversion.	35
2.1	Représentation schématique de la configuration de calcul de l'écho de surface.	38
2.2	a) Profil de la pièce utilisée pour l'acquisition L0°, b) B-scan réalisé avec le traducteur L0°, c) B-scan simulé, d) Superposition des courbes échodynamiques du B-scan expérimental (en rouge) et du B-scan simulé (en blanc).	40
2.3	a) Profil de la surface. La flèche indique le sens de tir du traducteur L63°. b) Écho expérimental engendré par la surface et détecté par le traducteur L63°. c) Écho simulé.	41
2.4	a) Vue en perspective de la configuration de contrôle en L0°. La couleur dans la zone de calcul code l'amplitude maximale du signal en fonction de la position. b) B-scan du champ ultrasonore au centre de la zone à la surface de la pièce. . .	42
2.5	Représentation schématique de la méthode de facétisation. Les traits noirs représentent les facettes initiales. Le trait rouge représente la flèche.	43
2.6	a) B-scan L0° expérimental correspondant à l'acquisition de la surface d'un bloc. b) En rouge : Profil mesuré par profilométrie mécanique de ce bloc. En vert : Profil Inversé obtenu à partir de l'acquisition montrée a.	45
2.7	En rouge : profil de la pièce CAO utilisé pour la simulation d'écho. En noir : profil extrait de la simulation d'écho L0°.	45
2.8	a) Acquisition L0° contrôlant l'interface eau-acier à gain faible. b) Acquisition L0° contrôlant l'interface acier austénitique-acier de la cuve à gain fort.	48

TABLE DES FIGURES

2.9	Représentation schématique de la platine et positions relatives des traducteurs.	49
3.1	a) B-scan expérimental montrant plusieurs défauts. b) B-scan segmenté. La boîte déterminant les segments issus du même mode et du même défaut est dessinée en rouge.	55
3.2	Représentation schématique de la configuration correspondant au développement de l'algorithme du positionnement de zone de calcul dans le cas selon génératrice.	60
3.3	Exemple d'application de l'algorithme de positionnement de zone. Les triangles bleus représentent les points obtenus par l'algorithme. La zone tracée correspond au résultat de l'algorithme. L'étoile noire correspond à la position réelle du défaut.	62
3.4	a) résultat de calcul de champ ultrasonore. b) Résultat de l'algorithme "faisceau". On a relié les points situés sur les mêmes faisceaux. Les positions du défaut associées à chaque faisceau sont représentées par des points noirs.	66
3.5	a) Résultat d'un calcul de champ ultrasonore. b) Points "iso-temps" pour différents temps de vol.	67
3.6	Comparaison des résultats de l'algorithme "faisceau" et "iso-temps" appliqué à un champ ultrasonore. En vert : algorithme "iso-temps". En noir : algorithme faisceau. Les traits noirs correspondent aux faisceaux détectés par l'algorithme.	68
3.7	a) B-scan simulé et indications retenues par le lissage adaptatif. b) B-scan segmenté expérimental et indications ultrasonores associées ; les indications ultrasonores du B-scan simulé sont reportées et on montre celle qui sont éliminées.	73
3.8	Comparaison des courbes "iso-temps" issues des deux indications du défaut n°1 détecté en mode LL.	75
3.9	Illustration du fonctionnement de la méthode de Brent. La courbe noire représente la valeur de la distance trouvée par l'algorithme en fonction de la profondeur du point possible. Figure partiellement extraite de [53].	75
3.10	Schéma récapitulatif de la stratégie d'inversion.	77
4.1	Forme représentative de l'interface eau - acier austénitique.	80
4.2	Procédure de positionnement du point brillant pour un trou.	81
4.3	Macrographie des sections de revêtement dans les deux sens de découpe.	82
4.4	a) Schéma du montage expérimental pour mesurer la vitesse des ondes L dans le matériau. b) B-scan obtenu.	84
4.5	Représentation schématique du montage expérimental dans le cas d'un contrôle selon génératrice.	85
4.6	a) Cscan de l'acquisition du bloc étalonnage. b) B-scan correspondant à l'incrément Y_0	87

TABLE DES FIGURES

4.7	a) B-scan simulé des échos du bloc étalonnage. b) B-scan expérimental des échos du même bloc. c) Comparaison des courbes échodynamiques du B-scan simulé (en blanc) et du B-scan expérimental (en rouge).	89
4.8	a) Représentation schématique du bloc homogène isotrope homogène incluant les positions des trous génératrices. b) B-scan expérimental obtenu.	91
4.9	a) B-scan expérimental du défaut 3. b) Comparaison des B-scan segmentés correspondant au B-scan expérimental et aux B-scan simulés en 2 et 3 dimension. c) Comparaison des courbes échodynamiques de ces mêmes B-scan.	94
4.10	En vert : Position de défaut trouvé par la méthode dans une pièce revêtue en fonction de la vitesse dans le substrat. En rouge : Position trouvée par l'acoustique géométrique.	103
4.11	a) Amplitude du champ ultrasonore en fonction de la position obtenu avec un calcul 2D. b) calculé en 3D. c) Comparaison des iso-temps issus des deux champs. L'étoile noire indique la position réelle du défaut.	106
4.12	a) Champ ultrasonore généré par le transducteur L63° à travers une surface non perturbée calculé en 2D. b) calculé en 3D. c) Comparaison de la loi de positionnements Z(X) issues du calcul 2D (en rouge) et 3D (en vert). d) pour Z(T).	107
4.13	a) Champ ultrasonore engendré par le transducteur L63° à travers un revêtement de surface complexe calculé en 2D. b) calculé en 3D. c) Courbes "iso-temps" résultat du post-traitement du calcul 2D et 3D.	107
4.14	a) Comparaison des échodynamiques du B-scan expérimental (en blanc) et simulé (en rouge) du défaut n°1 détecté en mode LL. b) Comparaison des B-scan segmentés	109
4.15	a) Comparaison des échodynamiques du B-scan expérimental (en blanc) et simulé (en rouge) du défaut A détecté en mode LL. b) Comparaison des B-scan segmentés	110
4.16	a) Comparaison des échodynamiques du B-scan expérimental (en blanc) et simulé (en rouge) du défaut F détecté en mode LL. b) Comparaison des B-scan segmentés	111
4.17	a) Comparaison des échodynamiques du B-scan simulé avec une ligne brillante (en rouge) et un point brillant (en blanc) du défaut n°1 détecté en mode LL. b) Comparaison des B-scan segmentés	112
4.18	a) Comparaison des échodynamiques du B-scan simulé en 3 dimensions en prenant en compte une ligne (en blanc) et en deux dimensions (en rouge) du défaut n°1 détecté en mode LL. b) Comparaison des B-scan segmentés	113
4.19	Distance entre les B-scan simulés issus de chaque point M de la courbe "iso-temps" et un B-scan issu d'un point de référence A_{ref} de cette même courbe en fonction de la distance $A_{ref}M$. La courbe verte représente la valeur théorique.	114

TABLE DES FIGURES

4.20	a) Distance entre le B-scan expérimental et les B-scan simulés obtenus en positionnant le défaut au point de la courbe Isotemps correspondant. b) Courbe "iso-temps" correspondante.	115
4.21	Position de défaut trouvée par la méthode faisceau (en rouge) et par la méthode rayon (en bleu), en fonction de la nature de revêtement.	116
4.22	Description schématique du fonctionnement du modèle de rayon.	117
B.1	Représentation schématique illustrant l'effet d'une variation de la normale à la surface sur le faisceau réfracté.	141
B.2	Variation de l'angle de réfraction en fonction de la pente locale du profil.	142

TABLE DES FIGURES

Liste des tableaux

1.1	Valeurs du rapport d'amplitude maximale entre le mode considéré et une pièce de surface régulière isotrope en mode L. . .	26
2.1	Résultats de la méthode de repositionnement utilisant le profil reconstruit et le profil réel. On montre les écarts entre les deux positions obtenues.	46
3.1	Décalage temporel obtenu pour chaque trou génératrice, à deux positions de capteur, pour la configuration selon courbure.	54
3.2	Décalage temporel obtenus pour chaque trou génératrice, à deux positions de capteur, pour la configuration selon génératrice.	54
4.1	Valeur des constantes élastiques (en GPa) mesurée et incertitudes.	83
4.2	Vitesse des ondes L de l'acier de la cuve calculées par la méthode de chronométrie dans les différents blocs.	85
4.3	Décalage en abscisse (ΔX) entre les maxima des échos simulés et expérimentaux pour différents angles d'incidence . . .	88
4.4	Décalage en temps entre les maxima des échos simulés et expérimentaux	90
4.5	Résultat de la méthode de repositionnement pour les 5 génératrices du bloc détectées en mode LL.	91
4.6	Résultat de la méthode de repositionnement pour les 5 génératrices du bloc détectées en mode TT.	92
4.7	Résultat de la méthode de repositionnement pour les 5 génératrices du bloc détectées en mode LT.	92
4.8	Résultat de la méthode de repositionnement pour les 4 génératrices du bloc détectée en mode LL dans la configuration selon génératrice.	94
4.9	Résultat de la méthode de repositionnement pour les 4 génératrices du bloc détectée en mode LL dans la configuration selon courbure, à deux positions de balayage distinctes (Bal1 et Bal2).	95
4.10	Décalage en temps entre les maxima des échos simulés et expérimentaux	96

4.11	Distance entre les positions obtenues pour les deux sens de tir en fonction de la désorientation cristallographique de la couche.	96
4.12	Écart entre les résultats de la méthode de repositionnement et les positions réelles de trois FEE détectées sous un revêtement de surface non perturbée dans la configuration selon génératrice.	97
4.13	Écart entre les résultats de la méthode de repositionnement et les positions réelles de trois FEE détectées sous un revêtement de surface non perturbée dans la configuration selon courbure.	97
4.14	Écart entre les résultats de la méthode de repositionnement et les positions réelles de trois FEE détectées sous un revêtement à surface irrégulière dans la configuration selon génératrice.	98
4.15	Écart entre les résultats de la méthode de repositionnement et les positions réelles de trois FEE détectées sous un revêtement à surface irrégulière dans la configuration selon courbure.	98
4.16	Position du défaut trouvé par la méthode dans une pièce revêtu en fonction de l'épaisseur du revêtement.	104
4.17	Écart entre la position réelle du défaut n°1 détecté en mode LL et la position trouvée par la méthode en fonction du degrés d'approximation.	111
4.18	Position de défaut pour le traitement de la même indication dans deux blocs de surface régulière (homogène et revêtu) par la méthode de positionnement et par la méthode rayon.	118
4.19	Vitesse d'énergie et angle de réfraction dans différents matériaux isotropes et dans l'acier austénitique dans la configuration courbure pour différentes orientations cristallographiques.	120
A.1	Constantes élastiques (en GPa) du revêtement selon le mode de dépôt.	139
C.1	Vitesse des ultrasons dans l'eau en fonction de la température.	143

Notations

α : angle d'incidence du traducteur L63°.

r : angle de réfraction du faisceau généré par le traducteur L63°.

c_L : Vitesse de propagation des ondes longitudinales dans l'acier de la cuve.

c_T : Vitesse de propagation des ondes transversales dans l'acier de la cuve.

c_{LT} : $0.5(c_L + c_T)$.

c_{eau} : Vitesse de propagation des ondes dans l'eau.

ρ_{eau} : Masse volumique de l'eau. (X,Y,Z) : Coordonnée de la platine de contrôle ou d'un traducteur. X correspond à la position de balayage, Y à l'incrément et Z à la hauteur. (x,y,z) : Coordonnée d'un défaut. x correspond à l'abscisse, y à l'ordonnée, z à la profondeur.

Bibliographie

- [1] N. Recho. *Rupture Par Fissuration Des Structures*. Hermès (Paris), 1995.
- [2] G. Bayon Ph. Benoist, R Besnard and J. L. Boutaine. CIVA workstation for NDE : Mixing of NDE techniques and modeling. *Review of progress in quantitative NDE*, 14 :2353–2360, 1995. ed by D.O. Thomson and D.E. Chimenti (Plenum, N-Y).
- [3] Fellingner P Marklein R Langenberg KJ Klaholz S. Numerical modeling of elastic waves propagation and scattering with EFIT- elastodynamic finite integration technique. *Wave Motion.*, pages 21–47, 1995.
- [4] Langenberg K.J. Hannemann R. Kaczorowski T. Marklein R. Koehler B. Schurig C. Walte F. Application of modeling techniques for ultrasonic weld inspection. *NDT E Int.*, 33 :465–480, 2000.
- [5] Halkjaer S. Sorensen M.P. Kristensen W.D. The propagation of ultrasound in a austenitic weld. *Ultrasonics*, 38 :256–261, 2000.
- [6] Schmitz V. Langenberg KJ Kappes W Krönig M. Inspection procedure assessment using modelling capabilities. *Nucl. Eng. Des.*, 157 :245–255, 1995.
- [7] Chassignol B. *Influence de la Structure Métallurgique Des Soudures En Acier Inoxydables Austénitique sur Le Contrôle Non Destructif*. ISAL 0107, INSA Lyon, 207 p., 2000.
- [8] Becache E. Joly P. Tsogka C. An analysis of new mixed finite elements for the approximation of wave propagation problems. *SIAM J Numer Anal*, 34 :1053–1084, 2000.
- [9] Becache E. Joly P. Tsogka C. Application to the fictitious domain method to 2d linear elastodynamic problems. *Journal of computational acoustics*, 9 :1175–1084, 2001.
- [10] Wen J Breazeale M. A diffraction beam field expressed as the superposition of gaussian beams. *J. Acoust. Soc. Am.*, 83 :1752–1756, 1988.
- [11] Spies M. Transducer field modeling in anisotropic media by superposition of gaussian base functions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 105 :633–638, 1999.
- [12] Spies M Krönig M. Ultrasonic inspection of inhomogeneous welds simulated by gaussian beam superposition. *Review of progress in QNDE.*, 18 :1107–1113, 1998. ed by D.O. Thomson and D.E. Cimenti (Plenum, NY).

- [13] A. Lhémery N. Gengembre. Pencil method in elastodynamics : Application to ultrasonic field computation. *Ultrasonics*, 38 :495–499, 2000.
- [14] G. A. Deschamps. Ray technics in electromagnetics. *Proc. IEEE*, 60(3) :1022–1035, 1972.
- [15] S.W. Lee M.S. Sheshadri V. Jamnepad and R. Mittra. Refraction at a curve dielectric interface : Geometrical optics solution. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-30 :12–19, 1982.
- [16] Nicolas Gengembre. *Modélisation Du Champ Ultrasonore Rayonné Dans un Solide Anisotrope et Hétérogène Par un Traducteur Immérgé*. PhD thesis, Paris 7, 1999.
- [17] O. Roy S. Mahaut M. Serre and A. Lhémery. Application of ultrasonic beam-forming and self-focusing techniques using a phased-array system to defect characterization. *proceedings of the first international conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurized components (Cambridge)*., pages 912–918, 1999.
- [18] P. Calmon A. Lhémery I. Lecoeur Taïbi R. Raillon and L. Paradis. Models for the computation of ultrasonic fields and their interaction with defects in realistic NDT configurations. *Nuc. Eng. Des.*, 180 :271–283, 1998.
- [19] A. Lhémery P. Calmon and J. Nadal. Broadband fields radiated in a solid by water-coupled transducers : A comparison of approximate models, numerical approaches and experiments. *Review of progress in QNDE.*, 15 :1019–1026, 1996. ed by D.O. Thomson and D.E. Cimenti (Plenum, NY).
- [20] M. El Amrani P. Calmon O. Roy D. Royer and O. Casula. The ultrasonic field of focused transducers through a liquid solid interface. *Review of progress in QNDE.*, 14 :1075–1082, 1995. ed by D.O. Thomson and D.E. Cimenti (Plenum, NY).
- [21] N. Gengembre A. Lhémery. Calculation of wideband ultrasonic field radiated by water coupled transducers into anisotropic media. *Review of Progress in QNDE*, 17 :899–906, 1998. ed by D.O. Thomson and D.E. Cimenti (Plenum, NY).
- [22] N. Gengembre A. Lhémery. Calculation of wideband ultrasonic fields radiated by water coupled transducers into heterogeneous media. *Review of Progress in QNDE*, 18 :1131–1138, 1999. ed by D.O. Thomson and D.E. Cimenti (Plenum, NY).
- [23] N. Gengembre A. Lhémery. Calculation of wideband ultrasonic field radiated by water coupled transducer into heterogeneous and anisotropic media. *Review of progress in QNDE.*, 19 :977–984, 2000. ed by D.O. Thomson and D.E. Cimenti (Plenum, NY).
- [24] P. Calmon. Couplé à la CAO, le contrôle non destructif devient virtuel. *CEA Technologie*, (54), Janvier / Février 2001.
- [25] F. Cartier S. Chatillon, A. Lhémery and P. Calmon. CAD - based simulation and imaging tools for UT expertise. *Review of progress in*

- quantitative NDE*, 20 :710–717, 2000. Ed by D.O. Thomson and D.E. Chimenti (Plenum, N-Y).
- [26] N. Gengembre A. Lhémy and X. Tarrago. A model to predict ultrasonic field radiated by water-coupled transducer into pieces of complex structures. *proceedings of the first international conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurized components (Cambridge).*, 2 :912–918, 1999.
- [27] D. Gridin. High frequency asymptotic description of head waves and boundary layers surrounding the critical rays in an elastic half space. *J. Acoust. Soc. Am.*, 104 :1188–1197, 1998.
- [28] Miklowitz J. *The Theory of Elastic Waves and Waveguides*. North Holland publishing company, Amsterdam, 1978.
- [29] Souissi A. *Développement Des Méthodes Numériques et Expérimentales Pour L'étude Du Champ Acoustique de Transducteurs Ultrasonores En Présence D'une Interface Fluide/Solide*. PhD thesis, Université de Compiègne, 1987.
- [30] Richards P.G. Aki K. *Quantitative Seismology, Theory and Methods*. Freeman and company, New York, 1980.
- [31] Atalar A. Reflection of ultrasonic waves at a liquid-cubic-solid interface. *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(2) :435–440, 1983.
- [32] Atalar A. Arikian O., Telatar E. Reflection coefficient null of acoustic waves at a liquid-anisotropic-solid interface. *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(1) :1–10, 1988.
- [33] Schmerr L Song SJ Sedov A. Ultrasonic flaw sizing inverse problems. *Inverse Probl.*, 18 :1775–1793, 2002.
- [34] M. Faur. *Caractérisation Des Défauts Par Une Méthode D'inversion Lors D'un Contrôle Ultrasonore. Application Au Contrôle Des Défauts En Paroi Externe*. PhD thesis, Université Paris 11 Orsay, 1999.
- [35] A. M. Tikhonov V. Arsenin. *Solutions of Ill-Posed Problems*. Winston (Washington DC), 1977.
- [36] M Bertero and P Boccacci. *Inverse Problems in Imaging*. Institute of Physics Publishing (Bristol and Philadelphia), 1998.
- [37] J. Idier. *Approche Bayésienne Pour Les Problèmes Inverses*. Hermès sciences publication (Paris), 2001.
- [38] F.G. Bass I.M. Fuks. *Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces*. Pergamon, New York, 1979.
- [39] W.C. Meecham. On use of the kirchhoff approximation for the solution of reflection problems. *J. Rational Mech. Anal.*, 5, 1956.
- [40] Jérôme Nadal. *Simulation D'un Contrôle Par Ultrasons Focalisés D'une Pièce D'acier Revêtue*. PhD thesis, Université Paris 6, 1996.
- [41] Soren M. Jacobsen Jens E Wilhjelm, Peder Pedersen. The influence of roughness, angle, range, and transducer type on the echo signal from planar interfaces. *IEEE Trans. Ultrason ferroelectr. freq control.*, 48(2) :511, March 2001.

- [42] D B Langston N F Haines. The reflection of ultrasonic pulses from surfaces. *J. Acoust. Soc. Am.*, 67(5) :1443, may 1980. Expression analytique du signal réfléchi sur une surface plane, courbe, rugueuse. Analyse est faite en temps et en fréquence.
- [43] A. Lhémery. Habilitation à diriger des recherches, 2001.
- [44] J.P. Weight. A model for the propagation of short pulses of ultrasound in a solid. *J. Acoust. Soc. Am.*, 75 :1716–1720, 1987.
- [45] D. De Vadder et A. Lhémery. Traducteur ultrasonore. Brevet n° 9501391 FIST (CNRS-ANVAR), 7 février 1995.
- [46] Chatillon S. Lhémery A. Cartier F. Calmon P. CAD-based simulation and imaging tools for UT expertise. *Review of progress in QNDE.*, 20 :710–717, 2000. ed by D.O. Thomson and D.E. Cimenti (Plenum, NY).
- [47] W.G. Neubauer. A summation formula for use in determining the reflection from irregular bodies. *J. Acoust. Soc. Am.*, 35 :279, 1963.
- [48] N.F. Haines and D.B. Langston. The reflection from ultrasonic pulses from surfaces. *J. Acoust. Soc. Am.*, 67 :1443, 1980.
- [49] P. Calmon. Contribution théorique à l'amélioration des lois de positionnement des indications ultrasonores. Technical Report RT3781, CEA, 1999.
- [50] Laurent Butin. *Etude et Modélisation de L'interaction D'un Faisceau Ultrasonore Large Bande Avec un Défaut Plan. Prise En Compte Des Effets de Diffraction D'onde de Volume et de Surface Pour la Caractérisation de Défaut Par Méthode Échographique et Tandem.* PhD thesis, Paris 7, 1999.
- [51] P. Calmon L. Butin, A. Lhémery. A model for predicting effects of surface wave propagation on the echo response from planar cracks. *Ultrasonics*, 36 :133–140, 1998.
- [52] Weight J P. A model to predict the ultrasonic echo-responses of small targets in solids. *J. Acoust. Soc. Am.*, 94(1) :514–526, 1993.
- [53] Press H Vetterling W Teukolsky S Flannery B. *Numerical Recipes in C++, The Art of Scientific Computing.* Cambridge University Press Second Edition, 1992.
- [54] Brent R.P. *Algorithm for Minimization Without Derivatives.* Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall Chapter 5, 1973.
- [55] C. Aristégui. *Anisotropie Élastique Totale Naturelle Ou Induite.* PhD thesis, Université Bordeaux I, 1997.
- [56] Aristegui C. Baste S. Optimal recovery of the elasticity tensor of general anisotropic materials from ultrasonic velocity data. *J. Acoust. Soc. Am.*, 101(2) :813–833, 1997.
- [57] B. Castagnède. *Mesures Des Constantes Élastiques de Solides Anisotropes Par Une Méthode Ultrasonore.* PhD thesis, Université Bordeaux 1, 1984.

- [58] B. Castagnède W. Sachse. Optimised determination of elastic constants of anisotropic solids from wavespeed measurements. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 8B :1855–1862, 1989. Ed DO Thomson and DE Chimenti (Plenum, New York).
- [59] Chassignole B. Villard D. Dubuguet M. Baboux J.C. El Guerjouma R. Characterization of austenitic stainless steel welds for ultrasonic NDT. *Review of progress in QNDE.*, 20 :1325–1332, 2000. ed by D.O. Thomson and D.E. Cimenti (Plenum, NY).
- [60] Gordon S. Kino. *Acoustic Waves. Device Imaging and Analog Signal Processing*. Prentice-Hall, 1987.
- [61] Ogilvy JA. Computerized ultrasonic rays tracing in austenitic steels. *NDT E Int.*, 26(6) :318–327, 1988.
- [62] Schmitz V. Walte F Chakhlov SV. 3d ray ttracing in austenite materials. *NDT E Int.*, 32 :201–213, 1999.
- [63] Dominique Delacenserie. Influence de l'état de surface et de l'anisotropie de la matière sur la propagation des ultrasons dans les aciers. Master's thesis, Conservatoire national des arts et métiers, 1985.
- [64] R.J. Hudgell. Handbook on the ultrasonic examination of austenitic clad steel component. Technical report, Joint Research Centre, Institute of advanced materials., 1994.
- [65] H. Granjon. *Bases Métallurgiques Du Soudage*. Publication de la soudure Autogène, Eyrolles (Paris), 1989.
- [66] Del Grosso V A Mader C W. Speed of sound in pure water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 52 :1442–1445, 1972.
- [67] Daniel Royer Eugène Dieulesaint. *Ondes Élastiques Dans Les Solides, Tome 1 : Propagation Libre et Guidée*. Enseignement de la Physique. Masson, (Paris), 1996.
- [68] E. G. Henneke. Refraction / reflection of a stress wave at a plane boundary between anisotropic media. *J. Acoust. Soc. Am.*, 51 :210–217, 1972.
- [69] J Moysan G Corneloup IE Magnien and P Benoist. Crack-like defect detection and sizing from image segmentation through co-occurrence matrix analysis. *Ultrasonics*, 30 :359–363, 1992.
- [70] Wüstenberg H Erhard A Brekow N. Evaluation of different ultrasonic probe concepts for the inspection of claddings. *Mater. Eval.*, 54(10), 1996.
- [71] Kauppinen P Särkiniemi P. Ultrasonic sizing of defects in the austenitic cladding of reactor pressure vessels. *Int. J. Press. Vessels Piping.*, 55 :141–147, 1993.
- [72] Dijkstra F De Raad J. Ultrasonic weld inspection of clad materials. *Stainl. steel world.*, 8(1) :46–50, 1996.

Annexe A

Caractéristiques mécanique nominales du revêtement

On donne ici les caractéristiques des constantes élastiques du revêtement, établie dans [63, 64]. La symétrie du cristal est orthorhombique et les constantes élastiques sont montrées dans le tableau A.1. Deux cas de figure sont à distinguer selon le mode de dépôt de l'inox. Le dépôt manuel et automatique. Les propriétés mécaniques de celui-ci sont alors légèrement différentes. La masse volumique est égale à 7800 kgm^{-3} .

	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{22}	C_{23}	C_{33}	C_{44}	C_{55}	C_{66}
Dépôt automatique	258	115	148	250	151	240	117	125	58
Dépôt manuel	250	115	180	250	138	250	117	125	68

TAB. A.1 – Constantes élastiques (en GPa) du revêtement selon le mode de dépôt.

On peut trouver toutes les informations sur le mode de dépôt du revêtement par exemple dans [65]. On décrit ici les phénomènes dont on a besoin pour notre application. L'anisotropie de l'acier austénitique déposé par électrodes est dû à deux phénomènes. Le grain élémentaire est en effet allongé et présente en lui-même une anisotropie, du fait de sa forme. De plus, l'organisation elle-même du matériau (forme et orientation des grains) contribue grandement à l'anisotropie du matériau. En effet, des directions privilégiées sont créées lors du refroidissement du revêtement fraîchement déposé. La croissance épitaxiale des grains s'effectue alors selon une direction privilégiée, perpendiculaire au gradient thermique. Les dendrites se trouvent donc orientées selon cette direction. Ainsi, l'axe de symétrie cristalline du revêtement dans le plan d'incidence de la configuration "selon courbure" est inconnu. Cet angle est compris entre $\pm 15^\circ$ par rapport à l'axe \vec{z} vertical. La figure 4.3 montre un exemple de visualisation des grains, indiquant leur croissance.

Cette structure particulière implique que le matériau est anisotrope d'un point de vue élastodynamique : la vitesse d'une onde élastique n'est pas la même selon sa direction de propagation. Les courbes de lenteurs correspondant à ce matériau sont montrées sur la figure 1.11.

Lors du dépôt des passes de revêtement de la cuve, des phénomènes complexes ont lieu à l'intersection entre deux passes de revêtement. Le dépôt s'effectuant à chaud, on peut parfois assister à des phénomènes de refusion de la couche d'acier austénitique, modifiant ainsi localement ses propriétés mécaniques. Dans cette zone, cela peut conduire à une inhomogénéité de l'anisotropie du revêtement. Notons que ces phénomènes n'ont lieu que très localement, cela ne remettant en aucun cas en cause l'ensemble du contrôle.

Annexe B

Influence d'une variation locale de la surface de la pièce contrôlée sur l'angle de réfraction

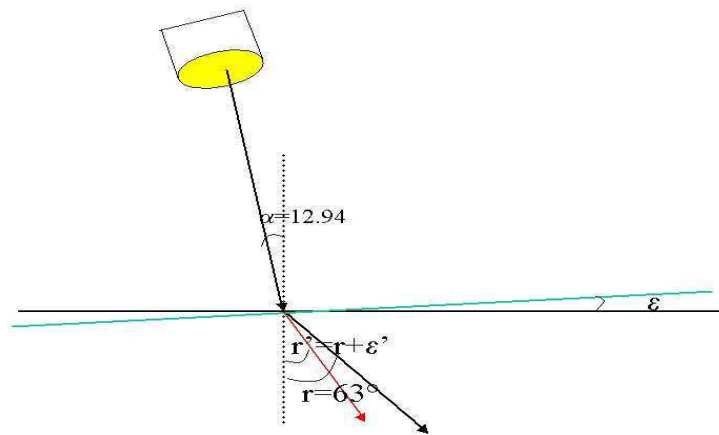


FIG. B.1 – Représentation schématique illustrant l'effet d'une variation de la normale à la surface sur le faisceau réfracté.

Comme on l'a vu au paragraphe 1.7.1, la déviation du faisceau provient de la modification locale de l'angle d'incidence, du fait de la forme de la surface. Afin d'avoir une idée qualitative de l'importance de ce phénomène, effectuons le calcul simple de la modification de l'angle de réfraction r par rapport à la verticale liée à une modification de la normale à la surface de $\epsilon \ll r$. On raisonne ici pour une onde transmise en mode L. Dans la configuration de référence, $r \cong 63^\circ$ et $\alpha \cong 12,94^\circ$. On se place ici dans le cadre de l'approximation d'onde plane et on calcule l'angle de réfraction par la loi de Snell-Descartes. Cette approximation est légitime car, à la surface,

les ondes acoustiques sont focalisées et le front d'onde peut être considéré comme plan. Sur la figure B.1, le trait vert représente la surface inclinée de ϵ , le trait rouge le rayon réfracté par la surface inclinée. Soit r' le nouvel angle de réfraction de l'onde par rapport à la verticale et $\lambda = 3,98$ le rapport des vitesses acoustique dans les milieux :

$$r = \arcsin(\lambda \sin(\alpha)) \quad (\text{B.1})$$

et

$$r' = \epsilon + \arcsin(\lambda \sin(\alpha - \epsilon)) \quad (\text{B.2})$$

La figure B.2 montre l'évolution de l'angle de réfraction r en fonction de la pente locale du profil. Soit $r' = r + \epsilon'$. La variation d'angle de réfraction, ϵ'

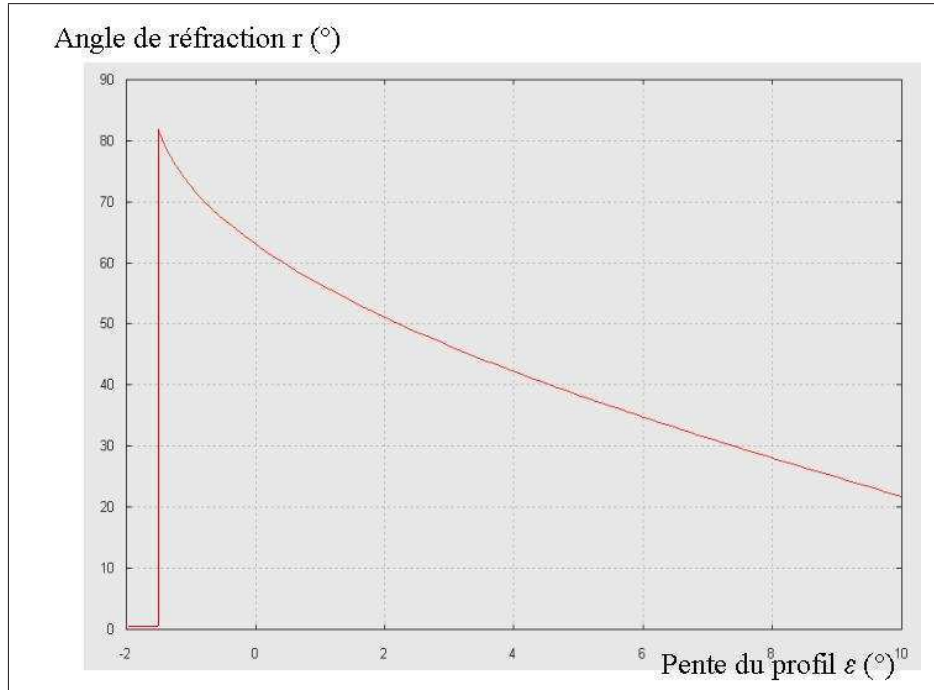


FIG. B.2 – Variation de l'angle de réfraction en fonction de la pente locale du profil.

correspondant à la variation d'angle de réfraction par rapport au cas non perturbé. En considérant $\epsilon \ll \alpha$ et $\epsilon' \ll r$, on obtient par développement limité :

$$\epsilon' \cong \left(1 - \frac{\lambda \cos(\alpha)}{\cos(r)}\right)\epsilon \cong -7,5\epsilon \quad (\text{B.3})$$

La déviation du faisceau induite par une variation locale de surface sera donc beaucoup plus importante que la variation de pente locale. Cela explique l'extrême sensibilité du faisceau aux irrégularités de surface.

Annexe C

Abaque de la vitesse des ultrasons dans l'eau en fonction de la température

Le tableau C.1 contient les valeurs de la vitesses des ultrasons dans l'eau en fonction de la température, au voisinage de l'ambiante. Ces valeurs sont extraites de la référence [66].

Température (°C)	Vitesse (ms^{-1})
18	1476
18,5	1477,6
19	1479,2
19,5	1480,8
20	1482,4
20,5	1483,9
21	1485,4
21,5	1486,9
22	1488,3
22,5	1489,8
23	1491,2
23,5	1492,6
24	1494
24,5	1495,4
25	1496,7
25,5	1498
26	1499,3
26,5	1500
27	1501,9

TAB. C.1 – Vitesse des ultrasons dans l'eau en fonction de la température.

Annexe D

Propagation des ondes planes dans un milieu anisotrope : surface des lenteurs

Pour étudier propagation des ultrasons dans la couche anisotrope, nous supposons l'onde plane.

D.1 Définitions

L'anisotropie d'un matériau est souvent décrite par sa surface des lenteurs. Elle est définie comme le lieu de l'extrémité du vecteur lenteur pour les différents types d'onde et ce dans toutes les directions. La lenteur (inverse de la vitesse de phase V_ϕ) associée à une onde plane se propageant dans une direction \mathbf{n} de l'espace dépend des constantes élastiques C_{ijkl} du matériau par l'intermédiaire de l'équation de Christoffel :

$$C_{ijkl}n_jn_lu_k - \rho V_\phi^2 u_i = 0, \quad (\text{D.1})$$

où le vecteur \mathbf{u} est la direction du déplacement associée à la direction du vecteur d'onde \mathbf{n} . Cette équation est équivalente à :

$$\det(\Gamma - \rho V_\phi^2 \mathbf{I}) = 0, \quad (\text{D.2})$$

où $\Gamma_{ik} = C_{ijkl}n_jn_l$ et \mathbf{I} est le tenseur unité. De manière générale, on a donc trois lenteurs différentes pour une direction donnée \mathbf{n} . Le problème de valeurs propres dégénérées est évoqué dans [16]. Ces trois ondes sont dénommées ondes qL (quasi-longitudinale), qT1 et qT2 (quasi-transversales), par ordre de lenteur croissant. De plus, à chaque lenteur correspond une direction de déplacement donnée par le vecteur propre \mathbf{u} qui lui est associé, correspondant à la polarisation de l'onde.

D.2 Détermination de la vitesse d'énergie

Si, dans le cas d'un solide isotrope, l'énergie se déplace dans la même direction et à la même vitesse que celle de l'onde, ce n'est pas en général

le cas dans un milieu anisotrope. Le vecteur vitesse d'énergie V^e a pour composante :

$$V_i^e = C_{ijkl} \frac{u_j u_l n_k}{\rho V} \quad (\text{D.3})$$

Ce vecteur est directement lié au vecteur flux d'énergie ou vecteur de Poynting, comme le montrent Royer et Dieulesaint [67], que l'on note en général \mathbf{P} :

$$P_i = -\omega^2 C_{ijkl} \frac{u_j u_l n_k}{V}. \quad (\text{D.4})$$

Ce vecteur, de même que le vecteur V^e qui lui est colinéaire, est perpendiculaire à la surface des lenteurs au point considéré.

D.3 Passage d'une interface.

Le calcul des ondes issues de la réflexion ou de la réfraction vers un milieu anisotrope se fait également par cette même équation de Christoffel. Les données d'entrée sont alors les composantes du vecteur lenteur dans le plan de l'interface. la résolution de l'équation donne alors la troisième composante de ce même vecteur, ce qui revient à appliquer la loi de Snell-Descartes. On a alors six valeurs possibles, non nécessairement symétriques. Trois se propagent vers le milieu anisotrope, tandis que les trois autres n'ont pas de sens physique. Heneke [68] montre que les trois ondes qui ont une signification physique sont celles qui pointent leur vecteur d'énergie vers le milieu, mais pas forcément leur vecteur d'onde.

Annexe E

La procédure de segmentation

La procédure de segmentation a pour objectif de transformer un B-scan en un ensemble de segments, afin de simplifier son analyse. Il s'agit d'une transformation utilisée en traitement d'image, décrite en détail dans [69]. On explique ici les différents paramètres utilisés dans notre application pour la mener à bien.

E.1 Détermination des points sur un tir

Chaque tir correspond à un signal temporel. On calcule l'enveloppe de ces signaux, puis on relève tous ces maxima locaux situés au-dessus du seuil. Si deux maxima sont distants en temps de moins de *tempo*, alors on ne retient que celui de plus forte amplitude. On cherche à obtenir un seul maxima par écho, car on n'a besoin que d'un segment par écho. On peut donc choisir *tempo* égal à deux durées d'écho par exemple. On dispose donc d'un ensemble de points qu'il faut relier entre eux afin d'obtenir des segments.

E.2 Formation des segments

Un des paramètres de la segmentation est un angle r . Dans le cas d'une surface non perturbée, cet angle correspond à l'angle moyen par rapport à la normale à la surface du faisceau réfracté engendrant les échos observés. Cette notion n'a plus lieu d'être dans notre cas, mais on doit tout de même renseigner ce paramètre, c'est pourquoi on choisit la valeur de l'angle de réfraction dans le cas non perturbé.

La formation d'un segment requiert la présence de points à toutes les positions de balayage de manière consécutive. Soit deux points (X_1, t_1) et (X_2, t_2) consécutifs calculés précédemment et δt l'échantillonnage temporel du signal, le segment est construit si :

$$(t_2 - t_1) - \frac{(X_2 - X_1) \sin(r)}{c} < Dt\delta t, \quad (\text{E.1})$$

où c est la vitesse de propagation des ondes considérées dans le matériau et Dt un paramètre réglable. Cette condition correspond à une tolérance

concernant l'écart entre la pente du segment construit et la pente qu'il devrait avoir avec un faisceau d'angle r . Dt doit être assez grand, car le faisceau n'a pas forcément cet angle, du fait de la surface complexe. On prend typiquement $Dt = 20$. La construction du segment s'effectue ainsi de manière itérative, jusqu'à ce qu'on arrive à une position de balayage où le point est rejeté.

E.3 Choix de l'indication associée au segment

A chaque point d'un segment, on peut associer l'amplitude de l'enveloppe du signal à cet endroit. On effectue un lissage de l'amplitude en fonction de la position du traducteur, afin d'éliminer le bruit expérimental. L'indication ultrasonore associée au segment est le point de plus grande amplitude de la courbe lissée. Notons que le seuil de la segmentation doit être choisi de telle manière à ce qu'il n'existe qu'un maximum par segment. En effet, lors de la procédure de comparaison des B-scan développée au chapitre 3.4.2, le nombre de segments expérimentaux est égal au nombre d'indications expérimentales.

Annexe F

Traducteurs utilisés

On décrit ici la nature des traducteurs utilisés industriellement. Notons au passage que la méthode décrite dans cette étude peut être appliquée à des acquisitions utilisant tout type de traducteur. Notons que Wüstenberg [70] et Kauppinen [71] et al se sont intéressés à l'évaluation de différents traducteurs au contact pour la détection de défaut dans le revêtement. Les performances de la méthode seront alors réduites dès lors que ceux-ci ne sont pas adaptés au problèmes, c'est-à-dire mal focalisés dans la configuration de référence. De Raad et al [72] se sont intéressés à l'application de technique TOFD (Time Of Flight Diffraction) pour détecter des défauts dans un composant revêtu.

F.1 Le traducteur L0°

Ce traducteur tire perpendiculairement à la cuve. Il s'agit d'un traducteur circulaire de rayon 20 mm. La forme de la pastille est sphérique. La fréquence du signal généré par ce traducteur est de 4 MHz.

F.2 Le traducteur L63°

Il s'agit d'un traducteur elliptique. Les demi-rayons de l'ellipse sont :

- dans le plan d'incidence de 35 mm
- dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence de 25 mm

Les traducteurs L63° sont bifocaux. La fréquence du signal engendré par le traducteur est de 2,8 MHz.