



HAL
open science

Influence de la réalité des matériaux et structures sur la propagation ultrasonore, en vue d'améliorer la modélisation du contrôle non destructif

Marie-Aude Ploix

► **To cite this version:**

Marie-Aude Ploix. Influence de la réalité des matériaux et structures sur la propagation ultrasonore, en vue d'améliorer la modélisation du contrôle non destructif. Acoustique [physics.class-ph]. Aix-Marseille Université, 2024. tel-04530603

HAL Id: tel-04530603

<https://hal.science/tel-04530603>

Submitted on 3 Apr 2024

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.

Aix-Marseille Université

Habilitation à Diriger des Recherches

Influence de la réalité des matériaux et structures sur la propagation ultrasonore, en vue d'améliorer la modélisation du contrôle non destructif

Marie-Aude PLOIX

Soutenue le 19 mars 2024

Composition du jury :

CASTAINGS Michel	Professeur des Universités, INP - I2M	Examineur
CHAIX Jean-François	Professeur des Universités, AMU - LMA	Examineur
CORNELOUP Gilles	Professeur des Universités Émérite, AMU - LMA	Tuteur
DARMON Michel	Directeur de Recherche, CEA-LIST/DIN/LSMA	Rapporteur
EL GUERJOURA Rachid	Professeur des Universités, Univ. du Mans - LAUM	Invité
GUEUDRÉ Cécile	Maître de Conférences HDR, AMU - LMA	Invitée
GUY Philippe	Maître de Conférences, INSA - LVA	Rapporteur
POTEL Catherine	Professeur des Universités, Univ. du Mans - LAUM	Rapporteuse
PRADA Claire	Directeur de Recherche, Institut Langevin	Examinatrice, Présidente du jury

Sommaire

Glossaire	7
Introduction	9
Curriculum Vitae	11
1. Liste des activités de recherche	13
1.1. Participation à des projets nationaux	13
1.2. Encadrements de travaux de recherche	14
1.2.1. Co-direction de thèses	14
1.2.2. Co-encadrement de stages Master	15
1.2.3. Co-encadrement d'ingénieurs/post-doctorants	15
1.3. Valorisation de la recherche, rayonnement scientifique et responsabilités	16
1.3.1. Pôle de compétences NDTVvalor	16
1.3.2. Participation à des instances et responsabilités	17
1.3.3. Reviews d'articles de recherche	17
1.4. Contrats et prestations de recherche et d'expertise	18
1.5. Liste de la production scientifique	20
1.5.1. Contributions à des ouvrages collectifs	20
1.5.2. Publications dans des revues à comité de lecture	20
1.5.3. Conférences internationales	22
1.5.4. Conférences nationales	24
2. Présentation de ma thématique de recherche	27
2.1. Contexte : le CND	27
2.2. Généralités sur la propagation ultrasonore	28
2.2.1. Caractéristiques d'un milieu théorique parfait	28
2.2.2. Propagation des ondes dans un milieu théorique homogène	29
❖ Equation de propagation	29
❖ Vitesse de propagation	30
❖ Atténuation	31
2.3. Les caractéristiques des matériaux et des structures réels, et leur influence sur la propagation ultrasonore	32
2.3.1. Dispersion	33
2.3.2. Anisotropie	34
2.3.3. Viscosité	36
2.3.4. Non linéarité	37
❖ Effet acousto-élastique	37
❖ Acoustique non linéaire	38

2.3.5.	Hétérogénéité	40
❖	Hétérogénéité discrète	40
❖	Hétérogénéité continue	42
2.3.6.	Réalité géométrique de la pièce ou de la structure	43
❖	Une seule interface : réflexion/transmission	43
❖	Plusieurs interfaces parallèles	45
2.4.	Synthèse : conséquences sur le CND, et notion de contrôlabilité ultrasonore des matériaux et structures réels	48
3.	La propagation ultrasonore dans les soudures austénitiques	51
3.1.	Contexte	51
3.2.	Modélisation de l'orientation des grains	54
3.2.1.	Etat de l'art	54
3.2.2.	Le modèle MINA	57
❖	MINA EE	58
❖	MINA TIG	61
3.2.3.	Synthèse et perspectives	64
❖	MINA 3D	64
❖	MINA « 4D »	65
❖	RC-CND et RE-CND : « Piloter » la microstructure (avant fabrication)	66
3.3.	Estimation de l'atténuation ultrasonore	67
3.3.1.	Problèmes spécifiques liés à l'atténuation par diffusion	67
❖	Atténuation et modélisation	67
❖	Atténuation et mesure	68
❖	Application au métal soudé	69
3.3.2.	Méthode de mesure avancée de l'atténuation	71
❖	Principe de la méthode	71
❖	Résultats et bilan	73
3.3.3.	Synthèse et perspectives	74
3.4.	Etude d'une stratégie d'inversion pour améliorer la modélisation	75
3.4.1.	Démarches mises en œuvre	75
❖	Sur les paramètres de solidification, en crime inverse	75
❖	Sur l'ordre d'enchaînement des passes, en crime inverse puis avec des données expérimentales	77
❖	Vérification de la sensibilité et de la concordance des données modélisées et expérimentales	78
3.4.2.	Influence de l'incertitude de mesure des C_{ij} sur la modélisation	80
3.4.3.	Synthèse et perspectives	83
3.5.	Bilan	84
4.	Contrôlabilité ultrasonore d'autres structures complexes	85
4.1.	Téléométrie derrière écran(s)	85
4.1.1.	Réponse acoustique de la cible triplane	86
4.1.2.	Détection et localisation derrière écran(s)	87
4.1.3.	Nouveau concept : le « quadriplan »	89
4.1.4.	Synthèse	90
4.2.	Contrôle d'un système multi-plaques immergé	91
4.2.1.	Propagation des leaky Lamb waves	92

4.2.2.	Apport du retournement temporel	94
4.2.3.	Introduction de la notion de « tâches » topologiques pour la localisation des défauts	96
4.2.4.	Synthèse et perspectives	98
4.3.	<i>Propagation dans les fluides avec écoulement et hétérogénéité de température</i>	99
4.3.1.	Problématique	99
4.3.2.	Approche analytique	100
❖	<i>Le modèle AcRaLiS</i>	100
❖	<i>Validations expérimentales</i>	101
4.3.3.	Approche numérique	103
4.3.4.	Synthèse et perspectives	103
4.4.	<i>Détection de fissures partiellement fermées</i>	104
4.4.1.	Quelques généralités sur les fissures et la problématique du contrôle conventionnel	104
4.4.2.	Application d'une sollicitation acoustique	105
4.4.3.	Application d'une sollicitation thermique	106
4.4.4.	Synthèse et perspectives	107
4.5.	<i>Evaluation de structures non métalliques</i>	108
4.5.1.	Evaluation des bétons	108
❖	<i>Mise en évidence de l'acousto-élasticité des bétons</i>	108
❖	<i>Mise en place d'une stratégie de fusion de données pour l'évaluation des bétons</i>	109
4.5.2.	Evaluation des composites épais	110
4.5.3.	Synthèse	112
5.	<i>Contrôlabilité de matériaux métalliques macroscopiquement homogènes</i>	113
5.1.	<i>Exemple d'un cas industriel complexe</i>	114
5.2.	<i>Influence des grains</i>	118
5.2.1.	Influence des tailles de grains	118
5.2.2.	Influence des joints de grains	121
5.3.	<i>Influence des macles</i>	122
5.4.	<i>Influence des dislocations</i>	122
5.5.	<i>Influence des précipités</i>	125
5.6.	<i>Influence des contraintes résiduelles</i>	127
5.7.	<i>Synthèse et perspectives</i>	128
	<i>Conclusion générale et perspectives</i>	129
	<i>Références bibliographiques</i>	133

Glossaire

COFREND	Confédération Française pour les Essais Non Destructifs
CND	Contrôle Non Destructif
CSC	Corrosion Sous Contrainte
DRX	Diffraction à Rayons X
EBS	Diffraction d'électrons rétrodiffusés (<i>Electron BackScattering Diffraction</i>)
EE	Électrode Enrobée (procédé de soudage)
LCND	Laboratoire de Caractérisation Non Destructive (équipe d'accueil de l'université, intégrée au LMA en 2012)
LMA	Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (UMR 7031, Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Méditerranée)
MINA	Modèle d'orientation de grains à partir du cahier de soudage (<i>Modelling anisotropy from Notebook of Arc welding</i>)
MISTRAL	Laboratoire commun entre Aix-Marseille Université/CNRS/Centrale Méditerranée et le CEA
$L\theta / T\theta$	Configuration ultrasonore : génération d'une onde longitudinale (« L ») ou transversale (« T ») avec un angle θ
RC-CND	Règles de Conception en vue des futurs CND
RE-CND	Règles d'Elaboration en vue des futurs CND
RCC-MRx	Code de l'AFCEM (<i>Règles de Conception et de Construction des matériels mécaniques des installations nucléaires hautes températures, expérimentales et de fusion</i>)
TIG	Tungsten Inert Gaz (procédé de soudage)
US	Ultrasons

Introduction

Ce manuscrit débute par mon curriculum vitae, puis se décompose en 5 chapitres. Le chapitre 1 montre la liste de mes activités de recherche : les participations à des projets nationaux, les encadrements de travaux de recherche (thèses, stages, ingénieurs et post-docs), la valorisation, les responsabilités collectives, la participation à des contrats et prestations de recherche et d'expertise, et la liste de ma production scientifique. On voit notamment la co-direction de 6 thèses. On voit également un nombre important de contrats de recherche, dû à mon statut d'ingénieur chercheur chez Protisvalor. Ces contrats parfois courts ont souvent permis de définir des sujets de thèse, qui se sont ensuite déroulées au laboratoire.

Le chapitre 2 introduit ma thématique de recherche de manière générale, et le contexte dans lequel elle s'inscrit, à savoir le **Contrôle Non Destructif (CND) par ultrasons**. La **contrôlabilité** d'un matériau ou d'une structure, que l'on peut définir comme la facilité avec laquelle on peut pratiquer un CND, par exemple ici un CND par ultrasons, nécessite de bien comprendre la **propagation ultrasonore**, et donc le milieu dans lequel les ondes se propagent. Les paramètres essentiels à maîtriser sont la célérité des ondes, leur atténuation, leur direction de propagation, et donc leur capacité de détection et de caractérisation des milieux et défauts. Ce chapitre rappelle les généralités sur la propagation ultrasonore dans un **milieu théorique parfait**, et fait l'état de l'art des caractéristiques d'un **milieu réel**, rencontré dans l'industrie, pouvant influencer la propagation ultrasonore, qui peut donc s'écarter de la théorie établie dans un milieu parfait. Une synthèse importante est faite à la fin du chapitre, permettant d'identifier les problématiques actuelles, et comment s'insèrent les différents travaux de recherche réalisés, expliqués dans les chapitres suivants.

Le chapitre 3 détaille mes travaux concernant la propagation ultrasonore dans les **soudures épaisses**, qui est ma principale thématique de recherche. Elle correspond à un besoin réel et particulièrement d'actualité de contrôle non destructif dans le domaine nucléaire. Dans le circuit primaire notamment, on utilise des matériaux métalliques anisotropes et hétérogènes, soudés, dont la structure dépend du procédé de soudage. En particulier, le dépôt des passes successives pour remplir le chanfrein implique des croissances de grains complexes. Elles ne sont pas aléatoires, mais déterminées par des processus qu'il faut connaître pour pouvoir prévoir la propagation des ondes. En effet, ces structures très particulières impliquent un contrôle ultrasonore réputé complexe, du fait des fortes déviations et atténuation subies par le faisceau ultrasonore. L'objectif est donc de comprendre les phénomènes et améliorer la modélisation afin de fiabiliser le diagnostic. Cela passe par l'étude de l'orientation des grains, de l'atténuation, et d'autres paramètres d'influence de la modélisation comme les constantes d'élasticité.

Le chapitre 4 expose mes travaux concernant la propagation ultrasonore dans différents autres milieux et structures complexes, dans un premier temps dans le cadre des réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération, refroidis au sodium liquide (RNR-Na). On s'intéresse tout d'abord à la **téléométrie** d'objets ou de structures positionnés derrière des écrans (plaques d'acier). Ce métal liquide est opaque et interdit tout contrôle visuel interne. On introduit alors des cibles, dont la réponse acoustique spécifique est analysée. On étudie ensuite la problématique du contrôle de **structures multi-plaques immergées**, en utilisant de manière originale les ondes de Lamb associées au retournement temporel, afin de détecter et localiser des défauts dans chaque plaque. L'application visée est le contrôle, depuis l'extérieur, des structures internes de la cuve de réacteur nucléaire. Enfin toujours pour le sodium liquide, la propagation ultrasonore dans des **fluides** avec écoulement

et hétérogénéité de température est analysée et modélisée, avec pour objectif la mesure de température du sodium liquide en sortie du cœur du réacteur.

Dans un second temps, je m'intéresse aux **fissures** partiellement fermées, afin de trouver une méthode qui permette de les détecter, mais surtout de les dimensionner correctement, la partie fermée étant invisible aux méthodes ultrasonores classiques.

Enfin quelques travaux complémentaires dans les **bétons** et les **composites** sont également exposés. A chaque fois, l'objectif est soit de contrôler les structures (et caractériser les éventuels défauts), soit d'évaluer un ou plusieurs paramètres du milieu de propagation.

Le chapitre 5 porte sur les travaux réalisés pour tenter de comprendre pourquoi des **métaux** standards de construction métallique classique, **réputés homogènes isotropes**, peuvent perturber un diagnostic de CND. On montre que des **caractéristiques micrométriques** comme les distributions de tailles de grains, ou encore les défauts dans le réseau cristallin (comme les dislocations ou les macles), peuvent influencer de manière non négligeable la propagation des ultrasons. On montre l'influence de cette microstructure sur les caractéristiques de la propagation ultrasonore : la vitesse, et l'atténuation.

La dernière partie fait un **bilan** et donne les **perspectives** de ces travaux. Je propose des actions dans la continuité des études réalisées, en particulier concernant la propagation dans les soudures épaisses. Je re-situe également l'importance de l'atténuation, ce qui me permet de proposer un projet de recherche original sur l'amélioration et la fiabilisation de la mesure de l'atténuation ultrasonore.

Curriculum Vitae

Etat civil et situation actuelle

PLOIX Marie-Aude

Ingénieur chercheur Protisvalor / LMA

Responsable NDTVvalor

Née le 05/12/1980 à Montbéliard (25)

marie-aude.ploix@univ-amu.fr

LMA CNRS UMR 7031

Aix-Marseille Université

Département GMP, IUT d'Aix

413 Avenue Gaston Berger

13 625 Aix-en-Provence Cedex

Cursus universitaire et diplômes

2006 **Doctorat** au laboratoire GEMPPM (devenu MATEIS) de l'INSA de Lyon,
en collaboration avec le LCND (devenu LMA) d'Aix-en-Provence, et financé par EDF R&D

« Étude de l'atténuation des ondes ultrasonores.

Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique »

Jury :	Chassignole B.	Ingénieur de recherche, EDF R&D	Invité
	Conoir J.M.	Directeur de Recherche, LAUE	Rapporteur
	Corneloup G.	Professeur des Universités, LCND	Directeur de thèse, invité
	El Guerjouma R.	Professeur des Universités, LAUM	Co-directeur de thèse
	Guy P.	Maître de Conférences, MATEIS	Examineur
	Lhémy A.	Ingénieur de Recherche HDR, CEA Saclay	Rapporteur
	Moysan J.	Maître de Conférences, HDR, LCND	Examineur
	Royer D.	Professeur des Universités, LOA	Président du jury

2003 **DEA Mécanique**, Filière Solides – Univ. de la Méditerranée – Mention Bien

2003 **Diplôme d'ingénieur** ISITV – Spécialité Ingénierie mathématique (modélisation numérique) (Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var, devenu SeaTech)

1998-2000 Classe Préparatoire aux Grandes Écoles (MPSI puis PSI) – Lycée V. Hugo (Besançon)

1998 Baccalauréat S option Mathématiques – Lycée Cuvier (Montbéliard) – Mention AB

Poste occupé

Depuis 2006 Ingénieur chercheur Protisvalor (en CDI depuis 2015),
rattachée au LMA (UMR 7031) depuis 2012

1. Liste des activités de recherche

1.1. Participation à des projets nationaux

2005-2008

❖ **Projet ANR ACTENA** (*Auscultation des CAbles TEndus Non Accessibles*), coordonné par le LCPC

Partenaires : ARMINES, CETE Lyon, CEA, ENPC, INSA Lyon, LCPC, Univ. Bordeaux I, Univ. D'Artois, UTC, Univ. des sciences et technologies Lille, Univ. Toulouse III, LCND

Livrables ANR (CHAIX J.F., CORNELOUP G., GARNIER V., LILLAMAND I. & PLOIX M.A.)

2006-2009

❖ **Projet ANR SENSO** (*Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton*), coordonné par le LMDC de Toulouse

Partenaires : GETEC, EDF CEIDRE, EXAM-BTP, SOVEP, Port Autonome Nantes St-Nazaire, LMDC (Univ. Toulouse), GHYMAC (Univ. Bordeaux I), IEMN (E.C. Lille), LCPC, LEAT (Univ. Sophia Antipolis), LCND

Livrables ANR (PLOIX M.A., MOYSAN J. & GARNIER V.)

❖ **Projet ANR SISTAE** (*Simulation et STATistiques pour les Essais non destructifs*), coordonné par le CEA Saclay

Partenaires : CEA, EADS, EDF, Bureau Veritas, CEDRAT, Ecole Polytechnique, LCND

Livrables ANR (PLOIX M.A. & MOYSAN J.)

2011-2015

❖ **Projet ANR MOSAICS** (*MOdélisation d'une Soudure Austénitique Inspectée par Contrôle ultraSonore*), coordonné par EDF R&D

Partenaires : CEA, DCNS, EDF R&D, EXTENDE, MATEIS (INSA Lyon), LCND

Livrables ANR (CORNELOUP G., GUEUDRÉ C. & PLOIX M.A.)

2016-2018

❖ **Projet ANR MUSCAD** (*Méthodes UltraSoniques pour la Caractérisation de matériaux de composants nucléaires pour l'Amélioration du Diagnostic*), coordonné par le CEA Saclay

Partenaires : CEA, EDF R&D, LVA (INSA Lyon), EXTENDE, LMA

Livrables ANR (GUEUDRÉ C., PLOIX M.A., MAILHÉ J. & CORNELOUP G.)

2022 : Participation au montage du projet ANR FAMPIC (*Fabrication Additive Minorant défaut et déchet : aPproche combinée Intelligence artificielle et modélisation du Contrôle ultrasonore*), coordonné par le LMA

Phase 1 : accepté – phase 2 : rejeté

Partenaires : LMA, Institut de Soudure, EDF R&D

2023 : Participation au montage du projet ANR MINA3D (*Modélisation 3D de la structure cristalline des soudures austénitiques épaisses multipasses réalisées en position par le procédé TIG. Application au contrôle non destructif par ultrasons*), coordonné par le LMA

Accepté, démarrage le 01/04/2024

Partenaires : LMA, IUSTI, LMGC, EDF R&D, CEA LIST, CEA LTA

1.2. Encadrements de travaux de recherche

1.2.1. Co-direction de thèses

2009-2013	
MASSACRET Nicolas	“Étude d’une méthode ultrasonore d’estimation des températures locales du sodium liquide en sortie cœur RNR-Na” Thèse CEA, soutenue le 10 janvier 2013 Direction : J. Moysan - Co-direction : M.A. Ploix (30%) - Encadrant CEA : J.P. Jeannot
2011-2013	
BAKHTI Samir	“Application de la technique tandem multi-éléments à la caractérisation ultrasonore de la structure d’une soudure multi-passes en acier inoxydable austénitique” Thèse AMU (ANR MOSAICS) <i>(S. Bakhti a démissionné du statut de doctorant en milieu de 3ème année et a continué son contrat en tant qu’ingénieur)</i> Direction : G. Corneloup - Co-direction : C. Gueudré, M.A. Ploix (~5%)
2015-2018	
KAUFFMANN Pierre	“Étude de la propagation, réémission et transmission des ondes de Lamb en vue du Contrôle Non Destructif de structures de réacteurs nucléaires immergées en sodium liquide” Thèse phare CEA, soutenue le 8 novembre 2018 Direction : G. Corneloup - Co-direction : M.A. Ploix (33%), J.-F. Chaix, C. Gueudré - Encadrant CEA : F. Baqué
2017-2020	
MARSAC Quentin	“Modélisation de la macrostructure de soudures TIG épaisses multipasses en acier inoxydable austénitique. Application au contrôle ultrasonore de soudures du circuit primaire des RNR-Na” Thèse CEA, soutenue le 19 novembre 2020 Direction : G. Corneloup - Co-direction : C. Gueudré, M.A. Ploix (33%) - Encadrant CEA : F. Baqué
2018-2022	
VALLÉE Jean-Christophe	“Génération et propagation d’ondes de Lamb dans les structures multi-plaques - Apport du retournement temporel pour le contrôle non destructif par ultrasons des cuves de réacteurs de génération IV” Thèse phare CEA, soutenue le 5 décembre 2022 Direction : J.-F. Chaix - Co-direction : M.A. Ploix (50%) - Encadrants CEA : F. Baqué et M. Cavaro
2020-2023	
PERRIN Arthur	“Ultrasons non linéaires pour la caractérisation de fissures fermées dans les matériaux métalliques” Thèse CIFRE NAVAL GROUP, en cours (démarrée en avril 2021) Direction : C. Payan - Co-direction : C. Gueudré, M.A. Ploix (20% les 2 premières années) - Encadrant NAVAL GROUP : P. Recolin
2024...	
	“Modélisation 3D de la structure cristalline de soudures épaisses. Application au contrôle non destructif par ultrasons” Thèse ANR (MINA3D), à venir Direction : C. Gueudré - Co-direction : M.A. Ploix - Encadrant CEA Saclay : L. Forest

1.2.2. Co-encadrement de stages Master

2013	
Stage Master 2 Agnès Zambon	“Etude et optimisation de la procédure de contrôle de pièces aéronautiques forgées en alliage de Titane Ti-6246” - Aubert&Duval
2014	
Stage Master 2 Clément Fillon	“Etude et optimisation du contrôle ultrasonore de pièces aéronautiques forgées” - Aubert&Duval
Stage Master 2 Pascal Fossat	“Potentialités des méthodes acoustiques pour la détection de défauts plans dans une plaque combustible” - CEA Cadarache / Laboratoire LEGEND
2015	
Stage Master 2 Pierre Kauffmann	“Étude de l’atténuation des ondes de Lamb en vue du Contrôle Non Destructif de réacteurs nucléaires refroidis au sodium liquide” - CEA Cadarache / Laboratoire LIET
2018	
Stage Master 1 François-Guillaume Ide	“Amélioration du Contrôle Non Destructif ultrasonore d'une soudure. Étude de l'influence des incertitudes des constantes d'élasticité sur la modélisation de la propagation du faisceau acoustique” – Projet ANR MUSCAD
2023	
Stage Master 1 Alexis Lebrat	“Étude d’une méthode d’imagerie non linéaire pour la détection et la caractérisation de fissures partiellement fermées” – Framatome Intercontrôle

1.2.3. Co-encadrement d’ingénieurs/post-doctorants

Nous avons été amenés à embaucher plusieurs ingénieurs et post-docs, que j’ai (co-)encadré, en tant que responsable de NDTValor (cf. page suivante) :

- ✓ Erwin Taviot, Ingénieur, 12 mois. 2012-2013. *CEA/NDTValor*. Caractérisation de capteurs ultrasonores spéciaux (TUSHT)
- ✓ Nicolas Massacret, Post-Doc, 24 mois. 2014-2016. *CEA/LMA*. SONAR, BUST, IKHAR
- ✓ Alejandro Vital-Juarez, Ingénieur, 12 mois. 2016-2017. *CEA/NDTValor*. Instrumentation, CIVA
- ✓ Masaru Nagaso, Post-Doc, 8 mois. 2018-2019. *CEA/NDTValor*. Valorisation calcul scientifique
- ✓ Pierre Kauffmann, Post-Doc, 8 mois. 2018-2019. *CEA/NDTValor*. Télémétrie
- ✓ Jean-Christophe Vallée, Post-Doc, 6 mois. 2023. *CEA/LMA*. Contrôle multi-plaques

1.3. Valorisation de la recherche, rayonnement scientifique et responsabilités

1.3.1. Pôle de compétences NDTValor

Le pôle de compétences NDTValor, créé en 2011, est la mise en synergie de savoir-faire et de compétences de quatre laboratoires de recherche (le LVA, MATEIS et CREATIS de l'INSA de Lyon ainsi que l'ex-LCND, intégré au LMA de Marseille), avec le Centre de formation END et de métrologie d'INSAVALOR.

NDTVALOR PÔLE DE COMPETENCES END MULTISERVICES

géré par : **PROTISVALOR** et/ou **INSA VALOR**
AU SERVICE DE LA RECHERCHE
Filiale de valorisation de Aix-Marseille Université

selon le partenariat avec les laboratoires de recherche :

LMA à Marseille / Aix-en-Provence, et **LVA** , **Mateis** et **CREATIS** à Lyon.



La mise en commun de compétences, ressources, et moyens permet de répondre aux nouveaux enjeux de R&D exprimés par les besoins actuels des industriels en Essais Non Destructifs. L'élargissement de l'application des END à des domaines où ils étaient peu utilisés nécessite une adaptation des méthodes traditionnelles.

Ainsi l'évolution des matériaux employés dans les industries, comme l'aéronautique, le nucléaire... ne permet plus d'envisager une approche classique basée sur des modèles simples, mais au contraire implique de reconsidérer une orientation favorisant la modélisation, la simulation, l'expérimentation, et éventuellement l'utilisation en parallèle de plusieurs méthodes associées à la fusion de données.

NDTValor propose une offre intégrée de services en END allant d'une expertise matériaux à la mise œuvre d'instrumentation existante ou conçue en fonction du besoin, jusqu'au traitement de l'information et des données. La nature des prestations offertes englobe la R&D, l'expertise, les essais et mesures, le conseil mais aussi la formation et la qualification des professionnels des END.

Depuis la création de NDTValor, je suis la responsable scientifique pour la partie Aix-Marseille. Je m'occupe également de la gestion administrative, financière et RH, avec Protisvalor (société de valorisation d'Aix-Marseille Université). Nous réalisons principalement des prestations d'expertise, de recherche et de R&D.

1.3.2. Participation à des instances et responsabilités

▪ Participation aux jurys de thèse de Nicolas Massacret (2013), Pierre Kauffmann (2018), Quentin Marsac (2020) et Jean-Christophe Vallée (2022).

▪ Membre de la COFREND (Confédération Française pour les Essais Non Destructifs) depuis 2017, et membre du Comité Régional Sud-Est depuis 2020

Dans ce cadre, participation à l'organisation de la Journée Technique Régionale de 2022, et celle de 2024 en préparation.

▪ Membre du Comité Opérationnel (COMOP) MISTRAL (laboratoire commun CEA/LMA) depuis 2019

▪ Membre du comité d'experts HCERES 2021 du LMN (Laboratoire de Mécanique de Normandie, INSA Rouen)

▪ Membre du comité de suivi de thèses 2022 de l'école doctorale « Sciences Pour l'Ingénieur » (ED 353)

▪ En interne au LMA :

○ Animation et coordination de l'équipe du site d'Aix-en-Provence depuis 2019

○ Co-responsable du Centre de Ressources Contrôle et Evaluation Non Destructifs

○ Membre du Groupe de Travail « Structuration des moyens expérimentaux » (2020-2021)

○ Membre du Groupe de Travail pour auditionner, évaluer et classer les demandes de bourses de thèse de l'école doctorale (2023)

1.3.3. Reviews d'articles de recherche

Reviewer d'articles (13) pour des revues renommées à comité de lecture :

2011	Journal of Key Engineering Materials
2011	Revue de métallurgie
2013	Ultrasonics
2014	IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control
2015	IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control
2016	IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control
2017	Acta Acustica united with Acustica
2017	Nondestructive Testing and Evaluation
2019	Ultrasonics
2021-2022	Ultrasonics (3 reviews du même article)
2022	Journal of Nondestructive Evaluation (2 reviews du même article)
2023	International Journal of Pressure Vessels and Piping
2024	Ultrasonics

1.4. Contrats et prestations de recherche et d'expertise

2007-2008

CEA Cad./LIET	<p>Prestations d'expertise et de faisabilité :</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Etude de faisabilité sur l'inspection ultrasonore de structures immergées en sodium liquide, non directement accessibles✓ Etude du potentiel du rétro-CND, méthode de conception d'ensembles mécaniques prenant en compte simultanément les règles du contrôle non destructif✓ Etude expérimentale de la télémétrie ultrasonore appliquée à des objets situés derrière des écrans <p><i>Livable n°1 (juillet 2007), CORNELOUP G., MOYSAN J. & PLOIX M.A.</i></p> <p><i>Livable n°2 (novembre 2008), CHAIX J.F., PAYAN C., PLOIX M.A., LEOR N. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°3 (décembre 2008), CORNELOUP G. & PLOIX M.A.</i></p>
---------------	--

2008-2009

Sonaxis et CreusotForge	<p>Etude de l'amélioration des performances apportées par la méthode DTVG dans le cadre de la détection de défauts situés dans des matériaux à gros grains (travaux confidentiels)</p> <p><i>Livable n°1 (décembre 2008), PLOIX M.A., GUEUDRÉ C. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°2 (novembre 2009), PLOIX M.A., GUEUDRÉ C. & CORNELOUP G.</i></p>
-------------------------	--

2009-2015

CEA Cad./LIET	<p>Convention pluriannuelle sur plusieurs thématiques :</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Mesure de température par ultrasons en sortie du cœur✓ Contrôles ultrasonores depuis l'extérieur de la cuve✓ Télémétrie ultrasonore à travers écrans✓ Recommandations de Conception issues du Contrôle Non Destructif (RC-CND)✓ Caractérisation ultrasonore de capteurs haute température <p><i>Livable n°1 (juillet 2009), PLOIX M.A., CHAIX J.F., PAYAN C., LILLAMAND I. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°2 (décembre 2009), PLOIX M.A. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°3 (juillet 2010), PLOIX M.A., GILLOT-LAMURE M. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°4 (décembre 2010), PLOIX M.A., CHAIX J.F., GILLOT-LAMURE M. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°5 (juillet 2011), PLOIX M.A., CORNELOUP G., CAVARO M. & CHAIX J.F.</i></p> <p><i>Livable n°6 (décembre 2011), PLOIX M.A., CHAIX J.F., CAVARO M., BAUDOT A., MOYSAN J. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°7 (juillet 2012), PLOIX M.A., CHAIX J.F., TAVIOT E., MOYSAN J. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°8 (décembre 2012), PLOIX M.A., CHAIX J.F., TAVIOT E., MOYSAN J. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°9 (juillet 2013), PLOIX M.A., CHAIX J.F., MOYSAN J., TAVIOT E. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°10 (janvier 2014), PLOIX M.A., MOYSAN J. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°11 (juin 2014), PLOIX M.A., CHAIX J.F. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°12 (décembre 2014), PLOIX M.A., CHAIX J.F. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°13 (septembre 2015), PLOIX M.A., CHAIX J.F. & CORNELOUP G.</i></p>
---------------	--

2011-2012

EDF R&D et DCNS	<p>Développement de l'IHM MINA, et extension aux soudures en X et K</p> <p><i>Livable n°1 (septembre 2011), PLOIX M.A., MOYSAN J., GUEUDRÉ C. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°2 (décembre 2011), PLOIX M.A., GUEUDRÉ C., MOYSAN J. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>Livable n°3 (mai 2012), PLOIX M.A., GUEUDRÉ C., MOYSAN J. & CORNELOUP G.</i></p> <p><i>MINA v3 et son guide d'utilisation</i></p>
-----------------	--

2014-2016

CEA Cad./LIET	Développements de codes de calcul pour la télémétrie par ultrasons en sodium liquide et validations expérimentales <i>Livrable n°1 (octobre 2014), MASSACRET N., MOYSAN J. & PLOIX M.A.</i> <i>Livrable n°2 (novembre 2014), MASSACRET N., MOYSAN J. & PLOIX M.A.</i> <i>Livrable n°3 (juillet 2015), MASSACRET N., MOYSAN J. & PLOIX M.A.</i> <i>Livrable n°4 (novembre 2015), MASSACRET N., MOYSAN J. & PLOIX M.A.</i> <i>Livrable n°5 (avril 2016), MASSACRET N., MOYSAN J. & PLOIX M.A.</i> <i>Synthèse (mai 2016), MASSACRET N., MOYSAN J. & PLOIX M.A.</i>
---------------	--

2016-2017

CEA Cad./LIET	Support pour les études de propagation des US en milieu hétérogène (simulation et expériences) et application au collecteur chaud d'ASTRID <i>Livrable n°1 (mai 2017), PLOIX M.A., VITAL JUAREZ A., MOYSAN J. & CORNELOUP G.</i> <i>Livrable n°2 (novembre 2017), PLOIX M.A., VITAL JUAREZ A., MOYSAN J. & CORNELOUP G.</i>
---------------	---

2016-2018

CEA Cad./LISM	Télémétrie ultrasonore derrière écran, et support à la thèse d'Emma Lubeigt <i>Livrable n°1 (octobre 2016), PLOIX M.A., CHAIX J.F., GUEUDRÉ C. & CORNELOUP G.</i> <i>Livrable n°2 (novembre 2017), PLOIX M.A., CHAIX J.F., GUEUDRÉ C. & CORNELOUP G.</i> <i>Livrable n°3 (septembre 2018), PLOIX M.A., CHAIX J.F. & CORNELOUP G.</i>
---------------	---

2016-2019

CEA Cad./LISM	Contrôlabilité des matériaux, des structures, et des structures soudées <i>Livrable n°1 (novembre 2016), PLOIX M.A., LILLAMAND I., GUEUDRÉ C. & CORNELOUP G.</i> <i>Livrable n°2 (novembre 2017), PLOIX M.A., LILLAMAND I., GUEUDRÉ C. & CORNELOUP G.</i> <i>Livrable n°2bis (octobre 2018), PLOIX M.A., LILLAMAND I., GUEUDRÉ C., CHAIX J.F. & CORNELOUP G.</i> <i>Livrable n°3 (octobre 2019), PLOIX M.A., LILLAMAND I., GUEUDRÉ C. & CORNELOUP G.</i>
---------------	--

2018-2019

CEA Cad./LISM	Valorisation de calcul scientifique et de gestion de données scientifiques <i>Livrable n°1 (décembre 2018), NAGASO M., PLOIX M.A. & MOYSAN J.</i> <i>Livrable n°2 (mars 2019), NAGASO M., PLOIX M.A. & MOYSAN J.</i> <i>Livrable n°3 (juin 2019), NAGASO M., PLOIX M.A. & MOYSAN J.</i>
---------------	--

2018-2020

CEA Cad./LISM	Télémétrie ultrasonore derrière écrans, sans et avec cible (triplan et quadriplan) <i>Livrable n°1 (décembre 2018), PLOIX M.A., KAUFFMANN P. & CORNELOUP G.</i> <i>Livrable n°2 (juin 2019), PLOIX M.A., KAUFFMANN P. & CORNELOUP G.</i> <i>Livrable n°3 (novembre 2019), PLOIX M.A. & CORNELOUP G.</i> <i>Livrable n°4 (octobre 2020), PLOIX M.A. & CORNELOUP G.</i>
---------------	---

2020-2021

CEA Saclay/SRMA	Influence de la taille des grains des aciers austénitiques sur leur contrôlabilité ultrasonore <i>1 Livrable (octobre 2021), PLOIX M.A. & CORNELOUP G.</i>
-----------------	---

2021

EDF R&D	Développement et adaptation du modèle MINA pour son intégration à la plateforme CIVA <i>1 Livrable (septembre 2021) : MINA v4.0 et son guide d'utilisation</i>
---------	---

2022

Framatome	Etude bibliographique concernant le potentiel de l'acoustique non linéaire dans le CND par ultrasons des matériaux métalliques <i>1 Livrable (décembre 2022), PLOIX M.A. & CORNELOUP G.</i>
-----------	--

2023

Bürkert Expertise concernant un dispositif de mesure de débit par ultrasons utilisant les leaky Lamb waves
1 Livrable (octobre 2023), PLOIX M.A., VALLÉE J.C. & CHAIX J.F.

2023-2024

Framatome Caractérisation des pièces étalons fissurées pour la poursuite des travaux sur les méthodes ultrasonores non linéaires
En cours, PLOIX M.A., GUEUDRÉ C. & CORNELOUP G.

2023-2024

CEA Cad./LISM Poursuite et synthèse des travaux de contrôles derrière écrans par méthodes ultrasonores
En cours, VALLÉE J.C., PLOIX M.A. & CHAIX J.F.

1.5. Liste de la production scientifique

1.5.1. Contributions à des ouvrages collectifs

-
- [CO 1] MOYSAN J., GUEUDRÉ C., PLOIX M.A., CORNELOUP G., GUY P., EL GUERJOURA R. & CHASSIGNOLE B., *Advances in ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds. Towards a 3D description of the material including attenuation and optimisation by inversion*, dans : Leger A., Deschamps M. (eds) *Ultrasonic Wave Propagation in Non Homogeneous Media*. Springer Proceedings in Physics, vol 128. Springer, Berlin, Heidelberg, **2009**. doi: [10.1007/978-3-540-89105-5_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-89105-5_2)
-
- [CO 2] BREYSSE D., *Non-destructive assessment of concrete structures: Reliability and limits of single and combined techniques - State-of-the-art report of the RILEM technical committee 207-INR*, Editeur Springer, 389 p., **2012**. ISBN: [978-9400727359](https://www.isbn-international.org/product/978-9400727359)
(contribution au chapitre 3)
-
- [CO 3] CORNELOUP G. & GUEUDRÉ C., *Le Contrôle Non Destructif (CND) et la contrôlabilité des matériaux et structures*, Edition PPUR, Collection Metis Lyon Tech, 316 p., **2016**. ISBN: [978-2889150021](https://www.isbn-international.org/product/978-2889150021)
(contribution aux chapitres 13 et 14)
-
- [CO4] CORNELOUP G., GUEUDRÉ C. & PLOIX M.A., *Non-Destructive Testing and testability of materials and structures*, Edition EPFL, Collection Engineering Sciences, 320 p., **2021**. ISBN: [978-2889154401](https://www.isbn-international.org/product/978-2889154401)
-

1.5.2. Publications dans des revues à comité de lecture

-
- [RCL 1] PLOIX M.A., EL GUERJOURA R, MOYSAN J., CORNELOUP G. & CHASSIGNOLE B., *Acoustical characterization of austenitic stainless steel welds for experimental and modeling NDT*, **Journal of Advanced Science** 17 (1), 76-81 (**2005**). doi: [10.2978/jsas.17.76](https://doi.org/10.2978/jsas.17.76)
-
- [RCL 2] MOYSAN J., PLOIX M.A., CORNELOUP G., GUY P., EL GUERJOURA R. & CHASSIGNOLE B., *Advances in ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds*, **Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing** 28 (3), 245-253 (**2008**). [hal-00434013v1](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00434013v1)
-
- [RCL 3] CHASSIGNOLE B., DUWIG V., PLOIX M.A., GUY P. & EL GUERJOURA R., *Modelling the attenuation in the ATHENA finite elements code for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds*, **Ultrasonics** 49 (8), 653-658 (**2009**). doi: [10.1016/j.ultras.2009.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2009.04.001)
-
- [RCL 4] BREYSSE D., LARGET M., SBARTAI Z.M., PLOIX M.A. & GARNIER V., *Non destructive measurement data fusion for a better assessment of concrete*, **European Journal of Environmental and Civil Engineering** 13 (4), 501-515 (**2009**). doi: [10.3166/EJECE.13.501-515](https://doi.org/10.3166/EJECE.13.501-515)
-

-
- [RCL 5] LILLAMAND I., CHAIX J.F., PLOIX M.A. & GARNIER V., *Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading*, **NDT&E International** 43 (8), 655-660 (2010). doi: [10.1016/j.ndteint.2010.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.07.001)
-
- [RCL 6] CHASSIGNOLE B., EL GUERJOURA R., PLOIX M.A. & FOUQUET T., *Ultrasonic and structural characterization of anisotropic austenitic stainless steel welds: Towards a higher reliability in ultrasonic non-destructive testing*, **NDT&E International** 43 (4), 273-282 (2010). doi: [10.1016/j.ndteint.2009.12.005](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.12.005)
-
- [RCL 7] PLOIX M.A., GARNIER V., BREYSSE D. & MOYSAN J., *NDE data fusion to improve the evaluation of concrete structures*, **NDT&E International** 44 (5), 442-448 (2011). doi: [10.1016/j.ndteint.2011.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.04.006)
-
- [RCL 8] PLOIX M.A., GUY P., CHASSIGNOLE B., MOYSAN J., CORNELOUP G & EL GUERJOURA R., *Measurement of ultrasonic scattering attenuation in austenitic stainless steel welds: realistic input data for NDT numerical modeling*, **Ultrasonics** 54 (7), 1729-1736 (2014). doi: [10.1016/j.ultras.2014.04.005](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.04.005)
-
- [RCL 9] MASSACRET N., MOYSAN J., PLOIX M.A., JEANNOT J.P. & CORNELOUP G., *Modelling of ultrasonic propagation in turbulent liquid sodium with temperature gradient*, **Journal of Applied Physics** 115 (20) (2014). doi: [10.1063/1.4875876](https://doi.org/10.1063/1.4875876)
-
- [RCL 10] PLOIX M.A., CORNELOUP G., MOYSAN J. & JEANNOT J.P., *Investigation of ultrasonic backward energy from various edges as a function of their 2D/3D geometry and of the incidence angle, for application to ultrasonic thermometry at the outlet of a tube*, **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation** 6, 38-44 (2016). doi: [10.1016/j.csndt.2016.09.001](https://doi.org/10.1016/j.csndt.2016.09.001)
-
- [RCL 11] NAGASO M., MOYSAN J., BENJEDDOU S., MASSACRET N., PLOIX M.A., KOMATITSCH D. & LHUILLIER C., *Ultrasonic thermometry simulation in a random fluctuating medium: Evidence of the acoustic signature of a one-percent temperature difference*, **Ultrasonics** 68, 61-70 (2016). doi: [10.1016/j.ultras.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.02.011)
-
- [RCL 12] KAUFFMANN P., PLOIX M.-A., CHAIX J.-F., POTE C., GUEUDRÉ C., CORNELOUP G. & BAQUÉ F., *Multi-modal leaky Lamb waves in two parallel and immersed plates: theoretical considerations, simulations and measurements*, **Journal of the Acoustical Society of America** 145 (2), 1018-1030 (2019). doi: [10.1121/1.5091689](https://doi.org/10.1121/1.5091689)
-
- [RCL 13] GUEUDRÉ C., MAILHÉ J., PLOIX M.-A., CORNELOUP G. & CHASSIGNOLE B., *Influence of the uncertainty of elastic constants on the modelling of ultrasound propagation through multi-pass austenitic welds. Impact on Non-Destructive Testing*, **International Journal of Pressure Vessels and Piping** 171, 125-136 (2019). doi: [10.1016/j.ijpvp.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.011)
-
- [RCL 14] KAUFFMANN P., PLOIX M.-A., CHAIX J.-F., GUEUDRÉ C., CORNELOUP G. & BAQUÉ F., *Interferences in the re-emission field of multimodal leaky Lamb waves propagating in an immersed plate: analytical modelling*, **Journal of Sound and Vibration** 465, 14p. (2020). doi: [10.1016/j.jsv.2019.115015](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115015)
-
- [RCL 15] MARSAC Q., GUEUDRÉ C., PLOIX M.-A., FOREST L., BAQUÉ F. & CORNELOUP G., *Realistic Model to Predict the Macrostructure of GTAW Welds for the Simulation of Ultrasonic Non destructive Testing*, **Journal of Nondestructive Evaluation** 39, 80 (2020). doi: [10.1007/s10921-020-00724-y](https://doi.org/10.1007/s10921-020-00724-y)
-
- [RCL 16] PLOIX M.-A., KAUFFMANN P., CHAIX J.-F., LILLAMAND I., BAQUÉ F. & CORNELOUP G., *Acoustical properties of an immersed Corner-Cube Retroreflector alone and behind screen for ultrasonic telemetry applications*, **Ultrasonics** 106, 106149 (10p.) (2020). *Editor's Choice for August 2020, Highlighted article*. doi: [10.1016/j.ultras.2020.106149](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106149)
-
- [RCL 17] VALLEE J.-C., PLOIX M.-A., BAQUÉ F., CAVARO M. & CHAIX J.-F., *Edge and Notch Detection in a Plate Using Time Reversal Process of Leaky Lamb Waves*, **Applied Sciences** 12, 228 (2022). doi: [10.3390/app12010228](https://doi.org/10.3390/app12010228)
-
- [RCL 18] PLOIX M.-A., GUEUDRÉ C., CORNELOUP G. & BAQUÉ F., *A new retroreflector named "quatriplan" based on the corner-cube principle, for advanced ultrasonic telemetry applications*, **Ultrasonics** 132, 106999 (2023), doi: [10.1016/j.ultras.2023.106999](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2023.106999)
-
- [RCL 19] MOYSAN J., GUEUDRÉ C., PLOIX M.-A. & CORNELOUP G., *Twenty years of progresses in modelling the micro-structure for ultrasonic testing from SMAW to GTAW: an analysis for future developments*, **Applied Sciences** 13, 10852 (19p.) (2023) doi: [10.3390/app131910852](https://doi.org/10.3390/app131910852)
-

- [RCL 20] VALLEE J.-C., PLOIX M.-A., CAVARO M. & CHAIX J.-F., *A new methodology of Non-Destructive Testing in a set of two parallel immersed plates using time reversal process and Leaky Lamb waves*, **NDT&E International**, *soumise*
- [RCL 21] PERRIN A., GUEUDRÉ C., PLOIX M.-A., CORNELOUP G., ULRICH T.J., RECOLIN P. & PAYAN C., *Closed cracks characterization in a steel sample applying a pump probe waves ultrasound method*, **Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems**, *soumise*
-

1.5.3. Conférences internationales

- [CI 1] PLOIX M.A., GUY P., EL GUERJOUMA R., MOYSAN J., CORNELOUP G. & CHASSIGNOLE B., *Attenuation assessment for NDT of austenitic stainless steel welds*, 9th **ECNDT** (European Conference on NDT), Berlin (Allemagne), 25-29 sept. 2006. [hal-01300033](#)
- [CI 2] J. MOYSAN, M.A. PLOIX, G. CORNELOUP, P. GUY, R. EL GUERJOUMA, B. CHASSIGNOLE, *Advances in ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds*, **Spring Conference of Korean Society for Non Destructive Testing**, Daejeong (Corée du Sud), 22-23 mai 2008, **Conférence invitée**
- [CI 3] MOYSAN J., GUEUDRÉ C., PLOIX M.A., CORNELOUP G., GUY P., EL GUERJOUMA R. & CHASSIGNOLE B.,
(voir [CO1]) *Advances in ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds. Towards a 3D description of the material including attenuation and optimisation by inversion*, 5th Conference **GDRE 2008** (Groupement De Recherche Européen : GDRE-US), Anglet (France), 2-6 juin 2008. [doi: 10.1007/978-3-540-89105-5_2](#)
- [CI 4] CHAIX J.F., LILLAMAND I., PLOIX M.A., GARNIER V. & CORNELOUP G., *Study of acoustoelasticity behavior of concrete material under uniaxial compression*, Congrès **Acoustics 2008**, Paris (France), juillet 2008
Publié dans **Journal of the Acoustical Society of America** 123, 3847 (2008). [doi: 10.1121/1.2935671](#)
- [CI 5] PLOIX M.A., GARNIER V., BREYSSE D. & MOYSAN J., *Possibilistic NDT data fusion for evaluating concrete structures*, Congrès **NDTCE'09** (Non-Destructive Testing in Civil Engineering), Nantes (France), 30 juin - 3 juillet 2009. [hal-01300025](#)
- [CI 6] MOYSAN J., PLOIX M.A., CORNELOUP G & LE BRUN A., *Analysis of a multiple-operators database for MAPOD study of ultrasonic pulse-echo response from Side-Drilled Holes*, **4th European-American Workshop on Reliability of NDE**, BAM Berlin (Allemagne), 24-26 juin 2009. [hal-01300026](#)
- [CI 7] GOBILLOT G., BAQUÉ F., LHUILLIER C., BRAU P.H., PLOIX M.A., AUGEM J.M. & SAILLANT J.F., *Ultrasonic techniques for improving inspection of sodium-cooled systems*, Congrès **ANIMMA** (1st International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications), Marseille (France), 7-10 juin 2009
Publié dans IEEE Conference Publications. [doi: 10.1109/ANIMMA.2009.5503765](#)
- [CI 8] BALAYSSAC J.P., LAURENS S., ARLIGUIE G., PLOIX M.A., BREYSSE D., DEROBERT X. & PIWAKOWSKI B., *Evaluation of concrete structures by combining non destructive testing methods (SENSO project)*, Congrès **NDTCE'09** (Non-Destructive Testing in Civil Engineering), Nantes (France), 30 juin - 3 juillet 2009. [hal-01303511](#)
- [CI 9] PLOIX M.A., GARNIER V., BREYSSE D. & MOYSAN J., *NDT data fusion for evaluating concrete structures*, Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation **QNDE 2010**, San Diego (Californie), 18-23 juillet 2010. [doi: 10.1063/1.3592084](#)
- [CI 10] CORNELOUP G, PLOIX M.A., CHAIX J.F., LILLAMAND I. & BAQUÉ F., *Potential of ultrasounds for NDT of a structure located behind parallel immersed plates*, Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation **QNDE 2010**, San Diego (Californie), 18-23 juillet 2010. [doi: 10.1063/1.3592132](#)
- [CI 11] MOYSAN J., CORNELOUP G., CHASSIGNOLE B., GUEUDRÉ C. & PLOIX M.A., *Modelling welded material for ultrasonic testing using MINA: Theory and applications*, Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation **QNDE 2011**, Burlington (Vermont), 17-22 juillet 2011. [doi: 10.1063/1.4716358](#)
-

-
- [CI 12] BAQUÉ F., PAUMEL K., CORNELOUP G., PLOIX M.A. & AUGEM J.M., *Non destructive examination of immersed structures within liquid sodium*, Congrès **ANIMMA** (2nd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications) Ghent (Belgique), 6-9 juin 2011
Publié dans IEEE Conference Publications. doi: [10.1109/ANIMMA.2011.6172879](https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2011.6172879)
-
- [CI 13] SBARTAÏ Z.M., GARNIER V. & PLOIX M.A., *Decision making for concrete evaluation using fusion of NDT techniques*, 10th **FLINS** (International Conference on Fuzzy Logic and Intelligent Technologies in Nuclear Science), Istanbul (Turquie), 26-29 août 2012. [hal-02746525](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02746525)
-
- [CI 14] MASSACRET N., MOYSAN J., PLOIX M.A., JEANNOT J.P. & CORNELOUP G., *Simplified modelling of liquid sodium medium with temperature gradient from thermohydraulic measurements to simulate wave propagation in liquid sodium. Application to ultrasonic thermometry in Sodium Fast Reactor*, 7th Conference **GDRE 2012**, Oléron (France), mai 2012. [hal-01300004](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01300004)
-
- [CI 15] MASSACRET N., MOYSAN J., PLOIX M.A., JEANNOT J.P. & CORNELOUP G., *Simplified modeling of liquid sodium medium with temperature and velocity gradient from thermohydraulic data. Application to ultrasonic thermometry in Sodium Fast Reactor*, Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation **QNDE 2012**, Denver (Colorado), 15-20 juillet 2012. doi: [10.1063/1.4789245](https://doi.org/10.1063/1.4789245)
-
- [CI 16] MARTINI D., GARNIER V. & PLOIX M.A., *Evaluation of an intrinsic error estimator for the data fusion of NDT techniques used to identify the material and damage properties of concrete structures*, **EWSHM 2012** (6th European Workshop on Structural Health Monitoring), Dresden (Germany), 3-6 juillet 2012. [hal-01300009](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01300009)
-
- [CI 17] MASSACRET N., MOYSAN J., PLOIX M.A. & JEANNOT J.P., *Validation of predicted path of thermally deflected ultrasonic waves*, **NDCM 13** (13th International Symposium on NonDestructive Characterization of Materials), Le Mans (France), 20-25 mai 2013
-
- [CI 18] MASSACRET N., MOYSAN J., PLOIX M.A., JEANNOT J.P. & CORNELOUP G., *Development of ultrasonic propagation simulation for acoustic thermometry in liquid sodium*, 8th Conference **GDRE 2014**, Gregynog (Wales), 23-27 juillet 2014. [hal-01299997](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01299997)
-
- [CI 19] MASSACRET N., MOYSAN J., PLOIX M.A. & JEANNOT J.P., *Ultrasound propagation through Kelvin-Helmholtz and Von Karman instabilities*, 9th Conference **GDRE 2015**, Aussois (France), 7-11 décembre 2015. [hal-01299996](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01299996)
-
- [CI 20] MASSACRET N., MOYSAN J., PLOIX M.A., JEANNOT J.P. & CHAOUCH N., *Study of ultrasonic propagation through Kelvin-Helmholtz instabilities for monitoring high-temperature fluid*, 19th Conference **WCNDT 2016** (World Conference on Non-Destructive Testing), Munich (Germany), 13-17 juin 2016. [hal-01299995](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01299995)
-
- [CI 21] KAUFFMANN P., PLOIX M.-A., CHAIX J.-F., GUEUDRÉ C., CORNELOUP G. & BAQUÉ F., *Study of Lamb waves for Non-Destructive Testing behind screens*, Congrès **ANIMMA** (International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications), Liège (Belgique), juin 2017. doi: [10.1051/epjconf/201817003005](https://doi.org/10.1051/epjconf/201817003005)
-
- [CI 22] BAQUÉ F., MARLIER R., AUGEM J.M., CORNELOUP G., PLOIX M.-A., GUEUDRÉ C. & LILLAMAND I., *Inspection specifications leading to extended ASTRID Design rules*, Congrès **FR'17** (International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development), Yekaterinburg (Russie), 26-29 juin 2017. [hal: cea-02434030](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-cea-02434030)
-
- [CI 23] KAUFFMANN P., PLOIX M.-A., CHAIX J.-F., GUEUDRÉ C., CORNELOUP G. & BAQUÉ F., *Non-Destructive Testing of Nuclear Structures behind Screen using Leaky Lamb Waves*, Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation **QNDE 2018**, Burlington (Vermont, USA), juillet 2018. doi: [10.1063/1.5099767](https://doi.org/10.1063/1.5099767)
-
- [CI 24] MOYSAN J., Corneloup G., Chaix J.-F., Gueudré C., KOMATITSCH D., LILLAMAND I., MAILHÉ J., MENSAH S., Ploix M.-A., PAYAN C., RAKOTONARIVO S., Baqué F., BONIN J., CAVARO M., GOBILLOT G., JEANNOT J.P., LHUILLIER C., PAUMEL K., LUBEIGT E., MASSACRET N., D'HONDT L., Kauffmann P., NAGASO M. & MARSAC Q., *Recent modelling advances in NDT to improve safety and sustainability for the next generation of nuclear reactor*, Congrès **AFPAC 2019** (Anglo-French Physical Acoustics Conference), Frejus (France), 16-18 janvier 2019. [hal-02411064](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02411064)
-

- [CI 25] GUEUDRÉ C., MAILHÉ J., PLOIX M.-A. & CORNELOUP G., *Non-Destructive Testing by ultrasound for multi-pass austenitic welds. Influence of the uncertainty of elastic constants on the detection of a defect*, Congrès **ICWAM 2019** (2nd International Congress on Welding, Additive Manufacturing and associated non-destructive testing), Metz (France), 5-7 juin 2019. [hal-04204540](#)
- [CI 26] MARSAC Q., GUEUDRÉ C., PLOIX M.-A., ROBIDET R., VETELE A.L., CORNELOUP G., FOREST L. & BAQUÉ F., *Towards a model for predicting the macrostructure of multipass GTAW welds of austenitic stainless steel*, Congrès **ICWAM 2019**, Metz (France), 5-7 juin 2019. [hal-03469989](#)
- [CI 27] PERRIN A., PAYAN C., GUEUDRÉ C., PLOIX M.-A., CORNELOUP G. & RECOLIN P., *Experimental investigation of the crack closure with applying Dynamic Acousto-Elastic Testing on a steel sample*, Congrès **ISNA 2022** (22nd International Symposium on Nonlinear Acoustics), Oxford (Angleterre), 4-8 juillet 2022. [hal-04204602](#)
- [CI 28] PERRIN A., PAYAN C., GUEUDRÉ C., PLOIX M.-A., CORNELOUP G. & RECOLIN P., *Experimental investigation of the crack closure with applying Dynamic Acousto-Elastic Testing on a steel sample*, Workshop **PAC MAN 2022**, Los Alamos (USA), 1-5 août 2022
- [CI 29] PLOIX M.-A., GUEUDRÉ C., MOYSAN J. & CORNELOUP G., *Modelling the microstructure of austenitic thick welds to improve their ultrasonic testing*, 42nd meeting of the **ITPA** Topical Group on Diagnostics, **ITER**, 10-13 octobre 2022, Conférence invitée. [hal-04204630](#)
- [CI 30] PERRIN A., PAYAN C., GUEUDRÉ C., PLOIX M.-A., CORNELOUP G. & RECOLIN P., *Thermal stress opening of closed cracks with local cooling on the cracked surface*, Congrès **ECNDT 2023** (13th European Conference on Non-Destructive Testing), Lisbonne (Portugal), 3-7 juillet 2023. [hal-04204615](#)
- [CI 31] VALLÉE J.-C., PLOIX M.-A., BAQUÉ F., CAVARO M., CHAIX J.-F., *Time reversal method applied to leaky Lamb waves in an immersed layered medium*, Congrès **ECNDT 2023** (13th European Conference on Non-Destructive Testing), Lisbonne (Portugal), 3-7 juillet 2023. [hal-04204622](#)
- [CI 32] VALLÉE J.-C., PLOIX M.-A., CAVARO M., CHAIX J.-F., *A new methodology of NDT in two parallel plates using time reversal process of leaky Lamb waves*, Forum **Acusticum 2023** (10th Convention of the European Acoustics Association), Turin (Italie), 11-15 septembre 2023. [hal-04204637](#)
-

1.5.4. Conférences nationales

- [CN 1] PLOIX M.A., EL GUERJOURA R., MOYSAN J., CORNELOUP G. & CHASSIGNOLE B., *Etude de l'atténuation en vue du contrôle par ultrasons des soudures en acier inoxydable austénitique*, Journées **COFREND 2005** (CONfédération FRANçaise pour les Essais Non-Destructifs), Beaune, 24-26 mai 2005
- [CN 2] CHAIX J.F., PLOIX M.A., LILLAMAND I. & GARNIER V., *Progrès dans la caractérisation ultrasonore de structures en béton*, **JAPSUS 2007** (10^e Journées d'Acoustique Physique, Sous-marine et UltraSonore – Société Française d'Acoustique), Paris, mai 2007. [hal-03576524](#)
- [CN 3] PLOIX M.A., MOYSAN J. & GARNIER V., *Recherche d'une stratégie de fusion de données pour l'estimation des propriétés de structures en béton*, **DIAGNOBETON 2007**, Aix-en-Provence, 10-11 mai 2007
- [CN 4] PLOIX M.A., BREYSSE D., GARNIER V. & SBARTAI M., *La fusion de données de contrôle non destructif au service du diagnostic de l'état du béton : qualité des données et réduction des incertitudes*, **JFMS 2008** (5^{èmes} Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures), Nantes, 26-28 mars 2008. [hal-01300028](#)
- [CN 5] PLOIX M.A., GARNIER V. & MOYSAN J., *Théorie des possibilités appliquée à l'END du béton*, Journées **COFREND 2008**, Toulouse, 21-23 mai 2008. [hal-01300029](#)
- [CN 6] CHAIX J.F., LILLAMAND I., PLOIX M.A., GARNIER V. & CORNELOUP G., *Étude de l'évaluation ultrasonore des contraintes dans les bétons*, Journées **COFREND 2008**, Toulouse, 21-23 mai 2008. [hal-01300030](#)
- [CN 7] BREYSSE D., PLOIX M.A. & GARNIER V., *L'apport de la fusion de données à l'estimation des propriétés du béton*, **Rencontres AUGC 2008**, Nancy, 4-6 juin 2008. [hal-01300031](#)
-

-
- [CN 8] BALAYSSAC J.P., LAURENS S., ARLIGUIE G., PLOIX M.A., BREYSSE D., PIWAKOWSKI B. & VILLAIN G., *Évaluation de l'état des ouvrages en béton par combinaison de techniques non destructives*, Journées **COFREND 2008**, Toulouse, 21-23 mai 2008. [hal-00814962](#)
-
- [CN 9] PLOIX M.A., MOYSAN J., DENANTE M., & CORNELOUP G., *Propagation ultrasonore dans les composites stratifiés et interprétation du bruit de structure*, **CFM 2009** (Congrès Français de Mécanique), Marseille, août 2009. [hal-01300022](#)
-
- [CN 10] CORNELOUP G., MOYSAN J., PLOIX M.A., CHAIX J.F., CAVARO M., GILLOT-LAMURE M., PAUMEL K., BAQUÉ F., JEANNOT J.P., MASSACRET N. & GASTALDI O., *Le contrôle non destructif des structures immergées dans du sodium liquide*, Journées **COFREND 2011**, Dunkerque, 24-27 mai 2011. [hal-01300015](#)
-
- [CN 11] PLOIX M.A., CHAIX J.F., CORNELOUP G. & BAQUÉ F., *Potentiel du contrôle ultrasonore d'une plaque masquée par des écrans parallèles*, Journées **COFREND 2011**, Dunkerque, 24-27 mai 2011. [hal-01300013](#)
-
- [CN 12] BENJEDDOU S., MOYSAN J., MASSACRET N., PLOIX M.A. & JEANNOT J.P., Numerical simulation of the temperature measurement by ultrasonic method in an environment representative of the core of SFR, **CFM 2013**, Bordeaux, 26-30 août 2013. [hal-01300006](#)
-
- [CN 13] MOYSAN J., MASSACRET N., PLOIX M.A., JEANNOT J.P. & CORNELOUP G., *Avancées pour l'inspection non destructive par des méthodes ultrasonores des réacteurs refroidis au sodium liquide*, **CFA 2014** (Congrès Français d'Acoustique), Poitiers, avril 2014. [hal-01299999](#)
-
- [CN 14] CHAIX J.F., PLOIX M.A., CORNELOUP G. & BAQUÉ F., *Analyse des ondes de Lamb pour la détection ultrasonore de défauts*, Journées **COFREND 2014**, Bordeaux, 20-22 mai 2014. [hal-01299998](#)
-
- [CN 15] CORNELOUP G., GUEUDRÉ C., PLOIX M.A., BAKHTI S. & CHASSIGNOLE B., *Prévision de la description de l'anisotropie de soudures austénitiques multipasses pour leur contrôle ultrasonore*, Journées **COFREND 2014**, Bordeaux, 20-22 mai 2014. [hal-01300001](#)
-
- [CN 16] CORNELOUP G., GUEUDRÉ C., PLOIX M.A., AUGEM J.M., SIBILO J., LEBARBE T. & BAQUÉ F., *Recommandations de Conception issues du Contrôle Non Destructif (RCC-MRx)*, Journées **COFREND 2014**, Bordeaux, 20-22 mai 2014. [hal-01300002](#)
-
- [CN 17] MASSACRET N., MOYSAN J., JEANNOT J.P., PLOIX M.A. & CORNELOUP G., *Etude d'une méthode ultrasonore d'estimation des températures du sodium liquide en sortie de cœur de SFR*, Journées **COFREND 2014**, Bordeaux, 20-22 mai 2014. [hal-01300000](#)
-
- [CN 18] MOYSAN J., MASSACRET N., NAGASO M., PLOIX M.A., KOMATITSCH D. & LHUILLIER C., *Mesures ultrasonores de temps de vol pour caractériser le passage de tourbillons dans l'eau : Expérience et simulations*, **CFA 2016**, Le Mans, 11-15 avril 2016. [hal-01299994](#)
-
- [CN 19] CORNELOUP G., GUEUDRÉ C., PLOIX M.A., LILLAMAND I. & BAQUÉ F., *Avancées sur la contrôlabilité ultrasonore des matériaux et structures*, Journées **COFREND 2017**, Strasbourg, 30 mai-1^{er} juin 2017. [hal-02418144](#)
-
- [CN 20] MARSAC Q., GUEUDRÉ C., PLOIX M.A., BAQUÉ F. & CORNELOUP G., *Modèle de prédiction de macrostructure de soudures TIG épaisses multipasses pour l'amélioration du CND par ultrasons*, WebDoctoriales **COFREND 2020**, 30 novembre-3 décembre 2020
-
- [CN 21] VALLEE J.C., CHAIX J.F., PLOIX M.A., BAQUÉ F. & CAVARO M., *Application du retournement temporel aux ondes de Lamb pour le contrôle non destructif des structures multi-plaques immergées en sodium liquide*, WebDoctoriales **COFREND 2020**, 30 novembre-3 décembre 2020
-
- [CN 22] PLOIX M.A., MOYSAN J., GUEUDRÉ C., MAILHÉ J. & CORNELOUP G., *Modélisation de la microstructure des soudures épaisses pour améliorer leur contrôle ultrasonore*, **CFA 2022**, Marseille, 11-15 avril 2022. [hal-03847769](#)
-
- [CN 23] VALLEE J.C., CHAIX J.F., PLOIX M.A., CAVARO M. & BAQUÉ F., *Application du retournement temporel aux ondes de Lamb pour le contrôle non destructif des structures multi-plaques immergées en sodium liquide*, **CFA 2022**, Marseille, 11-15 avril 2022. [hal-03847765](#)
-
- [CN 24] MOYSAN J., CAVARO M., PLOIX M.A. & PAYAN C. *Point d'avancement sur le contrôle ultrasonore d'un milieu liquide avec gradients de température et de vitesse d'écoulement et prise en compte du caractère diphasique du milieu*, Journées **COFREND 2023**, Marseille, 6-8 juin 2023. [hal-04204565](#)
-

-
- [CN 25] PLOIX M.A., GUEUDRÉ C., CORNELOUP G., MAILHÉ J. & MOYSAN J., *Dernières avancées sur la modélisation de la microstructure des soudures épaisses pour améliorer leur contrôle ultrasonore*, Journées **COFREND 2023**, Marseille, 6-8 juin 2023. [hal-04204582](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04204582)
-
- [CN 26] PERRIN A., PAYAN C., GUEUDRE C., PLOIX M.-A., CORNELOUP G. & RECOLIN P., *Ouverture des fissures fermées par refroidissement de la surface fissurée avec un spray de froid*, Doctoriales des Journées **COFREND 2023**, Marseille, 6-8 juin 2023
-
- [CN 27] VALLEE J.C., CHAIX J.F., PLOIX M.A. & CAVARO M., *Génération et propagation d'ondes de Lamb dans les structures multiplaques - Apport du retournement temporel pour le contrôle non destructif par ultrasons des cuves de réacteurs de génération IV*, Doctoriales des Journées **COFREND 2023**, Marseille, 6-8 juin 2023
-

Identifiants :

- ✓ HAL : 8263
- ✓ ORCID : 0000-0002-6988-1833
- ✓ Scopus Author ID : 26634312000

2. Présentation de ma thématique de recherche

Mes activités de recherche ont débuté durant mon doctorat, de 2003 à 2006, au sein du laboratoire GEMPPM (devenu MATEIS) de l'INSA de Lyon, en collaboration avec le LCND, équipe d'accueil de l'Université de la Méditerranée. Mes travaux de thèse étaient dirigés par Rachid El Guerjouma à Lyon et Gilles Corneloup à Aix-en-Provence, et co-encadrés par Philippe Guy et Joseph Moysan.

Je travaille depuis 2006, en tant qu'ingénieur chargée de missions de recherche (sur contrat), au départ au sein du LCND, qui a intégré le LMA (CNRS – UMR 7031) le 1^{er} janvier 2012, dans l'équipe Ondes et Imagerie. Durant ces 17 dernières années, j'ai eu l'occasion de participer, puis de co-encadrer un certain nombre d'études et de projets variés, exposés dans la suite de ce manuscrit.

Ces travaux montrent tous une même direction de recherche : il est possible d'améliorer le contrôle ultrasonore des matériaux et structures complexes par une meilleure connaissance de leur composition et microstructure réelles, aussi bien pour choisir une méthode d'investigation pertinente, que pour comprendre les résultats expérimentaux obtenus et/ou avoir des données d'entrée appropriées, indispensables à une modélisation réaliste.

2.1. Contexte : le CND

Le **Contrôle Non Destructif** (CND) est un enjeu majeur dans le monde industriel. En effet, dans de nombreux domaines (nucléaire, génie civil, aéronautique, ...), il est nécessaire de s'assurer de l'intégrité des structures, d'autant plus aujourd'hui où apparaissent des contraintes sécuritaires de plus en plus fortes. Le CND permet, sans altération de la structure, de contrôler l'absence de défauts, d'estimer la nocivité d'un défaut le cas échéant, et aussi d'évaluer les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant la structure. Le CND regroupe en fait un ensemble de méthodes classées selon les phénomènes physiques mis en jeu : acoustiques (ultrasons, émission acoustique), rayonnements (visuel, radiographie X, γ)... La coexistence de ces différentes méthodes est justifiée par le fait que les caractéristiques générales de l'objet à contrôler peuvent être très variées (Corneloup and Gueudré, 2016; Corneloup et al., 2021).

Le **CND par ultrasons** est très souvent utilisé car il présente des avantages intrinsèques certains, comme la facilité de mise en œuvre, la non-obligation d'accessibilité aux deux faces d'une pièce, la bonne adaptation aux orientations naturelles de la plupart des défauts, la possibilité de traverser de fortes épaisseurs, le lien direct avec les caractéristiques mécaniques du matériau, ainsi que la facilité de numérisation des informations. Mais il a aussi certains inconvénients, comme la nécessité de coupler le transducteur à la pièce, ou la très grande sensibilité de la propagation des ultrasons à l'hétérogénéité et/ou l'anisotropie du matériau.

Le contrôle par ultrasons est donc par nature **pluridisciplinaire**, associant la connaissance du **matériau** et de sa microstructure, l'anticipation des défauts potentiels créés à la fabrication ou en service, ainsi que la propagation des **ondes acoustiques** dans des milieux plus ou moins complexes. Selon les cas, il peut faire intervenir de la **modélisation**, de l'**expérimentation**, de l'**inversion** (optimisation, intelligence artificielle...) pour remonter aux paramètres recherchés (caractéristique mécanique, taille de défaut...), de l'**imagerie** (classique, ou utilisant le retournement temporel...), ou encore du **traitement du signal** ou de l'image. Le champ de recherche est donc très large, et intéresse toujours de nombreuses équipes de recherche.

Dans ce chapitre, je fais la synthèse des connaissances concernant la propagation théorique des ultrasons dans un milieu parfait. Le but ultime étant d'arriver à modéliser correctement la propagation ultrasonore dans un milieu réel, j'analyse ensuite chaque paramètre ayant une influence sur la propagation des ondes ultrasonores. Les échelles mises en jeu sont variées, du grain à la pièce entière avec sa géométrie. A noter que ces travaux bibliographiques font pleinement partie de mes activités de recherche, faisant régulièrement l'objet de contrats pour faire un point sur les connaissances actuelles. Ils sont primordiaux pour pouvoir préconiser des façons de concevoir et de fabriquer afin d'améliorer la **contrôlabilité**. Et ils permettent aussi de poser toutes les bases pour traiter, dans les chapitres suivants, les différents cas de contrôles complexes.

2.2. Généralités sur la propagation ultrasonore

On commence ici par définir les paramètres généraux de la propagation ultrasonore, qui seront ensuite modifiés par les caractéristiques réelles des matériaux.

2.2.1. Caractéristiques d'un milieu théorique parfait

Un milieu dit « théorique parfait » est **infini, élastique, linéaire, homogène et isotrope**. Dans un tel milieu, les ondes ultrasonores se propagent sans déviation ni division, sans consommation d'énergie, et à une vitesse constante, qui dépend uniquement du matériau (de ses caractéristiques mécaniques) et du type d'onde, et donc indépendamment de la fréquence. L'hypothèse de milieu théorique parfait est donc la plus facile pour la modélisation de la propagation ultrasonore.

Tout d'abord, rappelons brièvement la définition de chaque propriété d'un milieu parfait :

- Infini

L'hypothèse de milieu infini signifie que le milieu occupe tout l'espace dans toutes les directions : il ne présente pas de frontières à l'échelle des ondes.

- Elastique

L'élasticité désigne la propriété d'un matériau solide à retrouver sa forme d'origine après avoir été déformé. La déformation élastique est réversible.

- Linéaire

La linéarité implique le respect des principes de superposition et de proportionnalité de la réponse à une sollicitation (préservation des combinaisons linéaires : $f(\lambda x + \mu y) = \lambda f(x) + \mu f(y)$). Dit autrement, la réponse globale d'un système linéaire à plusieurs sollicitations (par exemple plusieurs ondes ultrasonores de différentes fréquences et/ou amplitudes) est égale à la somme des réponses élémentaires.

- Homogène

Un milieu est dit homogène lorsque ses propriétés sont uniformes spatialement.

- Isotrope

L'isotropie désigne l'invariance des propriétés d'un milieu en fonction de la direction.

Tout ou partie de ces propriétés peut être mis à mal par la réalité du matériau, et surtout par ce que voient les ondes ultrasonores en le traversant. Pour le rappel des principales caractéristiques de la propagation

ultrasonore du paragraphe suivant, nous considérons un milieu théorique homogène, qui en sous-entendu respecte également les hypothèses d'infinité, d'élasticité et de linéarité. Pour ce qui est de l'isotropie ou de l'anisotropie, les équations et paramètres qui vont suivre restent vrais car écrits pour le cas général.

2.2.2. Propagation des ondes dans un milieu théorique homogène

A l'échelle du contrôle non destructif par ultrasons, la propagation ultrasonore est toujours élastique. En effet, lorsqu'il s'agit de la propagation d'ondes ultrasonores dans le cadre du CND, on est dans le cadre de petites perturbations. On se place donc sous l'hypothèse d'élasticité, même si le matériau, lui, est mécaniquement dans son domaine plastique.

❖ Equation de propagation

Si l'on considère un milieu homogène soumis à une onde ultrasonore, l'hypothèse des petites perturbations de la théorie de l'élasticité s'applique, et il en découle la **loi de Hooke**, liant les contraintes σ aux déformations ε , écrite dans sa forme générale (Auld, 1990; Rose, 2004; Royer and Valier-Brasier, 2021) :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{avec } i \text{ et } j \in \{1,2,3\} \quad (2.1)$$

où C_{ijkl} (C_{ij} en format contracté matriciel, symétrique, avec 21 constantes indépendantes dans le cas général) est le tenseur d'ordre 4 des **constantes d'élasticité** du matériau, ainsi que les **équations de propagation** des ondes :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \quad (2.2)$$

u_i désignant la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur déplacement particulaire, et ρ la masse volumique du milieu.

Cas parfait

Dans le cas parfait, c'est-à-dire isotrope, les C_{ij} se réduisent aux deux coefficients de Lamé λ et μ comme suit :

$$C_{11} = \lambda + 2\mu \quad , \quad C_{12} = \lambda \quad \text{et} \quad C_{44} = \frac{C_{11} - C_{12}}{2} = \mu \quad (2.3)$$

λ et μ peuvent s'exprimer en fonction du module d'Young E et du coefficient de Poisson ν :

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.4)$$

En émettant l'hypothèse d'une **onde plane monochromatique**, de pulsation $\omega = 2\pi f$, le champ de déplacement est de la forme :

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = A \vec{P} e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})} \quad (2.5)$$

avec A une constante, \vec{P} la **polarisation** (vecteur unitaire, correspondant à la direction du mouvement des particules), et \vec{k} le vecteur d'onde : $\vec{k} = (\omega/V) \vec{n} = (2\pi/\lambda) \vec{n}$, où \vec{n} est le vecteur unitaire de la **direction** de propagation, $\lambda = V/f$ la **longueur d'onde**, et V la **vitesse** de propagation.

Le report de cette forme dans les équations de propagation conduit à l'**équation de Christoffel** :

$$\Gamma_{il}u_l - \rho V^2 u_i = 0 \quad (2.6)$$

où l'on a préalablement posé $\Gamma_{il} = C_{ijkl}n_j n_k$, tenseur d'ordre 2 appelé tenseur de Christoffel, qui présente les mêmes propriétés que le tenseur des constantes d'élasticité.

❖ Vitesse de propagation

Cas parfait

La résolution de ces équations dans un milieu parfait montre que deux types d'onde plane dite pure peuvent se propager (Figure 2.1) :

- une **onde longitudinale** (OL), ou de compression : le vecteur de polarisation est colinéaire à la direction de propagation,
- une **onde transversale** (OT), ou de cisaillement : le vecteur de polarisation est normal à la direction de propagation.

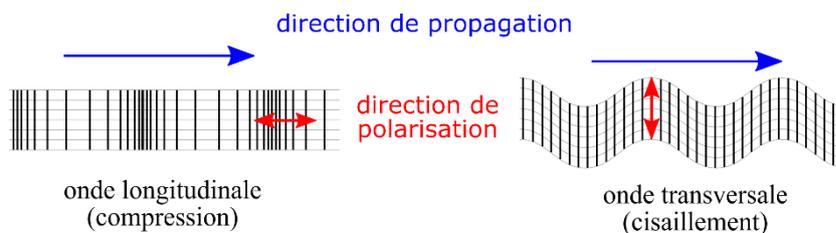


Figure 2.1. Les deux modes purs se propageant dans un milieu « parfait » infini

Leur **vitesse** V est constante et dépend uniquement des caractéristiques élastiques du milieu :

$$V_{OL} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad \text{et} \quad V_{OT} = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \quad (2.7)$$

Dans le cas général en ondes de volume, on définit trois vitesses.

- La **vitesse de phase** (dite canonique) est la vitesse du front d'onde monochromatique (vecteur normal au front d'onde) :

$$\vec{V}_{phase} = \frac{\omega}{k} \vec{n} \quad (2.8)$$

- La **vitesse d'énergie** est la vitesse de transport de l'énergie (cf. illustration de la Figure 2.2) (particulièrement utile dans les milieux anisotropes, voir le paragraphe 2.3.2) :

$$(V_{\text{énergie}})_i = \frac{C_{ijkl} P_j P_k n_l}{\rho V_{phase}} \quad (2.9)$$

La projection de la vitesse d'énergie sur la direction de propagation est égale à la vitesse de phase :

$$\vec{V}_{\text{énergie}} \cdot \vec{n} = V_{phase} \quad (2.10)$$

Donc $V_{\text{énergie}}$ est toujours supérieure ou égale à V_{phase} .

- La **vitesse de groupe** est la vitesse d'un paquet d'ondes de fréquences voisines (vitesse de l'enveloppe), autour d'une certaine fréquence (particulièrement utile dans les milieux dispersifs, voir juste après) :

$$\vec{V}_{\text{groupe}} = \left(\frac{d\omega}{d\vec{k}} \right) \quad (2.11)$$

Dans le cas d'une onde plane se propageant dans un milieu non dissipatif, on a $\vec{V}_{\text{groupe}} = \vec{V}_{\text{énergie}}$.

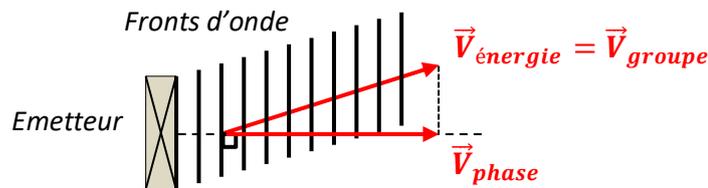


Figure 2.2. Vitesses de phase et d'énergie lors d'une déviation dans un milieu anisotrope

Cas parfait

Dans un milieu parfait, toutes ces vitesses sont égales.

❖ Atténuation

La définition la plus simple de l'**atténuation** est la perte d'amplitude observée sur le trajet des ondes. Pour être plus précis, si l'on parle de l'**atténuation intrinsèque**, il s'agit, pour un matériau donné, de la perte d'amplitude par unité de longueur, uniquement due au matériau (et fonction de la fréquence).

D'après cette définition, seuls deux phénomènes sont impliqués dans l'**atténuation intrinsèque** d'un matériau : l'**absorption**, qui résulte de la viscosité, et transforme l'énergie mécanique en énergie thermique, et la **diffusion**, qui résulte de la présence de diffuseurs, donc de discontinuités d'impédance acoustique, et qui implique une perte d'énergie des ondes cohérentes par le renvoi d'une partie des ondes dans d'autres directions. A noter que l'absorption implique une « vraie » perte d'énergie mécanique car transformée en énergie thermique, alors que dans le cas de la diffusion, toute l'énergie mécanique est conservée mais redistribuée spatialement et temporellement. Comme nous allons le voir par la suite, ce qui complexifie la notion d'atténuation est donc la notion de trajet dans le cas de la diffusion.

Nous reviendrons en détails sur ces phénomènes, au paragraphe 2.3.3 concernant la viscosité, et au paragraphe 2.3.5 concernant la diffusion (hétérogénéité).

L'atténuation est généralement introduite dans les équations par l'ajout d'une partie imaginaire dans le nombre d'onde :

$$\tilde{k} = k - jk' = \frac{\omega}{V_{\text{phase}}} - j\alpha \quad (2.12)$$

où α est le coefficient d'atténuation (par unité de longueur), ce qui implique la forme d'onde :

$$\vec{u}(x, t) = A\vec{P}e^{j(\omega t - kx)}e^{-\alpha x} \quad (2.13)$$

Cas parfait

Il est intéressant de noter ici qu'un matériau parfait n'engendre aucune atténuation.

2.3. Les caractéristiques des matériaux et des structures réels, et leur influence sur la propagation ultrasonore

Quand on envisage un CND industriel classique par ultrasons (détection de défauts), on considère souvent que la propagation des ultrasons est proche de celle que l'on aurait avec un matériau théorique parfait. Or les **matériaux réels** peuvent être viscoélastiques, élastiques non linéaires, anisotropes, et/ou hétérogènes du point de vue des ultrasons (c'est-à-dire selon la longueur d'onde d'auscultation). Ces caractéristiques impliquent des phénomènes plus complexes modifiant la propagation des ondes ultrasonores : des variations (locales et/ou globales) de célérité, des déviations, de l'atténuation et/ou de la diffusion, le tout dépendant de la longueur d'onde, donc de la fréquence (et de l'amplitude dans le cas de la prise en compte de la non-linéarité). De plus, la **structure réelle** à contrôler a des dimensions finies, impliquant des effets dus à la géométrie et aux interfaces rencontrées par les ondes. Et elle peut être obtenue par soudage, forgeage, moulage, collage, etc., ce qui change à chaque fois les caractéristiques du matériau, donc la propagation ultrasonore.

L'ensemble de ces caractéristiques peut fortement modifier le **signal** obtenu, en raison de variations possibles de vitesse, d'atténuation, de direction de propagation ou encore d'apparition d'échos de bruit. Les acquisitions de CND sont alors différentes de celles que l'on aurait avec un milieu parfait. Des erreurs peuvent se produire, dues à la mauvaise interprétation du signal, et ainsi fausser le diagnostic. C'est le cas par exemple des matériaux de type aciers inoxydables austénitiques, bétons, matériaux composites (cf. quelques exemples sur la Figure 2.3), fréquemment utilisés dans les domaines du nucléaire, du génie civil, ou encore de l'aéronautique. C'est aussi le cas avec des structures soudées de ces matériaux métalliques, soudures bimétalliques, structures sous contrainte, etc... Du bruit de structure, dû à la diffusion, peut également apparaître : il se traduit par des échos supplémentaires venant perturber, voire masquer un écho de défaut, par exemple.



Figure 2.3. Quelques exemples de matériaux réels : a) acier moulé statique, b) béton, c) composite forgé

Nous allons définir et aborder ici chacune de ces caractéristiques, et expliquerons dans chaque cas leur influence sur la propagation ultrasonore. L'ordre adopté correspond d'abord aux caractéristiques qui peuvent être rencontrées dans un milieu (ou une zone locale) homogène, à savoir l'anisotropie et la viscoélasticité, puis la non-linéarité (locale que globale), et enfin l'hétérogénéité, qui va faire apparaître des phénomènes particuliers en plus des précédents, selon la fréquence utilisée. Un matériau hétérogène peut en effet être vu comme un ensemble de zones homogènes (voire on peut choisir une fréquence permettant d'homogénéiser la structure du point de vue des ondes ultrasonores).

2.3.1. Dispersion

Commençons par le phénomène de **dispersion** qui implique que la vitesse de propagation d'une onde dépend de sa fréquence. Dans un milieu dispersif, les différentes composantes fréquentielles d'une onde polychromatique vont donc se propager à des vitesses différentes, entraînant une déformation de l'onde. Cela implique en pratique une déformation du signal reçu par rapport à celui émis. Tous les milieux sont dispersifs, à des degrés divers. Dans un milieu très faiblement dispersif, que l'on peut approximer par un milieu non dispersif, on a $V_{phase} = V_{groupe}$, et une onde polychromatique ne sera pas déformée au cours de sa propagation.

Comme nous le verrons plus loin, la dispersion peut également résulter de la géométrie (dispersion géométrique dans la propagation guidée, due à des interférences engendrées par les réflexions successives sur les parois du guide d'ondes), l'absorption (dans les matériaux viscoélastiques), ou encore de la périodicité d'une structure (Gazanhes et al., 1997).

Dans un système respectant les conditions de causalité (l'effet ne précède pas la cause) et de linéarité (la réponse du système est proportionnelle à la sollicitation), la vitesse et l'atténuation (fonctions de la fréquence) sont liées par les **relations de Kramers-Krönig**. D'après les publications fondatrices en acoustique (Sachse and Pao, 1978; O'Donnell et al., 1981), l'atténuation $\alpha(f)$ est mathématiquement liée à la transformée de Hilbert de la vitesse de phase $V_{phase}(f)$, et inversement. L'intérêt des relations de Kramers-Krönig réside dans le fait de ne mesurer que l'un des deux paramètres et d'en déduire l'autre. Un autre intérêt peut être de vérifier la causalité et la linéarité du système de mesure, en mesurant vitesse et atténuation et en vérifiant qu'elles respectent les relations de Kramers-Krönig.

La formulation la plus couramment utilisée (relations quasi-locales, i.e. sur une bande étroite de fréquences) s'écrit :

$$\begin{cases} \alpha(\omega) = \frac{\pi\omega^2}{2V_0^2} \frac{dV(\omega)}{d\omega} \\ \Delta V(\omega) = V(\omega) - V_0 = \frac{2V_0^2}{\pi} \int_{\omega_0}^{\omega} \frac{\alpha(\omega')}{\omega'^2} d\omega' \end{cases} \quad (2.14)$$

où V_0 désigne la vitesse de phase à $\omega = \omega_0$, et avec $\Delta V(\omega) \ll V_0$.

Ces relations ont été vérifiées de nombreuses fois expérimentalement, dans le cas d'atténuations en loi puissance (O'Donnell et al., 1981; Lee et al., 1990; Zellouf et al., 1996; Hosten, 1998; He, 1999; Kendall R. Waters et al., 2000; Trousil et al., 2001), en particulier dans des matériaux viscoélastiques.

En revanche si l'on considère un cas où la vitesse est décroissante en fonction de la fréquence (comme ça peut être le cas dans les milieux diffusants), la première relation impliquerait une atténuation négative, ce qui n'est physiquement pas possible. Il existe en réalité différentes formulations de ces relations (Szabo, 1995; K. R. Waters et al., 2000; Kimura, 2011), selon l'allure de la dispersion et/ou de l'atténuation (beaucoup de travaux dans le cas d'une loi puissance, quelques-uns pour des lois non monotones, comme (Waters et al., 2005)).

2.3.2. Anisotropie

L'**anisotropie** désigne la variation du comportement élastique en fonction de la direction de sollicitation. Dans le cadre de la propagation ultrasonore, les propriétés élastiques (impactant en particulier la vitesse de propagation) dépendent donc des directions de propagation et de polarisation de l'onde dans le matériau. Le nombre de constantes d'élasticité C_{ij} indépendantes est alors supérieur à 2 et dépend du degré de symétrie du matériau. Le Tableau 2.1 ci-dessous résume les principaux types d'anisotropie.

Propriétés	Symétrie(s)	Nb de C_{ij} indépendantes	Matrice C_{ij}
Triclinique	Aucune	21	$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ sym. & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$
Monoclinique	1 plan de symétrie	13	$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ & & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & 0 \\ sym. & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$ <p>où le plan (1,2) est le plan de symétrie</p>
Orthotrope	3 plans de symétrie orthogonaux	9	$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ sym. & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$
Isotrope transverse (ou orthotrope de révolution)	1 axe de révolution, perpendiculaire au plan d'isotropie	5	$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ sym. & & & & C_{66} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$ <p>où l'axe 1 est l'axe de symétrie, et $C_{44} = (C_{22} - C_{23})/2$</p>
Isotrope	Toutes (aucune direction privilegiée)	2	$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ sym. & & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{44} \end{bmatrix}$ <p>avec $C_{12} = C_{11} - 2C_{44}$</p>

Tableau 2.1. Principaux types d'anisotropie, et matrices des C_{ij} associées (les constantes indépendantes apparaissent en gras)

La résolution de l'équation de Christoffel (2.6) consiste à rechercher les valeurs propres ρV^2 et les vecteurs propres associés \vec{P} . Pour une direction de propagation \vec{n} donnée dans le cas d'un matériau anisotrope quelconque, il existe trois couples solutions, signifiant que trois types d'onde plane peuvent se propager :

- une onde (quasi-)longitudinale : la polarisation est (quasi-)colinéaire à la direction de propagation,
- deux ondes (quasi-)transversales : leurs vecteurs de polarisation sont (quasi-)normaux à la direction de propagation, et perpendiculaires entre eux. Elles se distinguent par leurs vitesses.

NB : Le préfixe « quasi » correspond aux propagations en dehors des plans principaux, où les modes ne sont pas purs.

Chacune de ces ondes aura une vitesse variable en fonction de la direction de propagation (cf. exemple de surfaces de vitesses à gauche de la Figure 2.4).

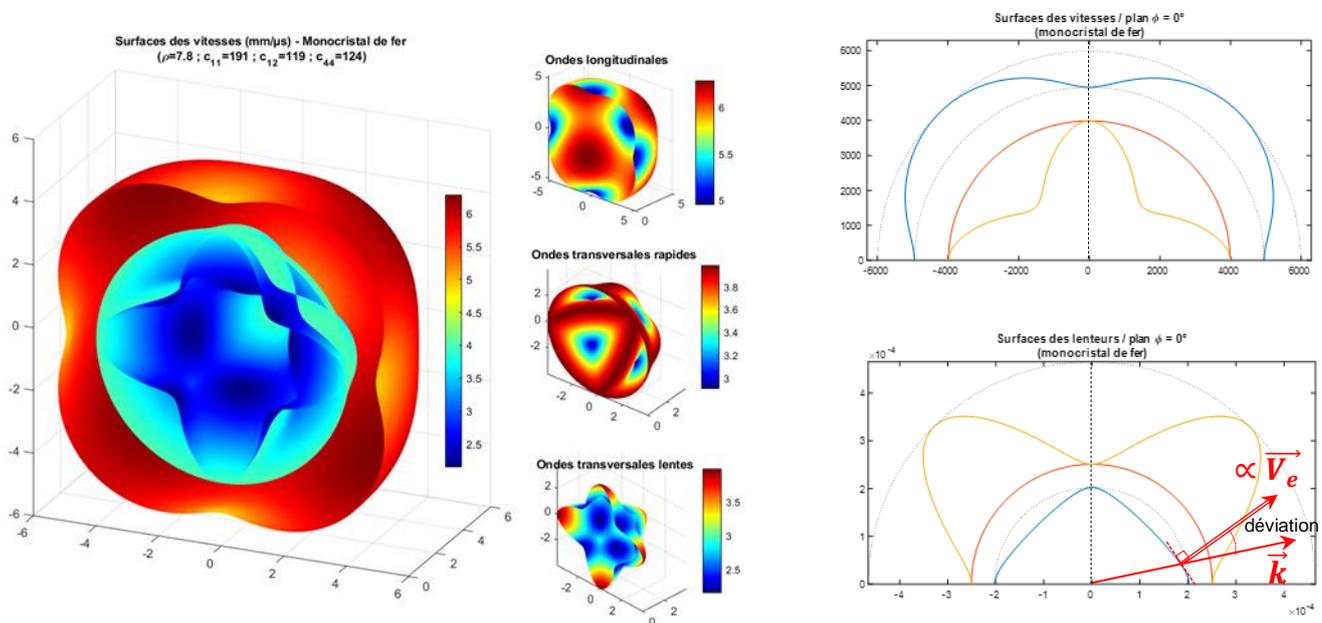


Figure 2.4. Conséquence de l'anisotropie : exemples de surfaces (3D) de vitesse (à gauche), et de courbes de vitesse et de lenteur dans un plan (à droite)

Remarque :

Le fait d'avoir deux ondes transversales dont les polarisations sont perpendiculaires entre elles et dont les vitesses sont différentes s'appelle la **biréfringence acoustique**. Notons au passage que ce terme ne fait pas l'unanimité parmi les auteurs. Certains comme Auld (Auld, 1990) considèrent que, comme en optique la biréfringence désigne le fait qu'à une interface, l'onde incidente génère deux ondes transmises (une onde longitudinale et une onde transversale dans un matériau isotrope), et donc que lorsque trois ondes sont générées (comme dans un matériau anisotrope), il s'agit de **triréfringence**.

Dans un matériau anisotrope, il faut désormais distinguer la vitesse de phase (colinéaire à la direction de propagation \vec{n} , et normale au front d'onde) et la vitesse d'énergie (parallèle au flux d'énergie). L'angle entre ces deux vecteurs est l'angle de **déviation** des ondes. Tracer les courbes des lenteurs des modes propagés permet de visualiser cette différence et l'angle de déviation (cf. exemple sur les courbes des lenteurs en bas à droite de la Figure 2.4).

Lors d'un contrôle ultrasonore, l'anisotropie peut donc impliquer à la fois des variations de vitesse de propagation en fonction de la direction de propagation, donc des temps de vol différents, pouvant fausser la localisation d'une indication, et également une déviation, qu'il est important d'anticiper pour savoir où positionner le récepteur par exemple.

Quant à la prise en compte de l'anisotropie dans la modélisation, elle consiste à fournir en donnée d'entrée la matrice des constantes d'élasticité du matériau, qu'il n'est pas toujours simple d'évaluer.

Mes travaux de recherche prenant en compte cette problématique seront présentés au chapitre 3 pour la propagation dans les soudures épaisses, et au paragraphe 5.1 pour l'acier inoxydable AIM1.

2.3.3. Viscosité

La notion de **viscosité** d'un solide induit la dépendance de sa réponse à la vitesse de sollicitation, et l'existence d'un retour à l'état initial du matériau après un certain temps. En d'autres termes, lorsqu'on applique une contrainte à un matériau **viscoélastique linéaire**, la réponse se décompose en une déformation élastique instantanée et réversible, et une déformation visqueuse (amortissement), également réversible mais qui dépend du temps (François, 2004).

En acoustique, la viscoélasticité se traduit par deux phénomènes : la **dispersion** (vitesse dépendante de la fréquence, voir paragraphe 2.3.1), et l'**absorption** (atténuation par conversion d'une partie de l'énergie mécanique en chaleur) des ondes ultrasonores. Cela entraîne l'ajout d'un terme d'amortissement à la loi de Hooke de l'équation (2.1). La contrainte devient dépendante de la vitesse de déformation via la loi de Newton, aboutissant au modèle de Kelvin-Voigt :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} + \eta_{ijkl}\frac{d\varepsilon_{kl}}{dt} \quad (2.15)$$

où η_{ijkl} sont les coefficients de viscosité.

Notons que cette loi de comportement est toujours linéaire.

On peut alors introduire des coefficients d'élasticité \tilde{C}_{ij} complexes, composés d'une partie réelle élastique indépendante de la fréquence, et d'une partie imaginaire, fonction de la fréquence (toujours sous l'hypothèse de solutions harmoniques en $e^{i\omega t}$) :

$$\tilde{C}_{ij} = C_{ij} + j\omega\eta_{ij} \quad (2.16)$$

Cela entraîne alors un nombre d'onde complexe dépendant de la fréquence, de la forme :

$$\tilde{k}(f) = k(f) - jk'(f) = \frac{\omega}{V(f)} - j\alpha(f) \quad (2.17)$$

où la vitesse V et l'atténuation α dépendent de la fréquence f .

L'atténuation due à l'absorption est généralement modélisée par une loi puissance (Szabo and Wu, 2000; Royer and Valier-Brasier, 2021) du type :

$$\alpha(f) = \alpha_0 f^y \quad (2.18)$$

où α_0 est une constante, et y est un nombre positif (le plus souvent inférieur ou égal à 2).

Ce type de loi est valable pour une large variété de matériaux viscoélastiques, sur une bande fréquentielle finie.

Sous l'hypothèse d'effets visqueux faibles devant les effets élastiques $((\omega\eta_{11}/C_{11})^2 \ll 1)$, la vitesse peut être considérée comme constante, et l'atténuation, due à la viscosité, proportionnelle au carré de la fréquence.

Expérimentalement, la viscosité se manifeste donc par une diminution de l'amplitude, fonction de la fréquence, ainsi qu'une variation de la vitesse de propagation également en fonction de la fréquence. Puisqu'une partie de l'énergie mécanique disparaît, il semble relativement simple de mesurer l'atténuation, tout comme la vitesse. Prendre en compte la viscosité dans la modélisation se fait également simplement, à l'aide de constantes d'élasticité complexes dans le cas général (à condition de les connaître).

En première approche, on considère en général que l'absorption est négligeable dans les métaux polycristallins. Cependant, certains défauts du réseau cristallin comme les dislocations peuvent théoriquement induire de l'absorption.

Mes travaux de recherche prenant en compte cette problématique seront abordés au paragraphe 4.5.2 concernant les composites et au paragraphe 5.4 concernant les dislocations.

2.3.4. Non linéarité

Un matériau élastique présente un comportement non linéaire dès lors que sa réponse ne respecte plus le principe de superposition et/ou de proportionnalité par rapport à la sollicitation. Autrement dit, la loi reliant contrainte et déformation n'est plus linéaire. Le principe physique fondamental de l'élasticité non linéaire repose sur la variation des modules élastiques des matériaux sous l'effet des contraintes.

Sur ce principe, se sont développées deux disciplines, dont les formalismes sont très proches : l'**acousto-élasticité** et l'**acoustique non linéaire** (Rasolofosaon et al., 1997). Dans les deux cas, le facteur reliant la contrainte à la déformation dépend de la contrainte, et la loi contrainte-déformation n'est donc plus linéaire. Leur différence réside dans le niveau de la contrainte appliquée, et sa nature statique ou dynamique.

❖ Effet acousto-élastique

L'**effet acousto-élastique** désigne la modification du module d'élasticité, donc des vitesses de propagation des ondes acoustiques lorsque le matériau est soumis à une contrainte quasi-statique « forte » (au moins de l'ordre du mégapascal). Il est important de noter que dans ce cas, l'hypothèse des petites perturbations est conservée concernant l'onde ultrasonore propagée (de très faible amplitude), qui vérifie donc toujours le principe de linéarité.

Dans le cas d'un matériau homogène isotrope, on introduit généralement, en plus des coefficients de Lamé λ et μ , des constantes d'élasticité de 3^{ème} ordre l , m et n , aussi appelés **constantes de Murnaghan** (Hughes and Kelly, 1953; Egle and Bray, 1976; Guz' and Makhort, 2000).

Les constantes de Murnaghan peuvent être calculées en mesurant les vitesses V_{ij} des ondes se propageant dans la direction i et de polarisation selon j dans les conditions suivantes (en supposant l'état de référence sans contrainte).

▪ Dans le cas d'un matériau isotrope soumis à une contrainte uniaxiale σ_{11} dans la direction 1, le matériau devient anisotrope, et on a :

- pour les ondes longitudinales :

$$\frac{(V_{11} - V_{kk})}{V_{11}} = m \sigma_{11} \quad , \quad k = \{2; 3\} \quad (2.19)$$

- pour les ondes transversales, de direction de propagation perpendiculaire à la contrainte :

$$\frac{(V_{k1} - V_{kj})}{V_{k1}} = n \sigma_{11} \quad , \quad k, j = \{2; 3\}, j \neq k \quad (2.20)$$

Notons que, le matériau étant devenu anisotrope, il y a biréfringence puisque la vitesse des ondes transversales varie selon la direction de polarisation.

▪ Dans le cas d'un matériau isotrope soumis à une contrainte hydrostatique σ , le matériau reste isotrope, et on a :

- pour les ondes longitudinales :

$$\frac{(V_{kk} - V_{kk}^0)}{V_{kk}^0} = (3l + 2m) \sigma \quad , \quad k = \{1; 2; 3\} \quad (2.21)$$

- pour les ondes transversales :

$$\frac{(V_{kj} - V_{kj}^0)}{V_{kj}^0} = (6m - n) \sigma \quad , \quad k, j = \{1; 2; 3\}, j \neq k \quad (2.22)$$

L'effet acousto-élastique peut être d'un grand intérêt dans le domaine du CND pour estimer des contraintes dans une pièce (à condition de connaître les vitesses de propagation à l'état initial hors contrainte), et il peut en revanche devenir gênant lorsqu'il influe sur la propagation ultrasonore, dans le cas de contraintes résiduelles par exemple.

Mes travaux de recherche prenant en compte cette problématique seront présentés au paragraphe 4.5.1 dans le béton.

❖ Acoustique non linéaire

L'**acoustique non linéaire** s'intéresse aux conséquences de la variation des modules d'élasticité au passage d'une onde, qui ne peut plus être considérée comme une petite perturbation, mais qui induit localement des modifications mesurables du milieu de propagation. Les contraintes mises en jeu ici sont donc dynamiques, et très inférieures aux contraintes statiques considérées en acousto-élasticité.

Dès lors que l'amplitude de la vibration dépasse un certain seuil (qui dépend du matériau) au cours de la propagation ultrasonore, de nouvelles contributions vont alors apparaître, comme des harmoniques, ou des interactions onde-onde (de fréquences égales aux sommes et/ou différences des fréquences des ondes initiales). Elles résultent de la distorsion du signal due à la variation locale de vitesse en raison de la mise en traction/compression du matériau au passage de l'onde (cf. illustration de la Figure 2.5).

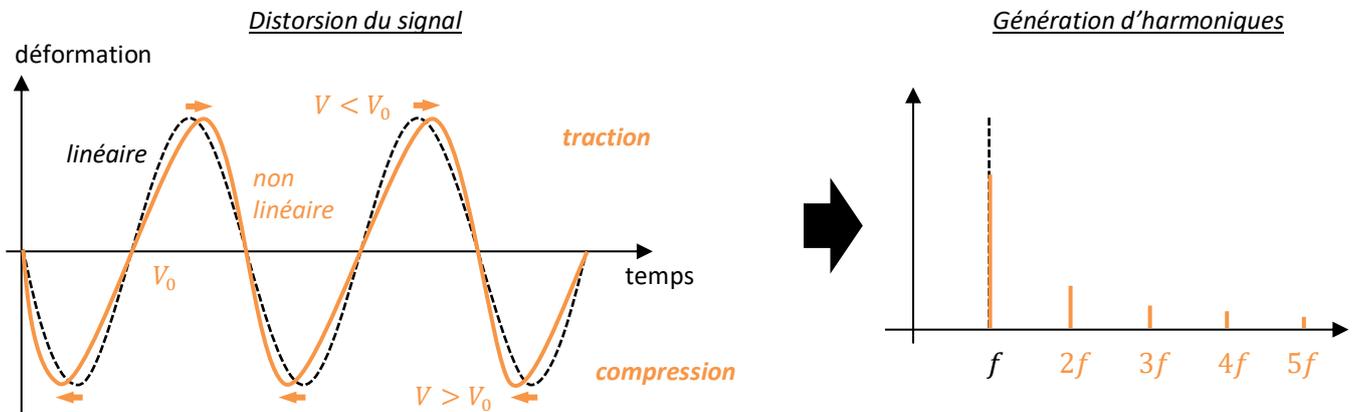


Figure 2.5. Exemple de conséquence de la non linéarité sur la propagation d'une onde monochromatique

Ainsi, dans le cas d'une seule onde, de fréquence f , la distorsion de l'onde implique la génération d'harmoniques supérieures ($2f$, $3f$...). Il arrive aussi que des sous-harmoniques apparaissent ($f/2$ par exemple) (Solodov et al., 2004). Dans le cas de la propagation de deux ondes de fréquences f_1 et f_2 , des composantes fréquentielles supplémentaires vont apparaître, proportionnelles à la différence ($f_1 - f_2$) et à la somme ($f_1 + f_2$) des fréquences initiales.

L'étude approfondie des caractéristiques non linéaires dans la réponse ultrasonore s'est particulièrement développée autour des années 1990 (Dubuget et al., 1996; Van Den Abeele, 1996; Van Den Abeele and Johnson, 1996; Nagy, 1998; Solodov, 1998), même si les premières observations d'harmoniques supérieures datent du 18^e siècle (Broda et al., 2014).

Pour un matériau (non visqueux) élastique non linéaire, la loi de comportement peut s'écrire sous la forme générale (Van Den Abeele, 1996; Guyer and Johnson, 1999) :

$$\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon(1 + \beta\varepsilon + \delta\varepsilon^2 + \dots) + \alpha(\varepsilon, \text{sign}(d\varepsilon/dt)) \quad (2.23)$$

où β et δ sont appelés paramètres non linéaires classiques, et α une fonction dépendante de la déformation et de sa dérivée temporelle, appelée paramètre non linéaire non classique.

Le paramètre β est directement lié au phénomène dit « classique » de génération d'harmoniques. Quant au terme contenant le paramètre α , il permet de tenir compte des phénomènes dits « non classiques » :

- d'hystérésis : l'état de la pièce à un certain instant dépend de son état précédent,
- et de dynamique rapide et dynamique lente : lors d'une sollicitation de forte amplitude d'un matériau élastique non linéaire non classique, les propriétés élastiques de ce matériau chutent très rapidement, puis reviennent lentement à leurs valeurs initiales après l'arrêt de la sollicitation.

Les microdéfauts (comme les microfissures) sont la cause majeure de non linéarité : ils se referment sous l'effet d'une contrainte de compression, augmentant la rigidité du matériau. C'est pourquoi les matériaux naturellement microfissurés (comme les bétons ou les roches) présentent un comportement non linéaire. Ces non-linéarités augmentent considérablement en présence d'endommagement, et ceci même pour des matériaux plus homogènes (comme le plexiglas par exemple). C'est pourquoi les méthodes d'acoustique non linéaire présentent un fort potentiel en CND. Elles sont aujourd'hui davantage expérimentales que modélisées.

Mes travaux de recherche prenant en compte cette problématique seront présentés au paragraphe 4.4, appliquée au cas des fissures partiellement fermées.

2.3.5. Hétérogénéité

L'hétérogénéité désigne la variation spatiale des propriétés. La notion d'homogénéité est relative : par exemple un métal peut être homogène à l'échelle de la pièce, mais il est composé de grains (aléatoirement orientés s'il est isotrope), dont les joints constituent des ruptures d'impédance locales, et qui sont donc des diffuseurs. L'hétérogénéité est certainement le paramètre le plus compliqué à prendre en compte dans la propagation ultrasonore.

Je distinguerai ici deux grandes familles de milieux hétérogènes : les milieux présentant une « **hétérogénéité discrète** », avec des frontières finies entre les phases, et les milieux présentant une « **hétérogénéité continue** », avec des propriétés continûment variables spatialement. Ce qui est important lors de la propagation ultrasonore est le niveau d'hétérogénéité que « voit » l'onde, ce qui dépend directement de la longueur d'onde et de la taille des hétérogénéités.

❖ Hétérogénéité discrète

La plupart du temps, ce que l'on appelle « matériau hétérogène » est à prendre au sens discret, c'est-à-dire constitué d'une juxtaposition de phases élémentaires (milieux) homogènes (viscoélastiques ou non, isotropes ou non). Par exemple, un matériau composite est constitué d'une matrice et de fibres, un métal polycristallin est constitué de grains, un béton est constitué de ciment et de granulats. Le Tableau 2.2 donne quelques exemples d'ordre de grandeur de zones élémentaires homogènes (ou hétérogénéités).

Matériau	Bois, béton	Composites	Métaux usuels	Métaux moulés
Ordre de grandeur des zones élémentaires homogènes	cm - mm	mm - 0.1mm	0.1 - 0.01mm	cm - mm

Tableau 2.2. Exemples de quelques matériaux hétérogènes, tiré de (François et al., 1991)

Le mécanisme qui modifie la propagation ultrasonore dans un tel matériau est la **diffusion** par les hétérogénéités (ou diffuseurs). Elle dépend du rapport entre la longueur d'onde λ ($\lambda = V/f$) et la dimension moyenne \bar{d} des diffuseurs. Ainsi on définit classiquement trois régimes de diffusion de la façon suivante :

- le **régime de Rayleigh**, quand $\lambda \gg \bar{d}$ (condition parfois notée $k\bar{d} \ll 1$, avec k le nombre d'onde) : le mécanisme principalement mis en jeu est la diffusion, simple ou multiple,
- le **régime stochastique**, quand $\lambda \cong \bar{d}$ (ou $k\bar{d} \cong 1$) : des phénomènes de résonance interviennent,

- le **régime géométrique**, quand $\lambda \ll \bar{d}$ (ou $k\bar{d} \gg 1$) : les ondes ont tendance à voir des « grosses » hétérogénéités, et le mécanisme principal est donc proche des phénomènes de réflexion/transmission à chaque interface.

La diffusion provoque sur la propagation une variation de vitesse et d'atténuation. Elle implique également l'apparition de bruit de structure sur le signal, qui correspond à la partie diffusée de l'énergie, partie dite **incohérente**, qui arrive à un temps différent de celui du front d'onde principal, partie dite **cohérente**. Le signal va donc potentiellement être déformé, de plus faible amplitude, et le bruit peut masquer la signature d'un défaut par exemple.

De nombreuses théories existent pour prendre en compte la diffusion : par exemple pour les plus connus, dans les bétons et les composites, la théorie de Waterman-Truell et le Generalized Self-Consistent Model (GSCM) (Yang and Mal, 1994; Kim, 2004), et dans les métaux polycristallins, les modèles de Stanke et Kino, de Hirsekorn, et de Weaver (Hirsekorn, 1982; Stanke and Kino, 1984; Weaver, 1990). Toutes sont à peu près d'accord sur l'allure générale théorique de la vitesse et de l'atténuation en fonction de la fréquence dans chaque régime de diffusion (cf. Figure 2.6), en revanche les zones de transition font débat. Ces modèles tiennent compte des propriétés élastiques des diffuseurs. Il peut aussi être nécessaire de prendre en compte la distribution des tailles des hétérogénéités, ainsi que leur forme (pouvant induire de l'anisotropie à l'échelle macroscopique).

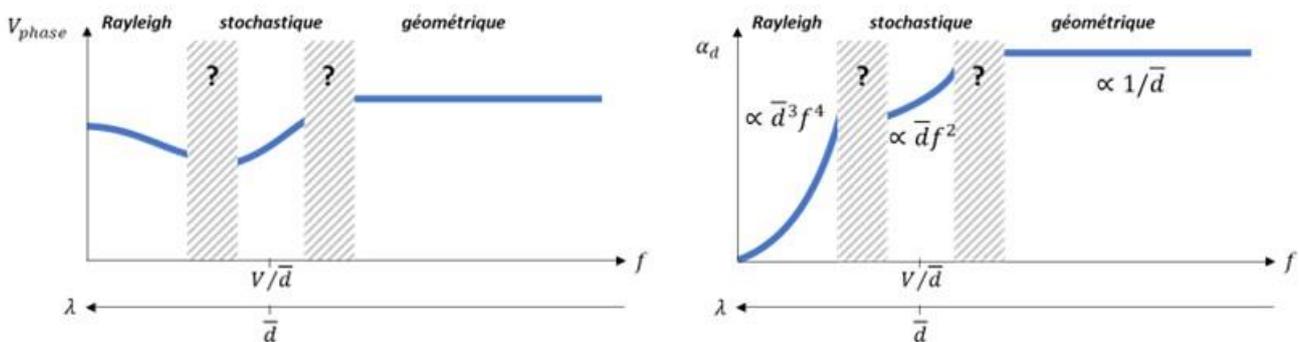


Figure 2.6. Allure générale des vitesses et atténuation théoriques des ondes longitudinales dans les trois régimes de diffusion (en considérant un milieu moyen équivalent isotrope)

On choisit généralement la fréquence de travail de façon à être dans le domaine de Rayleigh car l'atténuation est moins grande que dans les autres domaines, ce qui permet d'avoir un signal d'amplitude exploitable.

Les expérimentations réalisées dans le cadre de la diffusion ne sont pas toujours simples. Les paramètres comme la vitesse ou l'atténuation s'obtiennent sur la partie cohérente du signal. Or il n'est pas toujours évident de bien séparer la partie cohérente de la partie incohérente. En particulier en ce qui concerne la mesure de l'atténuation, on voit que si l'on parvenait à entourer complètement la pièce de capteurs récepteurs, 100% de l'énergie envoyée serait récupérée. Il faut donc bien définir la partie cohérente, et comment on l'identifie et on la traite.

Deux familles de solutions existent pour modéliser un matériau hétérogène « discret ».

- Soit par la **modélisation complète** du milieu :

Dans ce cas, on décrit le milieu avec tous ses diffuseurs, à l'échelle de chacun, exactement ou de manière statistique, afin d'être représentatif du degré d'hétérogénéité du milieu.

- Soit en passant par une méthode d'**homogénéisation** :

On définit un milieu homogène effectif équivalent, en moyennant via une méthode bien choisie d'homogénéisation, et on définit un coefficient d'atténuation (et éventuellement un générateur de bruit) permettant d'être représentatif de la diffusion. Par exemple dans un métal polycristallin composé de grains équiaxes aléatoirement orientés (donc macroscopiquement isotrope), on calcule les C_{ij} moyens du milieu homogène équivalent (Kube and Turner, 2015a), en se basant sur les propriétés du monocristal (plusieurs conventions existent, comme celles de Voigt, de Hill, de Reuss ou encore de Kröner-Eshelby).

L'hypothèse essentielle de la modélisation, en particulier dans le domaine de Rayleigh, porte sur le type de diffusion prise en compte : soit la **diffusion simple**, soit la **diffusion multiple** (cf. Figure 2.7). La diffusion simple (ou approximation de Born) prend en compte l'interaction de l'onde avec un seul diffuseur, alors que la diffusion multiple considère que l'onde interagit avec plusieurs diffuseurs successivement.

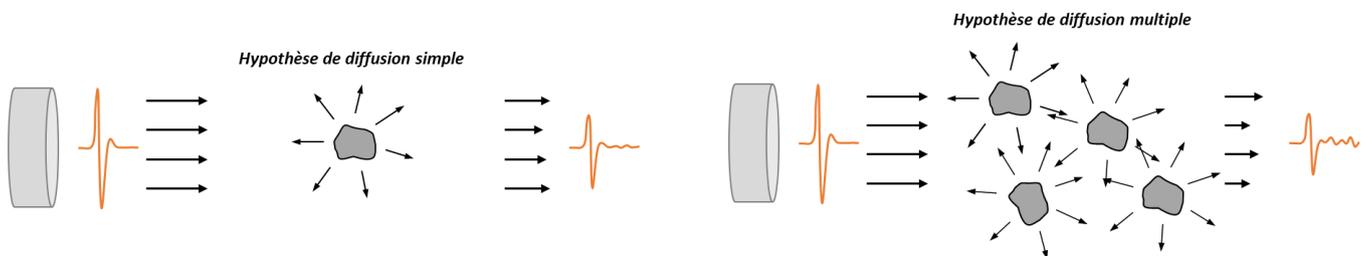


Figure 2.7. Notion de diffusion simple et multiple

On peut également coupler les deux approches si l'on s'intéresse à certains diffuseurs en particulier (comme des défauts) au milieu d'un matériau hétérogène. Le choix de la méthode dépend du type de résultat souhaité et des données disponibles.

❖ Hétérogénéité continue

Certains milieux peuvent avoir des propriétés qui varient continûment dans l'espace. C'est par exemple le cas :

- des fluides avec un champ de température,
- des soudures épaisses, dans les zones où la direction de croissance des grains varie continûment,
- des structures en béton présentant un gradient de propriétés comme la saturation en eau, ou le taux de carbonatation,
- ou encore de nouveaux matériaux actuellement à l'étude, appelés multi-matériaux obtenus par fabrication additive (par la technologie poudre), et dont la composition varie graduellement en cours de fabrication.

Dans ce cas, on a là aussi deux possibilités pour modéliser de tels milieux : soit les décrire continûment variables via des équations, soit les discrétiser en petites zones homogènes.

Mes travaux de recherche prenant en compte ces problématiques d'hétérogénéité seront présentés aux paragraphes 3.3 pour les soudures et 4.3 dans les fluides, et au chapitre 5 pour les aciers isotropes.

2.3.6. Réalité géométrique de la pièce ou de la structure

Outre les aspects purement matériau énoncés précédemment sous l'hypothèse de milieu infini, il est essentiel de tenir compte de la géométrie de la pièce ou de la structure à contrôler. Les phénomènes de **réflexion** et de **transmission** entrent en jeu, avec éventuellement des **conversions de mode** et des **changements de direction de propagation**. Cela va donc impacter la direction de propagation, la polarisation et l'amplitude des ondes propagées. L'état de surface de la pièce peut également fortement jouer sur les ondes propagées, en particulier sur leur amplitude. Enfin lorsqu'il y a plusieurs interfaces et sous certaines conditions, des **ondes guidées** peuvent être générées.

❖ Une seule interface : réflexion/transmission

Considérons une onde monochromatique incidente sur une interface plane entre deux solides quelconques homogènes anisotropes notés 1 et 2.

On commence par déterminer les vecteurs d'onde \vec{k} des différentes ondes impliquées. Si l'on considère une frontière plane, l'écriture des conditions aux frontières en tout point de l'interface impliquent que les vecteurs d'onde de toutes les ondes de part et d'autre de l'interface, incidentes, réfléchies et transmises, (1) sont contenus dans le même plan, et (2) admettent la même projection sur l'interface (cf. illustration de gauche de la Figure 2.8). Il en découle les **lois de Snell-Descartes** :

$$\frac{\omega}{V_{1(inc)}} \sin(\theta_{1(inc)}) = \frac{\omega}{V_{1(réfl)}} \sin(\theta_{1(réfl)}) = \frac{\omega}{V_{2(transm)}} \sin(\theta_{2(transm)})$$

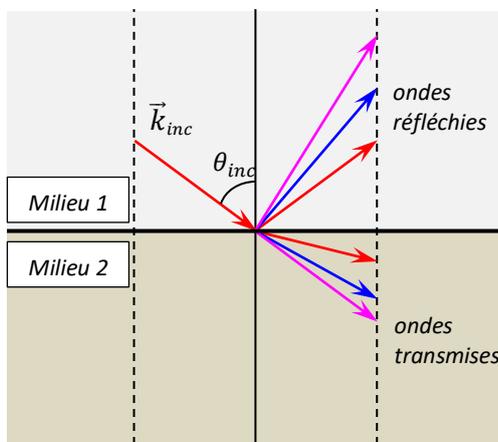
ou

$$\frac{\sin(\theta_{1(inc)})}{V_{1(inc)}} = \frac{\sin(\theta_{1(réfl)})}{V_{1(réfl)}} = \frac{\sin(\theta_{2(transm)})}{V_{2(transm)}}$$

(2.24)

quels que soient les modes mis en jeu.

Principe des lois de Snell-Descartes à une interface solide anisotrope /solide anisotrope



Exemple de courbes des lenteurs Interface eau/acier anisotrope

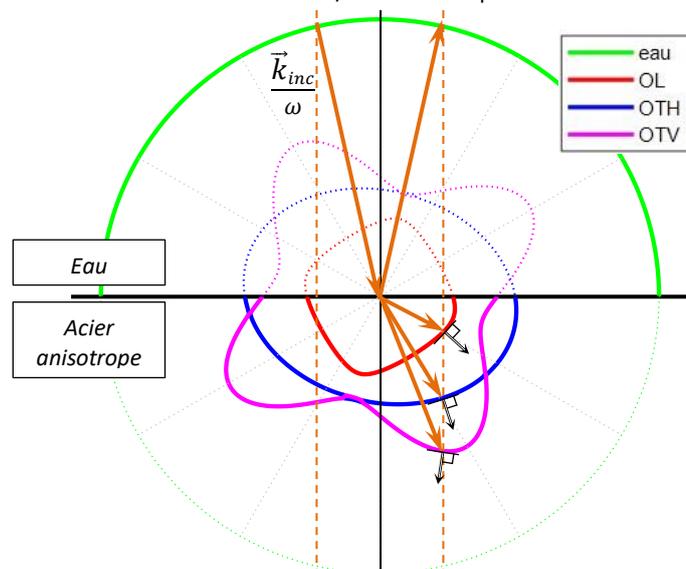


Figure 2.8. Illustrations des lois de Snell-Descartes

Cela permet la résolution graphique des ondes mises en jeu, sur les courbes des lenteurs ($= 1/V_{phase}$), comme illustré sur l'exemple de droite de la Figure 2.8. Par ailleurs, on peut également représenter la direction du vecteur vitesse d'énergie associée à chaque mode, qui est normale à la tangente à la courbe des lenteurs.

Dans un milieu anisotrope, l'onde transversale dont la polarisation est dans le plan de propagation est appelée **onde transversale verticale**, et celle polarisée perpendiculairement au plan de propagation est dite **onde transversale horizontale**.

On peut ensuite calculer les amplitudes, via les coefficients de réflexion et transmission de chaque mode. Pour cela, on établit des **conditions aux limites** : lorsqu'une onde ultrasonore rencontre une interface entre deux milieux solides quelconques, il y a continuité des vecteurs de déplacement et des vecteurs de contrainte (si l'un des deux milieux est fluide, il y a continuité des déplacements normaux et des vecteurs de contrainte). Par exemple, à l'interface entre deux milieux isotropes notés 1 et 2 (l'onde incidente étant dans le milieu 1), et en introduisant la notion d'**impédance acoustique** $Z = \rho V$, on obtient les coefficients de réflexion et transmission en amplitude suivants :

$$r = \frac{Z_1 \cos \theta_1 - Z_2 \cos \theta_2}{Z_1 \cos \theta_1 + Z_2 \cos \theta_2} \quad \text{et} \quad t = \frac{2Z_1 \cos \theta_1}{Z_1 \cos \theta_1 + Z_2 \cos \theta_2} \quad (2.25)$$

Angles critiques :

L'angle critique d'un mode (dans le milieu 2) correspond à l'angle d'incidence θ_{cr} dans le milieu 1 pour lequel ce mode disparaît ($\theta_{2(transm)} = 90^\circ$ dans l'équation 2.24). L'angle critique du mode m dans le milieu 2 se calcule de la façon suivante :

$$\theta_{cr} = \sin^{-1} \left(\frac{V_{1(inc)}}{V_{2(m)}} \right) \quad (2.26)$$

si $V_{1(inc)} < V_{2(m)}$.

A partir de cet angle critique, la direction de propagation de l'énergie devient parallèle à l'interface (Lanceleur et al., 1993). La solution correspondante k à l'équation de propagation devient imaginaire pure dans le cas isotrope ou dans un plan de symétrie dans le cas anisotrope, et complexe dans les autres cas. L'onde de volume cède la place à une onde dite évanescence ou hétérogène (Hosten, 1991; Nayfeh, 1995).

Ondes de surface :

Les ondes de surface, par définition, se propagent le long de la surface, et leur énergie décroît rapidement dans la profondeur. Parmi les ondes de surface, on trouve (Rose, 2004; Royer and Valier-Brasier, 2021) :

- les ondes de Rayleigh, les plus couramment utilisées en CND. Elles sont généralement non dispersives, et leur polarisation est elliptique dans le plan normal à la surface contenant la direction de propagation. Elles sont générées pour un angle d'incidence : $\theta_{inc} = \sin^{-1}(V_{inc}/V_{Rayleigh})$.
- les ondes longitudinales subsurfaciques (ou head waves, lateral waves, creeping longitudinal waves ou encore fast surface waves), proches du 1^{er} angle critique, avec un maximum de sensibilité un peu sous la surface.

- les ondes d'interface : on peut citer les ondes de Stoneley (interface solide-solide), non dispersives, qui existent quand le rapport $V_{T(1)}/V_{T(2)}$ est proche de 1, et les ondes de Scholte (interface liquide-solide), pour lesquelles l'énergie est plus importante dans le liquide que dans le solide.

Influence de l'état de surface :

L'état de surface de cette frontière est très important. Toutes les théories et équations précédentes sont valables sous l'hypothèse de contact plan parfait. Or les conditions aux limites peuvent être imparfaites, en particulier expérimentalement. Par exemple, la rugosité peut diffuser une partie de l'énergie (on parle alors de **réflexion diffuse**, par opposition à la **réflexion spéculaire** sur une surface plane), et un défaut de planéité modifie la propagation théoriquement attendue.

❖ Plusieurs interfaces parallèles

Lorsque l'onde voit deux interfaces parallèles successives (on parle alors de plaque ou lame, d'épaisseur e), des phénomènes de résonance peuvent apparaître, en fonction de l'épaisseur de la lame et la longueur d'onde.

Adaptation d'impédance :

Considérons trois milieux successifs, notés 1, 2 et 3, avec le milieu 2 d'épaisseur e . En incidence normale (dans le milieu 1) est introduite la notion d'adaptation d'impédance

- si e est égal au quart de la longueur d'onde dans le milieu 2, et que $Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3}$, alors la réflexion est nulle et la transmission est totale. On parle alors de lame quart d'onde (principe utilisé pour dimensionner la face avant des traducteurs piézoélectriques).

$$r = 0 \quad \text{et} \quad t = 1 \quad (2.27)$$

- si e est égal à la moitié de la longueur d'onde dans le milieu 2, la présence de la lame entraîne uniquement un déphasage de π de l'onde transmise, et la réflexion et la transmission à travers la lame ne dépendent pas de ses propriétés :

$$r = \frac{Z_1 - Z_3}{Z_1 + Z_3} \quad \text{et} \quad t = -\frac{2Z_1}{Z_1 + Z_3} \quad (2.28)$$

Guide d'ondes :

Sous certaines conditions peuvent aussi apparaître des nouveaux types d'onde : les **ondes guidées**. Elles résultent des réflexions successives sur les deux interfaces. L'un des intérêts des ondes guidées est la décroissance « naturelle » de l'énergie (due à la diffraction) en $1/x$ en s'éloignant de la source (contre $1/x^2$ dans un milieu infini).

Un guide d'onde est **dispersif**, pour des raisons géométriques. Il existe une infinité de modes, et leur propagation est très dispersive au voisinage de leur fréquence de coupure (lorsqu'elle existe).

Lorsque le guide d'ondes est une plaque, on trouve les ondes guidées **SH** (basées sur des ondes transversales à polarisation horizontale) et les ondes de **Lamb** (résultant de la combinaison des ondes longitudinales et des ondes transversales verticales). Les ondes de Lamb existent sous deux formes (dans les plaques homogènes isotropes ou dont le plan médian est un plan de symétrie géométrique) : les modes symétriques (les déplacements sont symétriques par rapport au plan médian de la plaque) et les modes antisymétriques (cf. Figure 2.9 à gauche). Les relations de dispersion (ou relations fréquentielles Rayleigh-Lamb) s'écrivent :

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad \text{pour les modes symétriques}$$

$$\frac{\tan(ph)}{\tan(qh)} = -\frac{4k^2pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad \text{pour les modes antisymétriques}$$
(2.29)

avec $p^2 = k_L^2 - k^2$ et $q^2 = k_T^2 - k^2$, où k est le nombre d'onde du mode de Lamb, et k_L et k_T sont ceux des ondes longitudinales et transversales dans la plaque.

La résolution de ces équations permet d'obtenir les nombres d'onde k des modes de Lamb en fonction de la fréquence, et donc les vitesses de phase (cf. exemple sur la Figure 2.9 à droite).

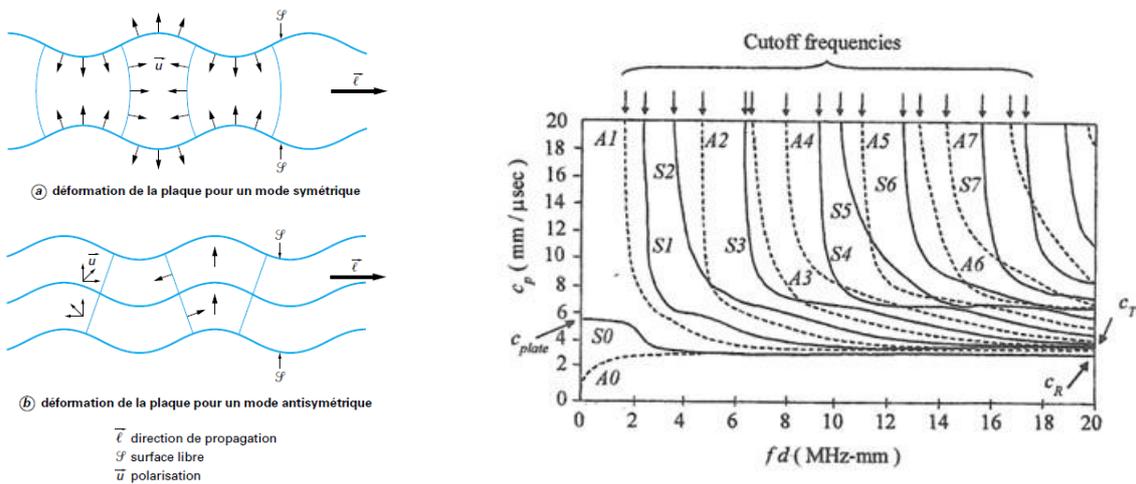


Figure 2.9. Gauche : Modes symétriques et antisymétriques (Dieulesaint and Royer, 2001) ; Droite : exemple de courbes de dispersion dans une plaque d'aluminium (Rose, 2004)

Multi-couches :

Dans les milieux multi-couches (cf. Figure 2.10), deux approches théoriques sont possibles : les méthodes exactes, et les méthodes d'homogénéisation. La méthode exacte la plus couramment utilisée est la méthode des matrices de transfert (Nayfeh, 1991). Sur le même principe, Rokhlin & Wang (Wang and Rokhlin, 2001; Rokhlin and Wang, 2002) ont développé une méthode inconditionnellement stable modélisant la propagation des ondes dans les milieux multicouches généralement anisotropes, en remplaçant les matrices de transfert classiques par les matrices de rigidité (ou de compliance).

Ce type de milieu fait apparaître des phénomènes de résonances et également de bandes passantes (transmission totale) et bandes de coupure (transmission nulle). De plus, lorsque le milieu est périodique, on parle alors d'ondes de Floquet (Potel and De Belleval, 1993).

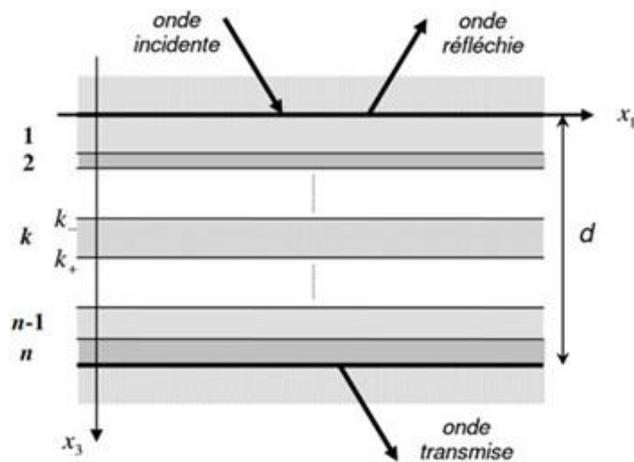


Figure 2.10. Représentation schématique d'un milieu multi-couches quelconque

Influence de la planéité et du parallélisme des faces :

La planéité et le parallélisme des faces d'une pièce sont primordiaux pour toute mesure expérimentale ultrasonore. Un exemple est illustré sur la Figure 2.11, qui montre que la mesure de vitesse est très sensible à ces deux paramètres.

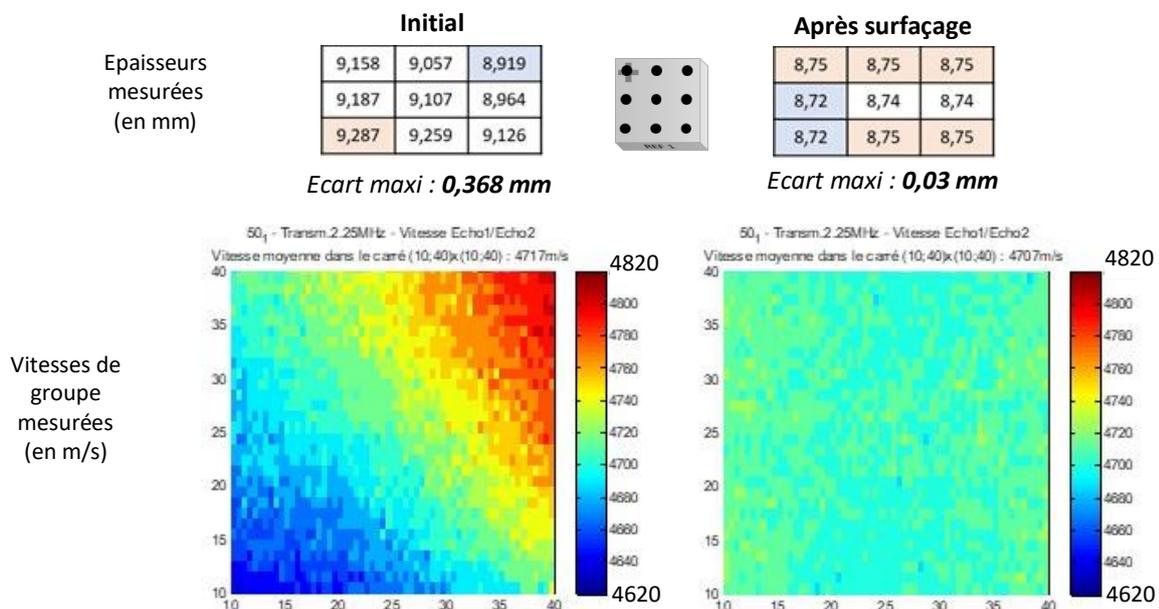


Figure 2.11. Epaisseurs d'une pièce de cuivre initiale (à gauche) puis surfacée (à droite), et images Cscan correspondantes des vitesses obtenues à 2.25MHz (en transmission)

Mes travaux de recherche prenant en compte ces problématiques d'interfaces seront présentés aux paragraphes 4.1 pour la télémétrie, 4.2 pour les ondes de Lamb dans des structures multi-couches alternant eau et acier, et 4.5.2 pour les composites.

2.4. Synthèse : conséquences sur le CND, et notion de contrôlabilité ultrasonore des matériaux et structures réels

Le contrôle non destructif consiste à rechercher les défauts éventuels dans une structure, et à les caractériser le cas échéant, en termes de nature (fissure, inclusion etc.), de position et de dimension (piliers du CND : détection, localisation, caractérisation et dimensionnement). Cela permet d'évaluer leur degré de nocivité, et donc d'urgence à réparer. Le contrôle par ultrasons implique de bien connaître le matériau, pour être capable de remonter aux caractéristiques du défaut.

En fonction de la réalité du matériau et de la pièce à contrôler, différents mécanismes peuvent intervenir et perturber la propagation. S'ils ne sont pas connus et anticipés, le contrôle peut être faussé (fausse alarme en l'absence de défaut, ou non détection en présence d'un défaut, ou encore erreur de dimensionnement du défaut, cf. illustrations de la Figure 2.12). En plus de cela, il faut également tenir compte de la réalité de la chaîne d'acquisition (qui peut présenter des non linéarités ou du bruit électronique par exemple), du faisceau ultrasonore (qui est loin de l'onde plane monochromatique théorique), et du milieu couplant, selon la modalité choisie (au contact ou en immersion). Le domaine de recherche du CND par ultrasons est donc à l'intersection de la **science des matériaux** et de l'**acoustique**.

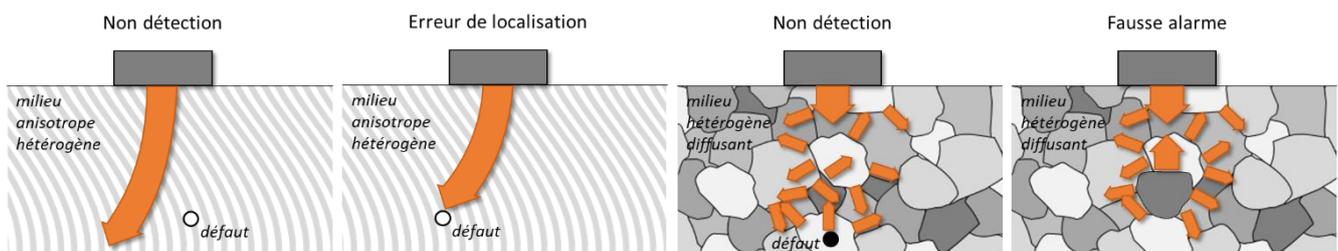


Figure 2.12. Illustrations schématiques d'erreurs de diagnostic

Cette expertise dans la complexité des interactions entre ultrasons et matériau réel est à la base des travaux de recherche présentés dans ce manuscrit. La démarche adoptée ici est donc de bien comprendre à la fois le milieu de propagation réel et ses particularités, et aussi la propagation ultrasonore, qui s'écarte souvent de la théorie, établie la plupart du temps sous des hypothèses simplificatrices. Cela permet d'améliorer la **contrôlabilité**, c'est-à-dire l'aptitude d'une pièce à être contrôlée de manière fiable et précise.

Dans les cas complexes, l'étape de la **modélisation** peut être nécessaire afin de bien comprendre et prévoir la façon dont les ondes se propagent, et donc les signaux qui seront enregistrés, pour pouvoir au final émettre un diagnostic fiable. Divers codes de simulation existent, basés principalement sur deux principes différents : la modélisation **analytique** ou semi-analytique (comme la plateforme CIVA), et la modélisation **numérique** de type éléments finis (comme ATHENA, COMSOL, SPECFEM ou encore CIVA FEM). Cependant la modélisation passe elle aussi par des hypothèses et approximations. Toute la question est de savoir jusqu'où ces hypothèses simplificatrices peuvent aller pour que le modèle soit fidèle aux expérimentations.

L'étape de modélisation nécessite a minima des données d'entrée représentatives du matériau (comme par exemple les constantes d'élasticité), généralement issues de mesures de vitesses et d'atténuation.

La mesure de ces paramètres n'est pas toujours simple. La vitesse la plus couramment mesurée est la vitesse de groupe, directement sur le signal temporel, par mesure de temps de vol. On peut aussi calculer la vitesse de phase assez facilement en traitant les signaux dans le domaine fréquentiel. La mesure de l'atténuation peut quant à elle devenir rapidement beaucoup plus complexe, selon les mécanismes mis en jeu. En particulier lorsqu'il y a de la diffusion, ou encore de la déviation, il peut devenir compliqué d'avoir une mesure totalement indépendante du dispositif de mesure, et de la géométrie de la pièce. D'un point de vue théorique, les mécanismes phénoménologiques menant à l'atténuation sont plutôt bien décrits et modélisés dans la littérature, et c'est l'inverse pour la vitesse.

C'est l'analyse à la fois des matériaux et de la réponse ultrasonore qui est traitée dans la suite de ce manuscrit.

3. La propagation ultrasonore dans les soudures austénitiques

Ma principale thématique de recherche concerne la propagation ultrasonore dans les matériaux et structures métalliques complexes. Parmi ces structures complexes se trouvent les soudures en acier inoxydable austénitique épaisses, classiquement dans le nucléaire entre 20 et 70 mm. Elles sont réalisées par empilement de passes de soudage (soudures dites multi-passes). La croissance des grains, déterministe, et fonction du gradient thermique local, implique une structure finale très anisotrope et hétérogène. Lors du contrôle, cela va entraîner une propagation ultrasonore très perturbée, avec des variations locales de vitesse, des déviations et de la diffusion.

3.1. Contexte

Le domaine du nucléaire est bien sûr très demandeur de travaux de recherche en CND, au vu des enjeux de sûreté toujours plus nombreux et exigeants. Le contrôle non destructif de l'intégrité des structures est essentiel afin de détecter au plus tôt d'éventuels défauts, et de les caractériser de manière à évaluer leur nocivité. Les études sont menées aussi bien pour les installations existantes (générations II et III, c'est-à-dire les REP et EPR) que pour les futurs réacteurs (génération IV).

Les **aciers inoxydables austénitiques** sont très utilisés dans le domaine nucléaire, notamment pour leurs performances à haute température, en particulier la résistance à la corrosion. Qu'ils soient moulés, forgés ou soudés, ils présentent généralement une **structure à gros grains**, parfois très texturée, qui les rend hétérogènes et anisotropes à l'échelle de la longueur d'onde des ultrasons (généralement à 2 MHz), donc difficile à contrôler par ultrasons (méthode souvent privilégiée pour sa facilité de mise en œuvre et sa bonne adaptation dans les cas où les accès à la zone à contrôler sont limités, à une seule face par exemple).

En particulier, les **soudures** sont des zones sensibles essentielles à contrôler, aussi bien à la fabrication qu'au cours du fonctionnement. Les soudures épaisses, présentes notamment dans le circuit primaire des centrales nucléaires, sont réalisées par un procédé (électrode enrobée, noté EE, ou TIG pour Tungsten Inert Gas) multipasses, qui consiste à déposer successivement des passes de métal d'apport afin de remplir le chanfrein. La procédure est reportée par le soudeur dans le cahier de soudage, aussi appelé DMOS (cf. exemple sur la Figure 3.1 à gauche). Cela implique des **croissances de grain** particulières, qui se développent lors de la **solidification** et sont fonctions du gradient thermique local, conduisant à des structures très anisotropes (cf. exemple sur la Figure 3.1 à droite). Cette **anisotropie** est **hétérogène** puisque les directions de croissance diffèrent selon les passes et leur ordre de dépôt. Cela perturbe fortement la propagation ultrasonore : le faisceau peut subir des déformations (déviation, division...) et une diminution de l'amplitude (atténuation par diffusion aux joints de grains), qui sont fonction de l'orientation locale des grains (cf. exemples de la Figure 3.2).

PROCES VERBAL DE - REPORT OF

T. MOIN DE PRODUCTION
 PRODUCTION TEST
 RECETTE DE METAUX D'APPORT
 FILLER METAL ACCEPTANCE
 QUALIFICATION DE SOUDEUR
 WELDER QUALIFICATION
 QUALIFICATION DE MODE OPERATOIRE
 WELDING PROCEDURE QUALIFICATION

Client: **EDF RENARDIERES** ESSAI N°: **A1 (DYN)**
 Customer: **EDF RENARDIERES** TEST Nr: **A1 (DYN)**
 Aménagement: **Site** Specification n°: **SPT 36249 (B)**
 Site:

RAPPORT D'ESSAI DE SOUDAGE - WELDING TEST REPORT

Qualification de soudage: **DNS 24599 Rev. B**
 Weld Procedure:

Procédé: **TIG - ELECTRODES**
 Process:

Position de soudage: **1G**
 Welding position:

Soudeur/Repère: **CHARTIER (1)**
 Welder/Stamp:

Métal de base: **Tôle ép: 60**
 Base metal: **Rep. T 102 II/12 et 1**

Appareillage: **Thyralc 320**
 Equipment:

Passe n° Pass n°	Métal d'apport - filler metal		Flux		Protection Shielding		I A	U V	vitesse soudage mm/min	P Preheat	P Preheat	t' entre pas- sages	t' entre pas- sages
	type	lot n°	type	lot n°	type	Env. Back							
1	OK6175	2062001			15	25	105	-	-	-	-	120°	
2-3	OK6175	2062001			25	80	-	-	-	-	-	150°	
4-5	1	5261891			25	110	-	-	-	-	-	250°	
6-7	4	400473			-	-	145	-	-	-	-	60°	
8-9	5	4410029			-	-	195	-	-	-	-	60°	
10-11	5				-	-	195	-	-	-	-	20°	
12-15	5				-	-	195	-	-	-	-	96°	
16-25	5				-	-	195	-	-	-	-	92-72°	

Observations - Remarks:

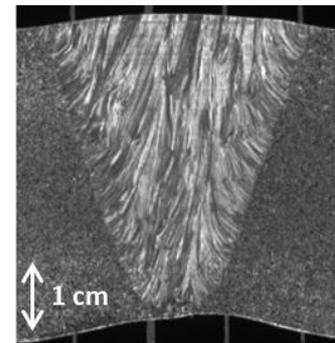
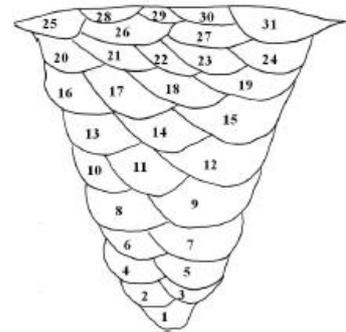


Figure 3.1. Exemple de cahier de soudage (à gauche), et de soudure épaisse multi-passes en acier inoxydable austénitique (à droite)

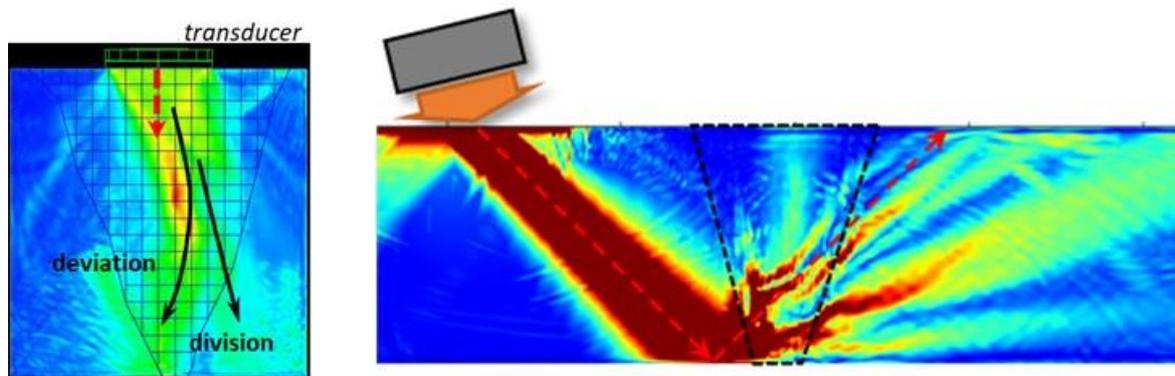


Figure 3.2. Illustrations de la problématique de la propagation ultrasonore : énergie maximale au cours de la propagation, à gauche en L0, à droite en T45

Cette propagation très perturbée a commencé à être constatée et étudiée par de nombreux auteurs dans la littérature dans les années 1980 (Baikie et al., 1976; Kupperman and Reimann, 1978; Yoneyama et al., 1978; Kupperman and Reimann, 1980; Tomlinson et al., 1980; Claytor et al., 1985; Ledbetter and Austin, 1985; Ogilvy, 1986; Hudgell et al., 1989). La perturbation est essentiellement due à l'anisotropie, qui a pour effet de dévier les ondes, comme le montrent les courbes de déviation de la Figure 3.3.

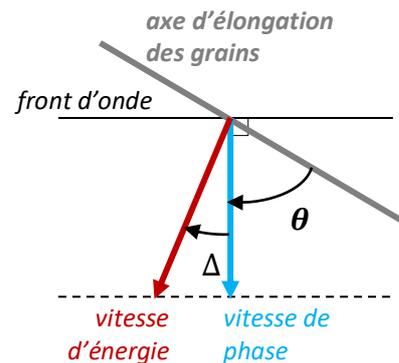
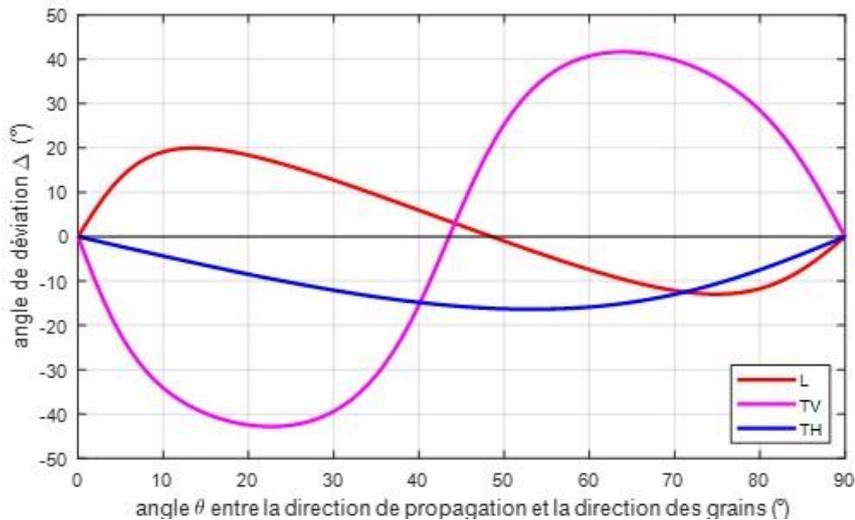


Figure 3.3. Déviation des ondes ultrasonores en fonction de l'orientation des grains

Il apparaît donc essentiel de bien comprendre comment se propagent les ondes ultrasonores dans ce type de structure, afin de pouvoir émettre un jugement fiable quant à l'état de santé du composant contrôlé (cf. illustration de la Figure 2.12 du chapitre 1 p. 48). Pour comprendre et anticiper la propagation ultrasonore dans une telle soudure, il est indispensable d'avoir une description précise de son anisotropie, directement liée à l'orientation des grains. Elle résulte de la solidification, qui dépend fortement du matériau (titane, acier, aluminium...) et du procédé de soudage (électrode enrobée, TIG, MIG, laser...). Outre la solution (destructive) de découper la pièce et d'analyser sa structure, une solution (non destructive) est d'avoir une pièce jumelle « témoin ». Mais se pose alors la question de sa représentativité par rapport à la pièce réelle : est-il possible de réaliser deux soudures strictement identiques ? L'autre solution, originale et privilégiée ici, est de modéliser la structure. Cette modélisation consiste à déterminer les orientations des grains selon la zone de la soudure. La connaissance de ces orientations, associées à un jeu de constantes d'élasticité du métal soudé (avec hypothèse d'orthotropie ou d'isotropie transverse selon les auteurs), permet d'avoir la description élastique complète de la soudure, et ainsi de modéliser, via un code de simulation (ATHENA, CIVA, COMSOL...), la propagation des ultrasons dans cette structure fortement hétérogène et anisotrope.

Les données d'entrée nécessaires au code de simulation ultrasonore sont :

- les orientations locales des grains dans la soudure,
- un unique jeu de constantes d'élasticité du métal soudé, avec pour cet acier l'hypothèse d'orthotropie ou d'isotropie transverse (les propriétés élastiques locales sont déduites par rotation de la matrice),
- des données permettant de tenir compte de l'atténuation par diffusion, induite par les grains (qui sera modélisée soit en décrivant la soudure grain par grain, soit en affectant une valeur d'atténuation fonction de l'orientation locale).

3.2. Modélisation de l'orientation des grains

3.2.1. Etat de l'art

Une soudure épaisse austénitique est constituée de longs grains colonnaires (**texture morphologique**), résultant de la croissance préférentielle de l'axe cristallographique [100] (**texture cristallographique**) dans la direction du gradient thermique au cours du refroidissement (Grong and Grong, 1997; Kou, 2003). Cela implique une structure locale avec au moins un axe de rotation (d'où l'hypothèse soit d'isotropie transverse, soit d'orthotropie). L'article de (Langenberg et al., 2000) met en évidence de manière très claire l'influence de la description d'une soudure sur le résultat de la modélisation de la propagation ultrasonore. La propagation est modélisée via les éléments finis (EFIT), d'abord dans un matériau homogène isotrope transverse : dans le cas présenté sur la Figure 3.4, une onde transversale est générée à 45° (onde T45) par une ligne émettrice (grâce à une loi de retard), et on observe que, bien que la vitesse de phase (liée au front d'onde) soit orientée à 45°, l'énergie se déplace quasi-verticalement : l'axe de l'isotropie transverse est orientée à 60° par rapport au front d'onde, menant à une déviation de l'ordre de 45° (cf. Figure 3.3).

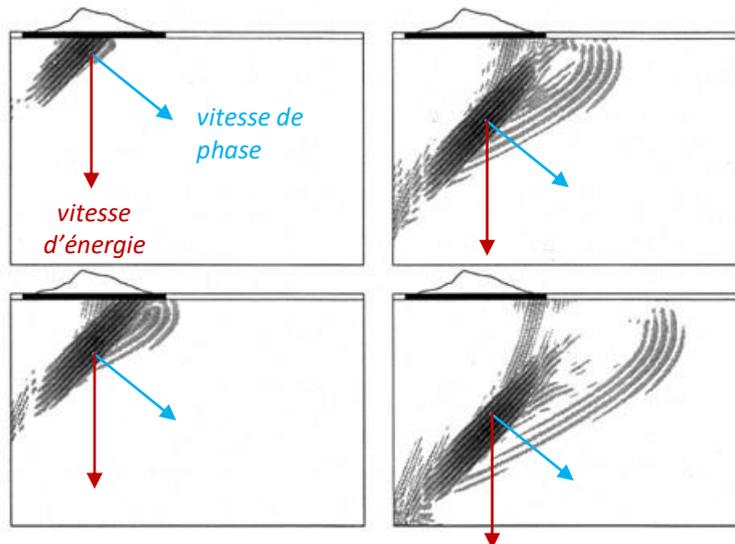


Figure 3.4. Modélisation de la propagation en T45 dans un milieu isotrope transverse, d'après (Langenberg et al., 2000)

Les auteurs testent ensuite la modélisation sur une soudure austénitique. Deux modèles de structure sont alors utilisés (cf. Figure 3.5) : le premier avec tous les grains verticaux, le second avec une hypothèse de symétrie. L'impact de ces deux modèles simplistes sur la détection d'une entaille est alors montré : dans le cas où les grains sont tous verticaux, l'entaille n'est pas détectée sur le signal ! Les auteurs soulignent en conclusion la nécessité de modéliser la soudure au plus proche de la réalité (« real-life weld »), avec une orientation qui varie spatialement dans toute la soudure.

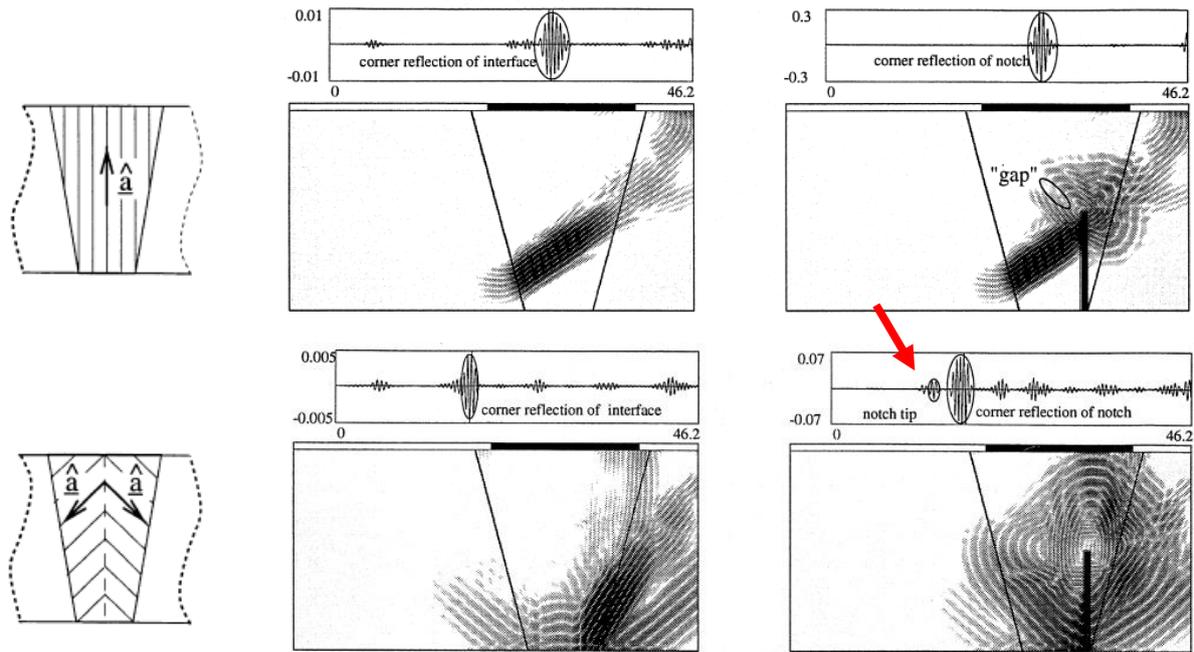


Figure 3.5. Modélisation de la propagation dans une soudure (en T45), sans et avec entaille, via deux descriptions volontairement simplistes : l'entaille peut ne pas être vue (Langenberg et al., 2000)

Certains auteurs partent de l'hypothèse de structure globale symétrique, mais ajoutent l'aspect variation de l'orientation, en partant de la quasi-orthogonalité au chanfrein pour finir vertical au centre (voir exemples de la Figure 3.6). Liu et Wirdelius (Liu and Wirdelius, 2014) partent ensuite de cette description pour optimiser (par algorithme génétique multi-objectif) l'orientation des grains dans certaines zones, en particulier celles proches des chanfreins, en comparant la modélisation (code rayon) aux mesures expérimentales, ce qui ne s'avère pas simple.

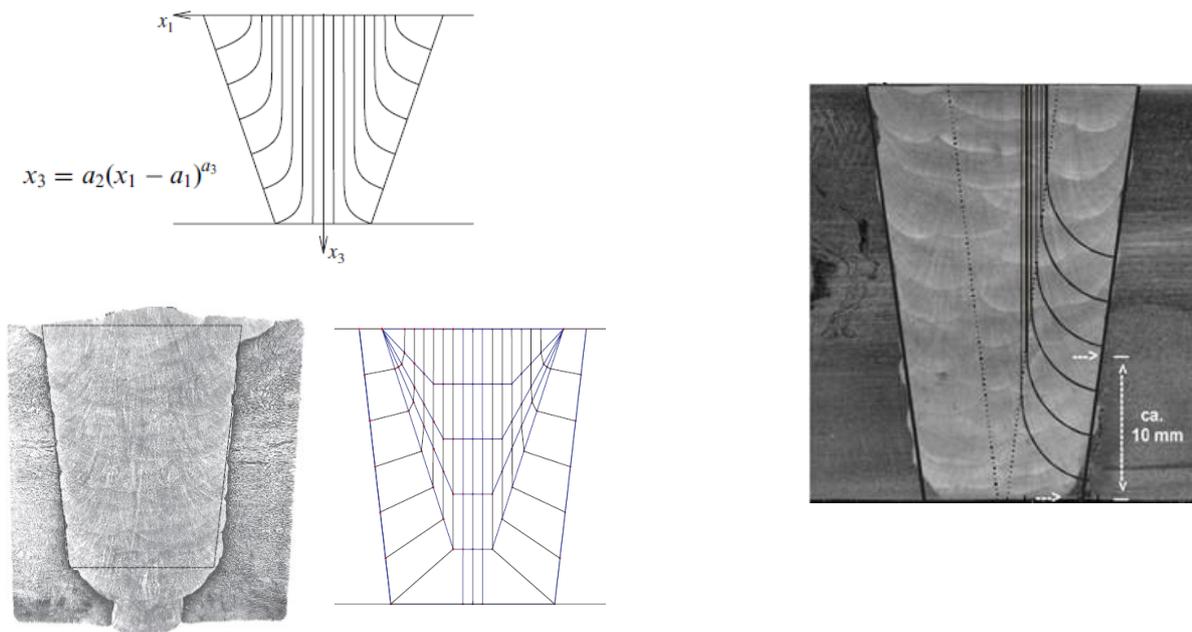


Figure 3.6. Descriptions de soudure avec variation de l'orientation : (Liu and Wirdelius, 2007, 2014) à gauche, et (Kohler et al., 2006) à droite

Le premier auteur à proposer une modélisation paramétrique plus élaborée (mais toujours symétrique) est **Ogilvy** (Ogilvy, 1985). Ce modèle part d'observations de macrographies et émet les hypothèses suivantes : (1) l'axe des grains au centre de la soudure est quasi-vertical, (2) les orientations sont quasi-symétriques de part et d'autre de cet axe (pour une soudure avec chanfrein en V symétrique), (3) les grains sont de plus en plus inclinés en s'éloignant de l'axe central, (4) l'orientation des grains le long des chanfreins est quasi-constante, et (5) l'orientation varie de moins en moins en s'éloignant de l'axe central.

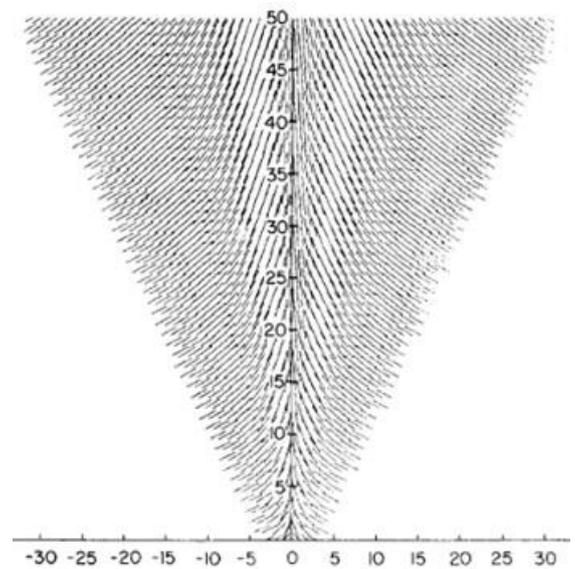
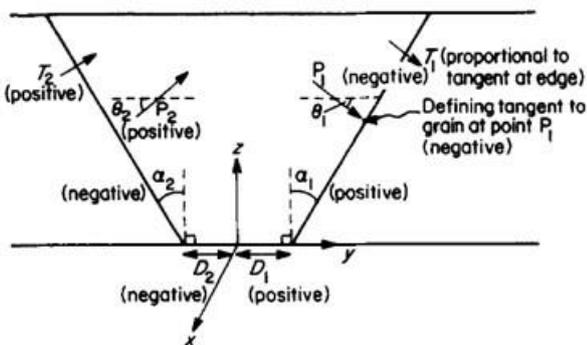
Le modèle est représenté sur la Figure 3.7. Notons que les paramètres du modèle D_1 , D_2 , α_1 et α_2 sont géométriques, T_1 et T_2 sont liés à l'orientation des grains aux bords de chanfrein, et η (compris entre 0 et 1) représente la rapidité avec laquelle l'orientation des grains diminue en s'éloignant horizontalement (selon y) de l'axe central de la soudure.

$$F_1(y, z) = \frac{T_1(D_1 + z \tan \alpha_1)}{y^\eta} \text{ for } y > 0$$

$$F_2(y, z) = \frac{T_2|D_2 + z \tan \alpha_2|}{|y|^\eta} \text{ for } y < 0$$

$$F_1(y, z) = \tan \theta_1 \text{ (negative, giving } \theta_1 \text{ as negative)}$$

$$F_2(y, z) = \tan \theta_2 \text{ (positive, giving } \theta_2 \text{ as positive)}$$



- 1) $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$;
- 2) $D_1 = D_2 = 3 \text{ mm}$ (defined by the geometry given);
- 3) $T_1 = -T_2 = -0.3$;
- 4) $\eta = 0.85$.

Figure 3.7. Modèle d'Ogilvy (à gauche) et exemple de résultat (à droite) (Ogilvy, 1985)

Ce modèle simple et rapide a été utilisé par de nombreux auteurs, comme (Halkjær et al., 2000; Zhang et al., 2012; Hoehne et al., 2013; Kolkoori et al., 2013).

D'autres modèles beaucoup plus complexes de type éléments finis existent. Le plus connu est le **modèle CAFE** (Cellular Automaton - Finite Element), initialement développé en 2D (Gandin and Rappaz, 1994), puis en 3D (Gandin and Rappaz, 1997). Cet algorithme, enrichi par la suite par d'autres chercheurs, prévoit la structure dendritique des grains pendant la solidification (cf. exemples sur la Figure 3.8). Il combine plusieurs échelles de calculs : (1) l'échelle macroscopique, via la résolution des équations de conservation globale de la masse, du moment et de l'énergie, (2) l'échelle mésoscopique, en calculant le développement de l'enveloppe du grain en fonction du champ de température, et (3) l'échelle microscopique, en modélisant la cinétique des pointes de dendrite pour calculer la croissance dendritique (cf. Figure 3.9). Des travaux récents ont visés à adapter le modèle CAFE aux procédés TIG et MIG et aux soudures multi-passes (Chen et al., 2016). Ce type de modèle donne de bons résultats, mais est particulièrement gourmand en temps de calcul et en

données d'entrée très spécifiques, comme la tension de surface, la viscosité du métal solide et du métal liquide, la viscosité thermique et dynamique du gaz ou encore le coefficient de Marangoni (Xue et al., 2022).

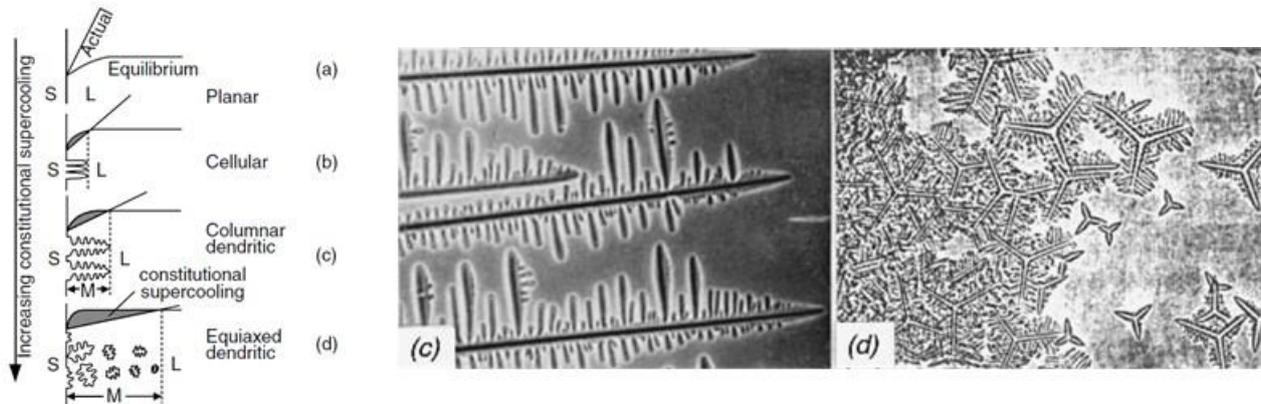


Figure 3.8. Exemples de mode de solidification à l'échelle dendritique : solidification dendritique colonnaire au centre, et équiaxe à droite (Kou, 2003)

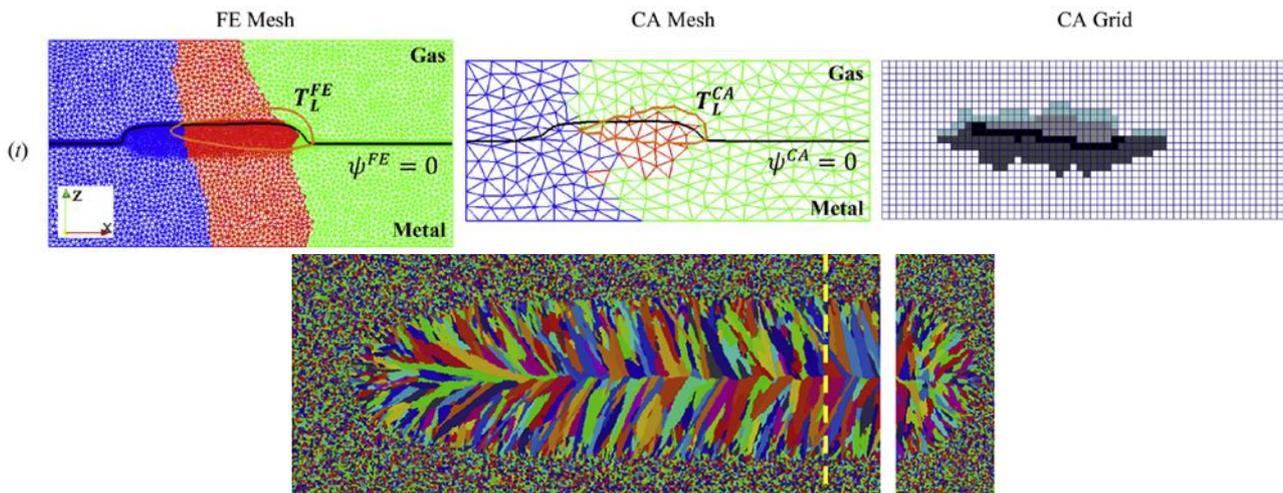


Figure 3.9. Echelles de modélisation du modèle CAFE (en haut) et exemple de structure de grains simulée (en bas), extraits de (Chen et al., 2016)

Une dernière possibilité, qui décrit de façon locale la réalité de la structure, et associe rapidité et simplicité d'utilisation, est le **modèle MINA**, sur lequel je travaille, et que je vais développer maintenant.

3.2.2. Le modèle MINA

Le modèle MINA (Modelling anisotropy from Notebook of Arcwelding) a commencé à être développé par le LCND au début des années 2000 (Moysan et al., 2003; Apfel, 2005), en collaboration avec EDF R&D et Naval Group. L'objectif est de prévoir l'orientation des grains dans une soudure, à partir de données d'entrée disponibles (celles inscrites dans le cahier de soudage), sans avoir à découper la pièce, et de manière rapide et réaliste. Ce concept a été décliné pour le soudage à l'électrode enrobée (MINA EE), puis pour le soudage TIG (MINA TIG) et fait l'objet de travaux actuels et futurs (MINA 3D et MINA 4D, discutés dans les perspectives).

❖ **MINA EE**

La première version de MINA a été créée pour les soudures réalisées à plat à l'électrode enrobée (MINA EE). Ces soudures étant réalisées à plat, l'hypothèse de croissance 2D a été adoptée, dans le plan normal à la direction de soudage. Notons qu'une légère inclinaison des grains existe dans la direction de soudage (Chassignole, 2000), mais n'est pas modélisée ici. Elle sera rediscutée plus loin.

L'écriture du modèle MINA repose sur l'étude phénoménologique de nombreuses macrographies de soudures, et l'identification des principaux paramètres d'influence. Tout d'abord la forme des passes, parabolique, dont la taille est liée au diamètre de l'électrode enrobée, permet de modéliser les directions du gradient thermique, donc les directions de solidification. Ensuite, le recouvrement (ou refusion) influence la position des passes dans le chanfrein. Et l'inclinaison de certaines passes (en particulier au chanfrein) modifie la direction locale du gradient thermique. Enfin les deux phénomènes les plus importants de croissance des grains sont :

- la **croissance épitaxiale** : les grains en bordure d'une passe déposée adopteront les orientations des grains du métal sur lequel la passe a été déposée,
- et la **croissance sélective** (ou compétition cristalline) : si deux grains côte-à-côte ont des orientations différentes, celui dont la direction de croissance est la plus proche de celle du gradient de température continuera de croître, pendant que l'autre sera stoppé.

Tous ces paramètres sont schématisés sur la Figure 3.10. L'échelle de modélisation est choisie par l'utilisateur, de l'ordre du mm. On choisit classiquement entre 0,5 et 2 mm, afin de modéliser la structure à l'échelle des variations des orientations, en particulier du point de vue des ultrasons (à 2 MHz, la longueur d'onde des OL est de l'ordre de 3 mm, et celle des OT est de l'ordre de 1,5 mm).

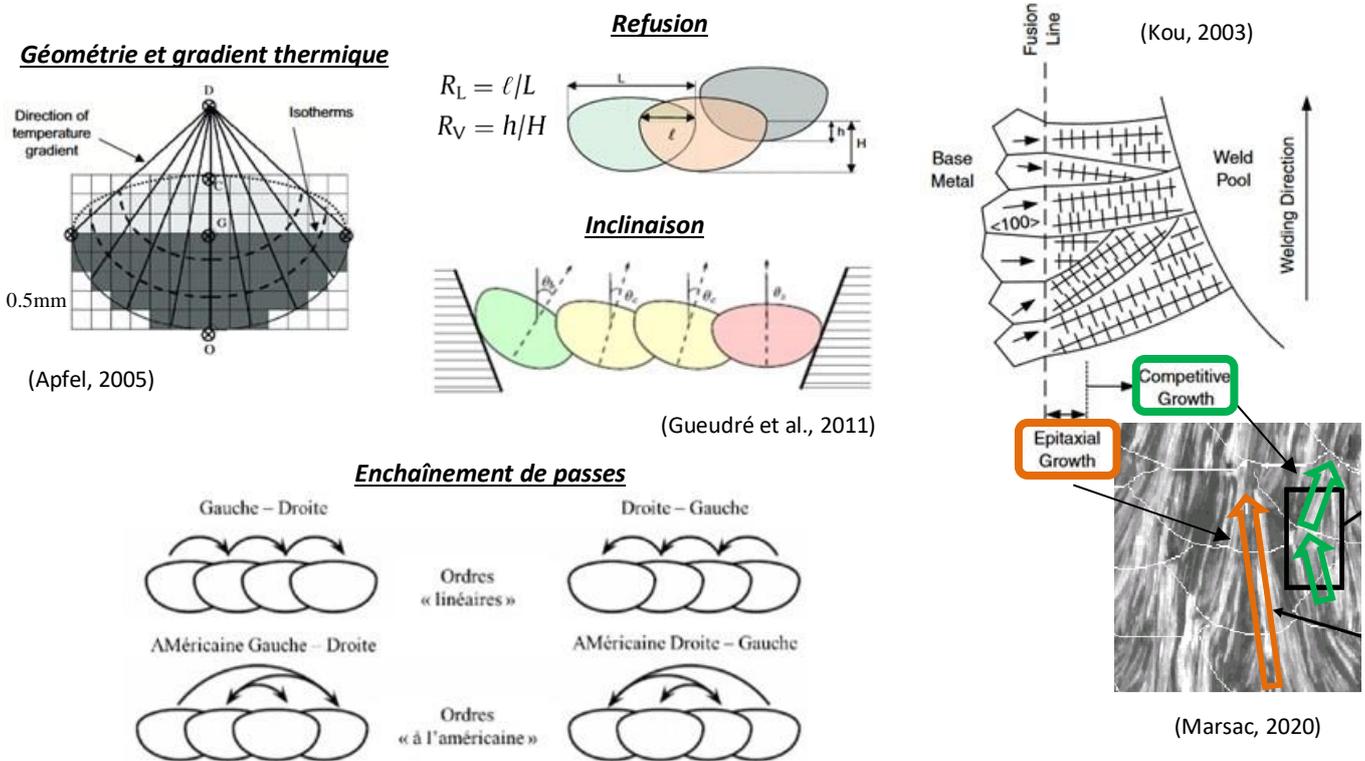


Figure 3.10. Paramètres d'influence de la croissance cristalline : forme des passes et gradient thermique, refusion et inclinaison, ordres « classiques » d'enchaînement des passes, et croissances épitaxiale et sélective (compétition cristalline)

Les données d'entrée de MINA EE sont donc :

- les données du cahier de soudage :
 - la géométrie du chanfrein,
 - l'ordre d'enchaînement des passes de chaque couche,
 - le diamètre de l'électrode utilisée pour chaque couche,
- les paramètres phénoménologiques :
 - de refusion (ou recouvrement) latérale et verticale, R_L et R_V ,
 - d'inclinaison des passes au bord du chanfrein et au centre de la soudure, θ_B et θ_C .

Notons que les paramètres de refusion et d'inclinaison sont des paramètres phénoménologiques qui sont déterminés soit par l'observation de macrographies, soit ajustés par inversion (comme nous le verrons plus loin, au paragraphe 3.4).

Ainsi, grâce à ces données d'entrée, la position et les dimensions de chaque passe dans le chanfrein est calculée, ainsi que les directions locales du gradient thermique associées à chaque passe. Cela permet d'initialiser des orientations de grains dans la passe. Ensuite le code réalise un calcul itératif des orientations dans la passe, en tenant compte des orientations dans les passes voisines, afin de rendre compte des phénomènes d'épitaxie et de compétition cristalline.

Les données de sortie sont alors une matrice des orientations des grains dans des mailles de la soudure de $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Un exemple est montré sur la Figure 3.11. Un excellent résultat est de montrer que MINA reproduit bien l'asymétrie de la soudure, ainsi que son hétérogénéité. L'erreur moyenne en comparant aux macrographies est de l'ordre de 10 à 15°.

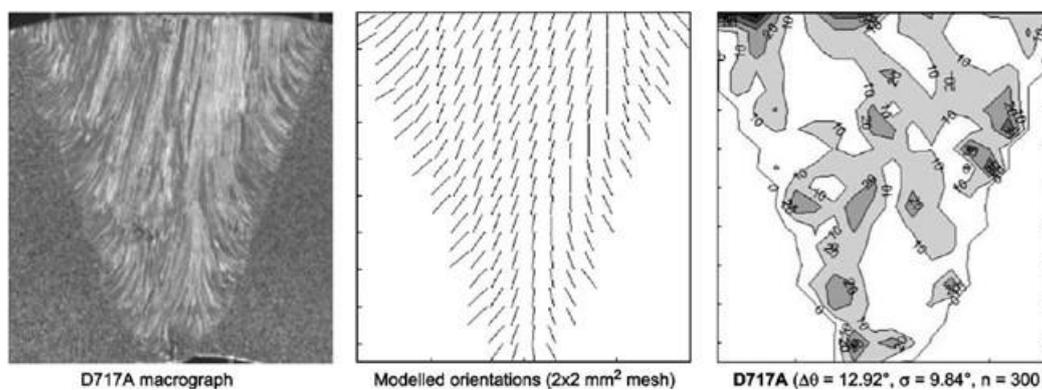


Figure 3.11. Exemple de comparaison d'une macrographie avec un résultat MINA : à gauche la macrographie, au milieu les orientations prédites par MINA, à droite la carte des écarts, par pas de 10° (le blanc correspond à un écart entre 0 et 10°) (Moysan et al., 2003)

Ce modèle a clairement montré sa pertinence pour prédire les orientations dans une soudure multi-passes, et ainsi permettre la modélisation plus réaliste de la propagation des ondes ultrasonores. Des exemples de résultats ultrasonores sont montrés sur la Figure 3.12. Les déviations et divisions du faisceau ultrasonore sont bien retrouvées en utilisant le modèle MINA, comparé aux orientations mesurées sur la macrographie. Quelques écarts demeurent avec les mesures expérimentales. Plusieurs explications peuvent être avancées, et qui seront détaillées plus loin : l'atténuation, qui n'était pas encore prise en compte ici dans la modélisation (cf. paragraphe 3.3), et l'incertitude sur les constantes d'élasticité (paragraphe 3.4.2).

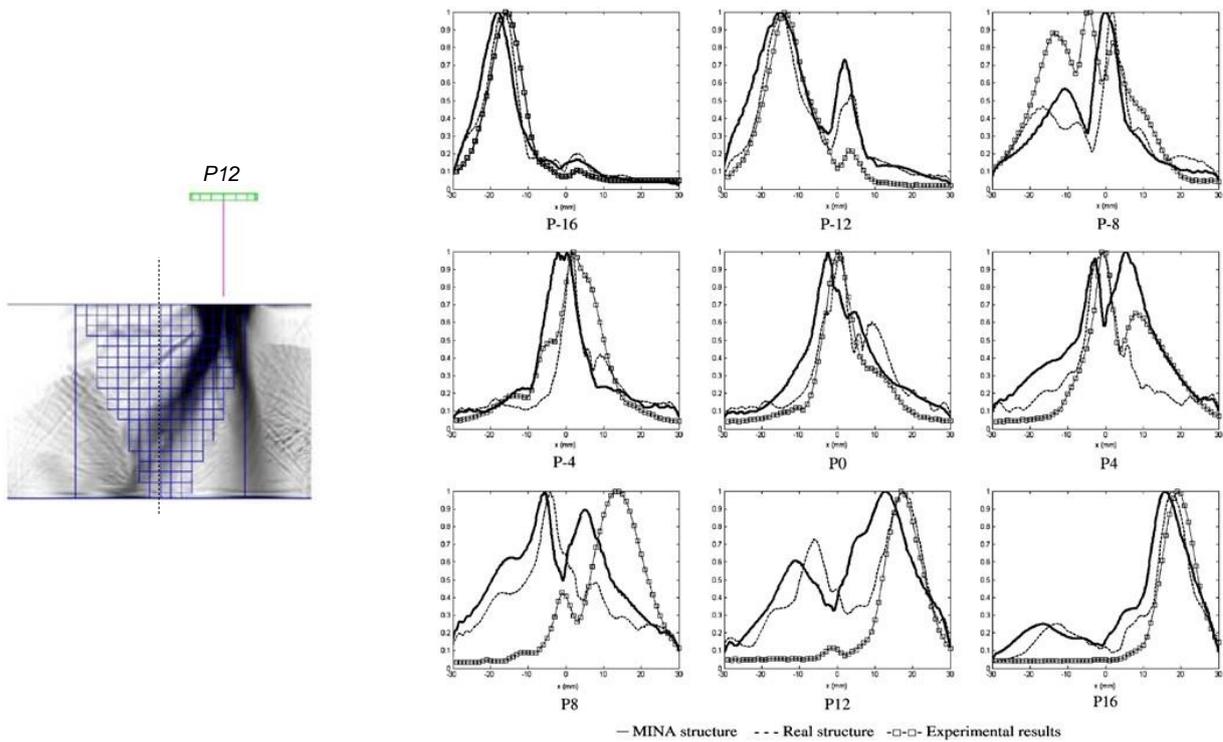


Figure 3.12. Exemples de résultat ultrasonore : modélisation à travers la structure réelle (macrographie) et la structure MINA, et expérimentation. Affichage des résultats sous forme d'échodynamiques (amplitudes maximales reçues en fond de pièce) pour plusieurs position de l'émetteur par rapport à l'axe de la soudure (Apfel et al., 2005)

L'efficacité du modèle MINA a ensuite été confirmée lors d'une collaboration avec le CANDE (Centre of Advanced Non Destructive Evaluation) de l'université Sungkyunkwan de Corée du Sud (Ye et al., 2012). D'autres équipes de recherche ont également utilisé MINA pour modéliser leurs soudures et ainsi simuler la propagation ultrasonore, comme l'Imperial College London (Fan and Lowe, 2014; Mark et al., 2014; Fan et al., 2015), l'université de Bristol (Nowers et al., 2015, 2016), ou encore EDF et le CEA (Chassignole et al., 2011, 2015; Leymarie et al., 2022), et le consortium européen ADVISE ("ADVISE Project H2020," n.d.).

Une IHM (cf. Figure 3.13) a par la suite été développée pour cette version de MINA (2D EE), pour pouvoir être facilement utilisée, en particulier par EDF. Puis le code a été adapté afin de pouvoir l'intégrer sous la forme d'un plug-in dans la plateforme de CND CIVA, développée par le CEA Saclay et commercialisée par la société EXTENDE. Cette intégration est actuellement en cours de finalisation, et le plug-in devrait être très prochainement disponible. Elle pourra ainsi être testée par un grand nombre d'utilisateurs, principalement industriels, ce qui permettra d'avoir un retour d'expérience riche et constructif.

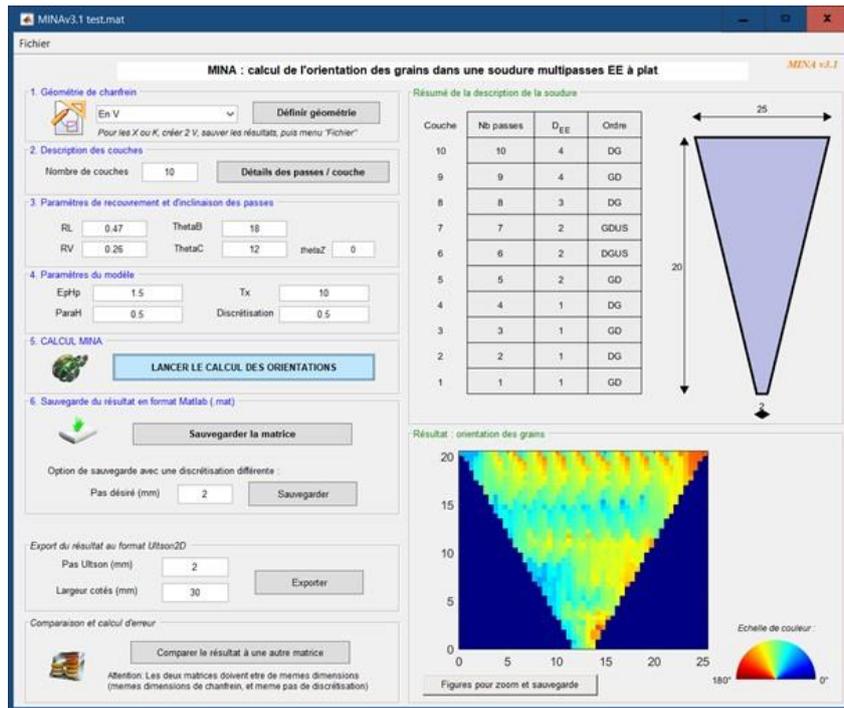


Figure 3.13. Screenshot de l'IHM MINA

❖ **MINA TIG**

Les travaux sur les soudures multi-passes se sont poursuivis au LCND. Dans le cadre du projet ANR MOSAICS, on a montré que le procédé de soudage utilisé exerce une forte influence sur la macrostructure des soudures. En effet, l'utilisation de MINA EE ne permettait pas de bien prédire la structure d'une soudure réalisée avec le procédé TIG. Cette différence de structure en fonction du procédé avait été également mise en évidence par d'autres auteurs (cf. exemple de la Figure 3.14).

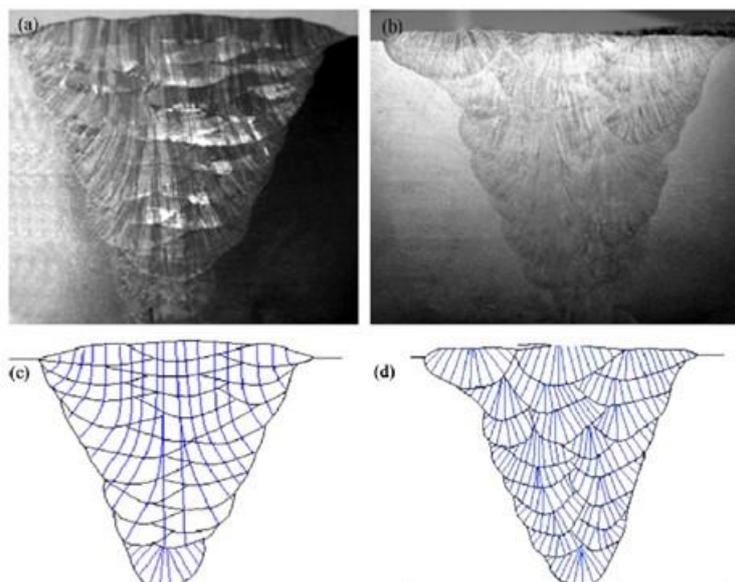
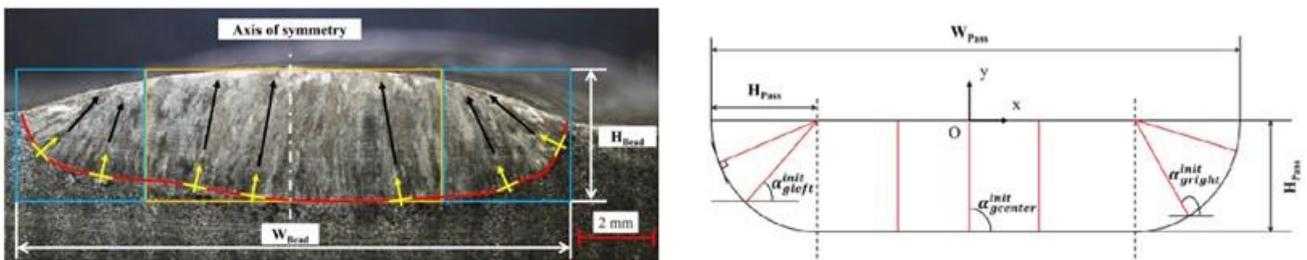


Figure 3.14. Différence de structure entre une soudure EE (à gauche) et une soudure TIG (à droite), extrait de (Tabatabaeipour and Honarvar, 2010)

Les travaux de thèse de Quentin Marsac (Marsac, 2020), menés au LMA et que j'ai co-encadrés, ont alors consisté à étudier le procédé de soudage en TIG semi-automatique. Un grand nombre de paramètres spécifiques à ce procédé a été analysé via une recherche bibliographique approfondie, et la première étape du travail a consisté à en extraire les principaux paramètres d'influence sur la microstructure. Ces paramètres, différents du procédé EE, sont la puissance et la vitesse de soudage, qui influencent la morphologie du bain de soudage, donc les gradients thermiques, et également la vitesse de déroulement du fil d'apport ainsi que son diamètre, qui jouent sur les dimensions des passes.

Plusieurs maquettes de soudure ont été étudiées, ainsi que des lignes de soudage (un seul cordon déposé sur une plaque). Il en est ressorti que la principale différence avec le procédé à l'électrode enrobée est la forme générale d'une passe (plus étalée pour le TIG), et donc le gradient thermique local (cf. Figure 3.15). Dans cette version de MINA, grâce aux résultats de l'analyse des lignes de soudage, les paramètres phénoménologiques de refusion sont maintenant calculés automatiquement à partir des données du cahier de soudage. De plus, les échanges thermiques entre passes sont pris en compte, ce qui permet de calculer automatiquement la direction moyenne du gradient thermique dans la passe, en fonction de sa position dans la soudure (au bord ou au centre du chanfrein). Les principes de croissance épitaxiale et sélective sont ensuite pris en compte, sur le même principe que dans MINA EE.



Les données d'entrée de MINA TIG sont donc :

- la géométrie du chanfrein,
- l'ordre d'enchaînement des passes de chaque couche,
- la puissance (tension \times intensité) et la vitesse de soudage,
- ainsi que la vitesse de déroulement du fil d'apport et son diamètre.

Là encore, on voit que MINA TIG reproduit bien l'hétérogénéité des orientations des grains (cf. exemple de la Figure 3.16). L'écart moyen en comparant aux macrographies est, comme pour MINA EE, de l'ordre de 10 à 15°.

Notons que, dans les deux versions de MINA présentées, les écarts moyens sont calculés et représentés sans tenir compte des « pixels » sur les bords du chanfrein, qui peuvent ne pas parfaitement coïncider : étant donnée la discrétisation, il arrive qu'un pixel « soudé » de la macrographie corresponde à un pixel « métal de base » de la soudure modélisée, et inversement.

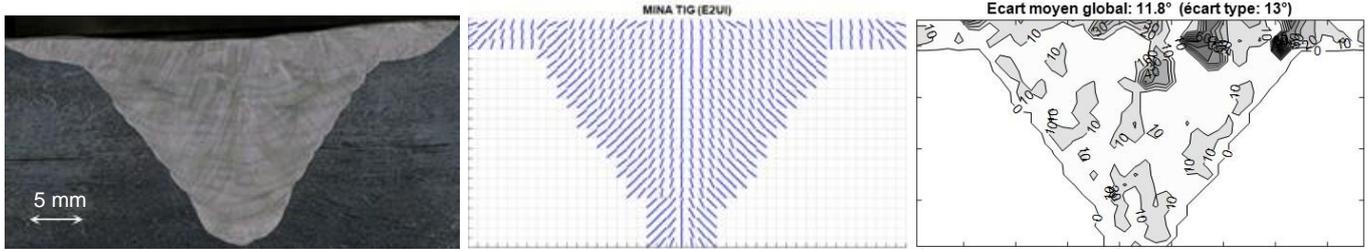


Figure 3.16. Exemple de comparaison d'une macrographie avec un résultat MINA TIG (en 1x1mm²)

D'un point de vue ultrasonore, comme l'illustre la Figure 3.17, on compare la modélisation de la propagation avec comme donnée d'entrée le résultat de MINA (« macrostructure modélisée »), celle avec comme donnée d'entrée la macrographie (« macrostructure réelle »), ainsi que l'expérimentation. On retrouve bien l'allure globale du faisceau, en termes de position des pics et donc en termes de déviation et de division du faisceau. Comme pour MINA EE, quelques écarts demeurent avec les mesures expérimentales, principalement en raison de l'incertitude sur les constantes d'élasticité, ainsi que l'aspect 3D de la croissance des grains (également dans la direction de soudage, hors plan des macrographies), qui va être expliqué dans les perspectives.

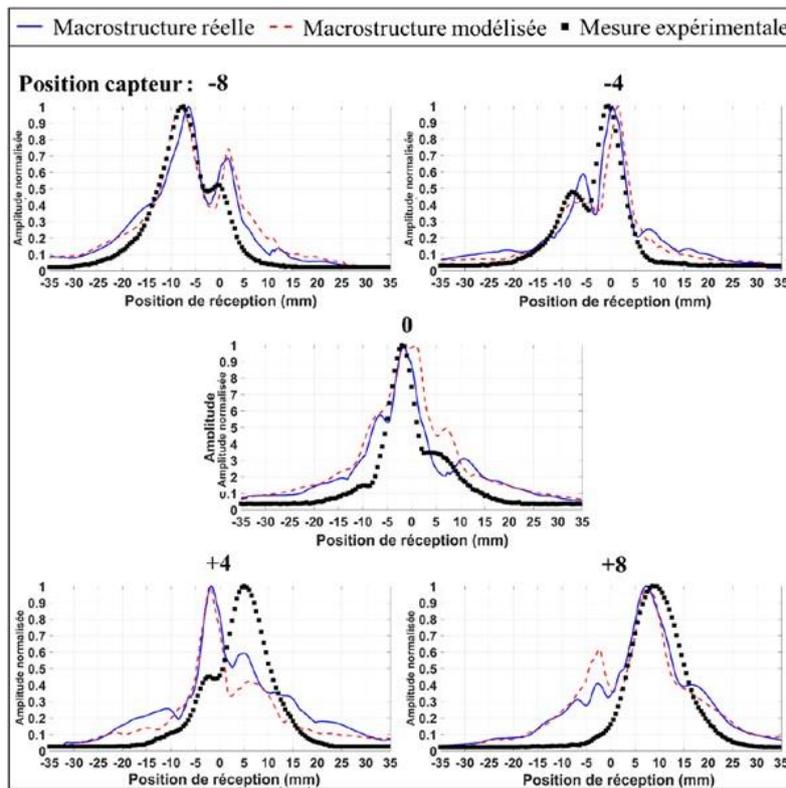


Figure 3.17. Exemple de comparaison de propagation ultrasonore, en LO, pour différentes positions de l'émetteur : macrographie + ATHENA (« macrostructure réelle »), MINA + ATHENA (« macrostructure modélisée ») et mesures expérimentales (Marsac, 2020)

3.2.3. Synthèse et perspectives

Mes travaux concernant le modèle MINA ont donné lieu à la publication de deux articles de recherche (Chassignole et al., 2010; Marsac et al., 2020), ainsi qu'à la participation à plusieurs congrès nationaux et internationaux.

Les travaux du LMA ont permis de progresser de manière très significative dans la prédiction 2D réaliste et rapide d'une structure soudée multi-passes en acier austénitique produite par les procédés à l'électrode enrobée (manuel) et TIG (semi-automatique). L'intérêt de sa rapidité est de pouvoir réaliser des études paramétriques, afin d'étudier l'influence de certains paramètres. L'orientation locale est prédite, à une échelle plus petite que la passe de soudage, et parfaitement adaptée aux ultrasons. Pour prévoir le contrôle non destructif (CND) optimal, la description fournie par MINA sert de donnée d'entrée, et la simulation de la propagation des ultrasons est ensuite obtenue via ces orientations et un ensemble de constantes d'élasticité (C_{ij}) spécifiques au métal soudé. La prédiction du contrôle ultrasonore de telles soudures est donc considérablement améliorée par les deux modèles MINA EE et TIG.

Nous avons envisagé plusieurs extensions du concept MINA, et certaines sont réalisables à plus ou moins long terme :

❖ MINA 3D

La distribution en 2D obtenue par MINA EE et MINA TIG peut être suffisante dans le cas d'un soudage à plat, même si une faible désorientation 3D constante a parfois été observée dans la direction du soudage. Mais la description 2D ne sera jamais réaliste si l'on considère du **soudage en position** (vertical, horizontal, plafond, voire orbital, cf. Figure 3.18), où les **désorientations 3D** sont importantes et potentiellement variables (d'environ 5° à 25°). D'autant plus que comme on l'a vu précédemment sur la Figure 3.3, quelques degrés d'orientation peuvent énormément dévier les ondes. L'inspection ultrasonore finale sera faussée.

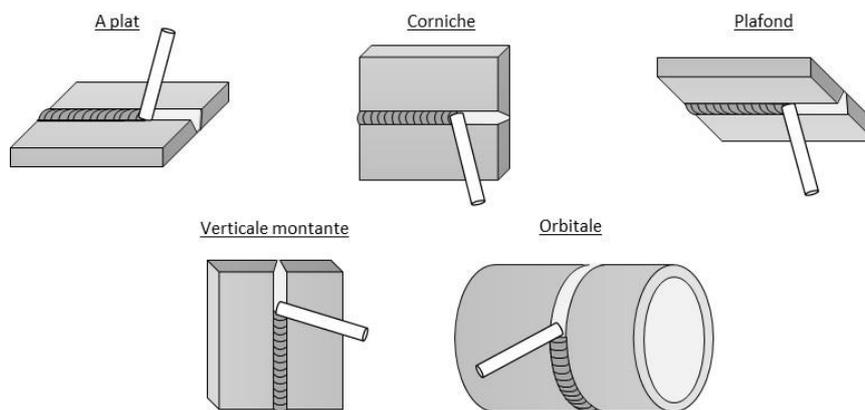


Figure 3.18. Illustrations du soudage en position

La désorientation dans la direction de soudage a d'ailleurs été observée sur des macrographies (Chassignole, 2000), et également d'un point de vue ultrasonore lors de la thèse de Quentin Marsac, où il a constaté une déviation du faisceau ultrasonore dans la direction de soudage (cf. Figure 3.19), lors d'un essai sur une soudure TIG pourtant réalisée à plat.

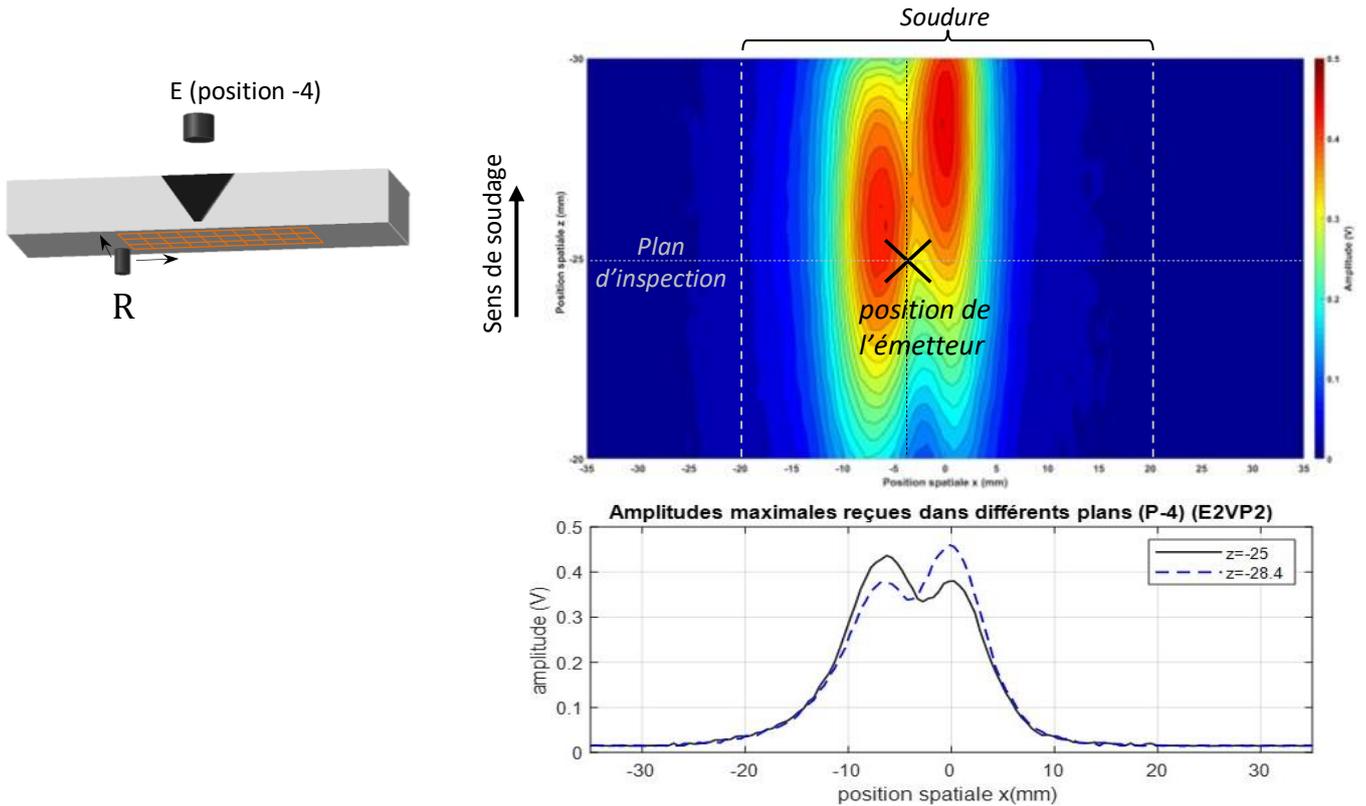


Figure 3.19. Mise en évidence expérimentale de la désorientation des grains dans la direction de soudage, sur une soudure réalisée à plat : en haut, sur l'image Cscan, deux maxima locaux d'amplitude, décalés de quelques millimètres par rapport au plan d'inspection ; en bas sur les échodynamiques, inversion des pics (Marsac, 2020)

De nouveaux paramètres vont être mis en jeu, comme la gravité, qui influera sur le gradient thermique local. Un projet ANR concernant cette problématique a été déposé à l'AAP2023, avec EDF, le CEA, l'IUSTI et le LMGC. Le projet a été accepté et démarrera le 1^{er} avril 2024. Une thèse que je co-encadrerai avec Cécile Gueudré sera réalisée sur ce sujet.

❖ **MINA « 4D »**

Une autre extension plus complexe de MINA concerne la fabrication additive métallique, avec le procédé **WA-AM** (Wire Arc Additive Manufacturing, procédé arc-fil). C'est une alternative à l'usinage (fabrication dite soustractive), qui permet en outre de diminuer les pertes de matière. Le procédé WA-AM consiste à empiler des cordons de soudure afin d'« imprimer » en 3D la pièce métallique (cf. exemples sur la Figure 3.20).

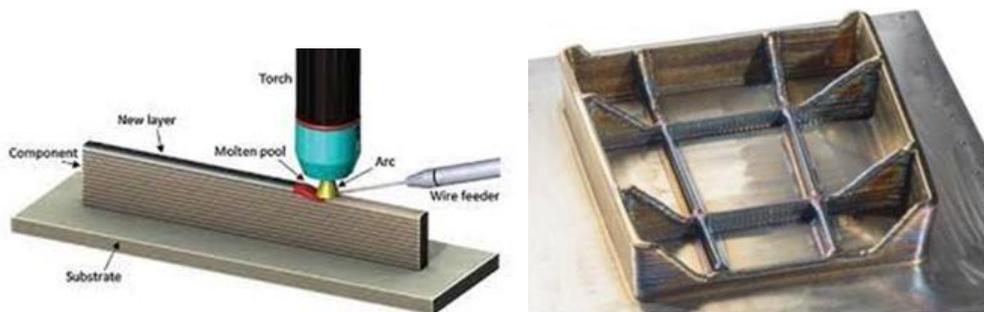


Figure 3.20. Illustrations du procédé WAAM (extraits du site <https://metalblog.ctif.com>)

Les différences fondamentales avec le soudage étudié jusqu'ici sont : (1) il n'y a pas de chanfrein, (2) la stratégie de dépôt des cordons est beaucoup plus complexe, et (3) on n'attend pas que le cordon soit refroidi avant de déposer le suivant. Cela implique une **dimension supplémentaire** à prendre en compte, relative au temps. En effet, le niveau de refroidissement de la passe précédente lors du dépôt de la nouvelle passe dépend du temps qui s'est écoulé. La cinétique de refroidissement et donc l'orientation des grains résultante en dépendra fortement.

Pour avancer sur cette perspective, un projet ANR, appelé « FAMPIC », a été déposé à l'appel à projet 2022, piloté par le LMA, et dont les partenaires étaient l'Institut de Soudure et EDF R&D. La proposition a passé la première étape, mais a été rejeté en seconde étape. Il sera retravaillé et reproposé ultérieurement.

❖ **RC-CND et RE-CND : « Piloter » la microstructure (avant fabrication)**

A long terme, une idée serait de proposer au soudeur un DMOS qui intègre des paramètres de soudage favorables, en particulier l'ordre d'enchaînement de passes, permettant d'avoir une structure plus facilement contrôlable tout en ayant les bonnes caractéristiques mécaniques. En effet, aujourd'hui, le contrôleur « subit » la microstructure des soudures après fabrication.

C'est dans cet objectif que nous avons introduit il y a quelques années les concepts de « **RC-CND** » et « **RE-CND** », qui signifient Règles de Conception (resp. d'Elaboration) en vue des futurs CND. L'idée est que le concepteur et le fabricant soient conscients des contrôles qui seront faits par la suite sur le composant, et donc en tiennent compte dans leurs choix, aussi bien du point de vue de la microstructure induite par le procédé de fabrication (RE-CND) que des conditions d'accès (RC-CND).

Le RC-CND a d'ailleurs été ajouté, en 2015, par le groupe de travail réunissant EDF, le CEA, AREVA et le LCND, et dont j'étais membre, dans l'annexe A20 du RCC-MRx (code édité par l'AFCEN : Association française pour les règles de conception, de construction et de surveillance en exploitation des matériels des chaudières électro-nucléaires). Nous avons également rédigé les « criteria » associés aux modifications (document qui fournit les fondements des règles et recommandations, permettant de comprendre et justifier les solutions apportées).

C'est par ailleurs un des cas d'application que propose maintenant la société EXTENDE, qui commercialise le logiciel de simulation de CND CIVA : « vérifier la contrôlabilité avant fabrication » et « envisager d'éventuelles modifications de conception »¹. Nous souhaitons donc poursuivre cette idée, en l'appliquant aux futures soudures épaisses.

¹ https://www.extende.com/files/extende/application_cases/CIVA_Application_Case_1_FR.pdf

3.3. Estimation de l'atténuation ultrasonore

Nous avons pu voir précédemment que la déviation du faisceau ultrasonore joue un rôle fondamental sur le résultat du contrôle des soudures austénitiques épaisses. Cependant même quand la déviation est bien prédite, des écarts d'amplitude peuvent demeurer, comme le montre l'exemple de la Figure 3.21. En effet, les grains constituent des diffuseurs pour les ultrasons, et atténuent donc, à des niveaux différents selon l'orientation des grains. Le métal de base, dans lequel est usiné le chanfrein, est isotrope, avec des grains petits (de l'ordre de 50 à 100 μm) par rapport au métal soudé, et atténue donc peu. Dans l'exemple, la partie du faisceau qui traverse la soudure est alors (expérimentalement) beaucoup plus atténuée que la partie qui ne voit que le métal de base. Comme la modélisation ne prenait pas encore en compte l'atténuation en 2003, cette partie du faisceau présentait une amplitude simulée bien plus importante. Mes travaux de thèse (Ploix, 2006) ont consisté à étudier et évaluer cette atténuation, afin de l'introduire dans la modélisation, réalisée à l'aide du code ATHENA.

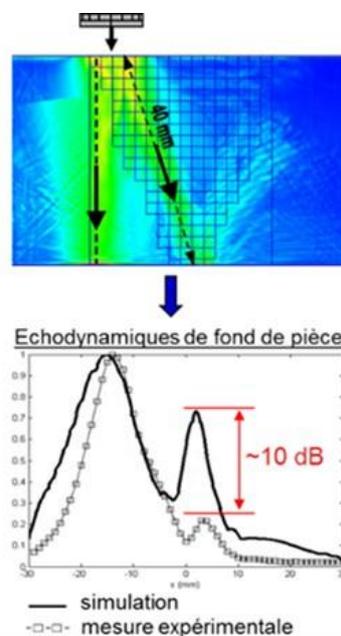


Figure 3.21. Exemple de modélisation ATHENA sans atténuation et comparaison à l'expérimental : erreur de 10dB

3.3.1. Problèmes spécifiques liés à l'atténuation par diffusion

Dans le cas des soudures, l'atténuation intrinsèque (définition au paragraphe 2.2.2 p.31) est causée par la diffusion aux joints des grains (l'absorption est classiquement négligée dans les métaux). En effet, le matériau étant orthotrope, deux grains côte-à-côte ont une direction cristallographique commune, l'axe [100], et les autres axes sont orientés différemment. Les ondes ultrasonores voient donc une différence d'impédance, et chaque grain est donc un diffuseur. Et les grains étant colonnaires (environ 150-200 μm x 4-5 mm), selon la direction de propagation, l'onde ne verra pas la même « dimension » ni la même anisotropie du grain.

❖ Atténuation et modélisation

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'atténuation par diffusion n'est pas simple à modéliser : soit on homogénéise le milieu et dans ce cas on lui affecte un coefficient d'atténuation (ce qui pose la question de

sa valeur, donc de sa mesure), soit on modélise entièrement le milieu, à l'échelle de chaque grain (il y a en fait homogénéisation à l'échelle de chaque grain).

Cette deuxième option reste rarement choisie car elle peut être complexe et est très coûteuse en capacité et en temps de calcul. En effet, la modélisation est nécessairement de type éléments finis, afin que la diffusion soit simulée. On peut tout de même citer les travaux d'EDF, dans les soudures (Chassignole et al., 2006; Lhuillier et al., 2017), qui aboutissent à des valeurs d'atténuation modélisée cohérentes avec l'expérimental et la théorie, au prix d'un temps de calcul très important et de la nécessité de connaître les dimensions des grains.

La première option est beaucoup plus fréquente. La soudure est alors décrite comme un ensemble de sous-domaines homogènes. Cela nécessite de fournir en données d'entrée non seulement les constantes d'élasticité, mais également des données concernant l'atténuation, dans chaque sous-domaine. Il faut donc mesurer expérimentalement les constantes d'élasticité et l'atténuation, sur des pièces représentatives. La détermination des constantes d'élasticité sera abordée plus loin, au paragraphe 3.4.2. Nous nous intéressons ici uniquement à l'atténuation.

❖ Atténuation et mesure

Comme nous l'avons évoqué au paragraphe 2.3.5, l'atténuation par diffusion est complexe à mesurer. La mesure doit être indépendante de la forme de la pièce et du dispositif expérimental utilisé. Or dans le cas de la diffusion, l'**atténuation intrinsèque** se mesure sur la partie cohérente du signal, qui n'est pas toujours simple à isoler expérimentalement (quelle taille de capteur ? positionné où ? etc.).

En effet, les différentes causes de perte d'énergie mesurée (c'est-à-dire vue par le récepteur) sont les suivantes :

- le matériau : tout d'abord l'atténuation intrinsèque (qu'on cherche à mesurer), mais aussi l'anisotropie, qui peut impliquer des déviations des ondes,
- la géométrie de la pièce : l'état de surface (rugosité, planéité, parallélisme des faces), et ses dimensions finies, qui impliquent de la réflexion/transmission, voire des conversions de mode,
- le dispositif expérimental : en particulier les caractéristiques du faisceau ultrasonore incident (ses dimensions, son ouverture, etc.), et du récepteur (position, dimensions, sensibilité, etc.), le couplage entre le(s) capteur(s) et la pièce etc.

Certaines de ces causes sont illustrées sur la Figure 3.22, dans le cas de l'immersion, avec des méthodes classiques en transmission ou réflexion. On se rend alors bien compte que la combinaison de plusieurs sources de perte d'énergie rend la mesure précise de l'atténuation intrinsèque seule particulièrement complexe, que l'on choisisse le mode transmission ou le mode écho, au contact ou en immersion. Elle sera généralement surestimée car une partie de la partie cohérente peut ne pas être récupérée par le récepteur.

La configuration minimisant au maximum les sources d'erreur est le mode transmission, en immersion, avec un capteur récepteur de plus grande dimension que le capteur émetteur. En effet, l'immersion permet de maîtriser l'interface de couplage, la transmission autorise le déplacement éventuel du récepteur si l'on veut chercher le maximum (en particulier en cas de déviation), et le récepteur plus grand permet de minimiser les pertes liées à la divergence. Notons qu'il existe dans la littérature des termes correctifs théoriques permettant de prendre en compte la divergence, par exemple dans (Wu and Stepinski, 2000).

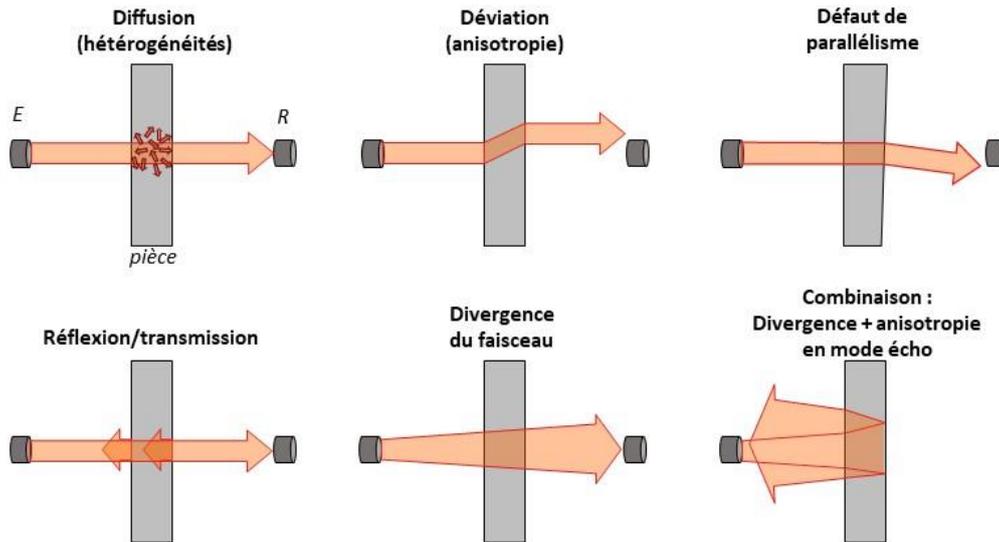


Figure 3.22. Illustration de quelques causes expérimentales de perte d'amplitude

❖ **Application au métal soudé**

D'un point de vue théorique, plusieurs modèles de diffusion dans les métaux polycristallins anisotropes ont été développés depuis les années 1980. Les principaux modèles, sous l'hypothèse de faible degré d'inhomogénéité, sont celui de Hirsekorn (Hirsekorn, 1985, 1986) et celui de Stanke et Kino (Stanke and Kino, 1984). Ce dernier est le plus complet : il est valable quelle que soit la fréquence, tout en restant sous les hypothèses de grains équiaxes (sphériques) et de faible anisotropie du monocristal.

Le modèle d'Ahmed et Thompson (Ahmed and Thompson, 1992; Ahmed and Panetta, 2002; S Ahmed et al., 2003) étend celui de Stanke et Kino aux grains allongés (ellipsoïdaux). Il prévoit que l'atténuation des ondes longitudinales est nulle lorsque la direction de propagation des ondes coïncide avec l'axe cristallographique privilégié des grains, et que plus les grains sont allongés (\bar{d}/h petit), plus l'atténuation est grande (cf. Figure 3.23).

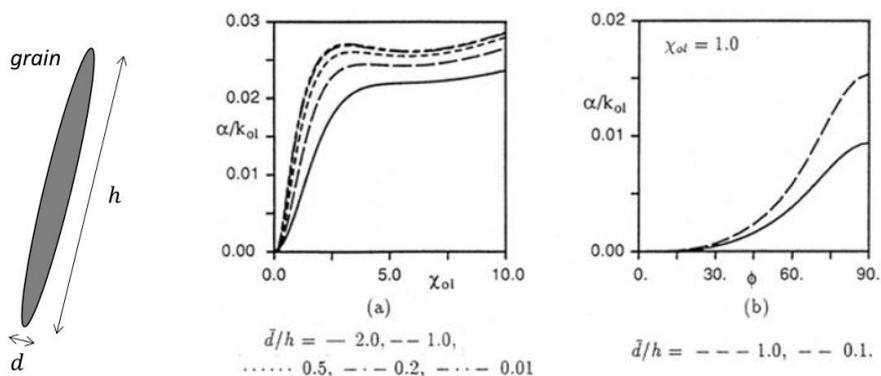


Figure 3.23. Coefficient d'atténuation théorique normalisé des OL, pour différentes valeurs de \bar{d}/h , à gauche en fonction de la fréquence normalisée, et à droite en fonction de la direction de propagation par rapport à l'orientation des grains (Ahmed and Thompson, 1992)

La Figure 3.24 montre les résultats du modèle d'Ahmed et Thompson obtenus pour des valeurs de \bar{d} et h correspondant aux soudures étudiées ici, grâce au code de calcul fourni par Salahuddin Ahmed, rencontré à un séminaire pendant ma thèse.

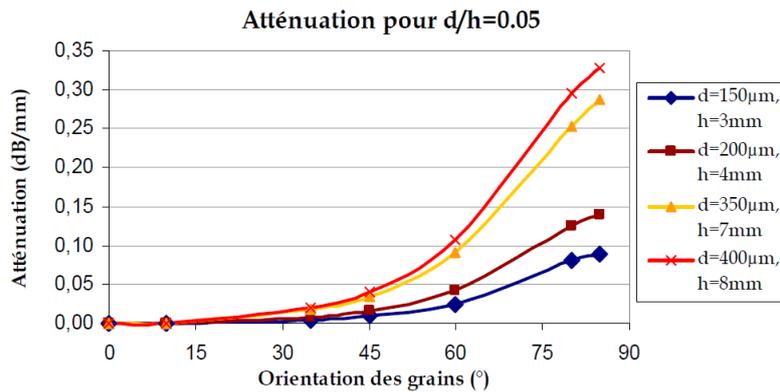


Figure 3.24. Coefficient d'atténuation théorique des OL, pour $\bar{d}/h = 0,05$

Plusieurs pièces ont préalablement été découpées, avec différentes orientations de grains homogènes (cf. schéma de gauche de la Figure 3.25). L'intérêt d'avoir des échantillons avec différentes orientations est de pouvoir faire des mesures en fonction de l'orientation des grains tout en restant en incidence normale. En effet, des mesures en incidence oblique sur un seul échantillon ajoutent des incertitudes importantes liées à la connaissance précise de la direction de propagation, aux conversions de mode et aux déviations.

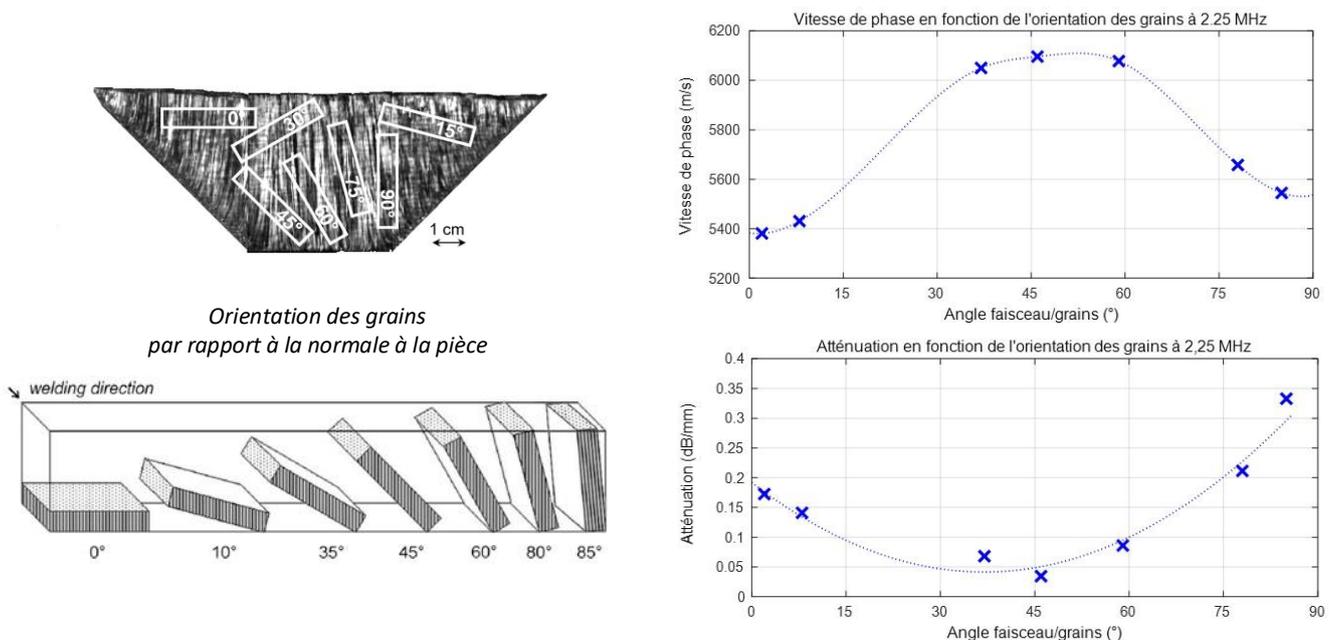


Figure 3.25. A gauche, pièces homogènes découpées avec différentes orientations de grain ; A droite, vitesses de phase et atténuations mesurées des OL via la méthode classique (Ploix, 2006)

Des premières mesures « classiques » ont d'abord été réalisées, en immersion et en transmission. Les valeurs obtenues en termes de vitesse et d'atténuation sont tracées sur la droite de la Figure 3.25. Elles traduisent un comportement fortement anisotrope, avec en particulier une variation de vitesse de 700 m/s selon la direction de propagation. De plus, d'après ces mesures, l'atténuation est maximale à 90°, et présente également un maximum local à 0°. Ce dernier point est en désaccord avec la théorie vue précédemment, dont le minimum en 0° est physiquement logique car très peu d'interfaces et donc de diffuseurs sont vus dans cette direction de propagation. C'est pourquoi nous avons cherché à améliorer la mesure.

3.3.2. Méthode de mesure avancée de l'atténuation

Ces valeurs d'atténuation, obtenues par la méthode classique, fausseraient la modélisation si elles étaient intégrées, en particulier pour les orientations proches de la direction de propagation. J'ai donc mis en œuvre lors de ma thèse une méthode plus précise, qui permet de prendre en compte la réalité du faisceau ultrasonore (sa composition spectrale et angulaire) ainsi que l'anisotropie du matériau. Les mêmes pièces que précédemment sont utilisées.

❖ Principe de la méthode

Cette méthode consiste à évaluer la différence entre le faisceau transmis théoriquement et le faisceau transmis expérimentalement. Cette différence est l'atténuation intrinsèque. Pour cela, on cartographie expérimentalement le faisceau ultrasonore qui arrive en incidence sur la pièce, ainsi que le faisceau transmis à travers la pièce (cf. schéma de principe de la Figure 3.26). On applique ensuite au faisceau incident expérimental, préalablement décomposé en spectre angulaire d'ondes planes, la transmission modélisée à travers la pièce anisotrope pour des ondes planes d'incidence quelconque.

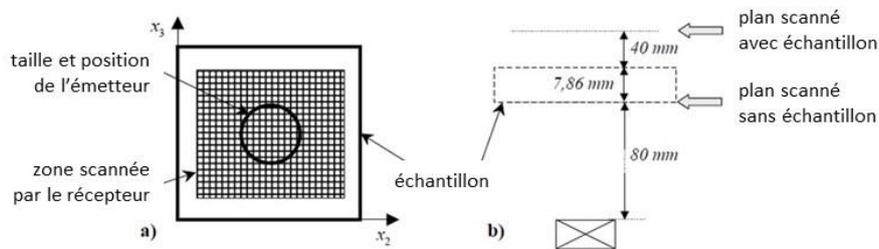


Figure 3.26. Zones scannées, sans et avec l'échantillon

La pièce est positionnée en champ lointain afin d'être sous l'hypothèse d'ondes planes. En effet, nous avons pu vérifier expérimentalement que le faisceau émis peut être particulièrement perturbé dans le champ proche, comme le montre les images Cscan de la Figure 3.27.

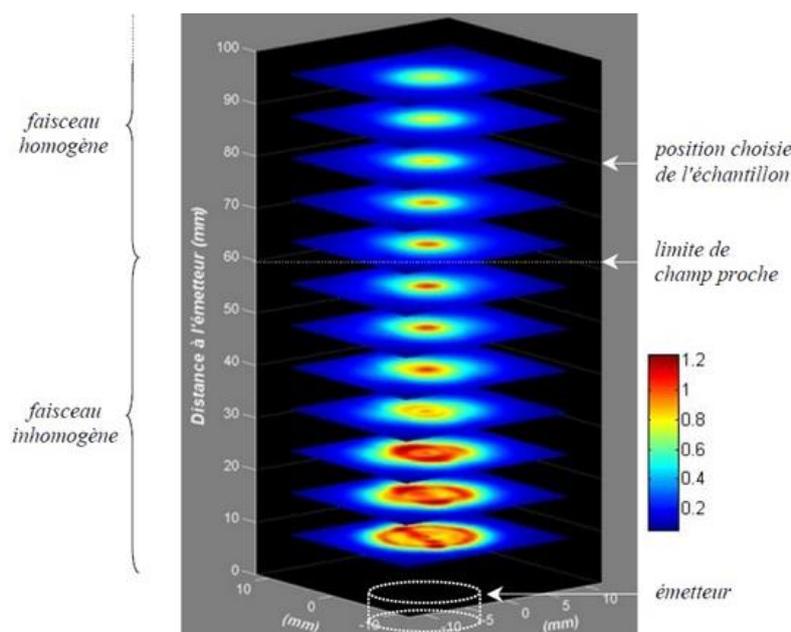


Figure 3.27. Illustration expérimentale de l'allure du faisceau réel dans le champ proche et le champ lointain

Les faisceaux incidents et transmis sont montrés sur la Figure 3.28. On note que le faisceau transmis a été dévié dans tous les échantillons de soudure, sauf celui à 45°, comme le prévoit la théorie, voir la Figure 3.3 p. 53. Il est principalement dévié sur l'axe horizontal (vers la gauche de 0 à 45°, puis vers la droite), mais également sur l'axe vertical pour les pièces notées 0° et 10°. On a alors vérifié les orientations dans les échantillons, et on a effectivement constaté que les échantillons présentaient une légère désorientation, de l'ordre de 5° dans la direction de soudage, ce qui impacte surtout les pièces 0° et 10° (cf. schéma des pièces de la Figure 3.25).

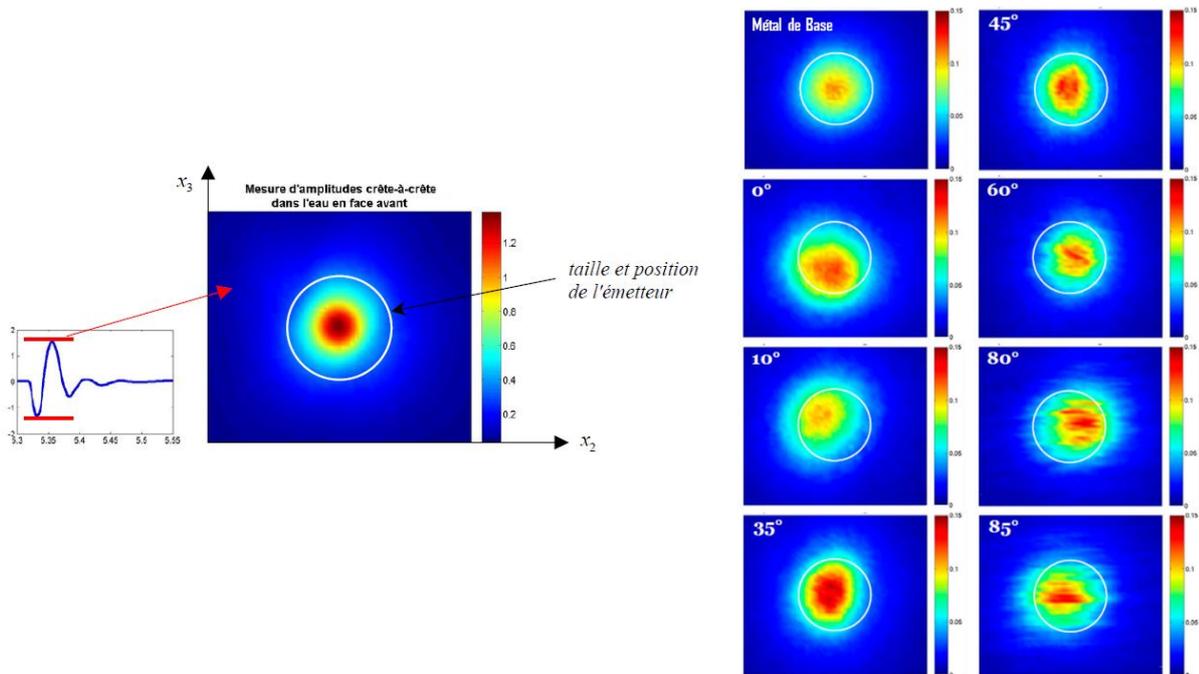


Figure 3.28. Images Cscan : à gauche, du faisceau incident, et à droite, à travers les différents échantillons

Ces deux désorientations combinées ont été prises en compte dans la modélisation de la transmission, en considérant le matériau triclinique. En effet, du point de vue du faisceau, le matériau avec les deux désorientations ne présente aucune symétrie. Mathématiquement, on applique à la matrice des constantes d'élasticité, initialement orthotrope (donc avec 9 C_{ij} indépendantes non nulles, cf. Tableau 2.1 p. 34), deux rotations successives pour être écrite dans le repère contenant la normale à la pièce, ce qui rend la matrice pleine. La transmission est calculée pour une incidence quelconque, à une fréquence donnée, et représentée dans le k-domaine (cf. exemple à gauche de la Figure 3.29).

Parallèlement, le faisceau incident expérimental est transformé en **spectre angulaire d'ondes planes**, également représenté dans le k-domaine (cf. exemple à droite de la Figure 3.29). Cela signifie que, comme pour un signal temporel qu'on décompose en ondes planes de différentes fréquences par transformée de Fourier, le faisceau est décomposé en ondes planes de différentes directions de propagation. Pour cela, on commence par appliquer une transformée de Fourier à chaque signal pour ne garder que la fréquence 2,25 MHz, et on applique à l'image obtenue une transformée de Fourier spatiale (2D).

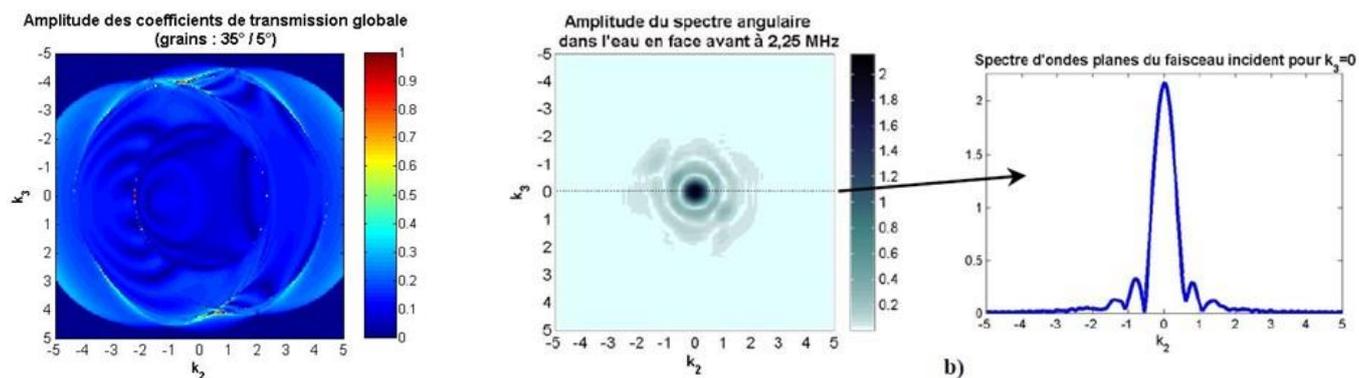


Figure 3.29. A gauche : exemple de coefficients théoriques de transmission dans le k -domaine : à droite : transformée en spectre angulaire d'ondes planes du faisceau incident

On peut alors multiplier les deux cartographies pour obtenir le faisceau transmis théoriquement à travers la pièce. L'atténuation se calcule en comparant les énergies de ce faisceau avec le faisceau transmis expérimentalement.

❖ Résultats et bilan

La Figure 3.30 présente les valeurs d'atténuation obtenues sans tenir compte de la légère désorientation dans la direction de soudage (ronds), donc avec une hypothèse monoclinique, et en tenant compte des deux désorientations, sous l'hypothèse triclinique (triangles). Cette prise en compte joue principalement sur l'échantillon noté « 0° ». On obtient alors une allure globalement croissante, en meilleur accord avec la théorie.

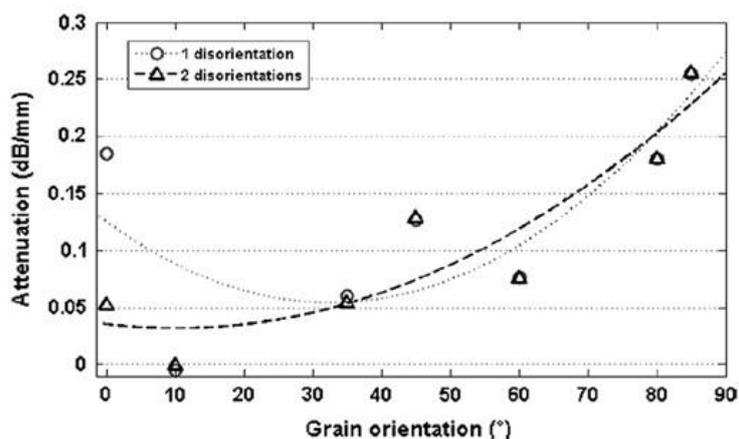


Figure 3.30. Atténuations obtenues selon l'hypothèse monoclinique/triclinique considérée (Ploix et al., 2014)

Pour la première fois, les coefficients d'atténuation mesurés ont pu être intégrés au code de simulation en éléments finis ATHENA d'EDF. Des simulations de contrôle sur des trous génératrices ont été réalisées, avec et sans atténuation, et les amplitudes obtenues ont été comparées à des mesures expérimentales. La Figure 3.31 ci-dessous présente les résultats : la simulation avec l'atténuation permet d'obtenir des écarts entre amplitude simulée et amplitude expérimentale inférieurs à 1 dB (contre des écarts de 5 à 8 dB sans atténuation).

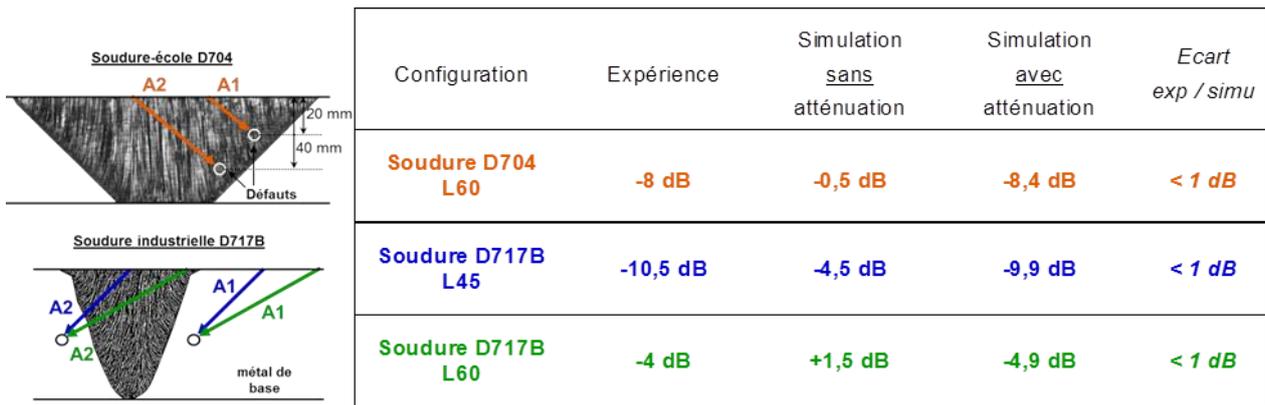


Figure 3.31. Comparaison des amplitudes (A2-A1) expérimentales, et simulées sans et avec atténuation (Ploix, 2006)

Cette méthode avancée de mesure de l'atténuation a permis de s'affranchir de nombreux facteurs influents et d'aboutir, comme le prévoit la théorie, à une atténuation croissante en fonction de l'orientation des grains.

3.3.3. Synthèse et perspectives

Ces travaux sur l'atténuation ont donné lieu à la publication de quatre articles de recherche (Ploix et al., 2005; Moysan et al., 2008; Chassignole et al., 2009; Ploix et al., 2014), ainsi qu'à la participation à plusieurs congrès nationaux et internationaux.

L'atténuation est un paramètre d'entrée très important lorsqu'on veut modéliser la propagation ultrasonore, mais elle est malheureusement très difficile à mesurer de manière fiable et précise, et est donc, dans la littérature, souvent mal (voire pas) prise en compte dans la modélisation.

Mes travaux de thèse ont permis de comprendre les écarts entre expérimentation classique et théorie, et une méthode a été mise en œuvre pour mesurer plus précisément l'atténuation en éliminant les biais liés à la réalité du faisceau expérimental, très différent de l'onde monochromatique théorique. Cette méthode est efficace mais complexe.

Une autre approche, plus complexe encore, consiste à mesurer directement la forme complexe des constantes d'élasticité C_{ij} : cette approche a été mise en œuvre au LVA de l'INSA de Lyon par Philippe Guy (Bodian, 2011). Elle repose sur le principe de mes travaux de thèse, en ajoutant des mesures en incidence oblique dans différents plans d'incidence. En combinant la mesure des vitesses et celle des atténuations en fonction de l'angle d'incidence et du plan d'incidence, on peut alors remonter aux C_{ij} complexes par une méthode d'inversion.

Je souhaiterais dans les années à venir continuer à travailler sur cette problématique de la mesure de l'atténuation, qui va au-delà des soudures. Le but serait de trouver une méthode expérimentale à la fois simple et fiable. L'idéal serait d'éliminer les biais liés au dispositif expérimental, et ainsi de travailler surtout sur le faisceau incident, en tentant de le faire tendre vers la théorie, c'est-à-dire cylindrique et monodirectionnel. L'objectif ultime serait alors d'aboutir à une méthode universelle, indépendante du dispositif de mesure, et relativement simple de mise en œuvre.

3.4. Etude d'une stratégie d'inversion pour améliorer la modélisation

Deux codes sont utilisés pour simuler et ainsi comprendre la propagation ultrasonore dans les soudures austénitiques épaisses : (1) MINA, développé par le LCND, qui prédit l'orientation des grains de la soudure, et (2) ATHENA, développé par EDF, code éléments finis qui simule la propagation ultrasonore. On obtient ainsi le **modèle direct**, qui contient un certain nombre de données d'entrée pour chacun des codes. Ces données d'entrée sont plus ou moins bien connues et/ou fiables, comme les constantes d'élasticité, ou encore les informations du cahier de soudage, qui peuvent être erronées voire absentes.

Lorsque des données d'entrées sont inaccessibles ou trop incertaines, une solution est de réaliser une **inversion**. Cela consiste à optimiser certains paramètres d'entrée afin de rapprocher le résultat de la simulation du résultat expérimental (cf. schéma de principe de la Figure 3.32), dans une zone saine de la pièce. L'objectif est d'avoir une modélisation la plus fidèle possible de la situation (saine) réelle, afin de faciliter ensuite la détection, la localisation et la caractérisation d'un éventuel défaut. Un autre objectif de l'inversion peut aussi être de remonter à des propriétés de la pièce ou du défaut.

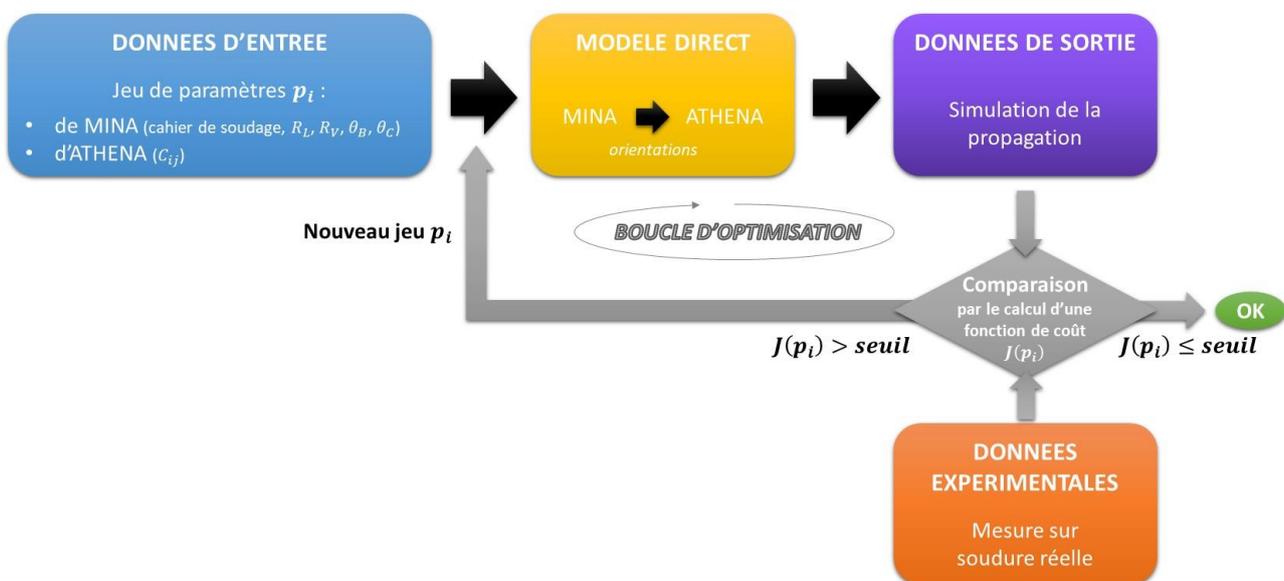


Figure 3.32. Schéma de principe de l'inversion

3.4.1. Démarches mises en œuvre

❖ Sur les paramètres de solidification, en crime inverse

Une première démarche d'inversion a été mise en œuvre au LCND (lors de mon stage de DEA en 2003) pour l'optimisation des paramètres de solidification, dans le cadre de soudures réalisées par électrode enrobée (MINA EE) : les recouvrements latéral et vertical R_L et R_V , et les angles d'inclinaison des passes θ_B et θ_C . En effet ces paramètres peuvent être évalués sur les micrographies, mais cela nécessite d'avoir découpé (donc détruit) des soudures similaires pour les analyser. D'après les nombreuses macrographies étudiées, on peut fixer des bornes à ces paramètres : $R_L \in [0.35; 0.6]$, $R_V \in [0.15; 0.4]$, $\theta_B \in [8.5^\circ; 21^\circ]$ et $\theta_C \in [5^\circ; 17.5^\circ]$. Ces domaines seront les contraintes pour le processus d'inversion.

Pour toute démarche d'inversion, il est important de d'abord bien choisir le **descripteur**, c'est-à-dire l'élément de référence que l'on va comparer, et la **fonction de coût**, qui permet de calculer l'écart entre la modélisation et la mesure expérimentale de ce descripteur.

Le descripteur sélectionné ici est la courbe « échodynamique », qui représente l'amplitude maximale réceptionnée en chaque point (cf. exemple sur la Figure 3.21 p.67). En effet, c'est un descripteur sensible, et pertinent dans l'objectif de comparaison à des mesures expérimentales.

Ainsi l'inversion pourra être faite sur une ou plusieurs positions du capteur émetteur, ici positionné de manière à générer du L0. Quant à la fonction de coût, elle est choisie égale à la somme des écarts quadratiques entre les échodynamiques simulées et expérimentales.

Cependant, à ce stade, l'atténuation n'ayant pas encore été intégrée au code ATHENA, les amplitudes modélisées ne peuvent pas être directement comparées aux amplitudes expérimentales. De plus, aucune donnée expérimentale n'était disponible. Il a donc été décidé de commencer par réaliser l'inversion en **crime inverse** : les paramètres optimaux recherchés sont les paramètres utilisés pour simuler la mesure « expérimentale » (au lieu de vraies données expérimentales). Cela permet par ailleurs d'évaluer la robustesse de la procédure d'inversion.

Ensuite il faut bien choisir l'**algorithme d'inversion**, qui doit minimiser la fonction de coût en faisant varier de manière itérative et adaptée les paramètres à optimiser. Selon l'allure de la fonction de coût, on peut choisir une méthode locale ou une méthode globale. Les **méthodes locales**, rapides, consistent à « descendre » le long de la fonction de coût pour trouver le minimum (généralement par le calcul du gradient). Elles sont parfaitement adaptées lorsque la fonction de coût est une fonction convexe, avec un unique minimum. Les **méthodes globales** quant à elles sont mieux adaptées lorsque la fonction de coût présente des minima locaux.

Une première analyse de sensibilité de la fonction de coût par rapport aux paramètres de solidification a menée à d'abord sélectionner une méthode locale, la méthode de Levenberg-Marquardt, pour sa robustesse et sa capacité à passer des « petits » minima locaux. Les résultats obtenus étaient encourageants mais pas suffisants. Une méthode globale a alors été testée par la suite, les algorithmes génétiques. Le principe se base sur l'évolution génétique d'une population au cours des générations : une population initiale d'individus est choisie au hasard (chaque individu est un jeu de paramètres). La génération suivante (i.e. l'itération suivante) permet d'obtenir une nouvelle population, et sont introduits des opérateurs de sélection, de croisement, de mutation ou encore de remplacement. Ne sont alors conservés que les individus les mieux « adaptés », et ainsi de suite. Un exemple de résultat est montré sur la Figure 3.33. Les résultats obtenus étaient prometteurs, et ont ensuite été poursuivis sur un autre paramètre essentiel.

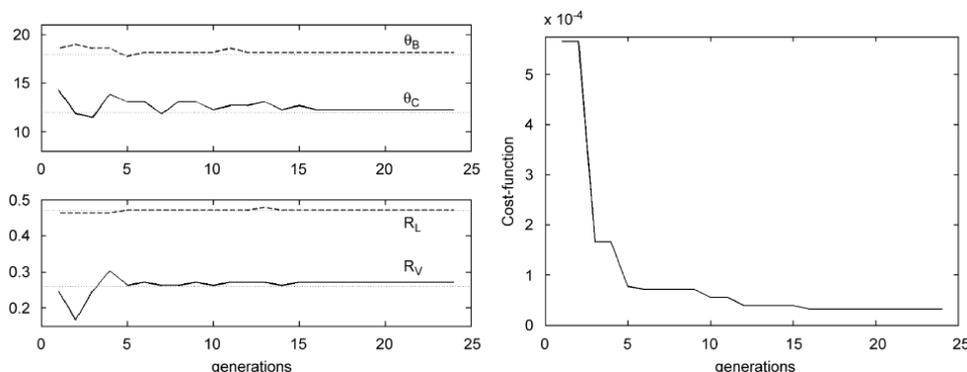


Figure 3.33. Résultat de l'inversion par algorithme génétique en crime inverse sur les paramètres de solidification (Gueudré et al., 2009)

❖ Sur l'ordre d'enchaînement des passes, en crime inverse puis avec des données expérimentales

Un autre paramètre, identifié comme un paramètre d'ordre 1 vis-à-vis de la structure de la soudure, et donc de la propagation ultrasonore, est l'ordre d'enchaînement des passes. Lors de l'opération de soudage, le soudeur peut déposer les passes d'une même couche dans le chanfrein de différentes manières : de gauche à droite, de droite à gauche, ou en alternant gauche-droite (cf. Figure 3.34). Dans le cas où le report de cet ordre d'enchaînement des passes dans le cahier de soudage est soit erroné, soit absent, voire lorsque le cahier de soudage est inexistant, le LCND a proposé de développer un algorithme d'inversion ayant pour objectif de retrouver cet ordre.

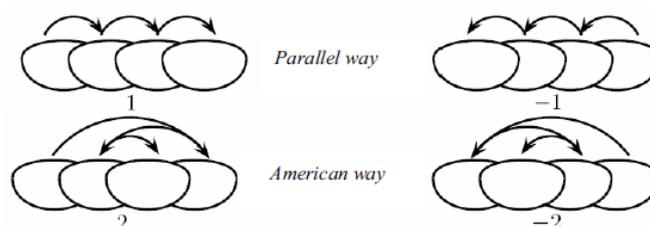
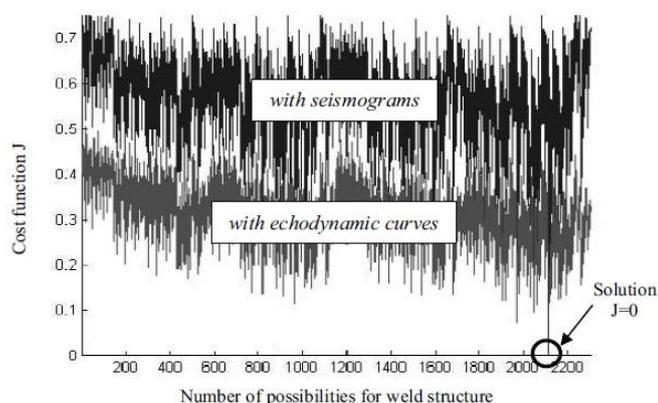


Figure 3.34. Codage des ordres d'enchaînement de passes possibles, pour chaque couche (Gueudré et al., 2011)

Mais l'inversion sur ce paramètre est un problème plus complexe. En effet, le nombre de possibilités de description de soudures peut être très grand, et surtout, de fortes discontinuités sont observées sur les fonctions de coût (cf. Figure 3.35 en haut), du fait de la discontinuité du paramètre à inverser (on code chaque couche d'une soudure comme illustré sur la Figure 3.34 : « 1 » pour une couche réalisée de gauche à droite, etc.).



Inversion process results (50 tests)	Success (%) for reconstructing the MysteryTyp [1 1 1 1 1 -1 2 -1 -1 -1]									
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
With Simulated data										
Echodynamic - 8 TestTyp - 2h12	100	100	94	80	62	76	100	100	100	100
Echodynamic - 16 TestTyp - 3h36	100	100	98	88	84	94	100	100	100	100
Sismogram - 8 TestTyp - 2h07	100	100	100	100	96	96	100	100	100	100
With Experimental data										
Echodynamic - 12 TestTyp - 6h27	0	98	0	0	2	40	2	0	100	100

Figure 3.35. En haut : exemple de fonction de coût, et en bas : résultats de l'inversion sur l'ordre d'enchaînement de passes (Gueudré et al., 2011)

C'est pourquoi la démarche s'est orientée vers un algorithme spécialement développé pour déterminer l'ordre couche par couche. Les résultats sont donnés sur le bas de la Figure 3.35 : on observe que les ordres dans chaque couche (numérotées de 1 à 10) sont globalement bien retrouvés en crime inverse. En revanche, les résultats sont beaucoup moins bons avec des données expérimentales (malgré la prise en compte désormais de l'atténuation dans la modélisation).

Quels que soient la méthode et le paramètre choisis, on aboutit à des écarts significatifs entre la simulation et la mesure expérimentale, qui empêche le processus d'inversion de fonctionner correctement. Nous avons donc décidé de vérifier de manière approfondie et détaillée d'une part le modèle direct, et d'autre part sa cohérence par rapport aux mesures expérimentales.

❖ **Vérification de la sensibilité et de la concordance des données modélisées et expérimentales**

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR MOSAICS.

Pour pouvoir réaliser l'inversion avec des données expérimentales, deux conditions sont indispensables au préalable :

- la modélisation et les mesures expérimentales doivent concorder quand tous les paramètres d'entrée du modèle direct sont corrects ;
- les résultats modélisés doivent s'éloigner des résultats expérimentaux lorsque les paramètres d'entrée du modèle sont modifiés.

Il faut donc d'une part une expérimentation robuste, reproductible et sensible aux paramètres à inverser, et d'autre part un modèle direct qui reproduise bien les phénomènes constatés expérimentalement.

Pour vérifier cela, des simulations ont été lancées avec toutes les combinaisons possibles d'ordre d'enchaînement de passes dans certaines couches de la soudure D717B (dans laquelle toutes les couches ont été réalisées en gauche-droite), puis les résultats ont été comparés aux mesures expérimentales. La première configuration testée est en mode écho en LO. Le capteur (multi-élément) est déplacé le long de la soudure afin de sonder toute la soudure.

Les principaux résultats sont montrés sur la Figure 3.36. La « bonne » modélisation est tracée en noir. Les modélisations en modifiant les ordres dans trois couches à la fois (en vert clair, magenta, bleu et rouge) montrent une certaine sensibilité pour les positions notées E4 à E6, c'est-à-dire lorsque le capteur est quasi-aligné avec l'axe de la soudure. En revanche, on voit que la modélisation correcte (en noir) ne concorde pas avec la mesure expérimentale (points vert foncé). On voit donc clairement ici que dans cette configuration, l'inversion ne marcherait pas.

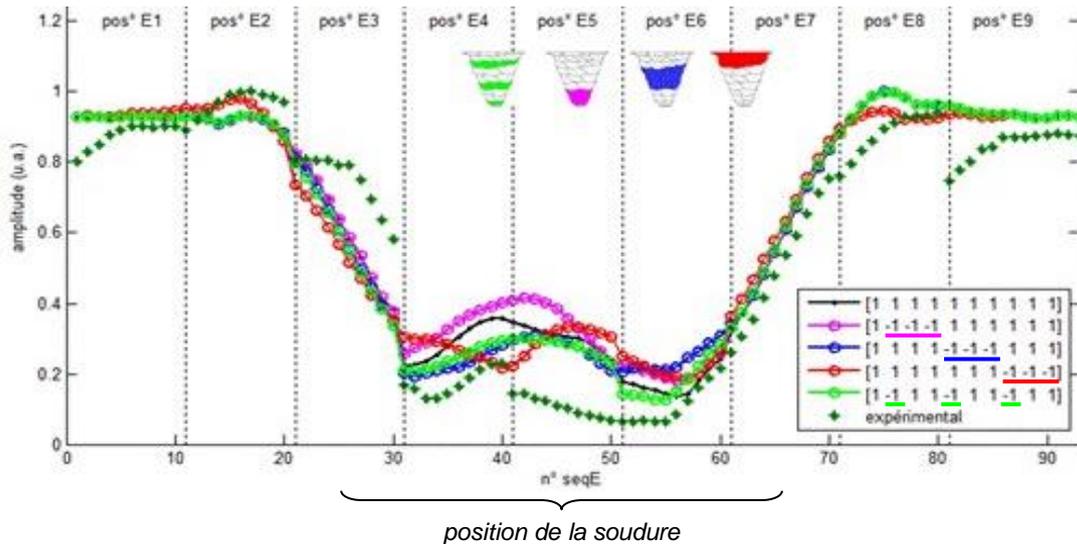


Figure 3.36. Sensibilité du modèle et comparaison à l'expérimental, en L0 (extrait du livrable MOSAICS n°3)

Nous avons testé une autre configuration sur la même soudure, en mode tandem, en T45. Les OT sont plus sensibles aux orientations des grains, et le mode tandem permet de ne traverser que certaines parties de la soudure à la fois. La soudure est parcourue dans un sens puis dans l'autre, en déplaçant dans chaque cas le couple de capteurs (multi-élément) le long de la surface. L'idée est de vérifier qu'une soudure faite totalement en gauche-droite et une totalement en droite-gauche présente bien des différences d'un point de vue ultrasonore. On a pu confirmer la bonne sensibilité de la modélisation à ces deux configurations. Cette confirmation de la sensibilité de la procédure à l'ordre d'enchaînement des passes est un point primordial en vue de l'inversion. En revanche la comparaison des résultats simulés aux mesures expérimentales n'a pas montré un accord suffisant.

Un dernier test sur une soudure corniche, très dissymétrique, en T60 (simulation et expérimentation dans les deux sens), avec pour données d'entrée les orientations de la macrographie, a montré le même type de conclusion : une bonne sensibilité aussi bien de la simulation que de l'expérimental, mais pas de concordance entre les deux.

Malgré une bonne sensibilité aussi bien du modèle direct que des mesures expérimentales, des écarts sont constatés entre les résultats simulés et expérimentaux, quelle que soit la configuration choisie. La suite des travaux, à la fin du projet MOSAICS puis au cours du projet MUSCAD, s'est donc appliquée à comprendre les dérives constatées entre la modélisation et l'expérimentation.

3.4.2. Influence de l'incertitude de mesure des C_{ij} sur la modélisation

Parmi les différents paramètres susceptibles d'affecter la modélisation du CND ultrasonore d'une soudure multi-passes (résumés sur la Figure 3.37), nous avons identifié le jeu de constantes d'élasticité du métal soudé comme paramètre d'entrée crucial pour tout code de simulation de propagation par ultrasons. Leur incertitude peut avoir un impact important sur le résultat de la simulation, et nous avons proposé cette étude dans le cadre du projet ANR MUSCAD.

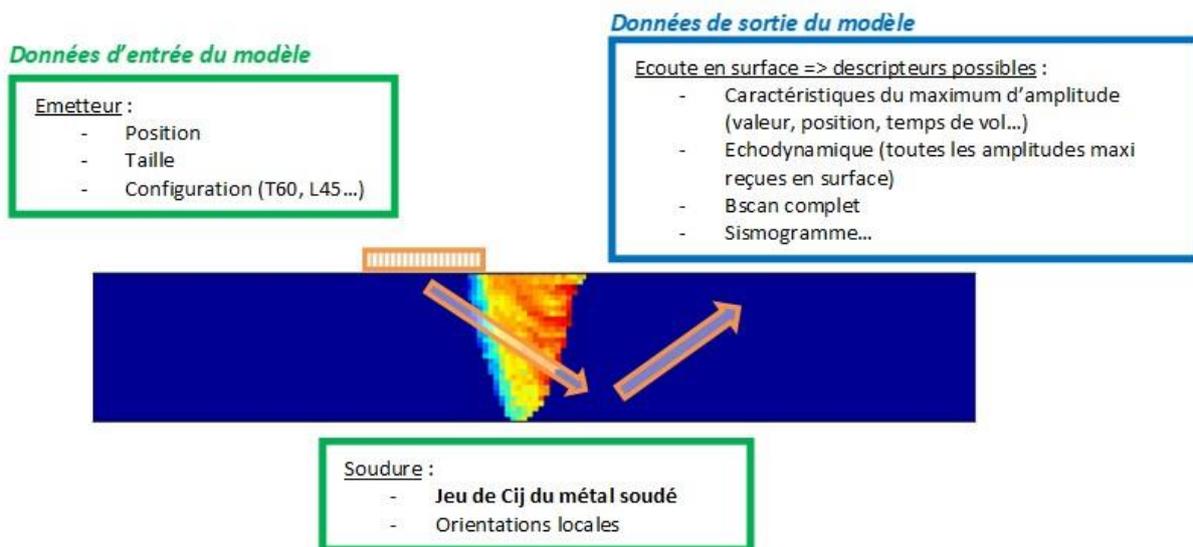


Figure 3.37. Les divers paramètres de la modélisation de la propagation ultrasonore

Les constantes d'élasticité sont difficiles à évaluer expérimentalement, en particulier sur des matériaux anisotropes, et les échantillons sur lesquels les mesures sont effectuées peuvent ne pas être représentatifs du métal soudé. C'est pourquoi elles sont le plus souvent prises dans la littérature.

Dans notre cas, les mesures ont été réalisées par Philippe Guy, au LVA de l'INSA de Lyon, sur les 7 échantillons homogènes orthotropes de mes travaux de thèse (cf. Figure 3.25 p. 70). Les mesures consistent à évaluer les vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales, sous différents angles d'incidence et dans différents plans. Un algorithme d'inversion permet alors de remonter aux parties réelles des C_{ij} . Les valeurs obtenues avec leur écart-type associé sont dans le Tableau 3.1 : le premier jeu correspond aux premières mesures réalisées, le second a été obtenu après optimisation du banc de mesure du LVA lors du projet ANR MUSCAD, qui a permis de réduire les écarts-types. Notons que, comme la modélisation est réalisée en 2D (et que le matériau est orthotrope), seules 4 constantes sont nécessaires.

		C_{11}	C_{33}	C_{13}	C_{55}
Jeu 1	moyenne (GPa)	243	231	143	110
	écart type σ_{Cij} (GPa)	18	8	6	5,5
Jeu 2	moyenne (GPa)	239	220	112	73
	écart type σ_{Cij} (GPa)	7	3	3	3

Tableau 3.1. Constantes d'élasticité (mesures LVA dans le cadre du projet ANR MUSCAD), exprimées dans le système de coordonnées 2D d'ATHENA (l'axe 3 correspond à l'axe d'élongation des grains)

Pour étudier l'impact de l'incertitude des C_{ij} sur la modélisation (via ATHENA), on a choisi d'utiliser la **méthode de propagation analytique des incertitudes**. Sous condition de linéarité sur le domaine de variation, cette méthode permet de calculer la variation globale du résultat de simulation à partir de neuf calculs par paramètre variable (de $C_{ij} - \sigma$ à $C_{ij} + \sigma$ par pas de 25%). Lorsqu'elle peut être utilisée, elle est donc bien plus intéressante (en termes de temps de calcul) que l'approche Monte-Carlo, qui nécessite un très grand nombre de calculs à partir de tirages aléatoires.

Le descripteur choisi pour analyser cet impact est le sismogramme. C'est une représentation dans le domaine {espace ; temps}, qui correspond aux signaux enregistrés en chaque point d'écoute à la surface de la pièce (image de type Bscan, voir exemple de la Figure 3.38). Il contient davantage d'informations que l'échodynamique et permet donc de faire une analyse approfondie de l'influence de l'incertitude des C_{ij} .

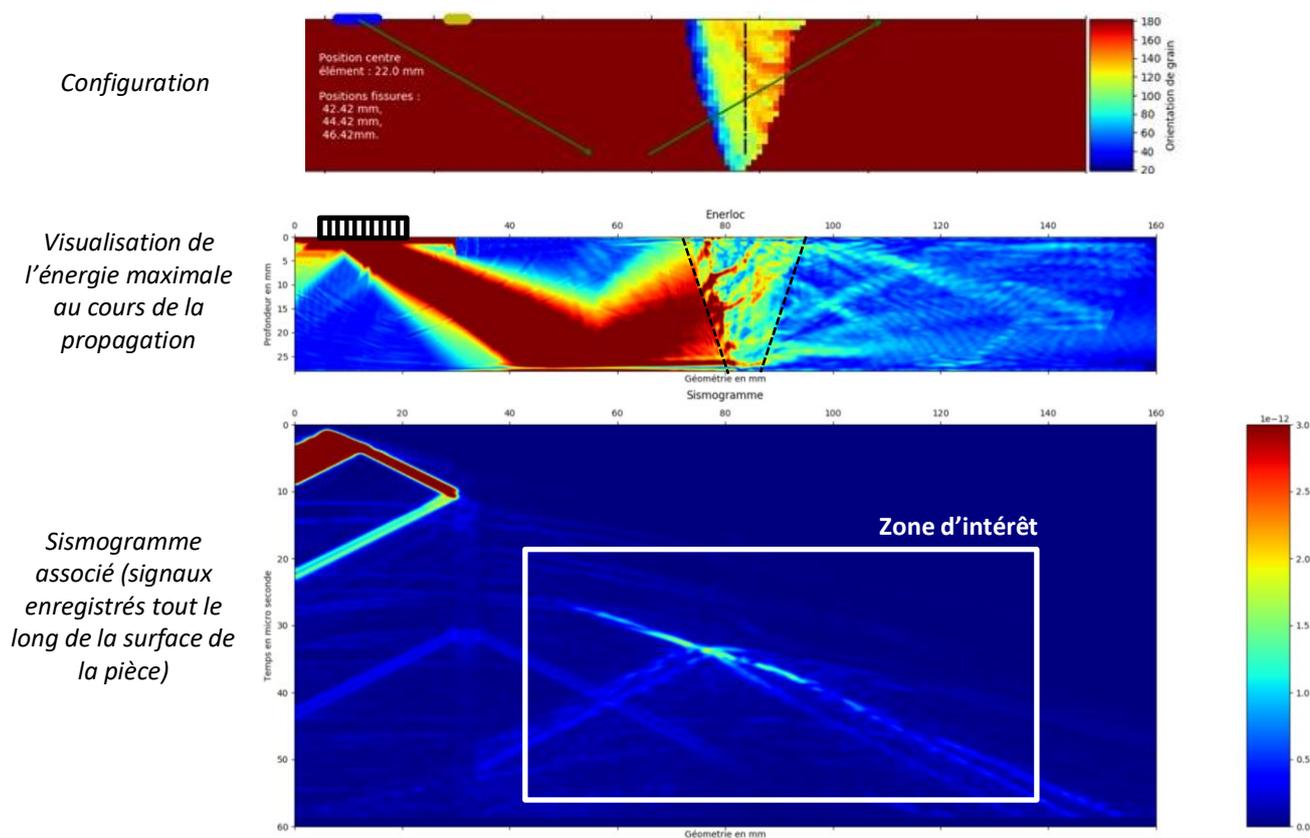


Figure 3.38. Exemple de modélisation, en T60

Trois configurations sont choisies pour cette étude : T60 (ondes transversales à 60°), T45 (ondes transversales à 45°) et L45 (ondes longitudinales à 45°). Pour la configuration L45, on sépare dans l'analyse les trajets notés LL et LT, c'est-à-dire la partie du faisceau sans et avec conversion de mode en fond de pièce.

La soudure choisie est une soudure corniche, très dissymétrique (cf. soudure en haut de la Figure 3.38). Dans chacune de ces configurations, 12 positions de l'émetteur sont définies afin de parcourir toute la soudure de différentes manières (en particulier avant ou après la réflexion en fond de pièce).

Pour chaque configuration et chaque position de capteur, la méthode permet de calculer les cartes de sensibilité pour chacun des C_{ij} et une carte d'incertitude de la zone d'intérêt choisie. On peut alors en extraire l'incertitude sur l'échodynamique, dont deux exemples sont représentés sur la Figure 3.39. Ces exemples montrent l'influence de la position du capteur sur le niveau d'incertitude du résultat.

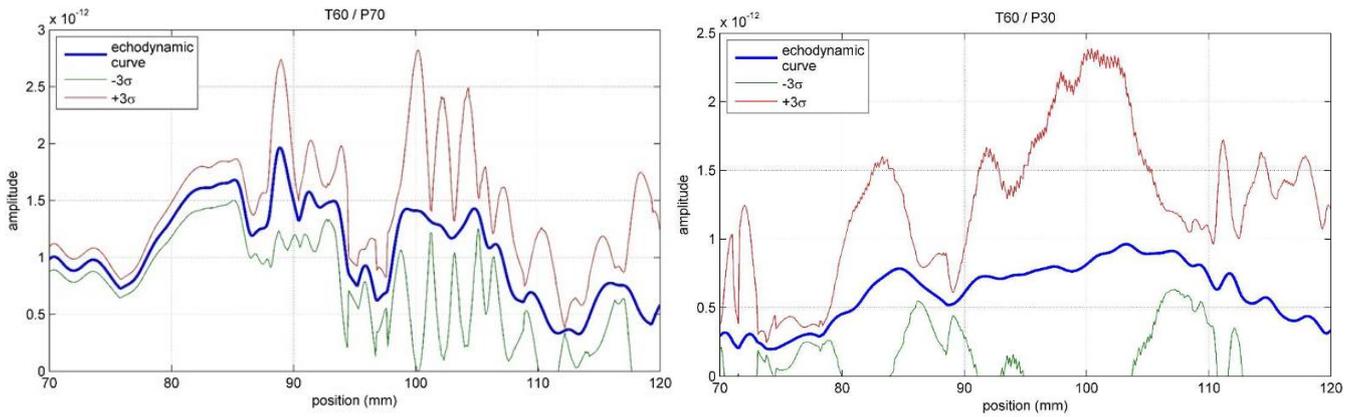


Figure 3.39. Exemples d'incertitude obtenue sur l'échodynamique, après variation de tous les C_{ij} . Le cas de gauche correspond à la Figure 3.38. Dans le cas de droite, le capteur est plus proche de la soudure, et le faisceau se réfléchit en fond de pièce après avoir traversé la soudure

On a également observé que, du fait des possibles divisions de faisceau, la position du maximum d'amplitude de la zone d'intérêt peut très fortement varier, aussi bien en temps qu'en espace. Le résumé de ces résultats, en termes de déplacement du maximum sur l'axe des temps (dt) et spatialement sur la surface de la pièce (dx), est reporté dans le Tableau 3.2 :

- Pour le jeu 1, on constate que les configurations en ondes L sont nettement moins sensibles aux incertitudes sur les C_{ij} que celles en ondes T. Ces configurations en ondes longitudinales sont donc plus fiables si l'on souhaite réaliser du CND pour la détection et le positionnement d'un éventuel défaut dans la soudure. En revanche elles sont moins intéressantes si l'on souhaite plutôt réaliser une inversion pour retrouver certaines caractéristiques de la soudure, comme l'orientation des grains, ou les C_{ij} eux-mêmes.
- Pour le jeu 2, on constate que la plus forte diminution des déplacements maxi dx et dt , par rapport aux résultats avec le jeu 1, a lieu pour la configuration T60. Les résultats de la configuration T45 restent inchangés, et les configurations en ondes L restent moins sensibles aux incertitudes sur les C_{ij} que celles en ondes T.

		T60	T45	L45/LL	L45/LT
Jeu 1	Déplacement maxi dx	33 mm	30 mm	11 mm	9,5 mm
	Déplacement maxi dt	11 μ s	8 μ s	1,3 μ s	1,3 μ s
Jeu 2	Déplacement maxi dx	7 mm	30 mm	4 mm	6 mm
	Déplacement maxi dt	2,5 μ s	8 μ s	0,3 μ s	0,8 μ s

Tableau 3.2. Déplacements maxi en temps et en position parmi toutes les positions d'émetteur, pour les configurations étudiées, avec prise en compte des anciens (jeu 1) et des nouveaux (jeu 2) écarts types (cf. Tableau 3.1)

On confirme donc la très forte influence de l'incertitude de mesure des C_{ij} sur la modélisation. Une erreur même faible sur leurs valeurs peut impacter le contrôle de manière très significative, d'autant plus que les contrôles classiques se basent généralement sur la recherche de l'amplitude maximale.

3.4.3. Synthèse et perspectives

Ces travaux ont donné lieu à la publication d'un article de recherche (Gueudré et al., 2019) (un second est en cours d'écriture), ainsi qu'à la participation à plusieurs congrès nationaux et internationaux.

Ces travaux ont permis de mettre en évidence et de quantifier l'influence de la connaissance précise des C_{ij} sur la simulation de la propagation par ultrasons. Cette influence dépend des conditions d'essai (position des capteurs par rapport à la soudure), et il a été clairement démontré que la modélisation des contrôles non destructifs classiques (consistant à rechercher l'évolution des échos maxima) est influencée et perturbée par la déviation du faisceau et le changement du temps de vol. Le seul moyen de réduire cette perturbation est la connaissance la plus précise possible des C_{ij} .

La suite à donner à ces travaux devrait se tourner vers les nouvelles possibilités qu'ouvre l'intelligence artificielle. L'idée serait d'utiliser l'apprentissage à l'aide d'un grand nombre de simulations, en faisant varier divers paramètres, afin d'ensuite pouvoir remonter à certains paramètres selon la pièce étudiée. On pourrait alors envisager de déterminer les C_{ij} (leur partie réelle), mais aussi l'atténuation (c'est-à-dire leur partie imaginaire, ce qui rejoint les perspectives précédentes sur paragraphe 3.3.3), voire les orientations dans toute la soudure.

3.5. Bilan

Les soudures épaisses, multi-passes, en acier inoxydable austénitique, présentes sur de nombreux composants du circuit primaire des centrales nucléaires, sont des zones particulièrement sensibles et indispensables à contrôler régulièrement. Elles possèdent des structures à la fois anisotropes et hétérogènes, et leur contrôle non destructif qui a pour objectif de détecter d'éventuels défauts, ainsi que de les caractériser (positionnement, dimensionnement) afin d'en évaluer le degré de nocivité, est réputé complexe. Les phénomènes de déviation, de division et d'atténuation du faisceau ultrasonore sont provoqués par la structure. Pour améliorer la compréhension des phénomènes de propagation et donc le contrôle, l'utilisation d'un code de simulation de la propagation ultrasonore est préconisée.

De grandes avancées ont été faites depuis les années 2000, auxquelles j'ai participé pour la plupart. L'objectif est de mieux connaître et prendre en compte la réalité de la structure afin de simuler le mieux possible la propagation ultrasonore. La simulation nécessite de disposer, comme données d'entrée, d'une description suffisamment réaliste de la soudure en termes d'orientations de grains, ainsi que des données matériau, telles que les constantes d'élasticité et les coefficients d'atténuation.

Nous avons ainsi développé le modèle **MINA** pour modéliser la microstructure sans découpe de la pièce, à partir de données accessibles. De très bons résultats ont été obtenus, et le modèle continue à être développé pour diverses applications. Il a par exemple été utilisé comme donnée d'entrée lors d'une thèse réalisée au laboratoire (Lubeigt, 2017), mettant en œuvre la méthode d'imagerie topologique pour détecter et localiser un défaut dans une soudure.

L'**atténuation**, rarement prise en compte dans la modélisation, est désormais modélisée dans le code ATHENA, en fonction de la direction de propagation par rapport à l'anisotropie. Cela permet d'utiliser des descripteurs de plus en plus riches en informations, basées sur l'amplitude ultrasonore, permettant ainsi une meilleure comparaison entre les données expérimentales et simulées.

Ces résultats mènent logiquement à avancer sur l'**inversion**, dont l'objectif est soit d'affiner la description de la soudure, soit de remonter à des paramètres inconnus. Cette inversion n'est pour l'instant pas optimale, en raison d'incertitudes sur les données d'entrée, en particulier les **constantes élastiques**, qui influent énormément sur le résultat de la simulation.

Les travaux se poursuivent dans plusieurs directions, en particulier l'extension à **MINA3D** pour le soudage en position, dans le cadre d'un projet ANR qui démarrera en avril 2024.

4. Contrôlabilité ultrasonore d'autres structures complexes

Comme expliqué au chapitre 3, ma principale thématique de recherche concerne la propagation ultrasonore dans les matériaux et structures métalliques complexes, et plus particulièrement les soudures en acier inoxydable austénitique épaisses. Mais d'autres structures complexes posent également des problèmes spécifiques de contrôle non destructif. J'ai participé à la recherche de solutions, y compris pour des matériaux tels que des bétons ou des composites.

Dans le domaine du nucléaire, la loi française sur la gestion durable des déchets et matières radioactives est à l'origine de travaux de recherche au CEA concernant les réacteurs nucléaires de nouvelle génération (gén. IV) basés sur la technologie sodium comme fluide caloporteur (RNR-Na). L'inspection et la surveillance des réacteurs nucléaires refroidis au **sodium liquide** fait largement appel à des procédés acoustiques. Meilleur que l'eau pour les échanges thermiques, le caractère opaque du sodium liquide rend les méthodes optiques inadaptées à l'auscultation des structures. De plus, la température élevée lors du contrôle (entre 200°C et 500°C) est critique vis-à-vis des différentes instrumentations possibles. Le CEA cherche donc à développer une instrumentation innovante et spécifique à ces réacteurs, notamment celle faisant appel à des capteurs situés à l'extérieur de la cuve.

Une étroite collaboration existe entre le CEA Cadarache et les membres permanents du LMA du site d'Aix-en-Provence depuis longtemps dans le cadre de ces futurs réacteurs, de génération IV, au sodium liquide (en particulier le projet de réacteur expérimental ASTRID). Je suis fortement impliquée dans cette collaboration depuis 2009, en tant que responsable scientifique de la plupart des travaux réalisés avec le laboratoire LISM de Cadarache et exposés ici. Ces nombreux travaux ont d'ailleurs contribué à la création du laboratoire commun MISTRAL entre le LMA et le CEA en 2019.

4.1. Télémétrie derrière écran(s)

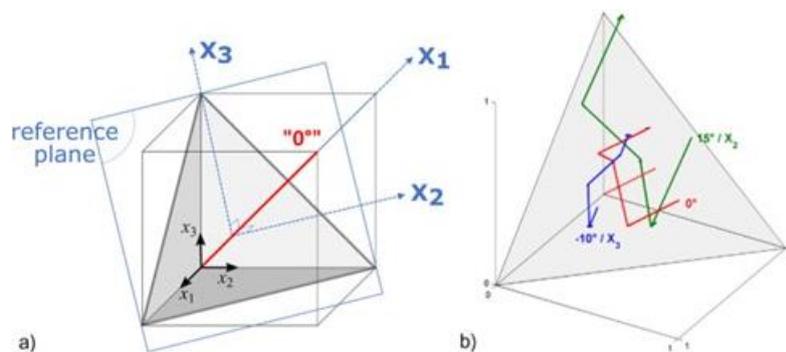
Dans le contexte de ces réacteurs de génération IV, un objectif est la **détection et localisation d'objets** ou de structures dans la cuve primaire. Le but est de vérifier que l'objet ou la structure en question n'a pas bougé, ou ne s'est pas déformé, et le cas échéant de connaître son déplacement ou sa déformation.

L'étude a débuté par la faisabilité de mesures télémétriques depuis l'extérieur de la cuve primaire sur plusieurs cas précis issus de plans d'ASTRID fournis par le CEA. La détection, la localisation et le positionnement d'un objet à l'aide d'ultrasons nécessitent une orientation relative appropriée entre l'objet et le faisceau ultrasonore. En mode écho impulsionnel, une quantité suffisante d'énergie spéculaire doit revenir vers le capteur pour être analysée et interprétée. Cette condition peut ne pas être remplie, par exemple dans le cas d'un objet désaligné ou non plan. La solution étudiée ici consiste à utiliser une cible spécifique fixée à l'objet, cette cible étant conçue pour réfléchir un maximum d'énergie en direction de l'émetteur.

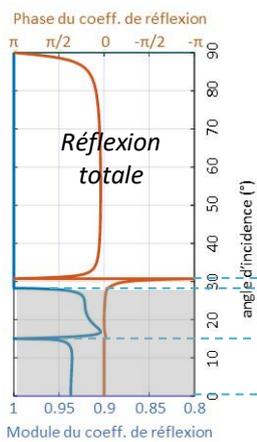
4.1.1. Réponse acoustique de la cible triplane

Le triplan, également appelé **rétrorélecteur coin de cube** (*Corner-Cube Retroreflector*), ou dioptré, est une cible qui réfléchit les ondes incidentes vers l'émetteur même lorsque ces ondes n'arrivent pas perpendiculairement. Elle est constituée de trois plans disposés perpendiculairement les uns aux autres. Cela permet aux ondes, par les trois réflexions successives sur chaque plan, de repartir vers la source dans la direction exactement opposée (cf. schémas en haut de la Figure 4.1). Cette cible est beaucoup utilisée dans le domaine de la géophysique (pour le suivi des mouvements de la croûte terrestre par exemple), mais peu voire pas en ultrasons (Locqueteau, 1992; Stephanis and Mourmouras, 1995; Narayanan et al., 2014).

La plage angulaire fonctionnelle (c'est-à-dire où la **réflexion** ultrasonore est **totale** sur toutes les faces) dépend des coefficients de réflexion locaux sur chaque face, donc des milieux impliqués. Pour un triplan en acier immergé dans de l'eau, la plage angulaire est d'environ $\pm 30^\circ$ (cf. bas de la Figure 4.1).



Coefficient de réflexion local sur une face



Réflexions successives sur les trois faces

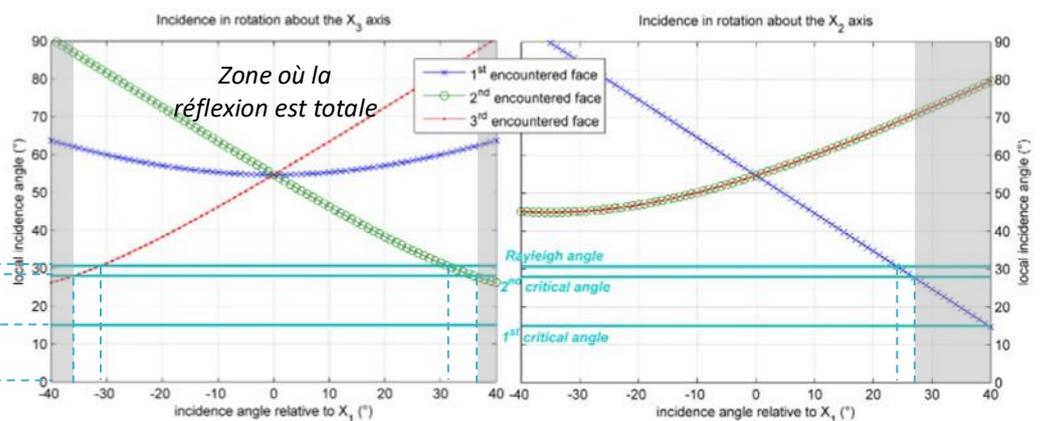


Figure 4.1. En haut : principe du triplan ; En bas : coefficients de réflexion (module et phase), angles critiques et angles d'incidence successifs sur les différentes faces (Ploix et al., 2020)

Le cas d'un triplan en acier inoxydable immergé dans l'eau est bien adapté pour les opérations de détection et de télémétrie dans les centrales nucléaires de 2^{ème} et 3^{ème} génération (eau), mais pas pour les réacteurs de 4^{ème} génération (sodium). Les ultrasons se propagent plus rapidement dans le sodium liquide que dans l'eau ($2\,470\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans le sodium à 200°C (Sobolev, 2011)), ce qui déplace tous les angles critiques vers le haut : les premier et deuxième angles critiques sont maintenant de $25,5^\circ$ et $51,7^\circ$, et l'angle de Rayleigh de 58° (au lieu de respectivement $14,9^\circ$, $28,2^\circ$ et $31,5^\circ$ dans l'eau). La plage angulaire avec réflexion totale est alors quasi-nulle, car peu d'angles d'incidence permettent une réflexion totale sur les trois faces (entre -3 et

+3° environ, cf. au centre de la Figure 4.2). Cela conduit à un diagramme de réflexion modélisé très différent du cas en eau.

Les essais de validation n'étant pas réalisables dans le sodium liquide, nous avons cherché la similitude d'un matériau courant dont le comportement dans l'eau serait proche de celui de l'acier dans le sodium liquide. Nous avons choisi le cuivre, pour lequel les angles critiques sont : 18,5°, 40,4° et 43,9° (cf. à droite de la Figure 4.2). Un triplan en cuivre a été fabriqué et étudié par ultrasons selon la même procédure que précédemment. Les résultats expérimentaux (courbe orange) sont en assez bonne concordance avec la modélisation CIVA : le minimum local à 13° et le maximum local à 15° sont bien retrouvés. En revanche, le maximum à 11° n'est pas observé expérimentalement : cet angle d'incidence étant au voisinage du second angle critique localement sur les faces, il est en dehors des limites de validité de CIVA (identifiés suite aux échanges avec Raphaële Raillon et Michel Darmon du CEA LIST).

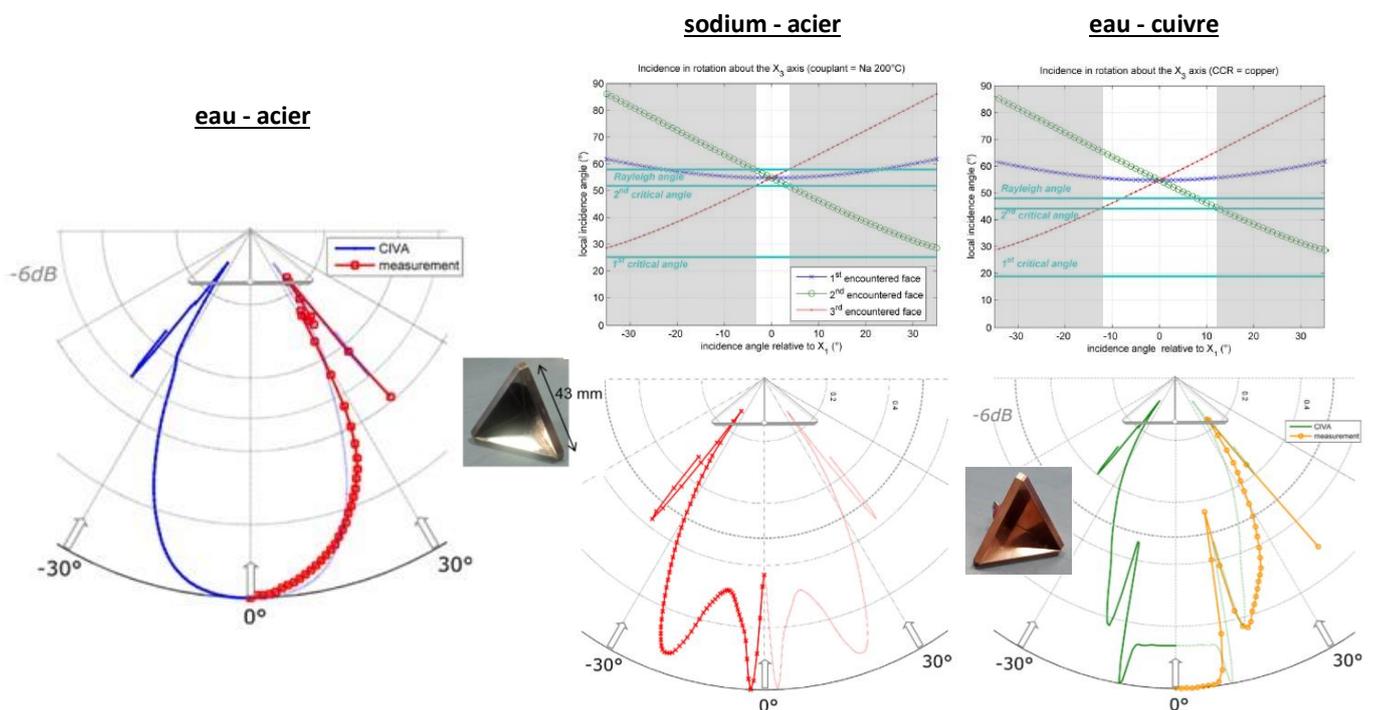


Figure 4.2. Réflexion d'un faisceau ultrasonore sur un triplan pour différents milieux : comparaison entre les calculs CIVA et les mesures expérimentales (sauf en sodium)

Ces résultats montrent que l'on peut toujours trouver des plages angulaires où une énergie élevée est renvoyée au transducteur. Ces plages sont réduites par rapport à celles du cas de l'acier dans l'eau. La connaissance des milieux considérés à la fois pour le triplan et le fluide environnant est donc prédominante pour la réflexion acoustique globale d'un triplan immergé.

4.1.2. Détection et localisation derrière écran(s)

Le triplan a été positionné derrière une puis deux plaques (cf. schéma à gauche de la Figure 4.3). Nous avons choisi de chercher à le détecter en incidence oblique (à 18°) pour deux raisons : l'incidence oblique permet d'éviter les échos multiples présents en incidence normale, et l'angle de 18° correspond à l'amplitude maximale transmise à travers une (ou des) plaque(s) d'acier.

Les résultats en termes d'images Cscan acquises en amplitude et temps de vol sont montrés sur la Figure 4.3. La cible est clairement détectable, et sa position par rapport au capteur peut être calculée très simplement à partir de la position du maximum d'amplitude et du temps de vol associé. Notons que les répétitions sont dues aux allers-retours dans la (les) plaque(s), qui se cumulent lorsque le capteur est déplacé.

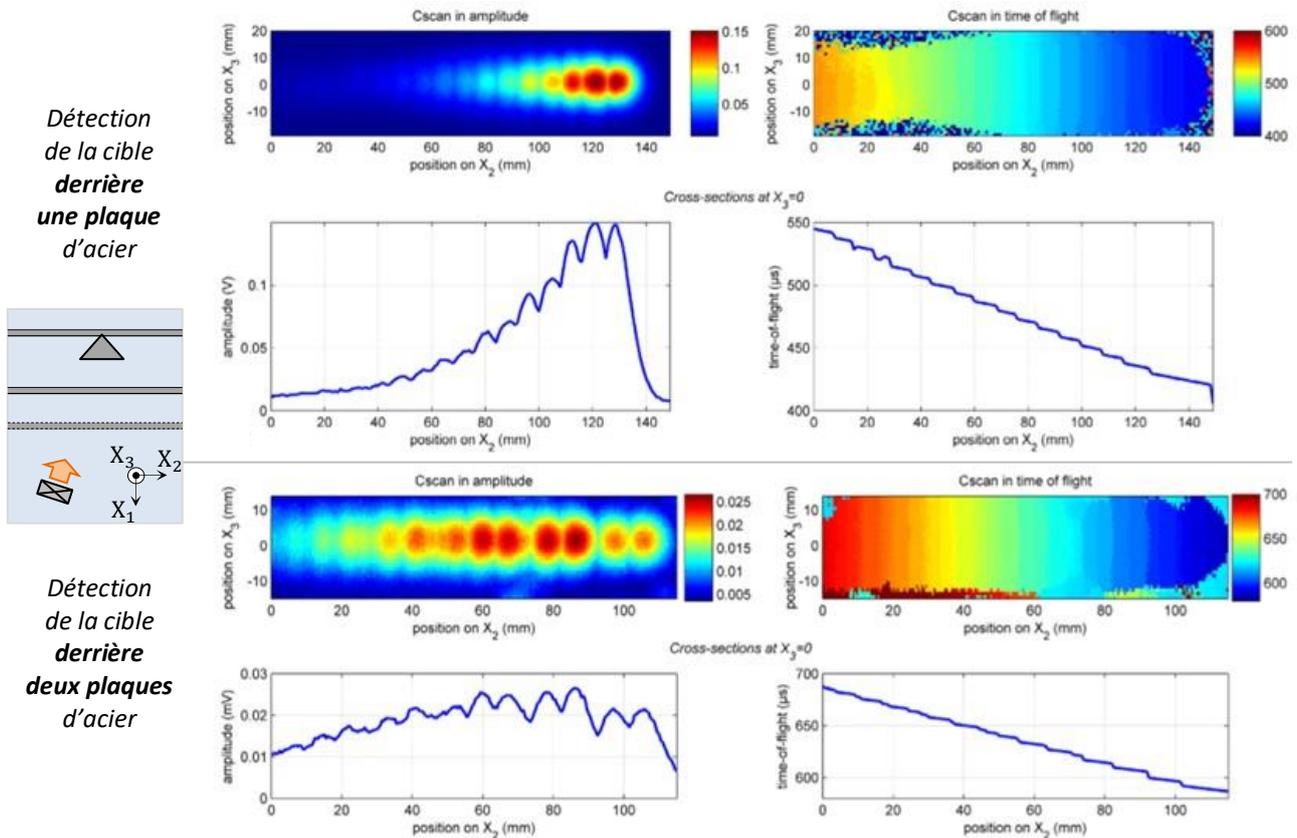


Figure 4.3. Images du triplan derrière une et deux plaques parallèles en acier, en incidence oblique

L'apport de l'incidence oblique par rapport à l'incidence normale est montré dans le Tableau 4.1 ci-dessous en termes de rapport signal-sur-bruit.

Configuration	Incidence normale	Incidence oblique (18°)
Triplan seul	> 100	> 100
Triplan derrière une plaque	≈ 8 (quand séparé des autres échos)	≈ 50
Triplan derrière deux plaques	Non détecté	≈ 3

Tableau 4.1. Rapport signal-sur-bruit expérimental en fonction de la configuration

Notons qu'un essai a permis de vérifier que la cible est toujours visible derrière 3 plaques d'acier (8, 10 et 12 mm d'acier).

4.1.3. Nouveau concept : le « quatriplan »

L'utilisation de ce triplan classique ne permet de connaître que sa distance au capteur ultrasonore, et sa position latérale lors du balayage de la zone. Elle ne permet pas de mesurer l'inclinaison éventuelle de la cible (en 3D), donc la déformation ou le déplacement latéral de la structure. Pour pallier cet inconvénient, une possibilité est de fixer un réseau de plusieurs triplans par exemple, comme envisagé dans (Martini et al., 2012; Wang et al., 2013) pour des applications optiques (télémétrie laser lunaire). Aucune évolution similaire n'a été trouvée dans la littérature dans le domaine de l'acoustique. Nous avons proposé ici un nouveau design de cible compacte, appelé quatriplan, reposant sur l'idée que (1) plusieurs triplans sont nécessaires pour accéder à des informations supplémentaires de position, et (2) le triplan présente des zones d'ombre (cf. Figure 4.4 à gauche). Dans le quatriplan, des petits triplans sont créés dans les coins du triplan initial, par l'ajout de trois parois supplémentaires (cf. Figure 4.4 à droite).

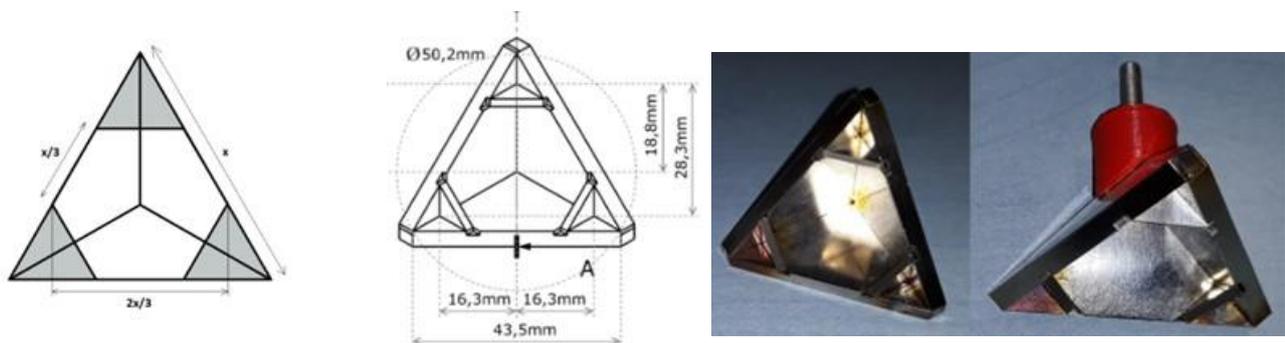


Figure 4.4. Zones d'ombre d'un triplan classique (Garthwaite et al., 2015), et définition et photo du quatriplan

La réponse ultrasonore du quatriplan a été comparée à celle du triplan en incidence normale. Les résultats, présentés sur la Figure 4.5, montrent que le triplan principal du quatriplan a le même comportement que le triplan simple (cf. images de la Figure 4.5 avec la gate 2 pour les arêtes et la gate 4 pour le cœur), et que les trois triplans secondaires sont clairement visibles, aussi bien avec un fenêtrage global (gate 1) qu'avec le fenêtrage resserré autour de leur temps de vol (gate 3).

Un essai en incidence oblique (exemple de résultat sur la Figure 4.6) confirme l'intérêt des trois cibles secondaires, qui renvoient des échos avec des temps de vol très différents, et permettent de remonter au positionnement 3D précis du quatriplan, donc de la structure sur laquelle il est fixé.

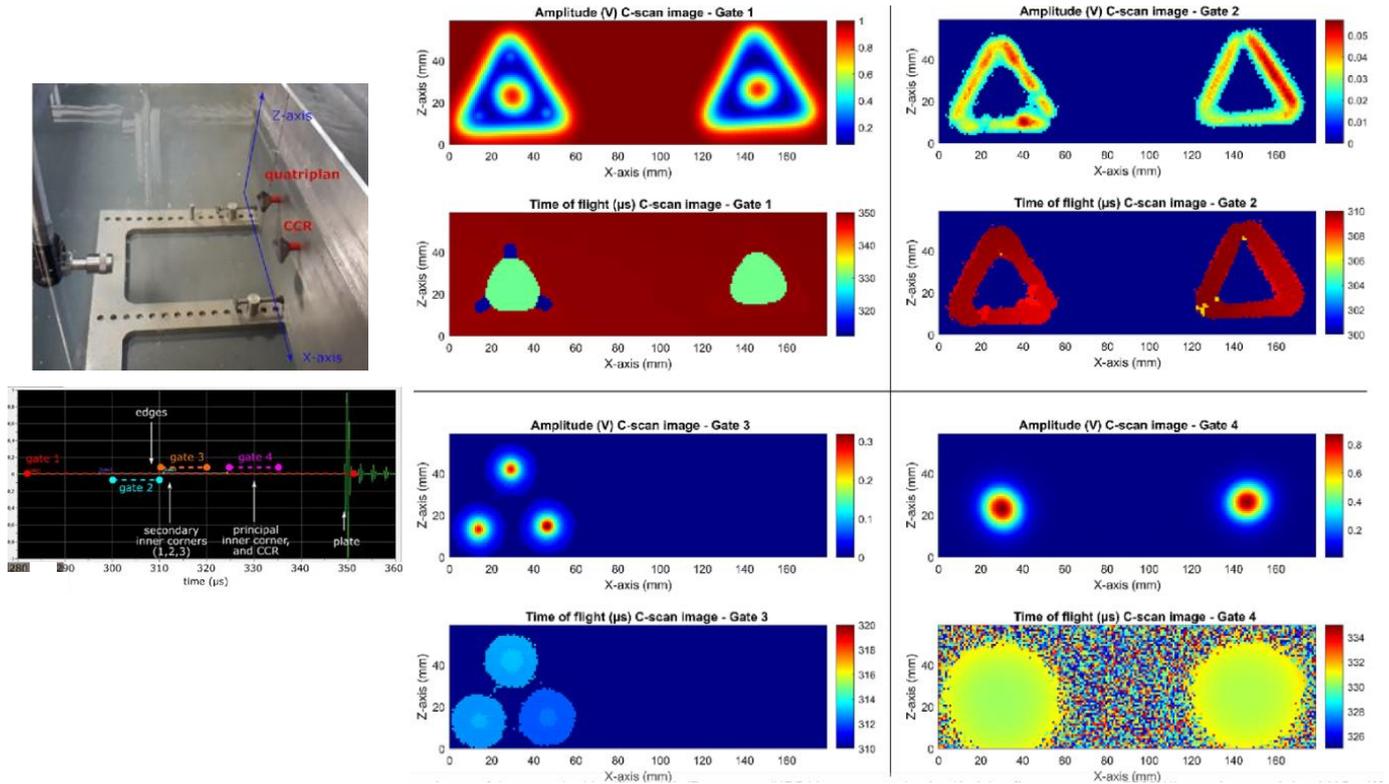


Figure 4.5. Réponses ultrasonores du quadriplan et du triplan pour différents fenêtrages temporels

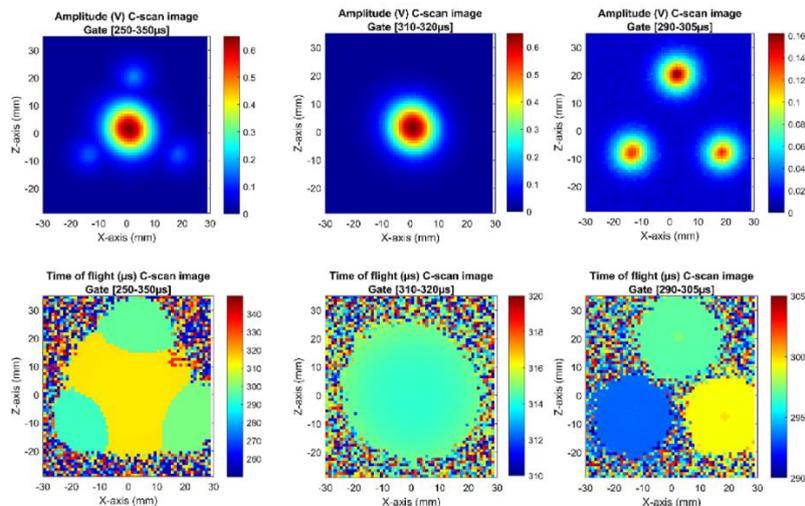


Figure 4.6. Réponses ultrasonores du quadriplan en incidence oblique, pour différents fenêtrages temporels

4.1.4. Synthèse

Ces travaux ont donné lieu à la publication de deux articles de recherche (Ploix et al., 2020, 2023), dont celui sur le triplan mis en avant par l'éditeur comme « *Editor's choice, Highlighted article* » en août 2020. Le quadriplan a également fait l'objet d'un brevet (Baqué, 2022), déposé par François Baqué du CEA (l'étude ayant été réalisée dans le cadre d'une prestation, les personnes du LMA impliquées n'ont pas pu être co-inventeurs).

Il pourrait être intéressant de poursuivre l'étude de ce type de cible, en évaluant la sensibilité, la précision et la répétabilité de la mesure obtenue.

4.2. Contrôle d'un système multi-plaques immergé

La problématique du **contrôle derrière écran(s)** a émergé au cours des études réalisées en collaboration avec le CEA Cadarache autour du projet de réacteur expérimental ASTRID. L'idée était d'étudier la possibilité de contrôler les structures internes, de la cuve principale depuis l'extérieur de la cuve (cf. schéma de la Figure 4.7), le défaut éventuel recherché étant de type fissure. Cela permet de s'affranchir des inconvénients majeurs liés d'une part à la température élevée et d'autre part au mouillage composite, qui contraignent l'introduction d'un capteur dans le sodium liquide.

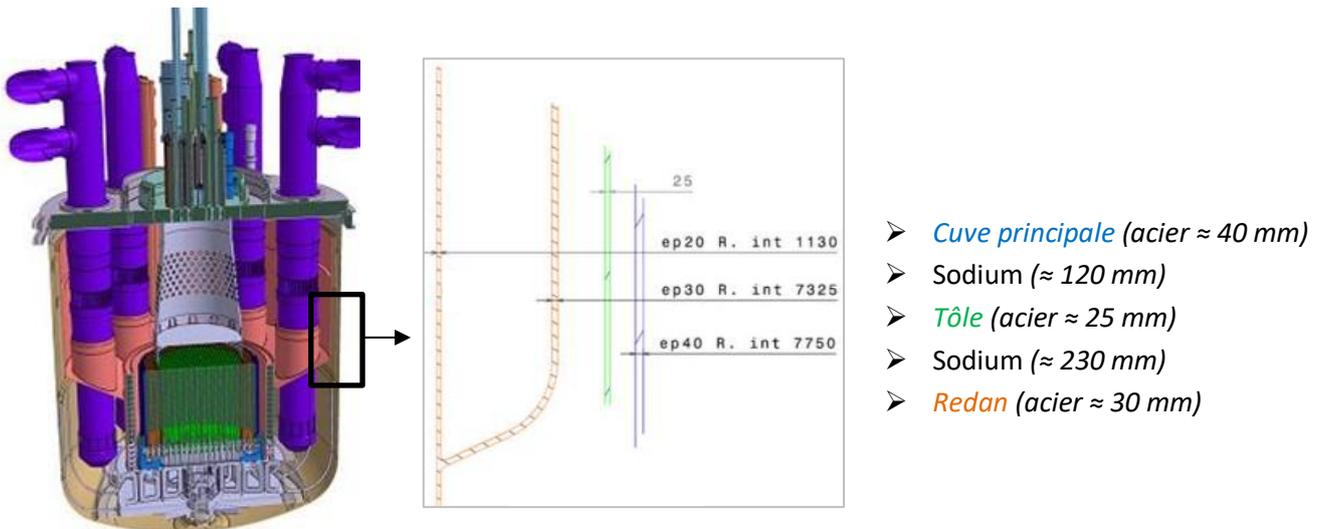


Figure 4.7. Exemple de zone à contrôler sur une vue en coupe d'ASTRID, et ordre de grandeur des structures concernées

Ces travaux ont commencé par une étude de faisabilité, réalisée dans le cadre de NDTVvalor. Cette étude a ensuite débouché sur deux thèses successives que j'ai co-encadrées, celle de Pierre Kauffmann (Kauffmann, 2018) puis celle de Jean-Christophe Vallée (Vallée, 2022). On voit ici un exemple de l'intérêt des travaux réalisés dans le cadre de NDTVvalor.

Nous avons assez vite eu l'idée originale d'utiliser les ondes guidées, les ondes de volume perdant trop d'énergie à chaque passage d'interface solide/liquide (que ce soit en incidence normale ou en incidence oblique). Notons que les diamètres des structures concernées étant grands (de l'ordre de 15 m), elles peuvent être assimilées à des plaques.

Les **ondes de Lamb** sont généralement utilisées pour réaliser des contrôles de plaques sur de longues distances. Lorsque la plaque est immergée, une partie de l'énergie s'échappe de la plaque dans le liquide environnant, et on parle alors de **leaky Lamb waves** (littéralement ondes de Lamb fuyantes). La propagation ainsi que la réémission ont d'abord été étudiées théoriquement et expérimentalement dans une plaque seule, puis dans deux plaques parallèles. Les « défauts » recherchés sont le bord de(s) plaque(s) (représentant un défaut simple traversant) et/ou une entaille. Afin d'optimiser la contrôlabilité, et en particulier être capable de localiser l'indication détectée, nous nous sommes également intéressés à une méthode d'imagerie basée sur le principe de **retournement temporel**.

4.2.1. Propagation des leaky Lamb waves

Les ondes de Lamb peuvent être de deux natures différentes, symétriques ou asymétriques, selon leur mode de vibration par rapport à l'axe de la plaque. Elles ont la particularité d'être dispersives : leur vitesse dépend de la fréquence. Et à une fréquence donnée, plusieurs modes peuvent coexister. Ces deux propriétés apparaissent sur les courbes de dispersion (en vitesse de phase), dont un exemple est tracé en haut à gauche sur la Figure 4.8.

Lorsque la plaque est immergée, ces ondes de Lamb subissent une atténuation de fuite (« leaky »), par réémission dans le fluide environnant. Leurs équations de dispersion sont les suivantes :

Pour les modes symétriques :

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} + \frac{4k^2pq}{(q^2 - k^2)^2} - i \frac{\rho_0 k_T^4 p \tan(qh)}{\rho \sqrt{k_0^2 - k^2} (q^2 - k^2)^2} = 0 \tag{4.1}$$

Pour les modes antisymétriques :

$$\frac{\tan(ph)}{\tan(qh)} + \frac{4k^2pq}{(q^2 - k^2)^2} + i \frac{\rho_0 k_T^4 p}{\rho \sqrt{k_0^2 - k^2} (q^2 - k^2)^2 \tan(qh)} = 0$$

avec h la demi-épaisseur de la plaque, $p^2 = k_L^2 - k^2$, $q^2 = k_T^2 - k^2$, k étant le nombre d'onde du mode de Lamb considéré, et k_m le nombre d'onde dans le fluide (pour $m = 0$), et des OL ($m = L$) et OT ($m = T$) dans la plaque.

On note que la partie réelle de ces équations correspond au cas d'une plaque libre (cf. équation (2.29) du chapitre 2, p. 40). La résolution de ces équations fournit les nombres d'onde des modes propagés, donc leur vitesse de phase et leur vitesse de groupe, ainsi que leur atténuation par réémission. Ces paramètres sont tracés sur la Figure 4.8.

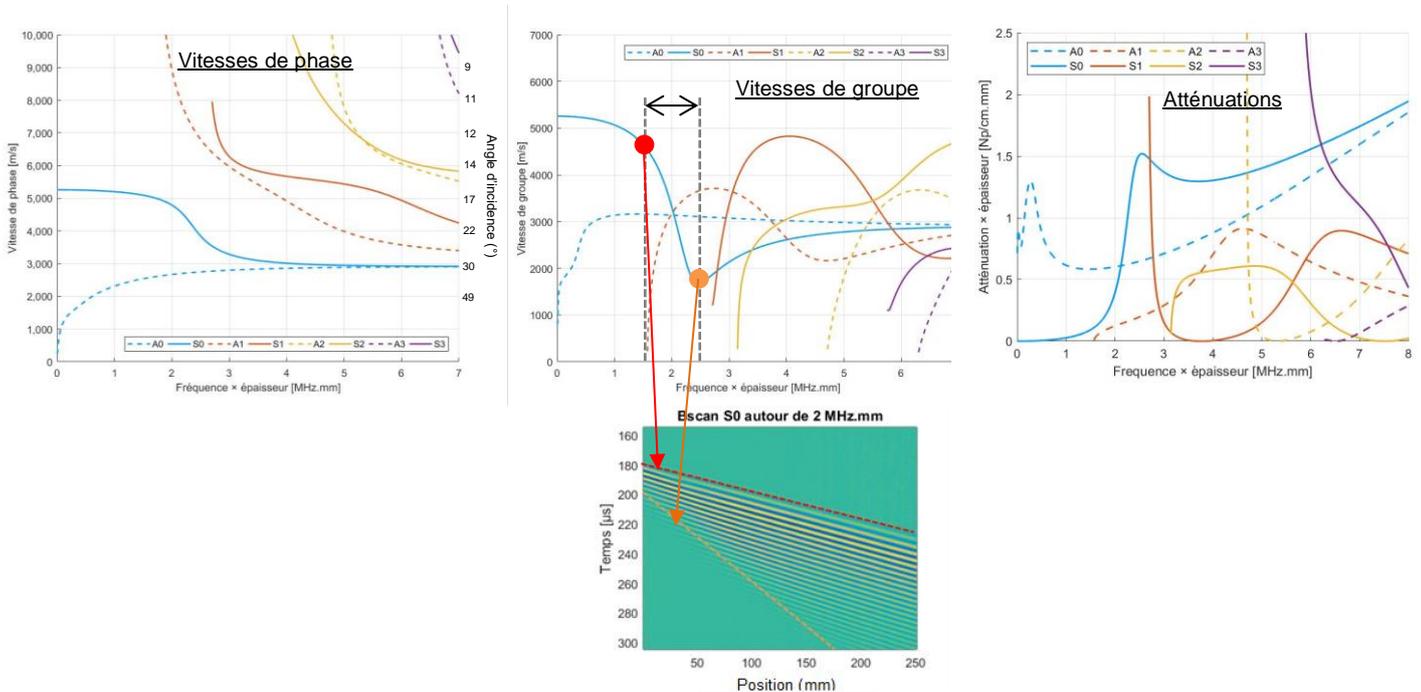


Figure 4.8. Dispersions et atténuation théoriques des ondes de Lamb dans une plaque d'acier immergée en eau, et observation expérimentale de la dispersion

On observe la forte dispersion des vitesses, selon le mode et le domaine du paramètre fréquence x épaisseur considéré. L'atténuation par réémission permet de savoir d'une part si le mode se propagera loin dans la plaque (faible atténuation), ou si au contraire il alimentera la seconde plaque en énergie (forte atténuation). Et par réciprocity, un mode très atténué sera plus facile à générer par un faisceau en incidence oblique dans l'eau.

Cette figure montre également une illustration des conséquences expérimentales de la dispersion (image Bscan en bas à droite) : une impulsion (donc large bande) s'étale temporellement au fur et à mesure de la propagation dans la plaque du fait des vitesses différentes des différentes composantes fréquentielles.

En plus du contenu fréquentiel plus ou moins large bande du signal, la réalité du faisceau expérimental, avec son ouverture et ses lobes secondaires, peut également générer d'autres modes. Dans ce cas, on observe des interférences dans la réémission, comme le montre l'exemple de la Figure 4.9, car chaque mode réémet des ondes dans le fluide à un certain angle. C'est le cas dans cet exemple car nous avons choisi de générer les ondes de Lamb en émettant un faisceau ultrasonore dans l'eau en incidence oblique, à l'aide d'un capteur mono-élément. L'angle d'incidence θ_{inc} est choisi pour générer le mode voulu (de vitesse de phase $V_{ph\ Lamb}$) à l'aide des lois de Snell-Descartes :

$$\theta_{inc} = \sin^{-1}\left(\frac{V_{eau}}{V_{ph\ Lamb}}\right) \quad (4.2)$$

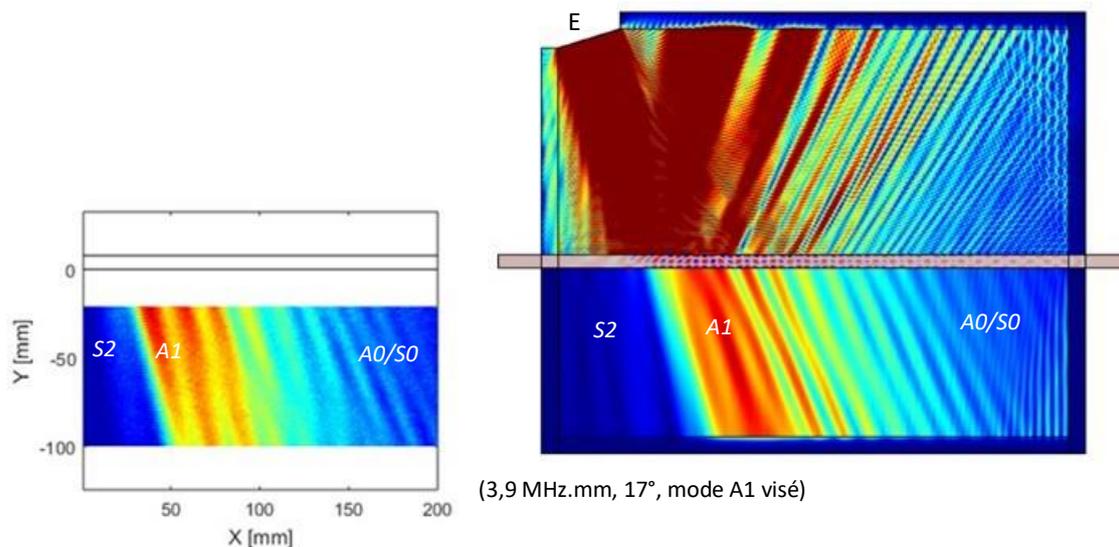


Figure 4.9. Mise en évidence des modes générés dans une plaque en observant la réémission : Cscan expérimental à gauche, et numérique (COMSOL®) à droite (Kauffmann et al., 2020)

Pour plus de flexibilité à l'émission, et également en vue de faire du retournement temporel (comme nous le verrons au paragraphe 0 juste après), le capteur mono-élément en incidence oblique a ensuite été remplacé par un capteur multi-élément. Cela présente plusieurs avantages, en particulier celui de pouvoir générer différents angles d'incidence via des lois de retard sans modifier la position du capteur, et également celui de pouvoir acquérir davantage d'informations en mode écho (acquisitions de type Bscan, cf. exemple en haut de la Figure 4.10).

Ce dernier avantage permet de réaliser une FFT3D sur les acquisitions, dans le but d'identifier et suivre les modes générés. La FFT3D consiste à réaliser une FFT2D (transformée de Fourier sur une image temps-espace)

sur une fenêtre glissante (cf. exemple à droite de la Figure 4.10). Tout le Bscan est ainsi balayé, et on obtient une image de l'énergie propagée aux différents nombres d'onde au cours du temps (cf. exemple en bas de la Figure 4.10). La FFT3D permet donc d'identifier les différents modes générés grâce à leur nombre d'onde, et le temps de vol de l'énergie observée permet d'identifier l'écho correspondant sur l'image Bscan. Elle permettra aussi dans la suite de sélectionner la partie des signaux, donc le mode, qui sera retourné temporellement.

L'exemple de la Figure 4.10 montre l'acquisition réalisée sur deux plaques parallèles, où la loi de retard est choisie de façon à générer le mode S0 dans les plaques. Le Bscan acquis en écho par le multi-élément présente plusieurs échos. L'écho de plus forte amplitude, vers 500 μ s, correspond aux modes A0/S0, A1/S1 et S2, qui reviennent des bords de plaque (leurs nombres d'onde étant négatifs, ce sont des modes régressifs). On montre donc que dans cette configuration, plusieurs modes ont été générés.

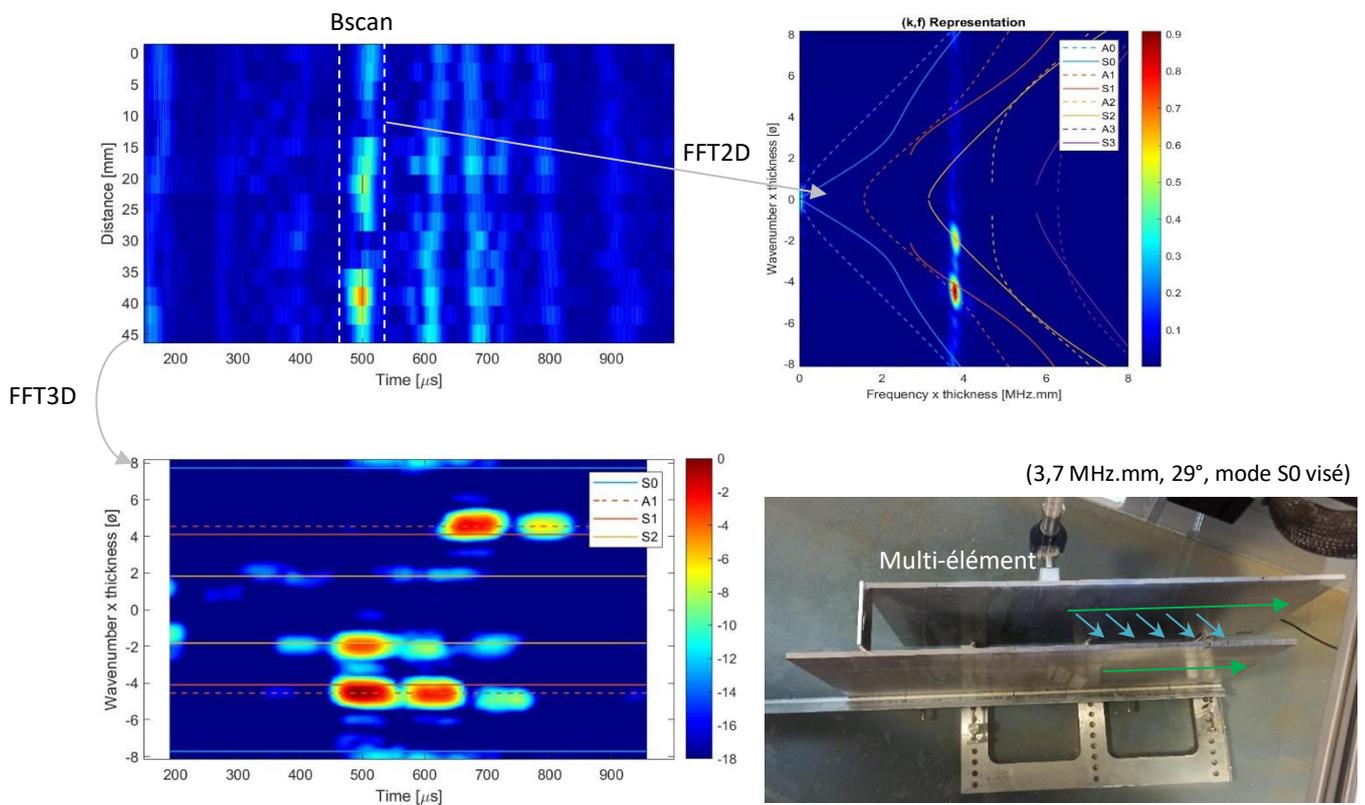


Figure 4.10. Exemple d'essai sur deux plaques en mode écho

Notons que la réflexion sur un bord ou une entaille peut engendrer des conversions de mode (Alleyne and Cawley, 1992; Cho and Rose, 1996; Castaings et al., 2002; Morvan, 2003). Des conversions sont observées dans ces travaux, mais elles ne sont pas analysées en détails.

4.2.2. Apport du retournement temporel

Le **retournement temporel** est un principe physique principalement basé sur la réciprocité et introduit dans le domaine des ultrasons au début des années 1990 (Fink, 1992). Il permet par exemple de focaliser une onde sur une cible échogène particulière même dans un milieu hétérogène (Prada et al., 1991; Prada and Fink,

1994) (cf. Figure 4.11). L'idée ici est de refocaliser l'énergie à l'endroit du défaut afin d'une part d'augmenter le contraste de l'image finale, et d'autre part de localiser le défaut.

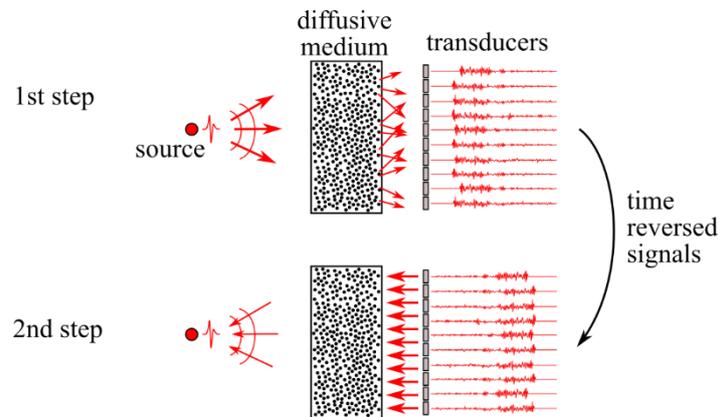


Figure 4.11. Principe du retournement temporel : exemple à travers un matériau diffusant (Corneloup et al., 2021)

On a choisi ici d'utiliser la méthode de l'**énergie topologique** (Dominguez et al., 2005; Rodriguez et al., 2012), associée à la propagation des ondes de Lamb. Cette méthode permet d'obtenir la localisation de l'indication (dont la signature expérimentale a été retournée temporellement) dans le milieu de propagation modélisé.

C'est une méthode d'imagerie qui procède en quatre étapes :

1. une mesure expérimentale dans le milieu réel, avec défaut,
2. une simulation numérique dans le milieu de référence, sans défaut (ici, plaque infinie),
3. une simulation numérique dans le milieu de référence, avec comme terme source le **résidu** (qui est la différence entre la mesure et la simulation) retourné temporellement,
4. le calcul de l'énergie topologique en chaque point du milieu, qui est la corrélation entre le champ direct et le champ adjoint.

Les deux premières étapes sont liées au **problème direct**, et la troisième est le **problème adjoint**. Le résidu refocalise à la position du ou des défauts qui lui ont donné naissance. L'énergie topologique prend des valeurs significatives lorsque les champs se croisent, c'est-à-dire à la position du défaut. Notons que cette méthode nécessite la connaissance précise du milieu (géométrie et caractéristiques élastiques), pour que la différence entre expérimental et numérique (le résidu) soit uniquement due au défaut recherché, et que sa localisation soit bonne.

Un exemple de résultat sur une plaque avec entaille (mi-épaisseur) est montré sur la Figure 4.12. On cherche ici à détecter et localiser aussi bien l'entaille que le bord de la plaque. Pour cela, deux parties du Bscan sont sélectionnées pour être retournées temporellement : celle autour de $200\mu\text{s}$ et celle autour de $300\mu\text{s}$. La FFT3D confirme qu'il s'agit du mode A1 dans les deux cas. Le calcul de l'énergie topologique avec le premier écho aboutit à la détection et localisation de l'entaille, avec un écart de position de 8mm. On note que la répartition des maxima d'énergie topologique correspond au profil de déplacement du mode A1 dans l'épaisseur de la plaque. Il n'est donc pas possible de dimensionner le défaut. La sélection du second écho mène à la détection et localisation du bord de plaque, avec un écart de 7mm, et on peut aussi observer un petit pic correspondant à l'entaille. Les écarts de localisation sont en partie dus au pas spatial d'enregistrement des signaux numériques (de 6,1mm), et ils restent inférieurs à la longueur d'onde (21,3mm pour le mode A1).

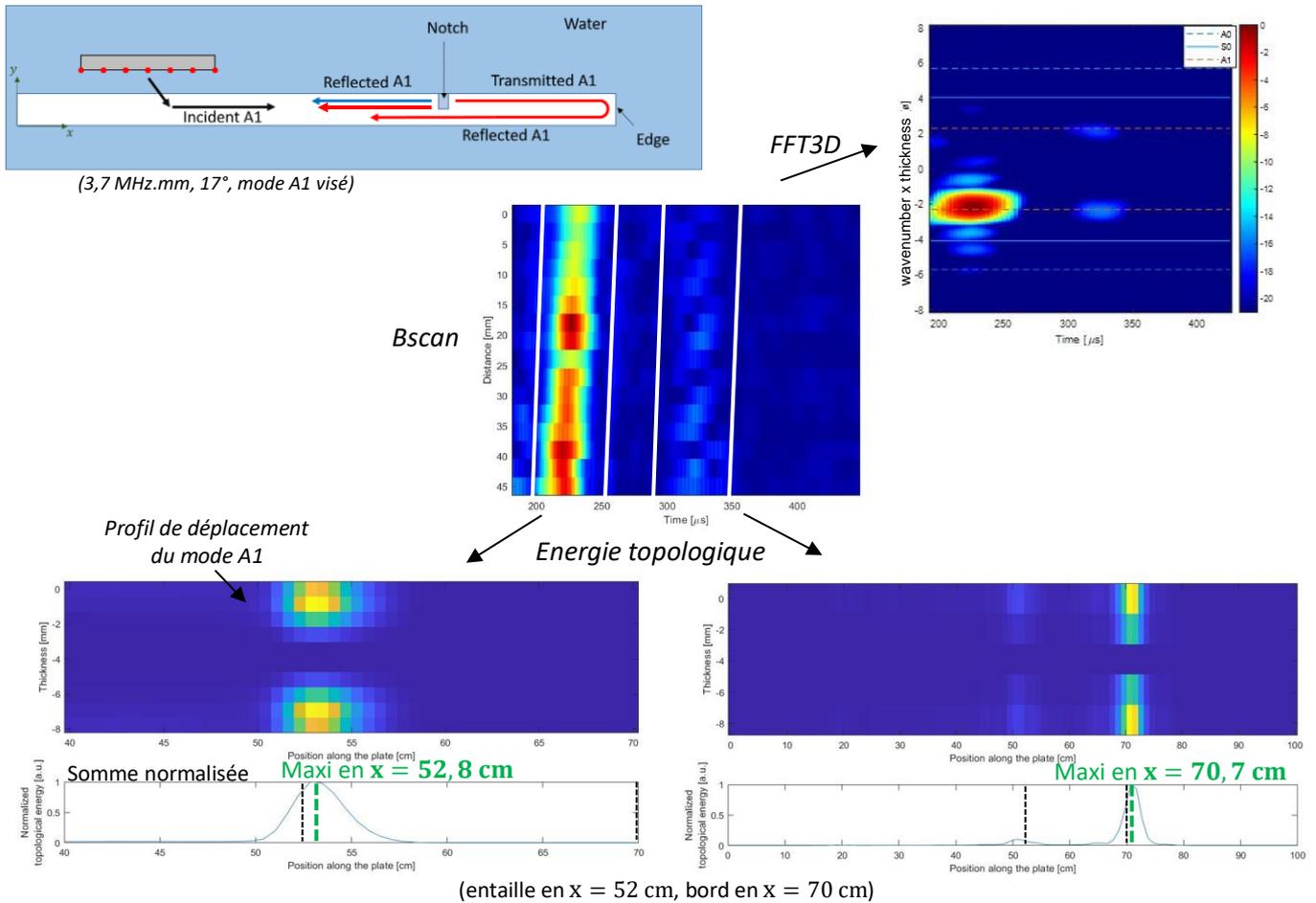


Figure 4.12. Détections séparées de l'entaille et du bord, par rétropropagation de deux parties distinctes du Bscan, dans le cas d'une plaque (Vallée et al., 2022; Vallée, 2022)

4.2.3. Introduction de la notion de « taches » topologiques pour la localisation des défauts

Dans le cas de deux plaques, on a constaté la possible apparition de plusieurs maxima locaux d'énergie topologique (cf. exemple de la Figure 4.13). La difficulté est alors de trier et identifier ces maxima. Une analyse approfondie des étapes de la méthode d'énergie topologique a alors permis d'y apporter une réponse, en introduisant la notion originale de « taches » d'énergie topologique.

Pour cela, les champs temporels des problèmes direct et adjoint ont été tracés et superposés dans chaque plaque (cf. Figure 4.14), mettant en évidence leurs interférences constructives. Cette représentation fait alors apparaître les « taches topologiques » qui sont les maxima locaux d'énergie topologique. Chacun des trajets du problème direct (notés « D » sur la Figure 4.14) et adjoint (notés « A ») a été identifié, ainsi que leur parcours (« 1 » désigne le trajet direct, « 2 » celui après un aller-retour entre les deux plaques, et ainsi de suite). Les trajets d'ordre supérieur ou égal à deux correspondent à des échos rémanents (fantômes) du (ou des) défaut(s), dus aux allers-retours entre les deux plaques. Les taches topologiques retenues sont donc celles se trouvant à l'intersection entre le trajet 1A et le trajet 1D dans chacune des plaques.

Dans l'exemple de la Figure 4.14, aucune tache n'apparaît à cette intersection (à la position $x \approx 85$ cm), aucun maximum d'énergie n'est donc retenu. Dans la seconde plaque, on retiendra la tache à la position $x \approx 68$ cm. Si l'on fait le lien avec les maxima trouvés en bas de la Figure 4.13, on peut en conclure que l'on a détecté et localisé le bord de la seconde plaque (maximum entouré en vert).

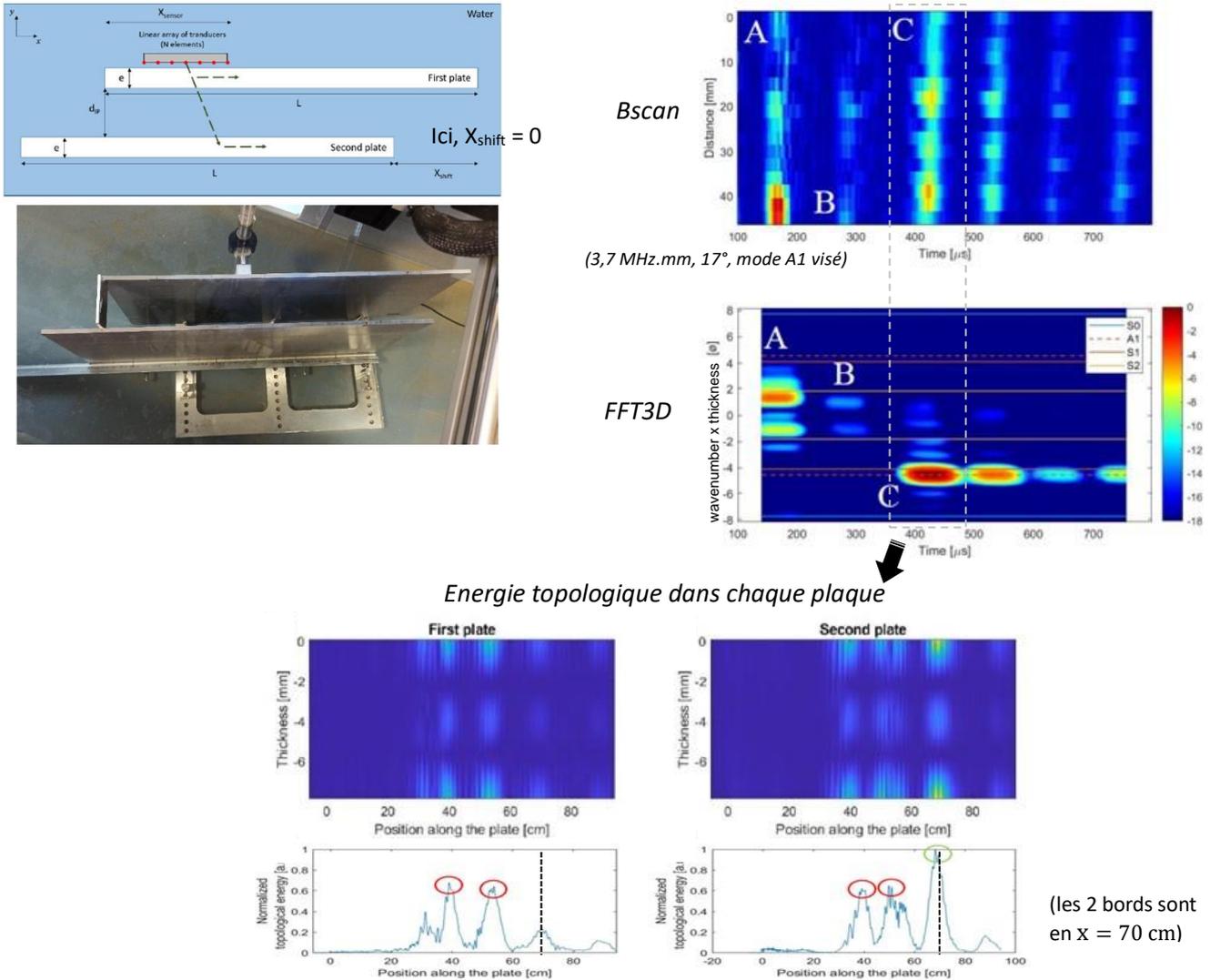


Figure 4.13. Application de la méthode sur deux plaques (cas où les bords sont alignés), en rétropropageant le paquet d'ondes noté C : apparition de maxima locaux

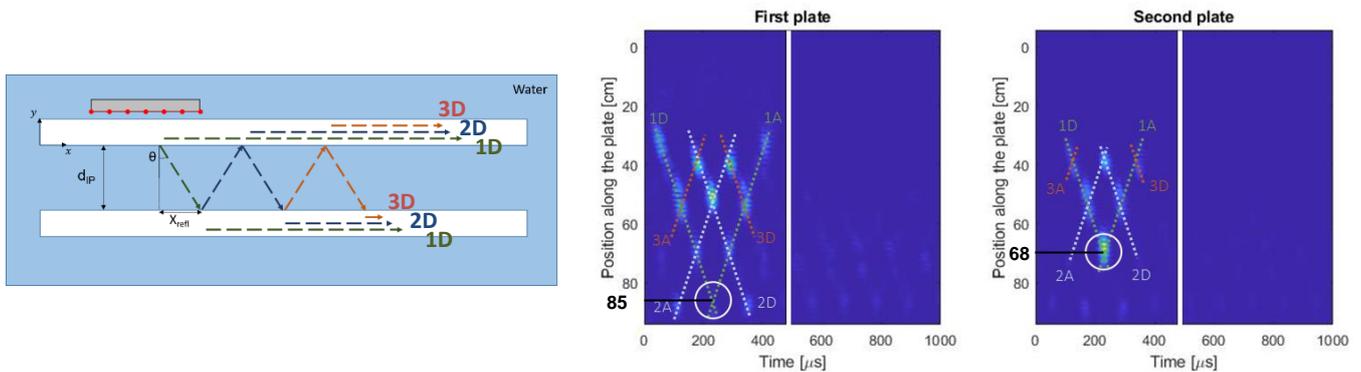


Figure 4.14. Superposition des champs direct et adjoint : définition et identification des taches topologiques

Cette méthode a été testée dans d'autres cas, en décalant latéralement la seconde plaque par rapport à la première afin de ne plus aligner les deux bords de plaque, et les résultats ont permis de valider la méthode.

D'autres essais ont également été réalisés, en choisissant trois modes différents, pour leurs niveaux différents d'atténuation par réémission : faible, intermédiaire et forte. En effet, selon le niveau de réémission, lié au couplage entre le fluide et la plaque, soit le mode sera plus facilement généré (et « conservé ») dans la première plaque, soit il rayonnera davantage dans le fluide et l'énergie atteindra donc davantage la seconde plaque.

Il a alors été montré que l'utilisation d'un mode faiblement atténué par réémission permet principalement le contrôle de la première plaque de la structure, un mode fortement atténué permet principalement le contrôle que de la seconde, et un mode moyennement atténué a quant à lui permis la détection du bord des deux plaques à partir d'une unique acquisition.

On voit clairement l'apport de l'imagerie topologique associée à la notion de taches topologiques : le Bscan seul ne permet ni de détecter, ni surtout de localiser les bords de plaque, ce que permet cette méthode.

4.2.4. Synthèse et perspectives

Ces travaux ont donné lieu à la publication de trois articles de recherche (Kauffmann et al., 2019, 2020; Vallée et al., 2022), auxquels s'ajoutent un article soumis et un autre en cours d'écriture, ainsi qu'à la participation à plusieurs congrès nationaux et internationaux. Notons également la distinction des travaux de thèse de Jean-Christophe Vallée, qui a reçu le prix Claude Birac au congrès COFREND de 2023.

Ils ont permis de grandes avancées dans la compréhension de la propagation des leaky Lamb waves et de la génération d'un mode dans la seconde plaque. La méthode originale proposée consistant à associer les leaky Lamb waves à une méthode utilisant le retournement temporel, la méthode d'imagerie topologique, permet de détecter et surtout de localiser un défaut dans un système multi-plaques immergé.

Les travaux se poursuivent actuellement suivant deux principaux axes : tout d'abord étudier différents types de défauts (entailles à différentes profondeurs) et ensuite évaluer l'efficacité de la méthode en ajoutant une troisième plaque. A plus long terme, il faudra également considérer des plaques d'épaisseurs différentes. On pourra alors envisager de préconiser un jeu d'épaisseurs à la conception (RC-CND) pour améliorer la contrôlabilité de futures structures multi-plaques immergées.

4.3. Propagation dans les fluides avec écoulement et hétérogénéité de température

Un autre axe de recherche mené avec le CEA Cadarache est la mesure de la température du sodium à la sortie des têtes des assemblages du cœur du réacteur, par une méthode de **thermométrie ultrasonore**. Cette instrumentation implique la propagation d'ondes ultrasonores dans du sodium liquide, **thermiquement inhomogène et turbulent** (cf. exemple de la Figure 4.15). Le milieu provoque des déviations du faisceau acoustique qu'il faut savoir prévoir et quantifier afin d'envisager l'emploi des ultrasons comme moyen de mesure en sortie d'un cœur de réacteur au sodium.

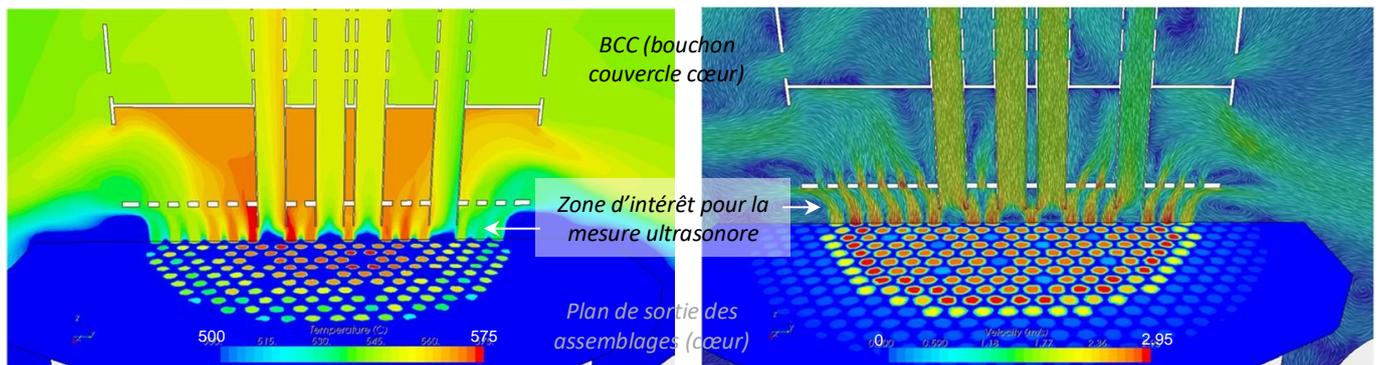


Figure 4.15. Exemple de calcul CFD (CEA) de champs de température (à gauche) et de vitesses (à droite) en sortie du cœur

Ces travaux ont commencé par une étude de faisabilité (dans le cadre de NDTValor), qui a à encore débouché sur deux thèses successives au LMA, celle de Nicolas Massacret (Massacret, 2014), que j'ai co-encadrée, puis celle de Masaru Nagaso (Nagaso, 2018).

4.3.1. Problématique

Le but de la thermométrie en sortie du cœur d'un réacteur est de détecter rapidement l'apparition d'incidents ou accidents entraînant un échauffement anormal du fluide de refroidissement. Certains dispositifs sont déjà utilisés, tels que des thermocouples ou des débitmètres, positionnés à une dizaine de centimètres à la verticale des assemblages à surveiller (sous le BCC). Ils sont donc susceptibles de mesurer un mélange de jet, avec un certain délai. L'objectif est d'améliorer les performances des techniques utilisées jusque-là, par l'utilisation des ultrasons.

L'idée, qui repose sur un brevet d'invention britannique déposé en 1985 par l'UKAEA (McKnight et al., 1985), est de disposer des capteurs ultrasonores en incidence rasante, permettant de viser les arêtes opposées d'un ou plusieurs assemblages (cf. Figure 4.16). Connaissant la vitesse des ondes ultrasonores dans le sodium liquide en fonction de la température (Leibowitz et al., 2003; Sobolev, 2011), l'écart de temps de vol entre les deux échos doit permettre de remonter à la température moyenne sur le diamètre du tube.

Les avantages de l'utilisation des ultrasons sont d'une part la rapidité de la mesure, et d'autre part son caractère localisé, en sortie d'assemblage. Le principal inconvénient est la distance de propagation des ultrasons au-dessus du cœur, de l'ordre du mètre, dans des conditions thermo-hydrauliques particulières. Les inhomogénéités de température, comme celles du champ de vitesses, vont engendrer des fluctuations spatiales de la vitesse des ultrasons, donc des déformations du front d'onde et de possibles déviations. Il est donc indispensable de maîtriser cette propagation pour pouvoir réaliser une mesure correcte.

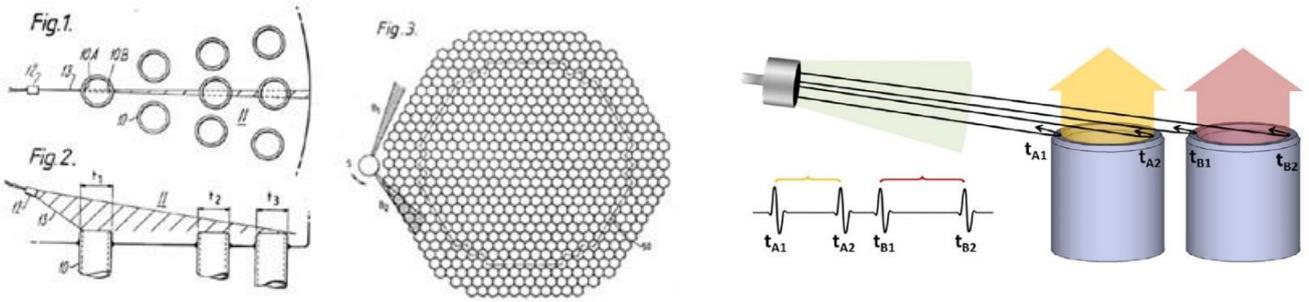


Figure 4.16. Illustration du brevet (McKnight et al., 1985), et schéma de principe de la thermométrie ultrasonore en sortie du cœur en incidence rasante (Ploix et al., 2016)

4.3.2. Approche analytique

Dans le cadre de la thèse de Nicolas Massacret, une étude thermo-hydraulique précise du milieu a été menée afin de proposer une description adaptée du milieu et de choisir un modèle de propagation adéquat. Cette étude des caractéristiques thermo-hydrauliques du sodium en sortie du cœur a tout d'abord permis d'émettre deux grandes hypothèses pour la construction du modèle.

La principale hypothèse est l'**hypothèse de fluide gelé** : les écoulements mis en jeu impliquant un nombre de Mach (rapport de la vitesse du fluide sur la vitesse du son) faible, de l'ordre de 10^{-3} , on suppose que les ultrasons se propagent suffisamment rapidement (de l'ordre de $2\,300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à $2,25\text{ MHz}$ dans du sodium à 550°C) pour que le fluide soit resté dans le même état durant leur trajet aller-retour.

De plus, la taille caractéristique L des inhomogénéités thermiques (liée au nombre de Prandtl du sodium qui est de l'ordre de 10^{-3}) est supérieure à 20 mm , ce qui permet de faire l'**hypothèse des ondes hautes fréquences** :

$$\lambda \ll L \text{ et } \sqrt{X\lambda} \ll L \quad (4.3)$$

où X est la distance parcourue par les ondes ultrasonores (λ est ici de l'ordre du millimètre). Cette hypothèse implique que les phénomènes thermo-hydrauliques n'engendrent ni diffraction ni diffusion.

❖ Le modèle AcRaLiS

Un code rayon 2D a alors été développé, permettant de simuler la propagation ultrasonore dans un milieu fluide en prenant en compte les champs de vitesses et de températures. Ce code, nommé **AcRaLiS** (Acoustic Ray in Liquid Sodium), prévoit les déviations des rayons constituant le faisceau, en résolvant de manière itérative le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{v}(\vec{x}_p, t) + c(\vec{x}_p, t) \frac{c(\vec{x}_p, t)}{\Omega} \vec{s} \\ \frac{d\vec{s}(\vec{x}_p)}{dt} = -\frac{\Omega}{c} \vec{v}c - \vec{s} \wedge (\vec{v} \wedge \vec{v}) - (\vec{s} \cdot \vec{v}) \vec{v} \end{cases} \quad (4.4)$$

où \vec{x}_p désigne un point du front d'onde, \vec{v} est la vitesse du fluide et c est la vitesse ultrasonore dans le fluide au repos. L'onde se propage dans le fluide en mouvement à la vitesse $c \cdot \vec{N} + \vec{v}$ (Pierce, 1989), avec \vec{N} le vecteur unitaire colinéaire à la direction de propagation. Et \vec{s} et Ω sont définis de la manière suivante :

$$\vec{s} = \frac{\vec{N}}{c + \vec{v} \cdot \vec{N}} \quad \text{et} \quad \Omega = 1 - \vec{v} \cdot \vec{s} \quad (4.5)$$

A chaque itération, les paramètres c , \vec{v} et leurs gradients sont déterminés localement (via une interpolation) à partir des données thermo-hydrauliques, fournies sous la forme d'une cartographie 2D. Une fois la direction de propagation calculée \vec{N} , le rayon est propagé dans cette direction, sur une distance de $c_{min}/2\pi f$.

L'amplitude peut également être calculée. Pour cela, on utilise la **méthode de sommation des faisceaux gaussiens**. A chaque rayon est affecté un profil énergétique gaussien, et l'amplitude acoustique en un point est alors obtenue en sommant les énergies apportées par chaque rayon (Červený et al., 1982; Massacret et al., 2014). Un exemple de résultats est montré sur la Figure 4.17 ci-dessous.

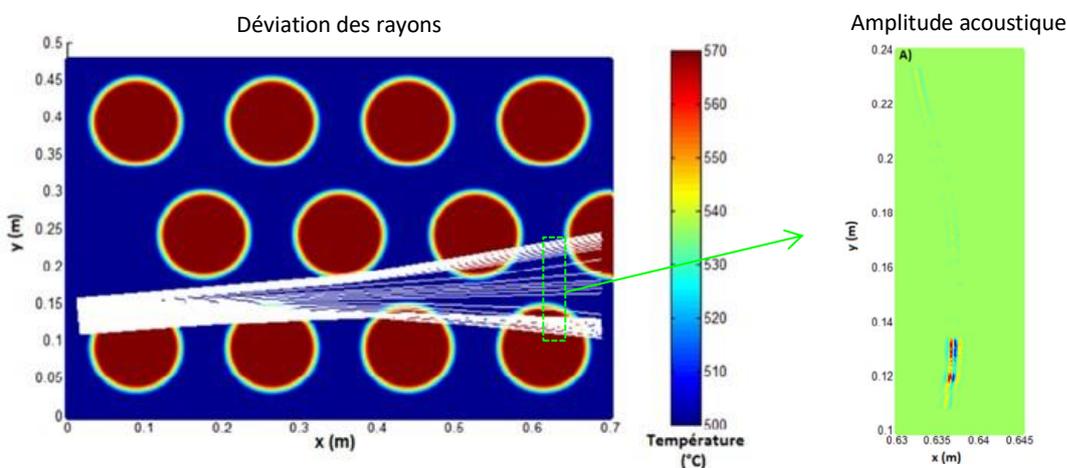


Figure 4.17. Exemple de résultat du modèle AcRaLiS, montrant la forte influence de la température en termes de déviations des rayons (à gauche), et de répartition de l'amplitude (à droite) (Massacret, 2014)

❖ Validations expérimentales

Deux bancs expérimentaux ont été développés afin de vérifier la validité du modèle et des hypothèses choisies.

Le banc **UPSilon** (Ultrasonic Path in Silicon oil) vise à vérifier la validité du code dans le cas d'une inhomogénéité thermique. Le fluide choisi est l'huile de silicone, dans le but de limiter les phénomènes de convection, et donc éviter les mouvements du fluide avec les différences locales de température. Le chauffage local est réalisé à l'aide de fils chauds. Un peigne de thermocouples est également introduit, et des mesures de strioscopie ont été réalisées pour reconstruire les données thermiques locales, et ainsi réaliser la modélisation associée. Un exemple de résultat de comparaison entre expérience et modèle est montré sur la Figure 4.18. Les écarts obtenus sont inférieurs à 3%.

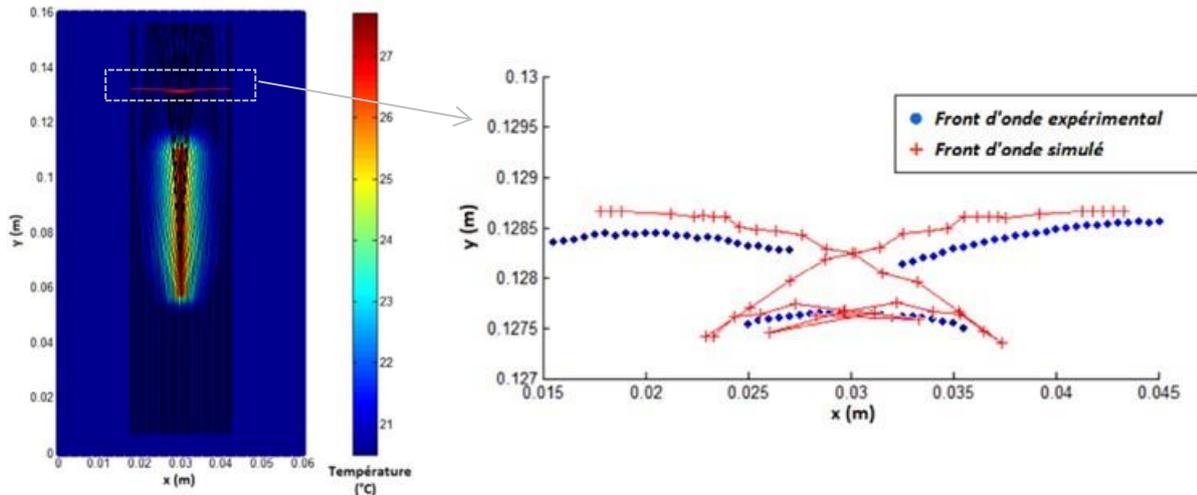


Figure 4.18. Comparaison modélisation AcRaLiS / mesures sur le banc UPSilon : influence du champ de température (Massacret, 2014)

Le second banc, **IKHAR** (Instabilities of Kelvin-Helmoltz for Acoustic Research), vise à vérifier la validité du code dans le cas d'inhomogénéité du champ des vitesses d'écoulement. Deux façons de créer des instabilités de type tourbillons périodiques ont été utilisées :

- La création d'instabilités de Kelvin-Helmoltz : elle repose sur le principe d'avoir deux écoulements de vitesses différentes, séparés par une paroi ; à la fin de la paroi, les flux se mélangent, créant périodiquement des tourbillons.
- Les instabilités de Van Karman : elles sont générées en introduisant un obstacle cylindrique dans un écoulement stationnaire.

La Figure 4.19 présente les résultats sur des instabilités de Van Karman. Des capteurs ultrasonores multi-éléments, positionnés de chaque côté de la zone instable, mesurent le faisceau transmis, et la simulation réalisée sous COMSOL® permet d'avoir une description thermo-hydraulique réaliste, nécessaire à AcRaLiS. Les résultats numériques et expérimentaux sont très proches, avec un écart sur les temps de vol de l'ordre de 1,5 ns.

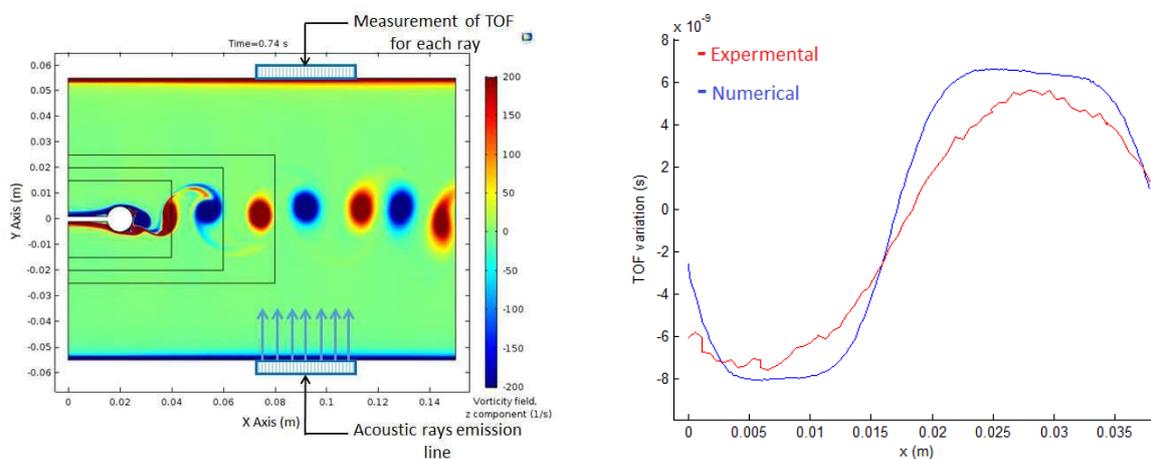


Figure 4.19. Comparaison modélisation AcRaLiS / mesures sur le banc IKHAR : influence du champ de vitesse d'écoulement (Massacret et al., 2016)

4.3.3. Approche numérique

La propagation a également été étudiée via les éléments finis, par l'utilisation du code de simulation open-source **SPECFEM**. C'est un code de propagation acoustique dans les milieux complexes 2D et 3D, basé sur la méthode des éléments spectraux, initialement créé pour simuler la propagation des ondes sismiques. Dans notre cas d'étude, les échelles de résolution sont très différentes.

Après une validation de l'échelle de l'étude et du choix de maillage adéquat, les travaux de Masaru Nagaso (Nagaso et al., 2016; Nagaso, 2018; Nagaso et al., 2021) ont pu montrer qu'il était possible d'étudier numériquement l'influence sur la propagation ultrasonore de la prise en compte des gradients de température avec SPECFEM, en 2D, 3D et même 4D (3D et temps) (cf. illustrations de la Figure 4.20). Les principales difficultés viennent d'une part de la nécessité de connaître les données thermohydrauliques assez finement, et d'autre part de la nécessité d'une grande puissance de calculs (HPC).

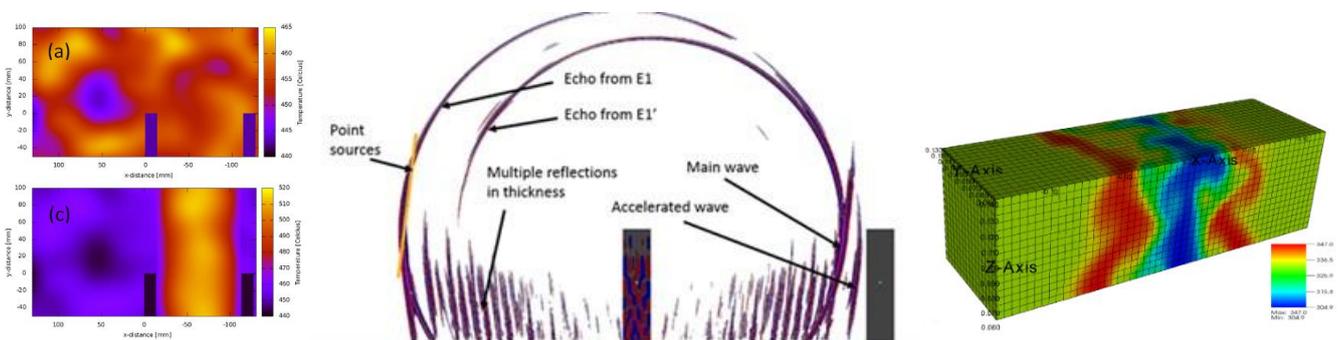


Figure 4.20. Exemple de simulations SPECFEM, en 2D et 3D (Nagaso et al., 2016; Nagaso, 2018; Nagaso et al., 2021)

4.3.4. Synthèse et perspectives

Ces travaux ont donné lieu à la publication de trois articles de recherche auxquels j'ai contribué (Massacret et al., 2014; Nagaso et al., 2016; Ploix et al., 2016), ainsi qu'à la participation à plusieurs congrès nationaux et internationaux.

Les travaux se poursuivent au laboratoire, en collaboration avec le CEA, en prenant également en compte l'engagement, travaux initiés par la thèse de Matthieu Cavaro (Cavaro, 2010) et poursuivis par la thèse de Lilian D'Hondt (D'Hondt, 2018), toutes deux visant à caractériser un nuage de bulles, par acoustique linéaire et/ou non linéaire, ainsi que la thèse en cours de Jules Fermé qui développe une méthode de vélocimétrie acoustique d'écho-PIV permettant d'imager le champ de vitesses d'un écoulement liquide avec microbulles.

4.4. Détection de fissures partiellement fermées

Dans cette partie, on s'intéresse à la détection et la caractérisation de fissures qui ont la particularité d'être partiellement fermées. La partie fermée (où les parois sont en contact) n'est pas détectable avec les méthodes conventionnelles de CND. En particulier le contrôle ultrasonore classique utilisant les ondes de volume mène au sous-dimensionnement de la fissure. C'est une thématique de recherche relativement récente, et encore très ouverte.

Deux pistes sont explorées ici : l'utilisation d'une méthode linéaire classique avec l'ajout d'une sollicitation thermique, et l'utilisation d'une méthode non linéaire, DAET, dont le principe repose sur la sollicitation acoustique de la fissure. La sollicitation, qu'elle soit acoustique ou thermique, a pour but d'ouvrir (de manière non destructive) la partie fermée de la fissure. Ces travaux sont réalisés dans le cadre de la thèse CIFRE d'Arthur Perrin, en cours, avec Naval Group.

4.4.1. Quelques généralités sur les fissures et la problématique du contrôle conventionnel

Les fissures peuvent avoir de nombreuses causes possibles. La mécanique de la rupture a pour objet d'étudier et de prédire l'amorçage et la propagation de fissures, en fonction du matériau (en particulier sa propriété fragile ou ductile) (Recho, 1995; Leblond, 2003). Lorsqu'il s'agit de pièces métalliques, comme c'est le cas ici, des fissures peuvent se créer :

- à la fabrication, notamment pendant l'opération de soudage : fissuration à chaud, à froid...
- en service : les fissures sont générées par fatigue (thermique ou mécanique), ou par corrosion sous contrainte.

Du point de vue industriel, il est primordial de connaître le type de mécanisme d'endommagement provoquant la fissure ainsi que sa dimension, car l'urgence de la réparation sera potentiellement très différente, comme l'illustre la Figure 4.21 ci-dessous : dans cet exemple théorique, une « petite » fissure (de 1 mm) de fatigue mécanique évoluera beaucoup plus lentement (courbe verte) et la réparation sera donc moins urgente qu'une fissure (toujours de 1 mm) de corrosion sous contrainte (courbe bleue).

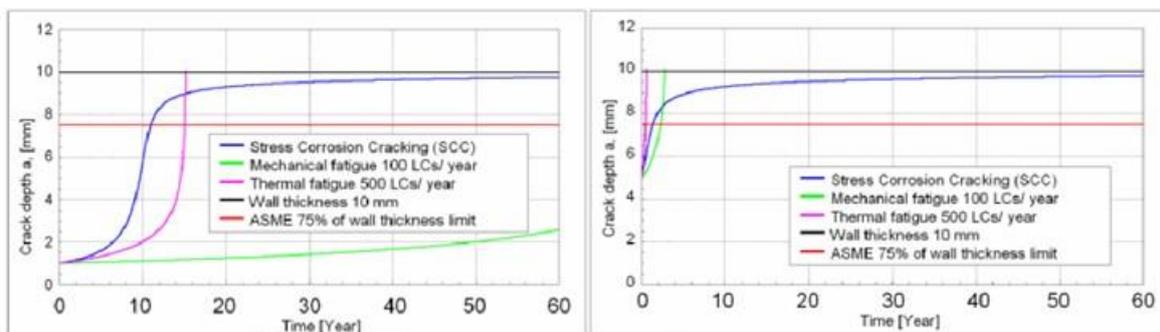


Figure 1 Crack growth values for different degradation mechanisms with starting crack sizes 1 and 5 mm

Figure 4.21. Exemple de croissance d'une fissure en fonction de sa taille et du mécanisme mis en jeu (Pitkänen et al., 2007)

Les fissures peuvent être (partiellement ou totalement) refermées pour diverses raisons : sous l'action de contraintes extérieures, ou de contraintes internes, dues notamment au passé thermique de la pièce, ou encore l'apparition de produit de corrosion. Des contacts, localisés ou non, peuvent donc exister. Le contact

possible entre les surfaces de la fissure pendant un chargement cyclique a été découvert dans les années 1970. Dès lors, les mécanismes de fermeture ont été étudiés plus en détails (Chowdhury and Sehitoglu, 2016; Pippin and Hohenwarter, 2017). La contrainte a une forte influence aussi bien sur la propagation de la fissure (forte concentration de contraintes en pointe de fissure) que sur sa fermeture (contraintes environnantes) (Miao et al., 2022). Il semble, d'après la littérature, que les fissures refermées soient majoritairement les fissures créées par fatigue.

Les méthodes ultrasonores conventionnelles utilisées pour dimensionner les fissures reposent principalement sur la mesure de l'écho de coin et la diffraction de la pointe de fissure : on recherche l'écho de coin pour connaître la position de la fissure, et l'amplitude de l'écho de coin (selon le faisceau utilisé) et/ou la détection de l'écho de diffraction permettent de remonter à sa profondeur. Or la partie fermée de la fissure est transparente aux ondes ultrasonores, rendant sa détection impossible. Un exemple est montré sur la Figure 4.22. Il est alors nécessaire de développer d'autres méthodes pour éviter le sous-dimensionnement.

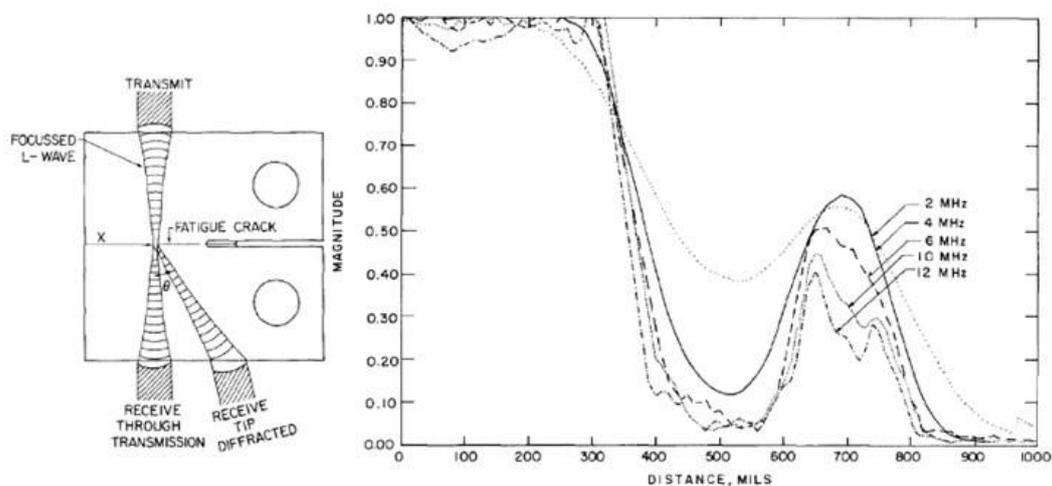


Fig. 6. Through transmission response of a fatigue crack showing partial closure far away from the crack tip.⁽¹⁵⁾

Figure 4.22. Mesure de l'amplitude transmise le long d'une fissure de fatigue : en plus de la zone fermée vers la pointe de fissure (à gauche), une autre zone partiellement fermée est mise en évidence sur la droite (Buck et al., 1984)

4.4.2. Application d'une sollicitation acoustique

La partie fermée des fissures a d'après la bibliographie un comportement non linéaire. En effet, une sollicitation mécanique provoque un « battement » des parois de la fissure qui induit une réponse acoustique non linéaire (Solodov, 1998; Biwa et al., 2004; Broda et al., 2014; Blanloeuil et al., 2016; Gao et al., 2019).

Nous avons donc tout d'abord vérifié cette hypothèse, en appliquant la méthode DAET. La **méthode DAET** (Dynamic Acousto-Elasticity Testing) consiste à solliciter la structure sur l'une de ses fréquences de résonance, à l'aide d'une onde monochromatique basse fréquence de forte amplitude, appelée **onde pompe** (cf. principe sur la Figure 4.23). Cette sollicitation provoque une alternance de mise en traction et en compression, qui va activer les non linéarités présentes dans la pièce. Une onde ultrasonore, de type impulsionnel, plus haute fréquence, appelée **onde sonde**, est alors envoyée dans la pièce à différents instants de la sollicitation, afin de sonder la pièce à différents niveaux de traction et de compression, et ainsi récupérer les informations non linéaires.

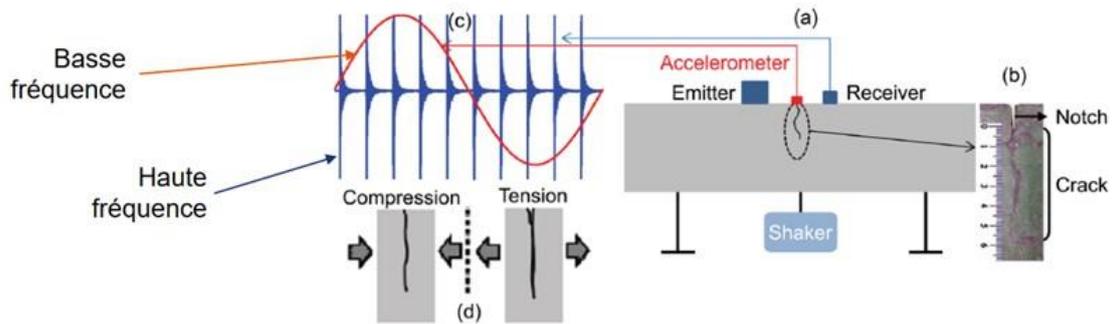


Figure 4.23. Principe de la méthode DAET (Payan et al., 2013)

Les résultats des essais sur une pièce d'acier fissurée de Naval Group, sont tracés sur la Figure 4.24. En fonction de l'amplitude de l'onde pompe (axe des abscisses), l'amplitude de l'onde sonde enregistrée (axe des ordonnées) varie. Le comportement devient hystérétique à partir d'un certain seuil d'amplitude de l'onde pompe (ici au-delà de 3V) : en effet, le comportement devient différent selon que la sollicitation est croissante ou décroissante.

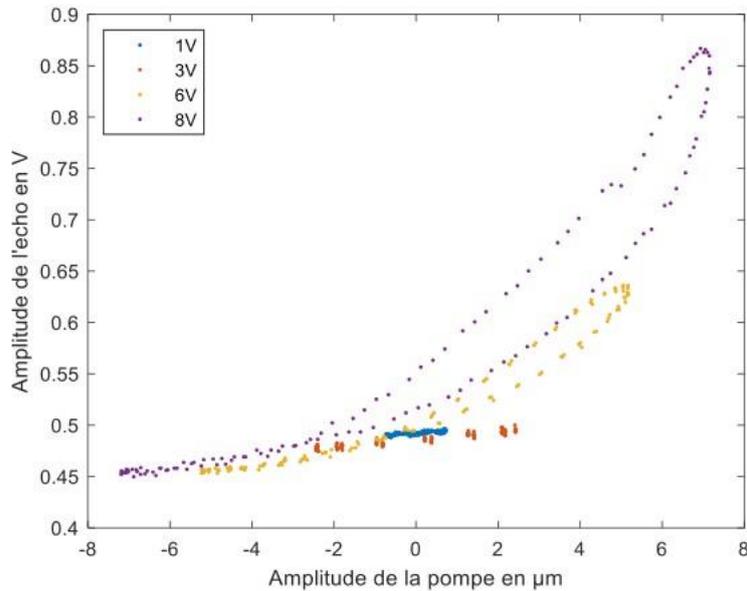


Figure 4.24. Résultat de la méthode DAET sur une pièce fissurée de Naval Group

Cette méthode nous a permis de confirmer la non linéarité provoquée par la partie fermée de la fissure. Cependant elle ne permet pas de remonter à la dimension réelle de la fissure. Une autre approche a alors été abordée.

4.4.3. Application d'une sollicitation thermique

Le but étant d'ouvrir la fissure, il a été décidé de solliciter la pièce thermiquement : le froid implique la contraction de la matière de chaque côté de la fissure, ce qui va provoquer l'ouverture de la fissure. Le froid est appliqué à l'aide d'une bombe à froid (à environ -30°C), et la fissure est observée par un faisceau en T45. La Figure 4.25 ci-dessous montre le principe de la méthode mise en œuvre et les résultats des essais, en termes d'amplitude de l'écho de coin mesuré. L'amplitude augmente fortement dès que le froid est appliqué.

Cela signifie que la réflexion augmente, et donc que la partie ouverte de la fissure grandit. Puis l'amplitude diminue lorsque le froid se diffuse dans la pièce, et elle revient au niveau initial à l'arrêt du froid.

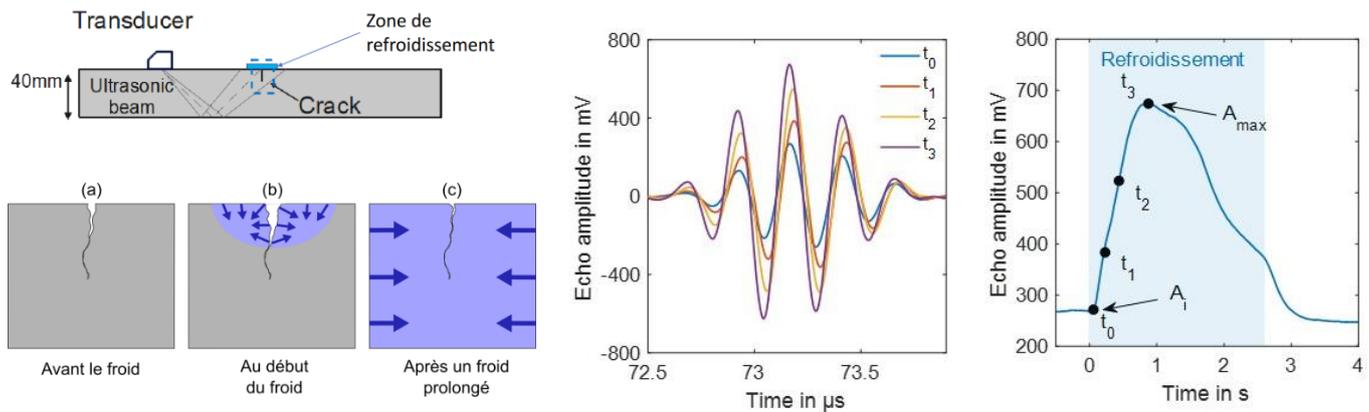


Figure 4.25. Principe et résultat de la sollicitation thermique

Cette méthode montre un fort potentiel pour mettre en évidence une fissure partiellement fermée. Elle devrait permettre d'améliorer le dimensionnement de la fissure. On ne peut en revanche pas être certain que toute la partie fermée de la fissure s'est ouverte, et donc que l'on voit la fissure dans sa totalité. Les travaux se poursuivent actuellement.

4.4.4. Synthèse et perspectives

Un article de recherche a été soumis dans le cadre de la thèse d'Arthur Perrin, et ses travaux ont déjà donné lieu à la participation à plusieurs congrès nationaux et internationaux.

Les travaux de thèse sont réalisés dans un cadre spécifique, industriel, avec des contraintes particulières (accessibilité...). D'autres pistes sont à explorer concernant cette problématique très actuelle. Une autre méthode est actuellement étudiée au laboratoire, en collaboration avec Framatome Intercontrôle. Cette méthode, appelée FAD/SAD (Ikeuchi et al., 2013; Ohara et al., 2019), se base sur la non linéarité des parties fermées des fissures, et la génération de sous-harmoniques. L'idée est d'envoyer, à l'aide d'un capteur multi-éléments, des ondes de différentes amplitudes. Après traitement des données acquises, la méthode permettrait d'imager la pièce, en mettant en évidence les zones non linéaires, donc les parties fermées.

Des maquettes fissurées ont été spécialement réalisées, et la première problématique posée est de savoir si une partie de la fissure est fermée, ou comment en fermer une partie le cas échéant. Un premier stage de Master 1 a été réalisé en 2023, et un stage de Master 2 est proposé cette année pour avancer sur cette thématique.

De plus, certaines fissures, comme celles générées par corrosion sous contrainte (CSC), peuvent présenter des ramifications, partiellement fermées également. Si l'on ajoute le fait que ces fissures sont souvent très proches d'une soudure épaisse en acier austénitique, et que les contraintes ne sont a priori pas négligeables dans ce type de pièce, on aboutit à une problématique particulièrement complexe en raison de la combinaison des difficultés. Un sujet de thèse est en cours de rédaction avec l'IRSN, le but étant ici le dimensionnement de la fissure ramifiée, avec pour originalité la fabrication de maquettes représentatives d'un mécanisme de CSC.

4.5. Evaluation de structures non métalliques

4.5.1. Evaluation des bétons

L'évaluation de l'état des ouvrages de génie civil, en béton, constitue également un enjeu d'importance, dans une démarche globale d'estimation de la durée de vie résiduelle, de planification des réparations ou d'optimisation de la surveillance. La principale difficulté dans l'évaluation et le contrôle du béton par ultrasons réside dans sa nature très hétérogène, car constitué de ciment, de sable et de granulats de diverses dimensions (allant de quelques millimètres à quelques centimètres). De plus, il est naturellement microfissuré. Donc il est très difficile de prévoir la propagation acoustique dans un béton donné, et donc de remonter aux propriétés recherchées.

❖ Mise en évidence de l'acousto-élasticité des bétons

Le projet ANR ACTENA (2005-2008) portait sur l'Auscultation des Cables Tendus Non Accessibles présents dans les structures en béton du génie civil. La problématique concernait l'auscultation des câbles de précontrainte non accessibles, avec pour but la détermination de la tension résiduelle. Ces câbles assurent le maintien d'une contrainte de compression dans les structures en béton. Leur ancrage n'est généralement pas accessible, et lorsqu'il l'est, son état permet difficilement d'effectuer un contrôle (câbles désolidarisés...). C'est pourquoi le LCND a proposé d'étudier la caractérisation des contraintes transférées par les câbles aux massifs de béton environnants, qui eux sont accessibles.

Pour cela, nous avons étudié, en grande partie expérimentalement, la sensibilité ultrasonore de différentes compositions de béton à l'état de contrainte, autrement dit l'**acousto-élasticité** (cf. paragraphe 2.3.4 p. 37). Les éprouvettes réalisées ont été instrumentées (jauges de déformation et capteurs ultrasonores) pour effectuer des mesures aussi bien dans l'axe de la contrainte appliquée que radialement. Tout le dispositif a été placé dans la machine de traction/compression/torsion (25 tonnes) du LMA.

L'analyse des campagnes d'essais a clairement montré que la vitesse ultrasonore varie en fonction de la contrainte uniaxiale appliquée au béton (cf. Figure 4.26). Comme le prévoit la théorie, les ondes les plus sensibles à cette contrainte sont celles polarisées dans la direction de chargement.

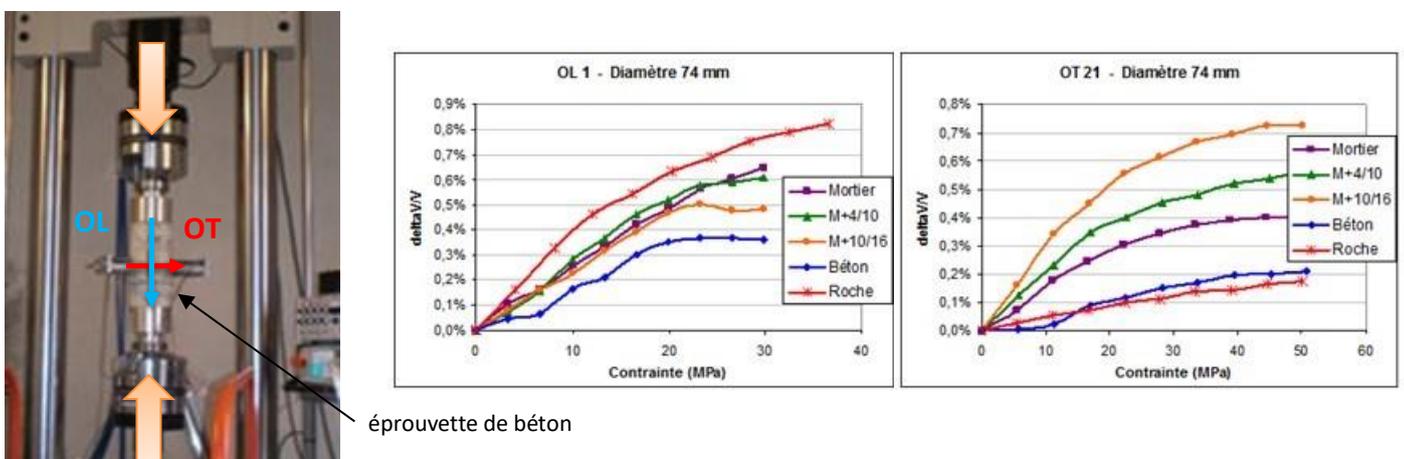


Figure 4.26. Montage d'une éprouvette instrumentée dans la machine de traction, et résultats de variations de vitesses longitudinales et transversales en fonction de la contrainte appliquée

Ces travaux ont donné lieu à la publication de deux articles de recherche (Chaix et al., 2008; Lillamand et al., 2010), ainsi qu'à la participation à plusieurs congrès nationaux et internationaux.

❖ ***Mise en place d'une stratégie de fusion de données pour l'évaluation des bétons***

L'un des objectifs du projet ANR SENSO (Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton) était d'estimer différents indicateurs ou pathologies de structures en béton, tels que la porosité, le degré de saturation en eau, la teneur en chlorures, la carbonatation.... La connaissance de ces paramètres contribue à établir un diagnostic quant à l'état de santé des structures de béton auscultées.

Pour cela, le LCND a proposé de mettre en place une stratégie de **fusion de données**. La fusion de données consiste à réunir les estimations provenant de différentes sources, pour en tirer la réponse la plus « plausible ». Elle est une **aide au diagnostic**, et sa réponse ne peut être considérée comme « vérité absolue ». De manière générale, lorsque les données de départ convergent vers une même estimation, le résultat tend vers cette estimation, et la fiabilité finale est renforcée. En revanche, lorsqu'elles sont en désaccord, l'opérateur de combinaison choisi doit permettre de gérer le conflit et donner l'estimation la plus plausible vis-à-vis des fiabilités, sensibilités et imprécisions de chaque information initiale. Notons que dans notre cas, il n'existe pas de corrélations théoriques et/ou analytiques validées entre les mesures observables et les indicateurs recherchés, et nous n'avons donc pas pu nous orienter vers une stratégie d'inversion.

Nous disposons ici de 80 observables mesurés, issus de diverses techniques de CND (US, radar, thermographie infrarouge, impact écho, résistivité électrique...) mises en œuvre par les différents partenaires du projet, sur diverses éprouvettes de différentes natures de béton. La grande quantité de données expérimentales a permis d'établir des corrélations empiriques entre observables et indicateurs. Chaque mesure d'observable (telle que la vitesse des ondes ultrasonores, la résistivité, l'amplitude radar...) est donc susceptible de fournir une estimation des indicateurs recherchés. Cette estimation est plus ou moins précise, et avec une confiance plus ou moins grande. La confiance dépend de la fiabilité et la sensibilité de l'observable à chacun des indicateurs, en fonction de l'allure et de l'incertitude de la corrélation associée.

La stratégie de fusion que j'ai choisi de développer était basée sur la **théorie des possibilités** (Dubois and Prade, 1994; Bezdek et al., 1999; Delmotte, 2000; Bloch, 2003), très utilisée dans le cas de données imprécises et incertaines (théorie des ensembles flous), et qui permet de gérer les conflits éventuels. Elle permet de plus une grande liberté en termes de modélisation des connaissances et de choix d'opérateurs de combinaison. Cette grande liberté nécessite toutefois de faire les bons choix à chaque étape du processus de fusion, afin d'obtenir un résultat logique et qui réponde aux attentes du problème posé. Ces choix ont été faits en discussion avec l'ensemble des partenaires du projet.

Un exemple de résultat est illustré sur la Figure 4.27 : la combinaison de l'ensemble des estimations fournit une distribution globale de degré de possibilité de chaque couple de valeurs d'indicateurs. Le maximum fournit donc les valeurs d'indicateurs les plus plausibles.

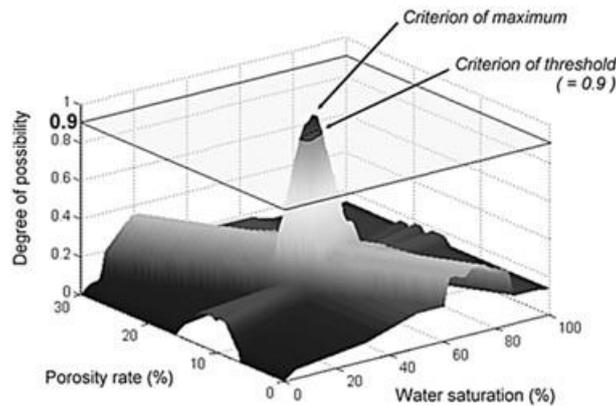


Figure 4.27. Exemple de résultat de fusion pour deux indicateurs : taux de porosité et degré de saturation en eau

Tous les essais de fusion à partir de la grande base de données disponible ont globalement montré que les estimations résultant de la fusion de données étaient très proches des mesures (semi-)destructives de validation, ce qui a validé la méthodologie mise en place.

Seule une série d'éprouvettes a toujours eu un comportement à part, avec de grands écarts entre fusion et mesure. Ces écarts provenaient de la grande différence de nature des granulats utilisés pour cette gâchée particulière de béton, montrant les limites de la méthode, qui fonctionne bien si les corrélations empiriques établies correspondent au béton étudié.

Ces travaux ont donné lieu à la publication de deux articles de recherche (Breyse et al., 2009; Ploix et al., 2011), ainsi qu'à la participation à plusieurs congrès nationaux et internationaux. Ils ont par ailleurs été poursuivis au LCND dans le cadre d'autres projets (comme le projet ANR EvaDéOS : Evaluation non destructive pour la prédiction de la Dégradation des structures et l'Optimisation de leur Suivi).

4.5.2. Evaluation des composites épais

L'aéronautique fait également partie des domaines demandeurs de travaux de recherche en CND. En effet, les matériaux composites sont très utilisés, en particulier pour leurs meilleures propriétés mécaniques à poids égal (par rapport aux matériaux métalliques par exemple), mais leur caractérisation et contrôle sont souvent complexes.

Le projet ANR SISTAE (Simulation et STATistiques pour les Essais non destructifs, 2006-2009), coordonné par le CEA Saclay, se proposait de développer et coupler des outils statistiques et de simulations numériques de CND (intégrés à terme à CIVA). L'approche statistique se traduit par l'établissement de courbes POD (Probability Of Detection), qui donnent la probabilité d'un système non destructif de détecter un défaut d'une taille donnée, en fonction de divers paramètres d'influence (microstructure, géométrie de la pièce, du défaut...). L'approche est basée sur un grand nombre d'essais expérimentaux, souvent très onéreux et parfois difficiles à réaliser, les (nombreux) paramètres d'influence à faire varier n'étant pas toujours maîtrisables, d'où le développement d'outils de simulation.

En ultrasons, l'un des paramètres fondamentaux en vue de la détection d'un défaut est le **rapport signal-sur-bruit** (amplitude de l'écho de défaut / niveau de bruit). Le bruit (outre le bruit électronique) provient de la microstructure de la pièce, qui renvoie de façon non aléatoire de l'énergie vers le capteur au fur et à mesure de la propagation du faisceau ultrasonore dans la pièce.

Le LCND était en charge d'étudier l'origine et la modélisation du bruit de structure dans les matériaux composites, afin de l'intégrer dans CIVA. Deux principaux phénomènes peuvent causer du bruit rétrodiffusé : la diffusion multiple sur les fibres, et la succession de réflexions et transmissions aux interfaces entre les plis. Aux fréquences de contrôle usuelles, et étant donnée la nature des composites étudiés (**multicouches** épais), il est apparu que la principale contribution au bruit de structure est la succession de sauts d'impédance acoustique entre les plis et les interplis.

Parmi les méthodes exactes, plus appropriées pour traiter le problème, nous avons choisi d'utiliser et d'implémenter la méthode de matrice de rigidité récursive de Rokhlin et Wang (Rokhlin and Wang, 2002) (méthode également utilisée pour les ondes de Lamb), car elle est inconditionnellement stable (quelles que soient les épaisseurs et la fréquence), et permet en outre d'introduire et de prendre en compte des épaisseurs quelconques.

Les résultats de modélisation ont montré la présence du phénomène de bandes d'arrêt (bien connu dans les milieux périodiques), la forte influence de la viscosité dans ce type de matériau, et l'influence non négligeable de la variation des épaisseurs de plis (cf. Figure 4.28).

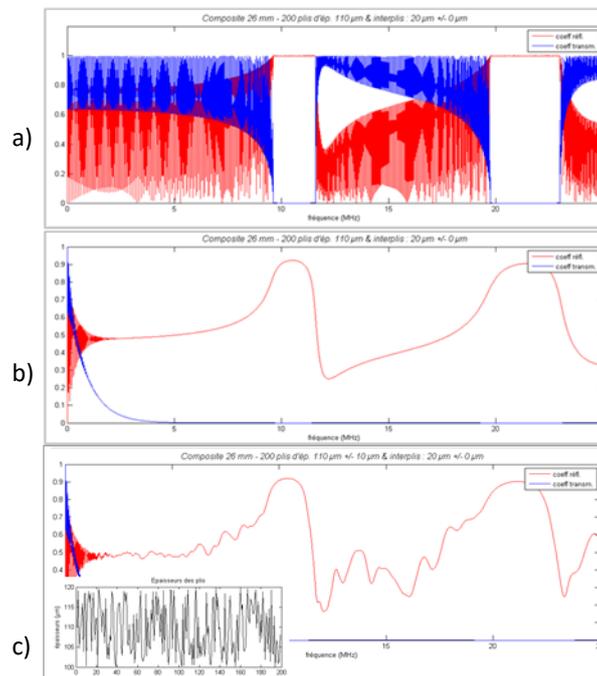


Figure 4.28. Réflexion (rouge) et transmission (bleu), en fonction de la fréquence, d'un multicouche composite :
 a) épaisseurs constantes et matériaux non visqueux,
 b) avec viscosité, c) avec viscosité et épaisseurs des plis variables entre 100 et 120 µm

Ces travaux ont été pris en compte dans CIVA pour l'amélioration de la modélisation du bruit de structure pour les matériaux composites. Ils ont par ailleurs fait l'objet de plusieurs communications.

4.5.3. Synthèse

Ces travaux sur d'autres matériaux que les matériaux métalliques ont donné lieu à la publication de trois articles de recherche (Breysse et al., 2009; Lillamand et al., 2010; Ploix et al., 2011), et à la participation à plusieurs congrès nationaux et internationaux.

Ces travaux ont montré que les problèmes rejoignent ceux rencontrés pour tous les matériaux de structure, et que les solutions peuvent donc être identiques, mais qu'il est là encore indispensable de bien connaître le matériau réel. Cela m'a donc apporté des compétences complémentaires. En particulier, la fusion de données est une porte d'entrée à l'intelligence artificielle, et c'est un excellent outil d'aide à la décision pour les cas où les sources d'informations sont nombreuses, complexes et relativement incertaines.

5. Contrôlabilité de matériaux métalliques macroscopiquement homogènes

Cette dernière thématique fait partie de travaux au long cours, qui n'ont malheureusement pas pu être publiés, soit pour cause de confidentialité, soit car les résultats demandent des vérifications complémentaires. Ils montrent cependant que la solution aux problèmes posés implique de s'intéresser aussi bien à la propagation ultrasonore qu'à la structure du matériau à différentes échelles, en lien avec son procédé de fabrication et/ou ses sollicitations durant sa mise en service. C'est la notion de contrôlabilité qui est ainsi mise en évidence.

La **contrôlabilité** (toutes techniques confondues, mais essentiellement ultrasonore) des matériaux a émergé de l'expérience du LCND sur divers travaux depuis de nombreuses années, ainsi que des discussions du Groupe de Travail Thématique (GTT), constitué de personnes du CEA, d'EDF, d'AREVA et du LCND (déjà évoqué p. 66). Nous avons élargi l'idée de règles de conception pour les CND (RC-CND) à l'idée de règles d'élaboration des matériaux (RE-CND). Pour cela, il faut connaître l'influence des paramètres de fabrication des matériaux sur la microstructure, et donc le contrôle non destructif.

Outre les soudures (chapitre 3), des structures et matériaux métalliques complexes sont également amenés à être contrôlés par ultrasons. L'objectif du CND industriel à la fabrication est d'abord de vérifier que les pièces ne présentent pas de défaut, et qu'ensuite la pièce finale sera contrôlable tout au long de sa vie, car présentant une atténuation compatible avec la détection des défauts rédhibitoires.

Les métaux ont la spécificité d'être des matériaux **polycristallins**. Même s'ils sont souvent considérés comme macroscopiquement homogènes, les caractéristiques de leur **microstructure** (grains, dislocations, macles, précipités etc., cf. exemple Figure 5.1) résultent du procédé d'élaboration du matériau et des sollicitations durant la vie en service, et influent sur la propagation ultrasonore. Pour un CND industriel recherchant des défauts plutôt grands, ces matériaux sont considérés comme quasiment parfaits, et ne demandent aucune attention particulière. Mais dès que les critères sont plus sévères dans la détection de petits défauts, ou plus précis dans leur localisation et dimensionnement, la microstructure prend de l'importance, et la bibliographie ne donne pas toujours d'informations claires sur leur influence.

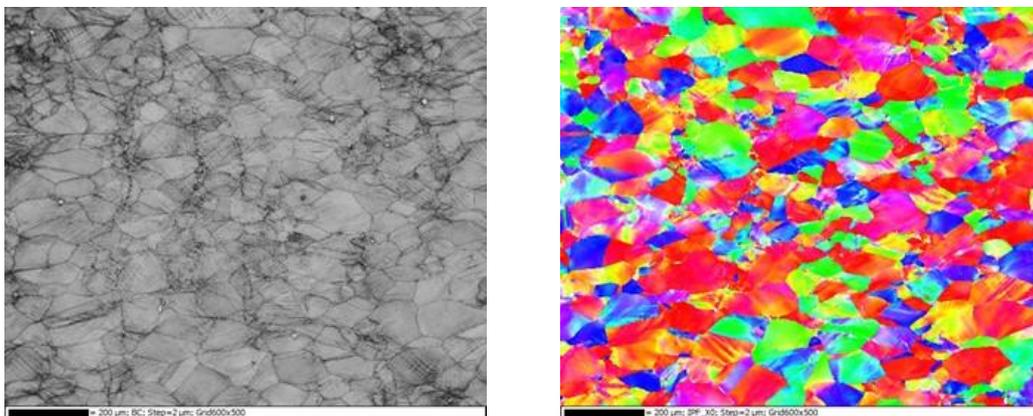


Figure 5.1. Exemple de microstructure (micrographie et EBSD) d'un matériau polycristallin (acier inoxydable écroui)

Les effets de la microstructure sur la propagation ultrasonore dépendent du rapport entre la longueur d'onde et la taille des hétérogénéités du matériau. Dans la littérature, il est classiquement admis que les paramètres ayant des effets d'ordre 1 dans les métaux sont la taille des grains et la texture cristallographique. Pour les autres paramètres, à savoir les inclusions, les précipités, les macles et les dislocations, la littérature est beaucoup plus pauvre, voire inexistante bien que leur influence soit parfois non négligeable. Les inclusions et les précipités désignent des éléments étrangers au métal environnant. Quant aux macles et aux dislocations, il s'agit de défauts d'empilement internes du réseau cristallin. Les théories et autres travaux expérimentaux de la littérature, lorsqu'ils existent, sont parfois insuffisants et échouent à expliquer les observations sur certains cas réels, comme nous avons pu le constater dans nos études. Il nous est alors apparu nécessaire de comprendre les écarts constatés.

Notre démarche consiste à étudier systématiquement la réalité du matériau, en essayant d'analyser les paramètres un par un, en fonction de son élaboration, et les caractéristiques mécaniques et acoustiques qui peuvent s'écarter des hypothèses théoriques. Le but est de comprendre la propagation ultrasonore constatée et donc les phénomènes particuliers observés. Nous verrons l'originalité de cet axe de recherche, mais également ses limites : il est très difficile d'isoler les paramètres d'influence, et les échelles d'observation et de compréhension étant diverses, de l'échelle du grain ou de l'ensemble de grains à la structure atomique (défauts d'empilement, dislocations...), ces travaux sont complexes, et toujours en cours.

5.1. Exemple d'un cas industriel complexe

Commençons par un exemple industriel complexe, représentatif de la problématique de contrôlabilité. Nous reviendrons ensuite en détails sur chaque paramètre. L'AIM1 (*Austenitic Improved Material #1*, 15Cr15Ni-MoMnSiTi, ou 15-15Ti-AIM1) est un acier austénitique étudié par le CEA (dans le cadre du projet MACNA) pour être utilisé pour la fabrication des crayons combustibles dans les réacteurs refroidis au sodium liquide (RNR-Na). Les pièces sont issues de ronds forgés, et sont contrôlées à réception afin de vérifier qu'elles respectent des spécifications de contrôle ultrasonore, c'est-à-dire que le niveau d'atténuation et de bruit sont acceptables. Or le CEA se trouve face à un certain nombre de rebuts. Pour éviter ces rebuts, il est nécessaire de comprendre d'où viennent les écarts aux spécifications (en particulier atténuation trop importante), et donc analyser le lien entre le procédé d'élaboration et la microstructure obtenue, donc la propagation ultrasonore.

Pour faire une étude que nous espérons systématique, nous avons élaboré un plan d'expérience avec le Laboratoire de Technologie des Matériaux Extrêmes (DEN/SRMA) du CEA Saclay. Huit pièces ont été extraites d'un même rond forgé (fourni par Aubert&Duval). Six de ces pièces ont subi divers traitements thermiques et/ou mécaniques, afin d'obtenir des microstructures variées, les deux autres sont laissées brutes de réception. Le plan d'expérience prévoit :

- des pièces brutes de réception,
- des pièces hypotremées à différentes températures, afin de faire varier les **tailles de grains**. Elles auront également des **macles thermiques**,
- des pièces écrouies, afin d'induire des **textures cristallographiques** et **morphologiques**, plus ou moins marquées selon le degré d'écrouissage, ainsi que des **dislocations**. Elles auront également des **contraintes résiduelles**,
- des pièces écrouies puis hypotremées, pour réduire les textures induites par l'écrouissage.

Des mesures ultrasonores ont été réalisées sur chacune des pièces, et des analyses approfondies de la microstructure ont été menées sur des petits cubes prélevés dans chaque pièce (cubes bleus à gauche dans le Tableau 5.1) : micrographie, EBSD, DRX et dureté (analyses réalisées à Saclay, au Laboratoire MSMP de l'ENSAM, et au LMA).

❖ **Résumé de l'analyse métallurgique des pièces**

Le Tableau 5.1 résume les informations métallurgiques de chacune des pièces. A noter que les pièces brutes de réception (notées A12 et B21) présentent des gradients de tailles de grain d'un bord à l'autre (d'environ 30 µm à 80 µm). Et les pièces écrouies doivent également comporter des macles mécaniques, mais elles sont trop petites pour être détectées sur nos analyses. Les macles détectées et reportés dans le tableau sont les macles thermiques.

Réf.	Repère	Etat métallurgique	Taille de grain (µm)	Ecart-type	Texture cristallo. ?	Indice de texture I	Texture morpho. ?	Aspect ratio	Taux de macles Σ3 (%)	Moyenne LocMis (*)	Précipités	Contraintes rés. Surf. / ¼ e / ½ e (Mises) (MPa)	Dureté (HRA)
A12	Al-G6	Brut de réception (bord)	(B) 66 (C) 33	44 18	Lég. [001] / Z	(B) 1.5 (C) 1.2	Non	(B) 0.64 (C) 0.64	(B) 18 (C) 22	(B) 0.5 (C) 0.9			(B) 45 (C) 49
B21			(B) 29 (C) 85	16 57	Lég. [001] / Z	(B) 1.2 (C) 1.8	Non	(B) 0.65 (C) 0.61	(B) 20 (C) 22	(B) 1.2 (C) 0.9			(B) 50 (C) 44
A11	Al-G0/1	Hypertrempé à T1	490	410	Non	1.6 (?)	Non	0.6 (?)	59	0.6			40
B11	Al-G4/5	Hypertrempé à T2<T1	49	42	Non	1.3	Non	0.62	35	0.9			46
B22	Al-ε23%	Brut de réception, écroui par laminage à froid	(B) 30 (C) 33	25 30	(B) Lég. [111]/X(B) (C) Lég. [001]/X(C)	(B) 1.2-2 (C) 1.2-1.8	Légère / X	(B) 0.48-0.58 (C) 0.52-0.57	(B) 10 ? (C) 10 ?	(B) 2 (C) 2			(B) 65 (C) 64
B12	Al-ε62%	Brut de réception, écroui par laminage à froid	(B) 200x100x40 (C) 110x60x30		Plutôt [101] et [111] / Z	(B) 2 (C) 2.4	Oui / X	(B) 0.32-0.53 (C) 0.37-0.54	(B) 19 ? (C) 19 ?	(B) 2.2 (C) 2.3		(B) 60 / 60 / 100 (C) 140 / 60 / 100	66
B13	Al-ε62%-G7/8	Brut de réception, écroui par laminage à froid + hypertrempé à T3<T2	(B) 17 (C) 19	11 12	(B) [001]/X et [101]/Z (C) idem	(B) 1.6-2 (C) 2.2	Non	(B) 0.66 (C) 0.67	(B) 33 (C) 35	(B) 0.2 (C) 0.2		(B) 60 / 40 / 200 (C) 75 / 40 / 250	39
B23	Al-ε23%-V	Brut de réception, écroui par laminage à froid + vieilli 72h à T4<T3	(B) 30 (C) 17	26 12	Lég. [111] / X	(B) 1.3-2.1 (C) 1.1-1.7	Légère / X	(B) 0.54 (C) 0.55	(B) 12 (C) 12	(B) 1.9 (C) 2.1			(B) 65 (C) 65

Tableau 5.1. Pièces d'AIM1 : état métallurgique et résultats des analyses de la microstructure

❖ **Résumé de l'analyse des mesures ultrasonores**

La procédure expérimentale a consisté à réaliser des acquisitions de type Cscan (balayage suivant deux directions), en transmission (incidence normale, en ondes longitudinales), les deux capteurs se déplaçant de manière synchronisée. En chaque point de chaque pièce, on a estimé la vitesse de groupe et l'atténuation à la fréquence maximale. Et au centre de la pièce, on a calculé la vitesse de phase (par déroulement de phase) et l'atténuation en fonction de la fréquence. A noter que l'atténuation a été mesurée non pas de manière absolue (nous avons vu la complexité au paragraphe 3.3), mais de manière à ce que toutes les mesures réalisées soient comparables entre elles, en relatif. Ces mesures ont été réalisées sur quatre bandes fréquentielles, autour de 1 MHz, 2,25 MHz, 5 MHz et 10 MHz.

Les principaux résultats de cette vaste campagne expérimentale sont tracés sur la Figure 5.2 en termes de vitesses de phase et d'atténuation. On voit que les différentes microstructures exercent une forte influence

sur la propagation ultrasonore : les vitesses varient sur une plage d'environ 250 m/s selon la pièce observée, et les courbes d'atténuation sont très différentes les unes des autres.

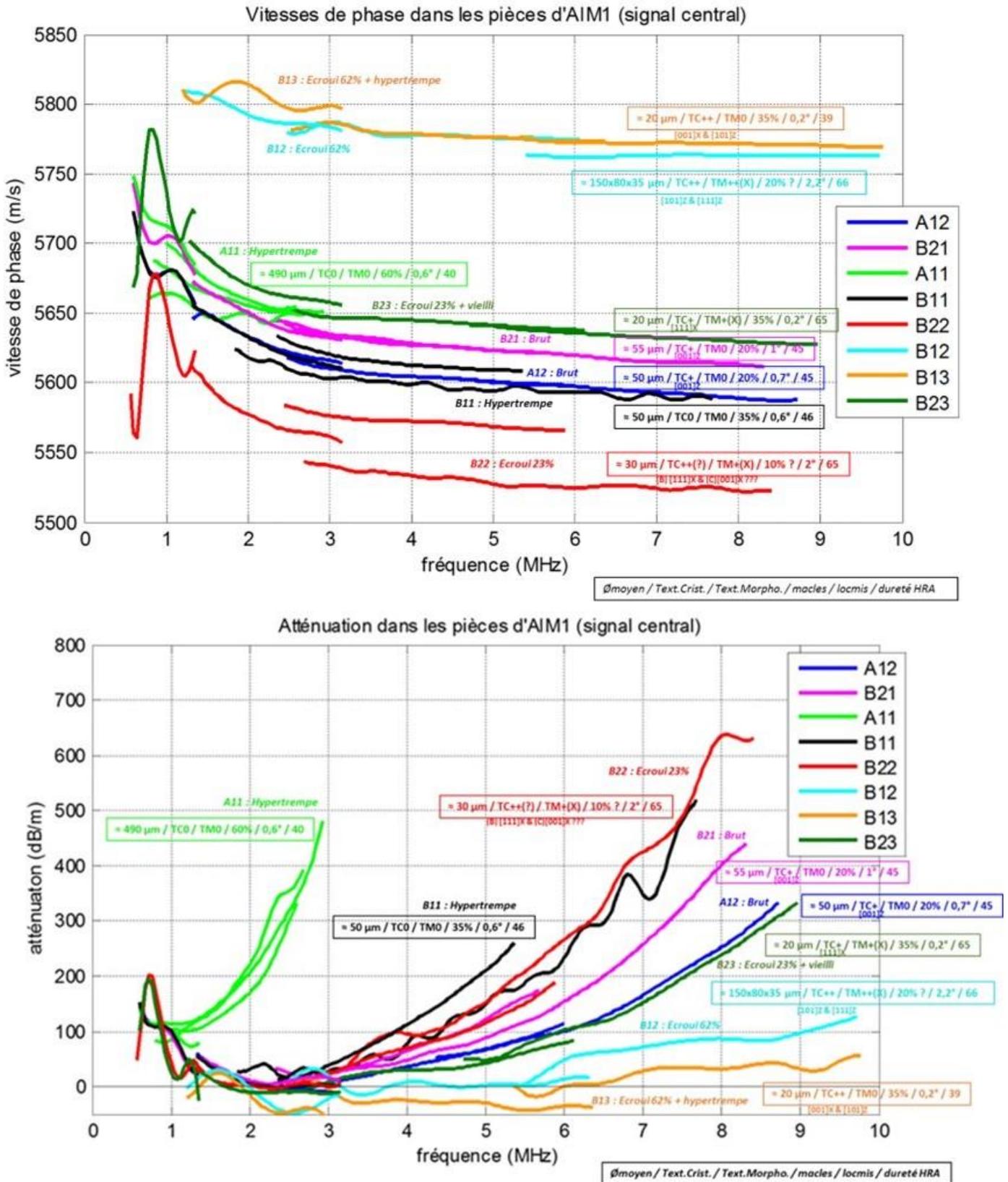


Figure 5.2. Synthèse des vitesses de phase (en haut) et des atténuations (en bas) mesurées sur les pièces d'AIM1

Notons que le paramètre $k\bar{d}$ a été évalué : on se situe dans tous les cas à des valeurs de $k\bar{d}$ inférieures à 0,5, donc dans le régime de Rayleigh, à l'exception de la pièce à gros grains (A11) qui est majoritairement en régime stochastique voire géométrique. La mesure à 10 MHz n'a d'ailleurs pas été possible car le signal était trop atténué.

De manière générale, les vitesses de phase diminuent lorsque la fréquence augmente, et les atténuations ont des allures de loi puissance, ce qui est en accord avec la théorie de la diffusion dans les matériaux polycristallins. Les vitesses les plus élevées et les atténuations les plus faibles sont celles des pièces les plus écrouies (B12 et B13, courbes cyans et oranges). Ce sont les pièces qui présentent une forte anisotropie, avec les axes cristallographiques privilégiés ([111] et [101]) orientés parallèlement à la propagation ultrasonore. On retrouve bien la logique de la théorie de la Figure 5.3 pour la vitesse dans le monocristal, et précédemment sur la Figure 3.23 p. 69 pour l'atténuation.

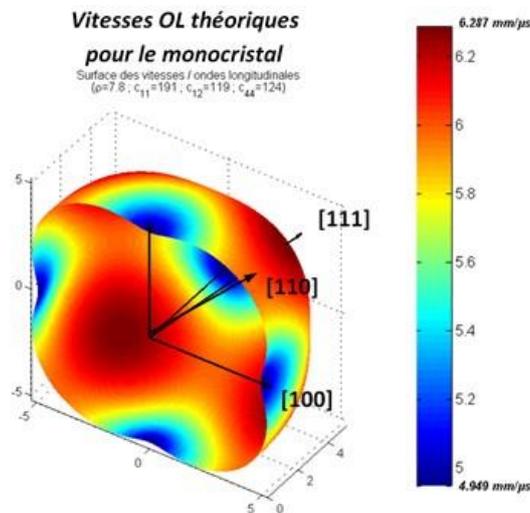


Figure 5.3. Vitesses de phase théoriques dans le monocristal, calculées à partir des C_{ij} mesurées par DRX

On note cependant le comportement à part de la pièce écrouie B22 (courbes rouges), qui présente la vitesse la plus faible et l'atténuation la plus forte (hors A11). Elle est d'après nos analyses métallurgiques très similaire à la pièce B23 (courbes vert foncé), qui a juste un vieillissement en plus. Or la propagation ultrasonore dans ces deux pièces est très différente, et les diverses théories ne parviennent pas à l'expliquer.

C'est pourquoi nous avons ensuite tenté d'étudier chaque paramètre individuellement pour dissocier les effets, en espérant qu'ensuite ils se cumulent simplement, ce qui restera à démontrer. Notons qu'il est très compliqué expérimentalement de ne faire varier qu'un seul paramètre (comme la taille des grains par exemple) car les traitements pour y parvenir peuvent également faire évoluer d'autres paramètres. Et ce point, essentiel, n'est pas toujours vérifié et/ou vérifiable dans les publications.

5.2. Influence des grains

En métallurgie (Barralis and Maeder, 2005; Murry, 2010), un grain (échelle microscopique) est une zone de matière ayant la même structure qu'un monocristal (empilement ordonné d'atomes formant un réseau périodique composé de mailles élémentaires). La solidification naturelle des matériaux métalliques impose la création de multiples grains qui sont donc différents, au minimum par leur orientation de réseau. Dans un tel matériau polycristallin, le joint de grain désigne l'interface entre deux grains.

5.2.1. Influence des tailles de grains

Comme nous l'avons abordé au chapitre 2 (paragraphe 2.3.5, p. 40), l'influence de la **taille des grains** seule sur la propagation ultrasonore est bien connue. Un grand nombre de travaux dans la littérature a été mené, aussi bien théoriquement qu'expérimentalement.

On note toutefois que la plupart des travaux portent sur les conséquences sur l'atténuation (et souvent le bruit de structure associé). Assez peu de travaux concernent la vitesse. Les théories, développées dès les années 1950, concernent les matériaux polycristallins macroscopiquement isotropes (grains équiaxes aléatoirement orientés) (Mason and McSkimin, 1948; Papadakis, 1959; Bhatia, 1959; Hirsekorn, 1982; Stanke and Kino, 1984; Weaver, 1990; Nicoletti et al., 1992; Kube and Turner, 2015b). Elles ont ensuite été étendues aux cas texturés (grains présentant une orientation privilégiée, équiaxes ou allongés) (Hirsekorn, 1986; Turner, 1999; S. Ahmed et al., 2003; Yang et al., 2011; Li and Rokhlin, 2015). Elles prévoient, comme montré précédemment sur la Figure 2.6 p. 41, que dans le domaine de Rayleigh la vitesse diminue et l'atténuation augmente lorsque la taille moyenne des grains augmente.

On a pu confirmer cela sur les pièces d'AIM1, en particulier sur les cartographies réalisées sur les deux pièces présentant un gradient de tailles de grain (cf. Figure 5.4 ci-dessous).

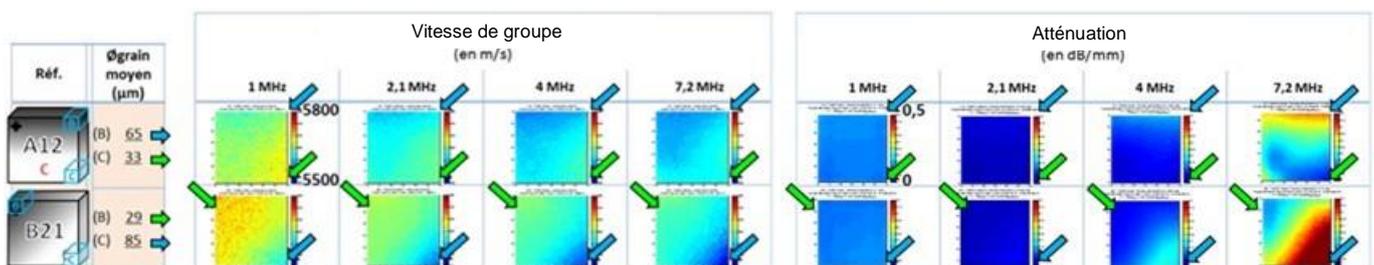


Figure 5.4. Cartographies des vitesses de groupe (à gauche) et des atténuations (à droite) sur les pièces avec gradient de taille de grains (toutes les échelles de couleurs sont identiques)

Cinq nouvelles pièces d'AIM1 ont été réalisées et traitées avec le CEA (SRMA), dans le but de faire varier uniquement la taille des grains. Pour cela, des hypertrempes ont été appliquées, à différentes températures, et avec des temps de palier et de cycle thermique plus ou moins long.

La Figure 5.5 montre les **distributions de tailles de grains** obtenues pour chacune des 5 pièces. On remarque que plus la taille moyenne est élevée, plus la distribution est étalée.

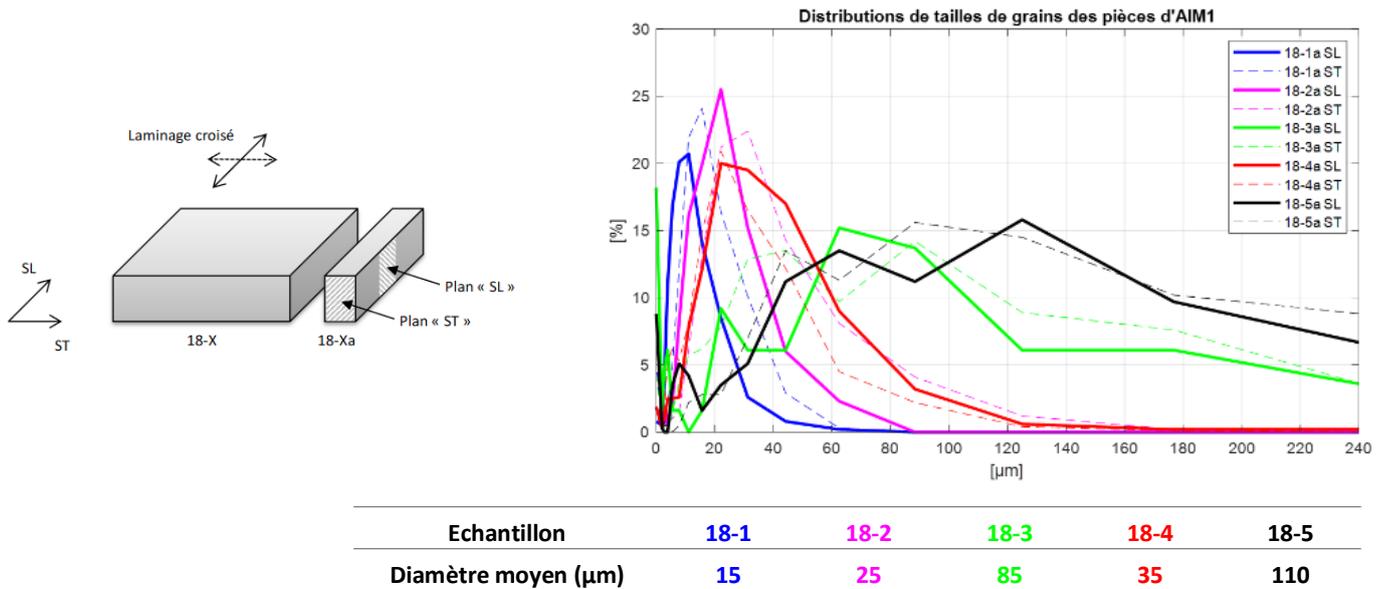


Figure 5.5. Distributions et moyennes des tailles des grains suite aux analyses micrographiques des cinq échantillons suivant deux plans

Deux échantillons ont subi des analyses EBSD : on a vérifié que les paramètres autres que la taille de grain n'ont pas évolué, et on a pu noter que ces deux échantillons présentaient une légère texture, similaire à celle des pièces B22 et B23 de l'étude précédente. Des mesures de dureté Vickers (HV5) ont également été réalisées sur les cinq pièces. Comme attendu, on note une relation inverse entre la taille de grains et la dureté (Bergstrom and Hallen, 1983) : plus les grains sont petits, plus la dureté est grande, et inversement.

Les mêmes mesures de vitesse et atténuation ultrasonores que précédemment ont alors été réalisées. Trois campagnes de mesures ont été réalisées (au fur et à mesure de la disponibilité des pièces), ce qui a permis de vérifier la bonne reproductibilité des mesures. Les résultats sont tracés en fréquentiel sur la Figure 5.6, et en fonction de la taille moyenne des grains sur la Figure 5.7.

On peut en conclure que :

- la décroissance de la vitesse en fonction de la fréquence semble confirmer la théorie de la diffusion, avec un début d'inflexion à l'approche du domaine stochastique ($k\bar{d}$ est proche de 1 pour la pièce 18-5, courbe noire, aux hautes fréquences),
- la croissance observée de la vitesse en fonction de la taille des grains (puis décroissance pour les plus gros grains) est à l'inverse de la théorie et des quelques résultats expérimentaux de la littérature (Palanichamy et al., 1995; Li et al., 2015; Chen et al., 2019) et aussi des essais précédents (Figure 5.4),
- l'atténuation présente un comportement classique et conforme à la bibliographie, que ce soit en fonction de la fréquence (loi polynomiale en f^4) ou en fonction de la taille des grains (plutôt linéaire). Seule la pièce 18-2 semble s'en écarter, en présentant une atténuation plus importante qu'attendu.

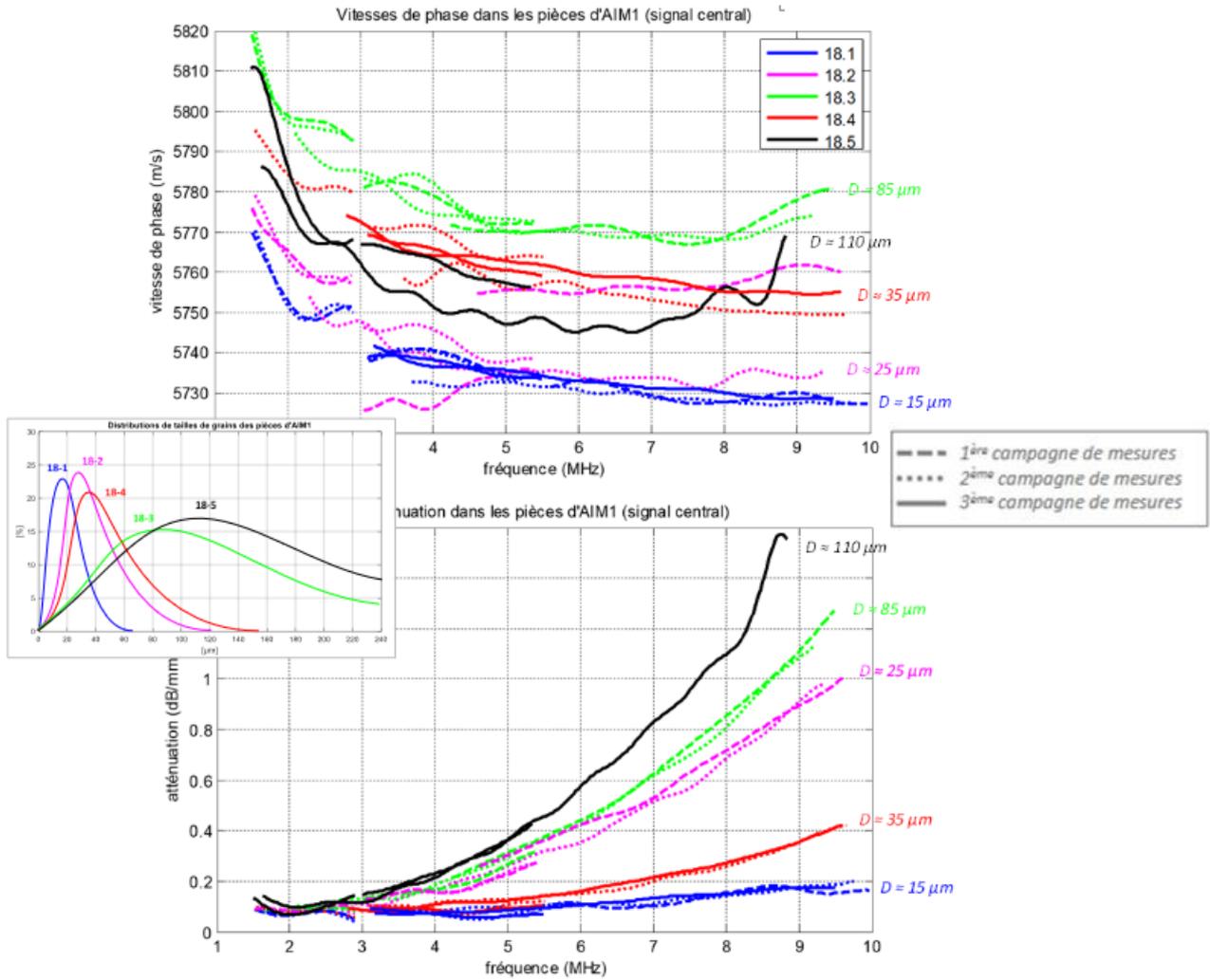


Figure 5.6. Vitesses de phase (en haut) et atténuations (en bas) du signal au centre de chaque pièce en fonction de la fréquence (à gauche : rappel schématique des distributions des tailles de grains)

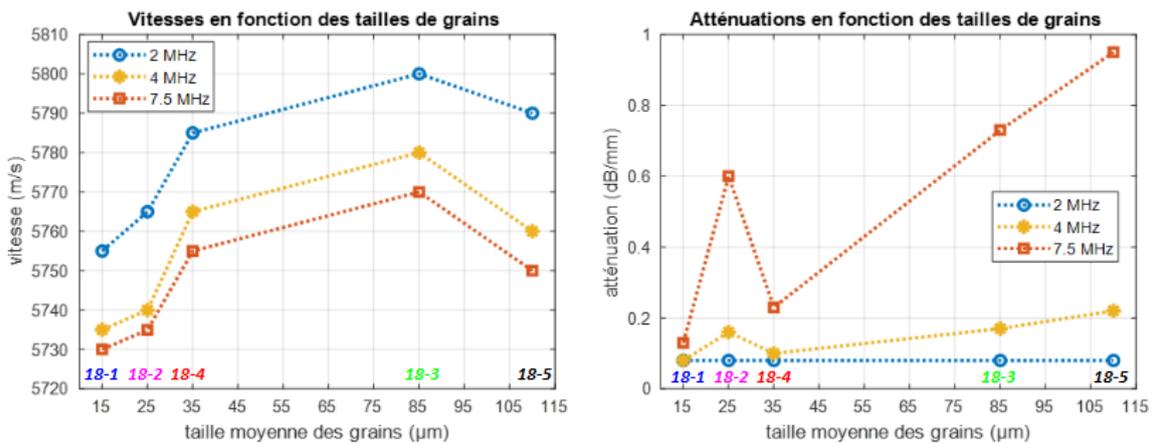


Figure 5.7. Vitesses (à gauche) et atténuations (à droite) représentées en fonction de la taille des grains

En résumé, nos résultats ont plutôt tendance à confirmer les travaux de la bibliographie, mais quelques résultats s'en échappent. On peut noter que, grâce aux avancées en termes de capacités informatiques, des travaux numériques récents de la bibliographie (Van Pamel et al., 2015, 2018) démontrent que l'allure de la distribution a des conséquences importantes sur la propagation ultrasonore, en particulier sur l'atténuation.

Le diamètre moyen des grains n'est donc pas une donnée suffisante pour prévoir l'atténuation dans une pièce, et ces travaux montrent les limites des théories. Nous avons en perspective de continuer ces études avec nos partenaires.

5.2.2. Influence des joints de grains

Le cadre des études réalisées en collaboration avec Sonaxis et CreusotForge (travaux confidentiels) était le contrôle des branches chaudes et froides du circuit primaire des centrales nucléaires actuelles (branches entre cœur – pompe primaire – générateur de vapeur). La problématique dans laquelle s'inscrivait cette étude concerne la capacité de détection de défauts de petites tailles (de l'ordre de 3 mm) dans des pièces en acier inoxydable forgé de grandes dimensions. Les pièces d'acier inoxydable concernées ayant subi plusieurs processus de forgeage successifs, leur microstructure est constituée de gros grains, de diamètre moyen de l'ordre de 0,7 à 1 mm, mais pouvant atteindre localement quelques millimètres.

Nous avons alors étudié les performances de la méthode de traitement de données ultrasonores « DTVG » pour détecter des défauts artificiels (trous à fond plat TFP) usinés à différentes profondeurs dans des cales étalons. La méthode DTVG a été mise au point au LCND par Gilles CORNELOUP (LMA) dans les années 1990 (Corneloup et al., 1996). Son principe repose sur l'analyse automatique des images ultrasonores, en traduisant les connaissances de l'expert lorsque celui-ci interprète une image « espace-temps » de type Bscan, en particulier les stabilités temporelles (« DT ») et spatiales (« VG ») typiques de la présence d'un défaut.

La méthode DTVG a été adaptée ici, et la fiabilité de la détection a été améliorée. Nous avons alors constaté des indications de même amplitude qu'un TFP dans une zone saine de la pièce. Afin de comprendre l'origine de ces indications, les pièces ont alors été découpées et analysées aux endroits de ces indications. Les radiographies ont confirmé l'absence de défaut de type fissure, porosité ou inclusion. L'étude métallurgique (analyses micrographiques et EBSD) a montré que le matériau présentait deux populations de grains globalement équiaxes : des très gros (2 à 3 mm, voire 5 mm), et aux joints de ces gros grains, des réseaux de petits grains (centaine de microns). Les gros grains présentaient une orientation cristalline préférentielle (texture cristallographique), alors que les petits grains avaient des orientations plus aléatoires. On a aussi remarqué la forte présence de macles.

On a alors pu montrer qu'un écho d'assez forte amplitude (autant qu'un TFP) était causé par un **grand joint de grain** (de plus de 2mm, zone B sur la micrographie de la Figure 5.8), parallèle à la surface de la pièce. Ceci peut donc induire des fausses alarmes lors d'un contrôle.

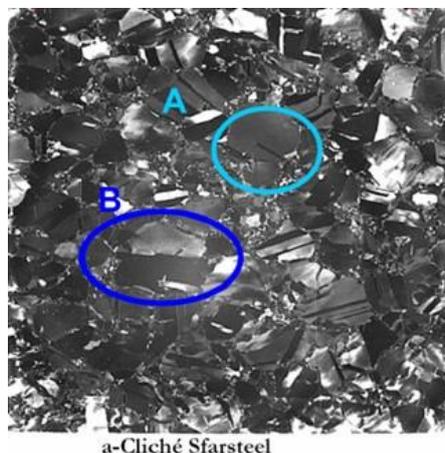


Figure 5.8. Micrographie de la pièce à l'endroit de l'indication ultrasonore : grand joint de grain dans la zone B

5.3. Influence des macles

Une macle est un basculement déterministe de l'orientation cristallographique d'une partie (bande) du grain (cf. Figure 5.9) (Baïlon and Dorlot, 2000). Par exemple, dans les structures c.f.c. (cubiques à faces centrées), une macle sera reliée à son orientation d'origine par une rotation de 60° autour de l'axe $[111]$. C'est grâce à cette caractéristique qu'elles sont détectées et classifiées automatiquement lors d'une analyse EBSD. Les macles permettent, avec les dislocations, la déformation plastique du matériau. Il y a principalement deux mécanismes de création de macles : le maclage thermique (macles réparties et orientées de manière plutôt aléatoire) et le maclage mécanique (macles plutôt orientées dans une même direction, en lien avec la direction de sollicitation mécanique).

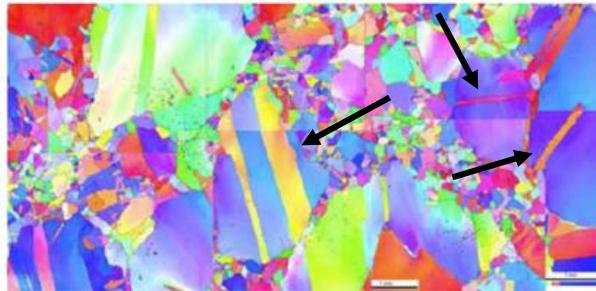


Figure 5.9. Exemple de matériau polycristallin maclé (observation par EBSD)

L'influence des macles sur la propagation ultrasonore est très peu connue et traitée dans la littérature. Quelques articles les mentionnent (Bowyer and Crocker, 1997; Behjati et al., 2011; Garcin et al., 2016), ajoutant qu'elles ont certainement une influence non négligeable, mais aucune publication ne traite spécifiquement de ce paramètre. Dans la mesure où elles semblent « couper » un grain en plusieurs morceaux, on peut imaginer qu'elles ont tendance à modifier la distribution (apparente) de tailles de grains, et à diminuer la taille moyenne. Leur présence devrait donc augmenter l'atténuation, et diminuer la vitesse si l'on est dans le domaine de Rayleigh. De plus, « bien orientée », une macle doit agir comme un réflecteur. Il a été confirmé lors d'une thèse réalisée au LCND (Feuilly, 2009) en collaboration avec EDF, que les macles (sur l'alliage Inconel 600) semblent avoir une influence non négligeable au moins sur l'atténuation, la vitesse n'ayant pas été étudiée.

La question de l'influence des macles manque cruellement de travaux et mériterait vraiment d'être étudiée plus en détails.

5.4. Influence des dislocations

Une dislocation est un défaut linéaire, mobile, correspondant à une discontinuité de la structure cristalline le long d'un plan atomique (cf. Figure 5.10). Les dislocations ont un rôle important dans les propriétés mécaniques d'un matériau : en se déplaçant (glissement), et en se multipliant, ce sont elles, avec les macles, qui sont à l'origine de la déformation plastique (François et al., 1991; Baïlon and Dorlot, 2000). A titre d'exemple, un métal non déformé présente une densité de dislocations relativement faible, mais qui est quand même de l'ordre de 10^4 à 10^6 km/cm^3 . Le même métal fortement déformé aura des dislocations en plus grand nombre, avec pour ordre de grandeur 10^6 - 10^7 km/cm^3 .

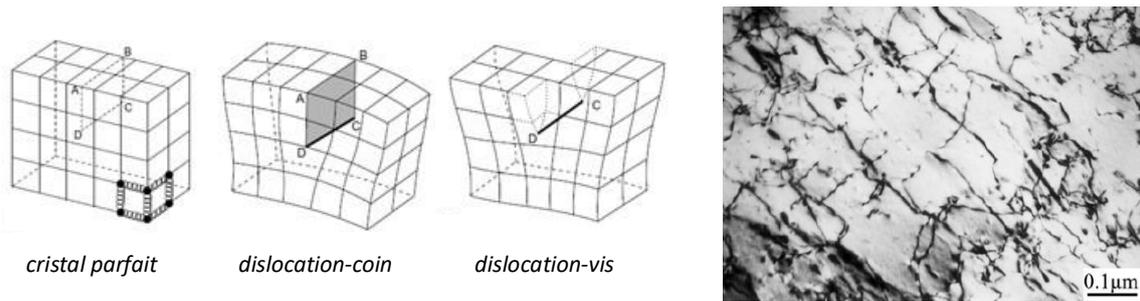


Figure 5.10. Dislocations : à gauche, représentation schématique (Hull and Bacon, 2011), à droite, vues au MET (Behjati et al., 2011)

D'un point de vue propagation ultrasonore, les quelques travaux de la littérature, théoriques (Maurel et al., 2005a, 2005b) et expérimentaux (Prasad and Kumar, 1994; Kenderian et al., 2003; Kim et al., 2008; Behjati et al., 2011; Mujica et al., 2012; Toozandehjani et al., 2015), montrent que les dislocations induisent une perte d'amplitude par absorption et diffusion, et une diminution de la vitesse. Notons que les quelques travaux expérimentaux n'isolent jamais vraiment la quantité de dislocations des autres paramètres.

Nous avons choisi d'étudier l'influence des dislocations, en collaboration avec le CEA Saclay et de laboratoire MSMP de l'ENSAM, en analysant des pièces de cuivre pur, soumises à différents niveaux d'érouissage (en traction) afin de créer des dislocations, puis à un vieillissement pour en éliminer. Des analyses micrographiques et EBSD ont été réalisées afin de connaître la microstructure en termes de taille de grains, de macles, de textures, et de dislocations. Les pièces sont isotropes, et les grains sont de l'ordre de $60\mu\text{m}$ dans l'échantillon initial de référence, et diminue avec l'érouissage, pour atteindre environ $20\mu\text{m}$ dans l'éprouvette la plus érouie. Une cause possible de la diminution de la taille des grains est le fractionnement des grains sous l'effet de l'érouissage, qui peut être dû à la polygonisation des dislocations : les dislocations s'organisent spatialement dans le but de relaxer les contraintes élastiques et minimiser l'énergie du cristal. Elles peuvent alors former des « murs », ou des « cellules », conduisant à des sous-joints de grains (Langlois, 2000; Benchabane, 2009; Buis, 2013). Il est également possible que la diminution observée des tailles de grains soit en réalité due à de macles suffisamment distordues pour être comptées (artificiellement par le logiciel de traitement, et de manière erronée) comme des grains. Ces hypothèses sont difficilement vérifiables de manière précise. En effet, par EBSD, les dislocations s'étudient de manière indirecte, en analysant les distorsions locales du réseau cristallin (petites désorientations, entre 0 et 5° par exemple), à l'intérieur de chaque grain. On obtient alors une distribution de distorsions. Le seul moyen a priori pour observer et quantifier les dislocations est l'utilisation d'un microscope électronique en transmission (MET).

L'érouissage ayant modifié la taille des grains, nous nous sommes affranchis de cette variation en gardant deux pièces érouies, et en leur appliquant un traitement thermique (vieillissement) afin de diminuer la quantité de dislocations. On pourra ainsi comparer les mesures ultrasonores pour chacune des pièces individuellement, avant et après vieillissement. Les distributions de distorsions de réseau avant et après vieillissement, ainsi que les vitesses et atténuations mesurées sont tracées sur la Figure 5.11.

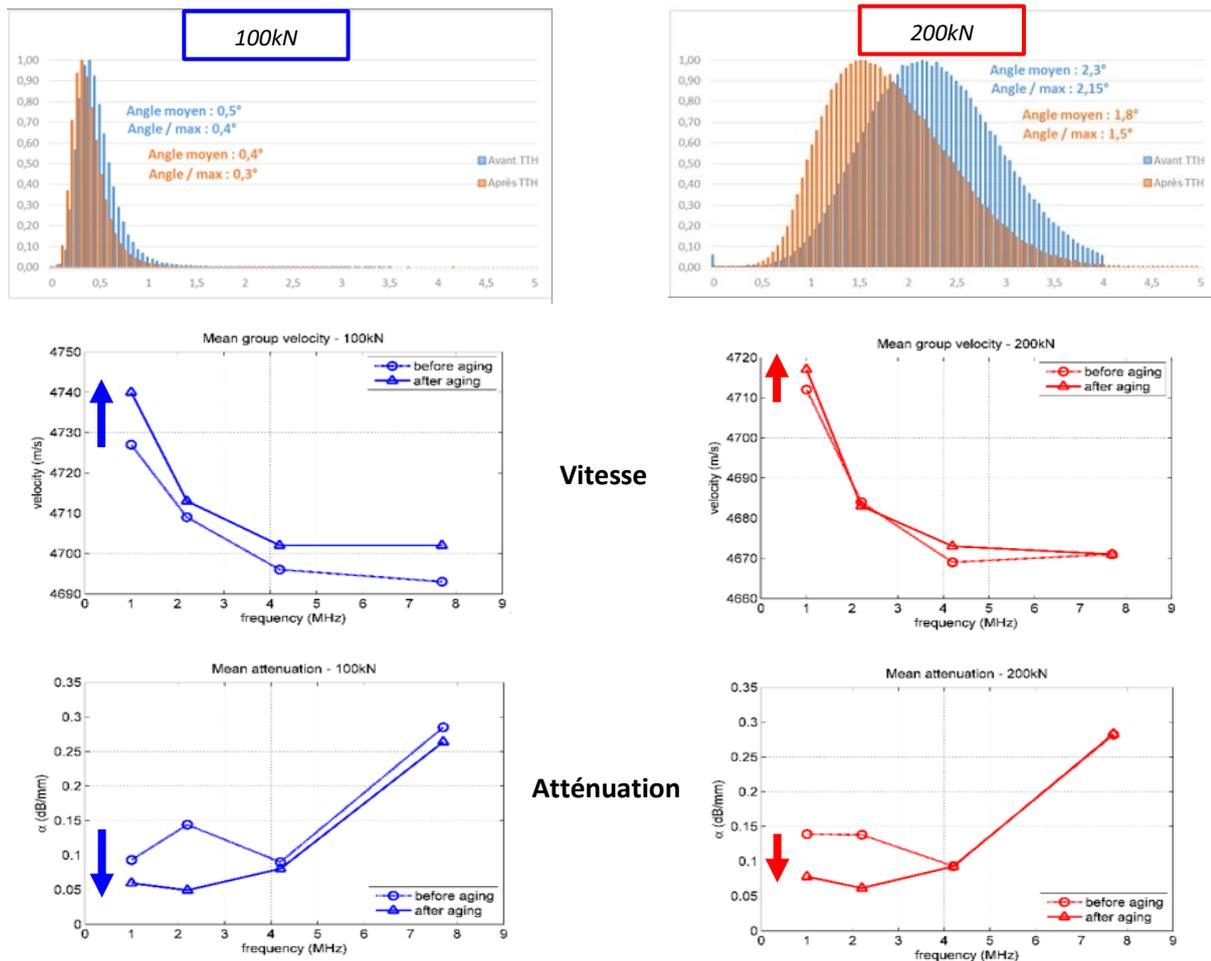


Figure 5.11. Histogrammes des distorsions avant/après vieillissement, et influence sur la vitesse et l'atténuation

Les distributions de distorsions se décalent bien vers des valeurs plus faibles après le traitement thermique, ce qui est le résultat attendu. On ne peut rien affirmer sur l'évolution de la densité de dislocations, même s'il est très probable qu'elle ait diminué de l'ordre de 10-20% (chiffre classique en restauration/maturation), et que ce soient les dislocations mobiles qui aient disparu. Il est aussi possible que leur nature ait changé (mobiles, en sous-joints...), mais ce point ne peut pas être vérifié.

Dans les deux cas, la vitesse présente une légère augmentation, plus marquée dans la pièce 100kN (de l'ordre de 10-15m/s) que dans la pièce 200kN (de l'ordre de 5m/s). Les mesures d'atténuation sont plus délicates, et moins bien reproductibles. L'élimination de dislocations semble tout de même avoir tendance à la faire diminuer.

Ces tendances sur la vitesse et l'atténuation semblent bien confirmer les travaux de la littérature. On conclut également que leur influence n'est pas négligeable, contrairement à ce que l'on aurait pensé au départ.

5.5. Influence des précipités

En métallurgie, la précipitation désigne la germination (ou nucléation) puis la croissance d'une nouvelle phase solide (Barralis and Maeder, 2005). Les précipités peuvent se former aussi bien dans les grains qu'aux joints des grains. Les précipités, s'ils sont plus rigides que la matrice, ont pour effet de durcir la matière. C'est le principe du durcissement par précipitation (cf. Figure 5.12) : la mise en température pendant une certaine durée d'un alliage permet la formation contrôlée de précipités (cohérents ou incohérents avec la matrice) qui auront tendance à offrir une meilleure résistance au déplacement des dislocations, ce qui augmente certaines caractéristiques mécaniques, comme la dureté.

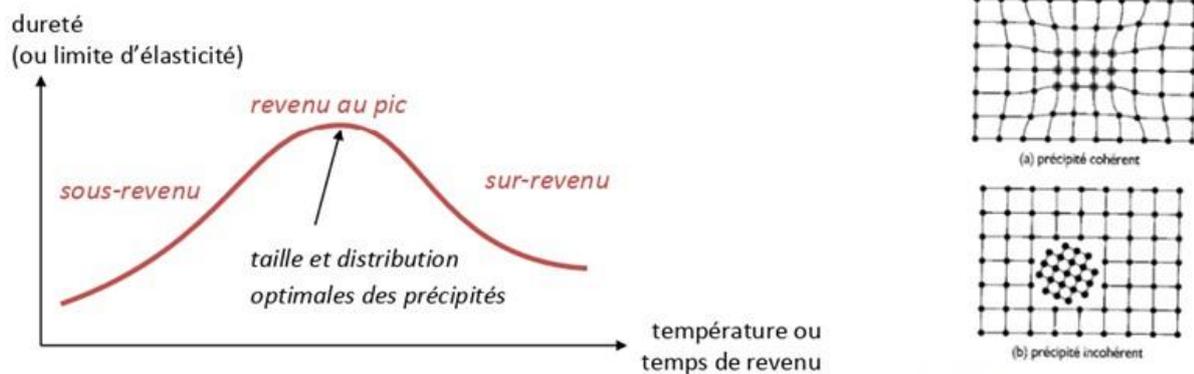


Figure 1.11 – Description des deux états des précipités.

Figure 5.12. Gauche : Schéma de principe du durcissement structural ; Droite : Cohérence des précipités (Murry, 2010)

Les caractéristiques cristallographiques, la taille et la distribution des précipités dans la matrice jouent un rôle fondamental dans le traitement de durcissement structural. Dans la phase de sous-revenu, les précipités formés ont tendance à être petits et cohérents avec la matrice. Dans la phase de sur-revenu, les précipités sont plus gros (se rejoignent) et sont plutôt incohérents.

L'influence des précipités seuls sur la propagation ultrasonore est assez peu étudiée dans la littérature (Kumaran, 2011; Kang et al., 2012; Kim et al., 2014; Thiele et al., 2014). On retiendra globalement que, dans la phase de sous-revenu, l'apparition de précipités va augmenter le module d'élasticité global du matériau, et donc augmenter la vitesse de propagation, tout en augmentant l'atténuation du fait de la diffusion par les précipités. La phase de sur-revenu semble présenter des phénomènes plus complexes, les précipités devenant incohérents, et les conclusions sont moins évidentes.

Le matériau que nous avons choisi ici pour étudier l'influence des précipités est l'alliage de magnésium AM60, pour sa capacité à se mettre en solution et à précipiter aux joints de grains sous l'effet du traitement thermique dit de vieillissement (ou revenu). Il est essentiellement composé d'environ 93% de magnésium et 6% d'aluminium. Les précipités, suite à un traitement thermique, seront majoritairement du $Mg_{17}Al_{12}$ et également un peu de Al_8Mn_5 . Notons que ces deux types de précipités ont un module d'Young supérieur à celui du magnésium.

Nous avons tout d'abord soumis cinq pièces de matériau brut à un recuit et une trempe. Puis quatre pièces ont subi un vieillissement, à 180° , durant 7h, 11h, 16h et 24h respectivement. Les analyses métallographiques ont ensuite été réalisées (cf. Figure 5.13). La pièce brute B est montrée à titre indicatif. En première approche, si l'on considère les niveaux de gris inférieurs à 100, on peut estimer une quantité approximative de précipités

de 1% dans RT à 32% dans RTV24. Les analyses EBSD ont quant à elles montré que toutes les pièces sont isotropes, toutes avec des grains de 115 μm en moyenne (avec un écart-type de 45 μm).

Des essais de micro-dureté ont également été réalisés afin d'identifier à quel stade du durcissement se situe chacune des pièces. La tendance globale observée est une augmentation de la dureté jusqu'au vieillissement d'environ 20h-25h, puis une tendance à diminuer. Ce qui signifierait que l'on est en sous-revenu pour la plupart de nos pièces, et que l'on atteint le revenu au pic aux alentours de 20h. La pièce RTV24 serait donc soit le revenu au pic soit en sur-revenu.

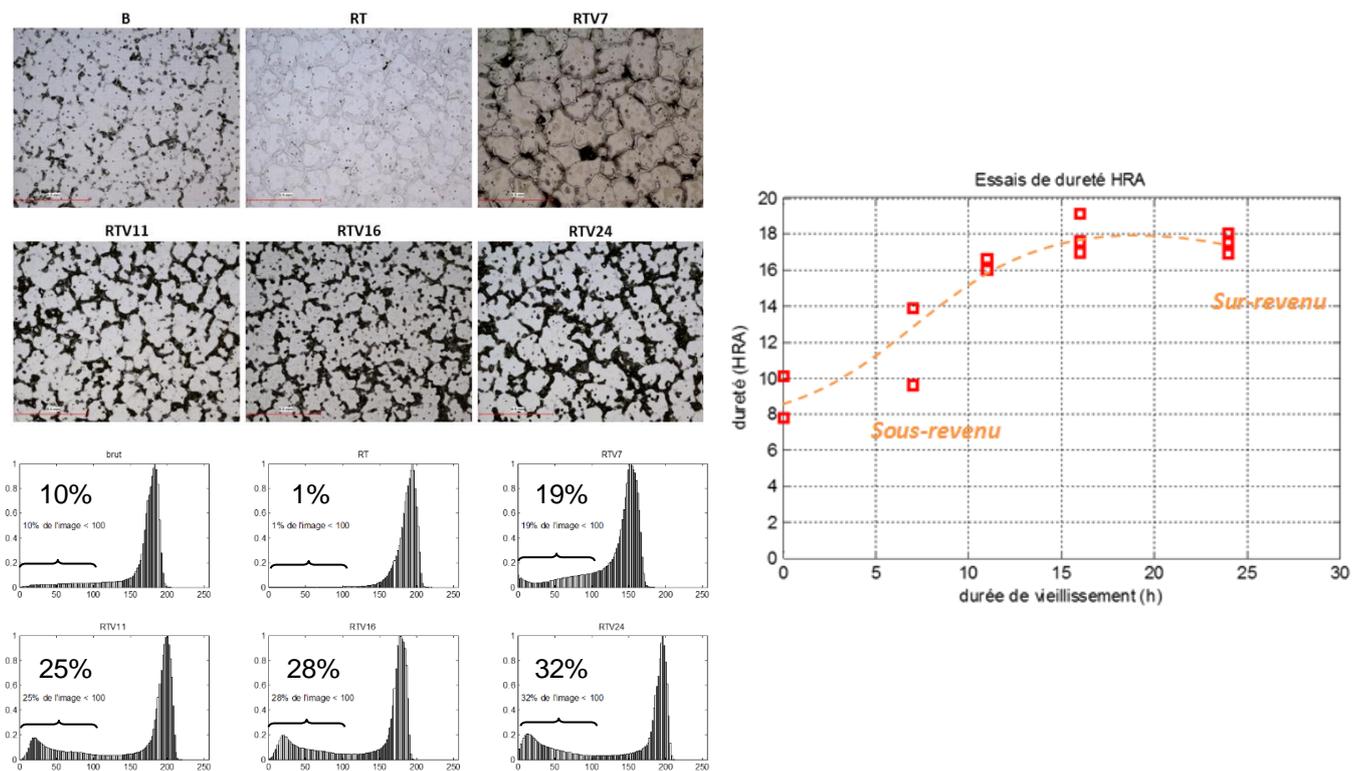


Figure 5.13. Micrographies optiques des pièces d'AM60, analyse des niveaux de gris pour estimer la quantité de précipités, et essais de dureté Rockwell

Les mesures ultrasonores de vitesses et d'atténuation ont été réalisées sur chacune des pièces, toujours avec la même procédure que précédemment. Les résultats sont tracés sur la Figure 5.14. On observe tout d'abord une augmentation de la vitesse de groupe (quelle que soit la fréquence) de l'ordre de 50-80 m/s, jusqu'à un vieillissement d'environ 16h, puis une diminution de 20-50 m/s. Ces variations ne sont pas négligeables. Quant à l'atténuation, elle augmente lorsque la fréquence augmente, mais elle présente une allure plutôt stable en fonction du vieillissement, c'est-à-dire de la quantité de précipités.

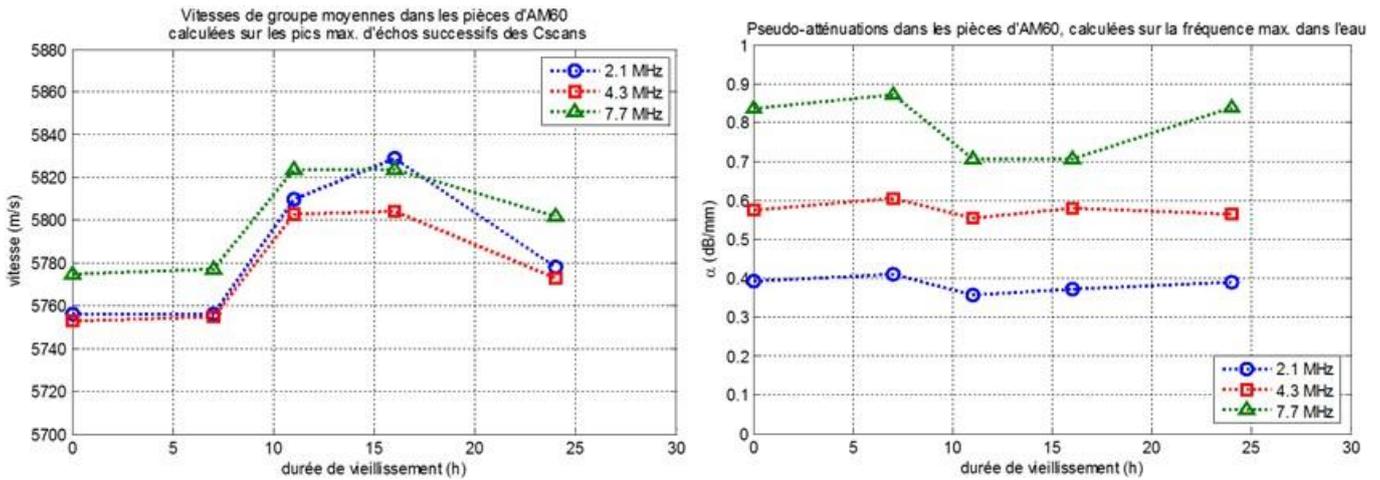


Figure 5.14. Vitesses de groupe et atténuations sur les pièces d'AM60

Là encore, une partie des résultats est en accord avec les travaux de la bibliographie, et une partie s'en échappe, de manière inexplicée. Nous avons donc encore une fois identifié des points de désaccord avec la bibliographie, et nous avons en perspective de continuer ces études avec nos partenaires.

5.6. Influence des contraintes résiduelles

La présence des contraintes fait appel à la notion d'acousto-élasticité, déjà abordée précédemment. Les contraintes résiduelles désignent les contraintes statiques autoéquilibrées existant dans une structure en l'absence de tout chargement extérieur. Elles sont fréquentes dans les métaux, à trois niveaux différents (Barralis et al., 1999).

- Les contraintes résiduelles macroscopiques (dites d'ordre 1) : elles sont plutôt homogènes et s'étendent sur plusieurs grains. Toute modification dans l'équilibre des forces, due par exemple à un enlèvement de matière dissymétrique, se traduit par des variations dimensionnelles macroscopiques à l'échelle de la pièce.
- Les contraintes résiduelles microscopiques (dites d'ordre 2) : elles sont plutôt homogènes, à l'échelle d'un grain ou d'une portion de grain. Elles proviennent dans ce cas de la différence d'orientation cristalline entre grains voisins.
- Les contraintes résiduelles sub-microscopiques (dites d'ordre 3) : elles sont hétérogènes, à l'échelle interatomique, et sont associées aux déformations existant au voisinage des défauts cristallins (dislocations, joints de grains, précipités, etc.).

Elles peuvent être induites par le soudage, l'usage, ou encore la déformation (écrouissage). Elles peuvent être éliminées via un traitement dit de relaxation.

Selon leur répartition et direction, elles peuvent induire de l'anisotropie et/ou de l'hétérogénéité.

Dans le cadre de nos travaux sur l'AIM1, les contraintes résiduelles ont été estimées uniquement sur les pièces d'AIM1 B12 et B13, par analyse DRX. Des niveaux non négligeables de contraintes ont été mesurés, jusqu'à 250 MPa, dans la direction de laminage, donc perpendiculaires à la direction de propagation (et de polarisation) ultrasonore dans notre cas.

Si l'on se réfère à la théorie, une contrainte uniaxiale de 200 MPa implique une variation de la vitesse de 2 m/s par rapport au cas sans contrainte. Et Kube et Turner (Kube and Turner, 2016) montrent que les contraintes uniaxiales ont un impact sur le coefficient de diffusion, donc sur l'atténuation. Malheureusement dans notre cas, contrainte et anisotropie se combinent et leurs effets ne peuvent pas être dissociés. On ne peut donc rien confirmer pour l'instant. Mais c'est un paramètre, souvent négligé, qu'il faudra étudier.

5.7. Synthèse et perspectives

Le contrôle ultrasonore de certains métaux pose parfois des difficultés dues aux différents modes d'élaboration. Le matériau ne peut plus être considéré comme globalement homogène et parfait. Des atténuations trop élevées ou des pics d'amplitude peuvent par exemple apparaître, et la compréhension de ces observations nécessitent une bonne connaissance du matériau et des spécificités de sa microstructure réelle, en lien direct avec son procédé d'élaboration et ses sollicitations en fonctionnement.

Les diverses théories de la littérature ne suffisent pas, dans ces cas complexes, à expliquer les phénomènes observés. Les expérimentations ne sont elles-mêmes pas toujours simples à mettre en œuvre, tant du point de vue du matériau (maîtrise des paramètres qui varient) que du point de vue de la mesure ultrasonore (mesure précise et reproductible). En conclusion, le paramètre principal reste la taille et les orientations des grains, mais les autres paramètres ne doivent pas être systématiquement négligés.

L'étape suivante sera de montrer que les effets doivent simplement s'additionner. Car nous avons également vu que les microphénomènes mis en jeu sont liés, et sont difficilement dissociables. On peut également se demander à quelle échelle d'observation on doit s'arrêter. Les dislocations par exemple sont des déformations à l'échelle du réseau atomique, et c'est leur nombre très important qui fait que les ultrasons y sont sensibles.

Ces travaux n'ont malheureusement pas donné lieu à publication pour l'instant. Deux publications sont en cours d'écriture (l'une sur l'influence des dislocations et des précipités, l'autre sur les paramètres d'influence observés dans l'AIM1), mais nous avons encore du travail avant de pouvoir les soumettre car nous devons encore comprendre et expliquer certains écarts.

Conclusion générale et perspectives

J'ai eu la chance de participer ces 20 dernières années à de grandes avancées dans la compréhension et la prévision de la microstructure des **soudures épaisses**, et de la propagation ultrasonore dans ces structures particulièrement complexes. Ce sont des structures colonnaires anisotropes spatialement variables, en raison de la croissance des grains, qui varie au cours du dépôt successif des passes dans le chanfrein, en fonction du gradient thermique local. Ce type de structure provoque des déviations et de l'atténuation du faisceau ultrasonore qu'il est indispensable de connaître pour faire un contrôle donnant un diagnostic fiable.

Il y a quelques dizaines d'années, la seule solution était de travailler sur le choix des meilleures fréquences, des meilleures focalisations, de l'expérimentation en somme. Puis sont apparus les traitements numériques des signaux et images, traitements a posteriori, qui ont donné de bons résultats pour des matériaux légèrement hétérogènes. Dans les années 2000, la modélisation est devenue une grande aide à la prévision du contrôle et de son résultat, à condition d'avoir des données d'entrée réalistes : ici, les orientations des grains, les constantes d'élasticité du métal soudé, et l'atténuation du métal soudé, en fonction de l'orientation des grains.

Nous nous sommes attachés au LMA à développer l'aspect réaliste de la description de la soudure, à partir de données obtenues simplement lors de l'opération de soudage sans instrumentation particulière (donc en n'utilisant que le cahier de soudage). Les orientations sont prédites en 2D par le modèle MINA pour les soudures réalisées à l'électrode enrobée et au TIG. Les résultats sont très bons, et le modèle MINA a été intégré dans CIVA, gage de performance. Il a été également utilisé par plusieurs laboratoires internationaux comme solution initiale pour différents modèles de détection de défauts ou d'imagerie complexe.

Il reste certains travaux de recherche à réaliser concernant cette thématique. Tout d'abord la poursuite de la modélisation de la structure de ces soudures épaisses, en ajoutant la **troisième dimension** (sens de soudage), qui ne peut pas être négligée dans le cas de **soudage en position**. Pour cela, il sera nécessaire de prendre en compte les effets du vecteur gravité sur la solidification. La bibliographie montre que ces effets ne sont pas si simples, et nous avons déposé un projet ANR concernant cette problématique, dont les partenaires complémentaires (EDF, les laboratoires LIST et LTA du CEA, et les laboratoires académiques LMGC, IUSTI et LMA) réunissent toutes les compétences et expertises nécessaires : numériques et expérimentales dans le soudage et la cinétique de refroidissement, ainsi que la modélisation et l'expérimentation ultrasonore. Les retours (fin mai 2023) des 3 évaluateurs de l'ANR sont élogieux et la suite semble sur la bonne voie.

On pourra également envisager d'introduire une **quatrième dimension**, qui est le temps. En effet, dans le cadre de procédés de soudage particuliers, comme la **fabrication additive** de type WA-AM (procédé arc-fil), le facteur temps prend une importance fondamentale car dans ce cas, il n'y a pas d'interruption dans la cinétique de soudage. La machine n'attend pas le refroidissement complet de la passe déposée avant d'enchaîner la passe suivante, et la cinétique de refroidissement est donc totalement différente du cas du soudage conventionnel. Il sera donc indispensable de prendre en compte la température des passes inférieures, qui dépend du temps.

Pour les autres thématiques de recherche dans les structures complexes, j'ai montré l'étendue de la diversité du contrôle non destructif dans des domaines variés. Dans le nucléaire, nous avons montré, pour la problématique de la **téléométrie** derrière écrans, l'intérêt de l'ajout d'une cible fixée sur la structure dont on veut contrôler la position. Nous avons proposé un nouveau design de cible, appelée quadriplan, qui permet

également de remonter à l'éventuelle désorientation (rotation) de la structure en plus de sa position 3D. Dans ce domaine, il serait intéressant d'évaluer les limites et les incertitudes de la mesure, en particulier en prenant également en compte les travaux réalisés dans les **fluides** avec écoulement et/ou champ de température.

Nous avons également proposé une méthode innovante d'imagerie d'un défaut à travers écrans, en utilisant le **retournement temporel** avec des **ondes de Lamb** en structures immergées. Cette méthode a montré son efficacité pour détecter et localiser un défaut dans la première et deuxième plaque. Les travaux se poursuivent selon deux principaux axes : introduire différents types de défauts, et ajouter une troisième plaque. On regardera aussi l'influence des épaisseurs des plaques, et on pourra également à plus long terme tendre vers une situation plus réaliste en étudiant la présence d'une soudure sur le trajet des ondes de Lamb. Il faudra alors décrire la soudure dans la modélisation, via le modèle MINA par exemple.

La problématique du dimensionnement des **fissures partiellement fermées** est particulièrement d'actualité. La partie fermée est invisible pour les méthodes ultrasonores classiques, impliquant son sous-dimensionnement. Plusieurs méthodes sont à l'étude, consistant à appliquer une sollicitation externe (acoustique ou thermique), afin d'ouvrir les parties fermées et/ou d'activer les non linéarités. Les travaux se poursuivent sur ces deux axes. La sollicitation thermique permet d'ouvrir en partie la fissure, mais semble pour l'instant insuffisante pour remonter à la dimension réelle de la fissure. Les méthodes non linéaires semblent avoir un bon potentiel d'après la littérature mais nécessite des travaux supplémentaires.

Les travaux réalisés sur les bétons et les composites m'ont permis d'acquérir des compétences concernant l'**acoustoélasticité** (qui pourront être très utiles pour prendre en compte les contraintes résiduelles dans les soudures notamment), la **fusion de données** (prémices de l'intelligence artificielle), et la modélisation dans les **structures multi-couches** (qui ont été très utiles dans les travaux sur les systèmes multi-plaques).

L'**intelligence artificielle** est par ailleurs un outil très intéressant pour le domaine du CND, qu'il faudra évaluer. Au vu des dernières avancées, elle pourrait montrer un réel apport, en particulier dans les cas où l'on souhaitait faire de l'inversion, par exemple dans la reconstruction complète (orientations et constantes d'élasticité, voire l'atténuation) d'une soudure inconnue. Une autre application d'un grand intérêt pour le CND est la classification des signaux (ou images) ultrasonores afin d'identifier les échos de défauts et ainsi être une aide indéniable au diagnostic. Cela nécessitera des compétences pluridisciplinaires (informatique, mathématique, matériau et acoustique) qui impliquerait le montage d'un projet avec un consortium bien choisi afin de réunir toutes ces compétences.

L'étude détaillée de la **microstructure des matériaux métalliques** à l'échelle de la pièce, celle du grain et celle du réseau atomique a montré la complexité effective de ces matériaux. Les diverses échelles de paramètres ont toutes une influence non négligeable sur la vitesse et l'atténuation ultrasonore. Certaines observations expérimentales s'écartent de la théorie, et les travaux doivent être poursuivis pour expliquer l'origine de ces écarts. Il faudra ensuite démontrer que les effets s'additionnent (ou non).

L'ensemble de ces travaux montre la complexité du **contrôle ultrasonore des matériaux et structures réelles**, l'influence des milieux de propagation et la question de l'échelle à laquelle il est nécessaire de les connaître et de les décrire. Cela mène naturellement à l'idée d'anticiper, à l'étape de la conception et de la fabrication des pièces, à la façon de procéder pour améliorer la **contrôlabilité de la future structure**. C'est ce que l'on a commencé à étudier, en introduisant les notions de **RC-CND** et **RE-CND** (règles de conception et d'élaboration basées sur les futurs CND). Ces travaux doivent être poursuivis pour éviter de trouver des situations où le

contrôleur subit la situation de contrôle et les difficultés associées. Là aussi l'intelligence artificielle pourrait aider, en indiquant (après un apprentissage adapté) au concepteur ou au fabricant la meilleure solution de conception et/ou de fabrication permettant d'améliorer la contrôlabilité des futures structures, tout en conservant les propriétés mécaniques voulues.

Enfin un projet complexe auquel je tiens serait de continuer à travailler sur la question de l'**atténuation** ultrasonore, dans sa mesure et sa prise en compte. Cette question va au-delà des soudures et se pose quel que soit le matériau. Sa mesure est pour l'instant trop dépendante du dispositif de mesure pour les méthodes classiques, et trop complexe avec des méthodes plus rigoureuses comme celle mise en œuvre durant mes travaux de thèse. Mon objectif à terme est de trouver une méthode intermédiaire qui permette de supprimer les biais de mesure tout en gardant une certaine simplicité de mise en œuvre. L'idée que je souhaiterais développer serait principalement de travailler expérimentalement sur le faisceau ultrasonore, en cherchant le moyen de le rendre le plus proche possible de la théorie, c'est-à-dire composé d'ondes planes unidirectionnelles, pour s'affranchir de la complexité du faisceau qui induit une propagation complexe, et ainsi avoir accès à la « vraie » atténuation d'une onde plane. Par la suite, je souhaiterais étudier le moyen de normaliser la mesure de l'atténuation, ce qui entraînerait non seulement la définition d'une méthode universelle, mais aussi nécessairement celle d'une pièce étalon reproductible. Autant la notion de pièce étalon, de référence, est simple quand on s'intéresse à des caractéristiques géométriques, autant cela se complique fortement quand on recherche une microstructure (métallurgique) étalon.

Références bibliographiques

- ADVISE Project H2020 [WWW Document], n.d. . ADVISE Proj. H2020. URL <https://www.advise-h2020.eu/>
- Ahmed, S., Panetta, P.D., 2002. Ultrasonic attenuation and backscattering in polycrystalline materials with nonspherical grains. Presented at the NDE2002 predict. assure. improve. National Seminar of ISNT, Chennai.
- Ahmed, S., Thompson, R.B., 1992. Effect of preferred grain orientation and grain elongation on ultrasonic wave propagation in stainless steel, in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 11B. AIP Conf. Proc., pp. 1999–2006.
- Ahmed, S., Thompson, R.B., Panetta, P.D., 2003. Ultrasonic attenuation as influenced by elongated grains, in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 22. AIP Conf. Proc. <https://doi.org/10.1063/1.1570126>
- Ahmed, S., Thompson, R.B., Panetta, P.D., 2003. Ultrasonic attenuation as influenced by elongated grains, in: Thompson, D.O., Chimenti, D.E. (Eds.), Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 20. Amer Inst Physics.
- Alleyne, D.N., Cawley, P., 1992. The Interaction of Lamb Waves with Defects. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 39. <https://doi.org/10.1109/58.143172>
- Apfel, A., 2005. Modélisation de l'orientation cristalline des soudures multi-passes en acier inoxydable austénitique : application au contrôle non destructif ultrasonore (Thèse de doctorat). Université de la Méditerranée.
- Apfel, A., Moysan, J., Corneloup, G., Fouquet, T., Chassignole, B., 2005. Coupling an ultrasonic propagation code with a model of the heterogeneity of multipass welds to simulate ultrasonic testing. Ultrasonics 43, 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.09.004>
- Auld, B.A., 1990. Acoustic fields and waves in solids. R.E. Krieger.
- Baikie, B., Wagg, A., Whittle, M., Yapp, D., 1976. Ultrasonic Inspection of Austenitic Welds. J. Br. Nucl. Energy Soc. 15, 257–261.
- Bailon, J.-P., Dorlot, J.-M., 2000. Des matériaux. Presses internationales Polytechnique.
- Baqué, F., 2022. Cible ultrasonique pour le contrôle non destructif. FR3112399.
- Barralis, J., Castex, L., Maeder, G., 1999. Précontraintes et traitements superficiels. Tech. Ing.
- Barralis, J., Maeder, G., 2005. Métallurgie. Elaboration, structures-propriétés, normalisation, Précis. Nathan.
- Behjati, P., Najafzadeh, A., Dastjerdi, H.V., Mahdavi, R., 2011. Ultrasonic Characterization of Strain Hardening Behavior in AISI 316L Austenitic Stainless Steel. Metall. Mater. Trans. -Phys. Metall. Mater. Sci. 42A, 543–547. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0562-2>
- Benchabane, G., 2009. Les mécanismes de recristallisation et de croissance des grains dans les métaux et alliages métalliques légers (Thèse de doctorat). Mohamed Khider-BISKRA, Alger (Algérie).
- Bergstrom, Y., Hallen, H., 1983. Hall-Petch Relationships of Iron and Steel. Met. Sci. 17, 341–347. <https://doi.org/10.1179/030634583790420808>
- Bezdek, J.C., Dubois, D., Prade, H. (Eds.), 1999. Fuzzy Sets in Approximate Reasoning and Information Systems, 1999th edition. ed. Springer, Boston.
- Bhatia, A.B., 1959. Scattering of high-frequency sound waves in polycrystalline materials. J. Acoust. Soc. Am. 31, 16–23. <https://doi.org/10.1121/1.1907605>
- Biwa, S., Nakajima, S., Ohno, N., 2004. On the acoustic nonlinearity of solid-solid contact with pressure-dependent interface stiffness. J. Appl. Mech.-Trans. Asme 71, 508–515. <https://doi.org/10.1115/1.1767169>
- Blanloeuil, P., Meziane, A., Norris, A.N., Bacon, C., 2016. Analytical extension of Finite Element solution for computing the nonlinear far field of ultrasonic waves scattered by a closed crack. Wave Motion 66, 132–146. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2016.04.016>
- Bloch, I., 2003. Fusion d'informations en traitement du signal et des images BLOCH Isabelle. Hermès - Lavoisier.
- Bodian, P.A., 2011. Propagation des ultrasons en milieu hétérogène et anisotrope: application à l'évaluation des propriétés d'élasticité et d'atténuation d'aciers moules par centrifugation et de soudures en Inconel (Thèse de doctorat). INSA Lyon.
- Bowyer, W.H., Crocker, R.L., 1997. Modelling of attenuation and scattering of ultrasound in polycrystalline copper (No. SKI Report 97:16).
- Breyse, D., Larget, M., Sbartai, Z.M., Ploix, M.-A., Garnier, V., 2009. Non destructive measurement data fusion for a better assessment of concrete. Eur. J. Environ. Civ. Eng. 13, 501–515. <https://doi.org/10.3166/EJECE.13.501-515>
- Broda, D., Staszewski, W.J., Martowicz, A., Uhl, T., Silberschmidt, V.V., 2014. Modelling of nonlinear crack-wave interactions for damage detection based on ultrasound—A review. J. Sound Vib. 333, 1097–1118. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.09.033>
- Buck, O., Thompson, R.B., Rehbein, D.K., 1984. The interaction of ultrasound with contacting asperities: Applications to crack closure and fatigue crack growth. J. Nondestruct. Eval. 4, 203–212. <https://doi.org/10.1007/BF00566225>
- Buis, C., 2013. Etude des corrélations entre les défauts structuraux et les inhomogénéités spatiales des détecteurs de rayons X à base de CdTe pour l'imagerie médicale (Thèse de doctorat). Saint-Etienne.

- Castaigns, M., Le Clezio, E., Hosten, B., 2002. Modal decomposition method for modeling the interaction of Lamb waves with cracks. *J. Acoust. Soc. Am.* 112, 2567–2582. <https://doi.org/10.1121/1.1500756>
- Cavaro, M., 2010. Apport de l'acoustique non linéaire à la caractérisation de l'engagement du sodium liquide : application aux réacteurs nucléaires de quatrième génération (Thèse de doctorat). Aix-Marseille 2.
- Červený, V., Popov, M.M., Pšenčík, I., 1982. Computation of wave fields in inhomogeneous media — Gaussian beam approach. *Geophys. J. Int.* 70, 109–128. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1982.tb06394.x>
- Chaix, J.-F., Lillamand, I., Ploix, M.-A., Garnier, V., Corneloup, G., 2008. Study of acoustoelasticity behavior of concrete material under uniaxial compression. *J. Acoust. Soc. Am.* 123, 3847–3847. <https://doi.org/10.1121/1.2935671>
- Chassignole, B., 2000. Influence de la structure métallurgique des soudures en acier inoxydable austénitique sur le contrôle non destructif par ultrasons (Thèse de doctorat). INSA de Lyon.
- Chassignole, B., Diaz, J., Fouquet, V.D.T., Schumm, A., 2006. Structural noise in modelisation. Presented at the 9th European Conference on NDT (ECNDT), Berlin.
- Chassignole, B., Dupond, O., Fouquet, T., Brun, A.L., Moysan, J., Benoist, P., 2011. Application of Modelling for Enhanced Ultrasonic Inspection of stainless steel welds. *Weld. World* 55, 75–82. <https://doi.org/10.1007/BF03321310>
- Chassignole, B., Duwig, V., Ploix, M.-A., Guy, P., El Guerjouma, R., 2009. Modelling the attenuation in the ATHENA finite elements code for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds. *Ultrasonics* 49, 653–658. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2009.04.001>
- Chassignole, B., El Guerjouma, R., Ploix, M.-A., Fouquet, T., 2010. Ultrasonic and structural characterization of anisotropic austenitic stainless steel welds: Towards a higher reliability in ultrasonic non-destructive testing. *NDT E Int.* 43, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.12.005>
- Chassignole, B., Recolin, P., Leymarie, N., Gueudré, C., Guy, P., Elbaz, D., 2015. Study of ultrasonic characterization and propagation in austenitic welds: The MOSAICS project, in: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 34. AIP Conf. Proc., pp. 1486–1495. <https://doi.org/10.1007/BF03321310>
- Chen, S., Guillemot, G., Gandin, C.-A., 2016. Three-dimensional cellular automaton-finite element modeling of solidification grain structures for arc-welding processes. *Acta Mater.* 115, 448–467. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.011>
- Chen, X., Wu, G., Chen, H., Zhou, Z., 2019. A multi-parameter ultrasonic evaluation of mean grain size using optimization. *NDT E Int.* 106, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.05.003>
- Cho, Y., Rose, J.L., 1996. A boundary element solution for a mode conversion study on the edge reflection of Lamb waves. *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 2097.
- Chowdhury, P., Sehitoglu, H., 2016. Mechanisms of fatigue crack growth - a critical digest of theoretical developments. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 39, 652–674. <https://doi.org/10.1111/ffe.12392>
- Clayton, T., Kupperman, D., Reimann, K., 1985. Visualization of ultraosnic-beam distorsion in anisotropic stainless steel. *J. Phys. Colloq.* 46, C10-795-C10-799. <https://doi.org/10.1051/jphyscol:198510174>
- Corneloup, G., Gueudré, C., 2016. Le contrôle non destructif et la contrôlabilité des matériaux et structures, PPUR, ed, METIS LyonTech.
- Corneloup, G., Gueudré, C., Ploix, M.-A., 2021. *Non-Destructive Testing and Testability of Materials and Structures*, EPFL Press English Imprint, ed.
- Corneloup, G., Moysan, J., Francois, D., 1996. Improvement to Defect Detection by Ultrasonic Data Processing: The DTVG Method, in: Thompson, D.O., Chimenti, D.E. (Eds.), *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Volume 15a*. Springer US, pp. 917–924. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0383-1_120
- Delmotte, F., 2000. Un nouvel opérateur de fusion adaptatif. *Trait. Signal* 17, 299.
- D'Hondt, L., 2018. Caractérisation Acoustique de Nuages de Microbulles (Thèse de doctorat). Aix-Marseille Université.
- Dieulesaint, E., Royer, D., 2001. Propagation et génération des ondes élastiques, in: *Techniques de l'ingénieur*.
- Dominguez, N., Gibiat, V., Esquerre, Y., 2005. Time domain topological gradient and time reversal analogy: an inverse method for ultrasonic target detection. *Wave Motion* 42, 31–52. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2004.09.005>
- Dubois, D., Prade, H., 1994. La fusion d'informations imprécises. *Trait. Signal* 11, 447.
- Dubuguet, M., ElGuerjouma, R., Dubois, S., Baboux, J.C., Vincent, A., 1996. Characterization of the non-linear elastic properties of aluminium alloys using ultrasonic evaluation under load, in: Driver, J.H., Dubost, B., Durand, F., Fougeres, R., Guyot, P., Sainfort, P., Suery, M. (Eds.), *Aluminium Alloys: Their Physical and Mechanical Properties*, Pts 1-3. Transtec Publications Ltd, Zurich-Uetikon, pp. 951–956. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.217-222.951>
- Egle, D.M., Bray, D.E., 1976. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel. *J. Acoust. Soc. Am.* 60, 741–744. <https://doi.org/10.1121/1.381146>
- Fan, Z., Lowe, M., 2014. Array Imaging of Austenitic Welds by Measuring Weld Material Map, in: Chimenti, D.E., Bond, L.J., Thompson, D.O. (Eds.), *40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing*, Vols 33a & 33b. Amer Inst Physics, Melville, pp. 941–947. <https://doi.org/10.1063/1.4864922>

- Fan, Z., Mark, A.F., Lowe, M.J.S., Withers, P.J., 2015. Nonintrusive Estimation of Anisotropic Stiffness Maps of Heterogeneous Steel Welds for the Improvement of Ultrasonic Array Inspection. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 62, 1530–1543. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2015.007018>
- Feuilly, N., 2009. Etude de l'influence de la microstructure sur la diffusion ultrasonore en vue de l'amélioration du contrôle non-destructif des matériaux polycristallins (Thèse de doctorat). Université Aix-Marseille II.
- Fink, M., 1992. Time-Reversal of Ultrasonic Fields .1. Basic Principles. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 39, 555–566. <https://doi.org/10.1109/58.156174>
- François, D., 2004. Lois de comportement des métaux - Élasticité. Viscoélasticité. *Tech. Ing.* <https://doi.org/10.51257/a-v1-m4151>
- François, D., Pineau, A., Zaoui, A., 1991. Comportement mécanique des matériaux - Elasticité et plasticité, Hermès. ed.
- Gandin, C., Rappaz, M., 1994. A Coupled Finite-Element Cellular-Automaton Model for the Prediction of Dendritic Grain Structures in Solidification Processes. *Acta Metall. Mater.* 42, 2233–2246. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90302-6](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90302-6)
- Gandin, C.A., Rappaz, M., 1997. A 3D cellular automaton algorithm for the prediction of dendritic grain growth. *Acta Mater.* 45, 2187–2195. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00303-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00303-5)
- Gao, K., Rougier, E., Guyer, R.A., Lei, Z., Johnson, P.A., 2019. Simulation of crack induced nonlinear elasticity using the combined finite-discrete element method. *Ultrasonics* 98, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.06.003>
- Garcin, T., Schmitt, J.H., Militzer, M., 2016. In-situ laser ultrasonic grain size measurement in superalloy INCONEL 718. *J. Alloys Compd.* 670, 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.222>
- Garthwaite, M.C., Nancarrow, S., Hislop, A., Thankappan, M., Dawson, J.H., Lawrie, S., 2015. The Design of Radar Corner Reflectors for the Australian Geophysical Observing System: a single design suitable for InSAR deformation monitoring and SAR calibration at multiple microwave frequency bands. *Geosci. Aust.* <https://doi.org/10.11636/Record.2015.003>
- Gazanhes, C., Herault, J.P., Kurkdji, J., Sageloli, J., 1997. Quelques aspects de la dispersion ultrasonore (Rapport de recherche No. 146), Publications du LMA.
- Grong, O., Grong, Ø., 1997. Metallurgical Modelling of Welding. Institute of Materials.
- Gueudré, C., Le Marrec, L., Chekroun, M., Moysan, J., Chassignole, B., Corneloup, G., 2011. Determination of the order of passes of an austenitic weld by optimization of an inversion process of ultrasound data, in: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol 30. AIP Conf. Proc., pp. 639–646. <https://doi.org/10.1063/1.3591910>
- Gueudré, C., Le Marrec, L., Moysan, J., Chassignole, B., 2009. Direct model optimisation for data inversion. Application to ultrasonic characterisation of heterogeneous welds. *NDT E Int.* 42, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.07.003>
- Gueudré, C., Mailhé, J., Ploix, M.-A., Corneloup, G., Chassignole, B., 2019. Influence of the uncertainty of elastic constants on the modelling of ultrasound propagation through multi-pass austenitic welds. Impact on non-destructive testing. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 171, 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.011>
- Guyer, R.A., Johnson, P.A., 1999. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials. *Phys. Today* 52, 30–36. <https://doi.org/10.1063/1.882648>
- Guz', A.N., Makhort, F.G., 2000. The physical fundamentals of the ultrasonic nondestructive stress analysis of solids. *Int. Appl. Mech.* 36, 1119–1149. <https://doi.org/10.1023/A:1009442132064>
- Halkjær, S., Sørensen, M.P., Kristensen, W.D., 2000. The propagation of ultrasound in an austenitic weld. *Ultrasonics* 38, 256–261. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00103-1](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00103-1)
- He, P., 1999. Experimental verification of models for determining dispersion from attenuation. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 46, 706–714. <https://doi.org/10.1109/58.764857>
- Hirse Korn, S., 1986. Directional Dependence of Ultrasonic Propagation in Textured Polycrystals. *J. Acoust. Soc. Am.* 79, 1269–1279. <https://doi.org/10.1121/1.393706>
- Hirse Korn, S., 1985. The scattering of ultrasonic waves in polycrystalline materials with texture. *J. Acoust. Soc. Am.* 77, 832–843. <https://doi.org/10.1121/1.392052>
- Hirse Korn, S., 1982. The scattering of ultrasonic waves by polycrystals. *J. Acoust. Soc. Am.* 72, 1021–1031. <https://doi.org/10.1121/1.388233>
- Hoehne, C., Kolkoori, S., Rahman, M.-U., Boehm, R., Prager, J., 2013. SAFT Imaging of Transverse Cracks in Austenitic and Dissimilar Welds. *J. Nondestruct. Eval.* 32, 51–66. <https://doi.org/10.1007/s10921-012-0159-3>
- Hosten, B., 1998. Heterogeneous structure of modes and Kramers–Kronig relationship in anisotropic viscoelastic materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 104, 1382–1388. <https://doi.org/10.1121/1.424347>
- Hosten, B., 1991. Reflection and transmission of acoustic plane waves on an immersed orthotropic and viscoelastic solid layer. *J. Acoust. Soc. Am.* 89, 2745–2752. <https://doi.org/10.1121/1.400685>
- Hudgell, R., Worrall, G., Ford, J., Gray, B., 1989. Ultrasonic Characterization and Inspection of Austenitic Welds. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 39, 247–263. [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(89\)90088-4](https://doi.org/10.1016/0308-0161(89)90088-4)
- Hughes, D.S., Kelly, J.L., 1953. Second-order elastic deformation of solids. *Phys. Rev.* 92, 1145. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1145>
- Hull, D., Bacon, D.J., 2011. Introduction to dislocations, 5. ed. ed. Elsevier/Butterworth-Heinemann, Amsterdam.

- Ikeuchi, M., Jinno, K., Ohara, Y., Yamanaka, K., 2013. Improvement of Closed Crack Selectivity in Nonlinear Ultrasonic Imaging Using Fundamental Wave Amplitude Difference. *Jpn. J. Appl. Phys.* 52, 07HC08. <https://doi.org/10.7567/JJAP.52.07HC08>
- Kang, T., Kim, H.-H., Song, S.-J., Kim, H.-J., 2012. Characterization of fatigue damage of Al6061-T6 with ultrasound. *NDTE Int.* 52, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.08.001>
- Kauffmann, P., 2018. Étude de la propagation, réémission et transmission des ondes de Lamb en vue du Contrôle Non Destructif de structures de réacteurs nucléaires immergées en sodium liquide (Thèse de doctorat). Aix-Marseille Université.
- Kauffmann, P., Ploix, M.-A., Chaix, J.-F., Gueudré, C., Corneloup, G., Baqué, F., 2020. Interferences in the re-emission field of multimodal leaky lamb waves propagating in an immersed plate: Analytical modelling, simulation and experimentation. *J. Sound Vib.* 465, UNSP 115015. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115015>
- Kauffmann, P., Ploix, M.-A., Chaix, J.-F., Potel, C., Gueudré, C., Corneloup, G., Baqué, F., 2019. Multi-modal leaky Lamb waves in two parallel and immersed plates: Theoretical considerations, simulations, and measurements. *J. Acoust. Soc. Am.* 145, 1018–1030. <https://doi.org/10.1121/1.5091689>
- Kenderian, S., Berndt, T.P., Green, R.E., Djordjevic, B.B., 2003. Ultrasonic monitoring of dislocations during fatigue of pearlitic rail steel. *Mater. Sci. Eng. A* 348, 90–99. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00636-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00636-6)
- Kim, C.S., Kwun, S.I., Park, I.K., 2008. Characterization of creep-fatigue in ferritic 9Cr-1Mo-V-Nb steel using ultrasonic velocity. *J. Nucl. Mater.* 377, 496–500. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.04.012>
- Kim, H.-H., Kim, H.-J., Song, S.-J., Lim, B.S., Kim, K.-C., 2014. Assessment of precipitates of isothermal aged austenitic stainless steel using measurement techniques of ultrasonic attenuation. *J. Mech. Sci. Technol.* 28, 3021–3026. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0708-z>
- Kim, J.-Y., 2004. On the generalized self-consistent model for elastic wave propagation in composite materials. *Int. J. Solids Struct.* 41, 4349–4360. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.03.020>
- Kimura, M., 2011. Velocity dispersion and attenuation in granular marine sediments: Comparison of measurements with predictions using acoustic models. *J. Acoust. Soc. Am.* 129, 3544–3561. <https://doi.org/10.1121/1.3585841>
- Kohler, B., Muller, W., Spies, M., Schmitz, V., Zimmer, A., Langenberg, K.J., Mletzko, U., 2006. Ultrasonic testing of thick walled austenitic welds: Modelling and experimental verification, in: Thompson, D.O., Chimenti, D.E. (Eds.), *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 25. AIP Conf. Proc., pp. 57–64.
- Kolkoori, S.R., Rahman, M.-U., Chinta, P.K., Ktreutzbruck, M., Rethmeier, M., Prager, J., 2013. Ultrasonic field profile evaluation in acoustically inhomogeneous anisotropic materials using 2D ray tracing model: Numerical and experimental comparison. *Ultrasonics* 53, 396–411. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.07.006>
- Kou, S., 2003. *Welding metallurgy*, 2nd ed. Wiley-Interscience, Hoboken, N.J.
- Kube, C.M., Turner, J.A., 2016. Stress-dependent ultrasonic scattering in polycrystalline materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 139, 811–824. <https://doi.org/10.1121/1.4941253>
- Kube, C.M., Turner, J.A., 2015a. Voigt, Reuss, Hill, and self-consistent techniques for modeling ultrasonic scattering, in: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol 34. AIP Conf. Proc., pp. 926–934. <https://doi.org/10.1063/1.4914698>
- Kube, C.M., Turner, J.A., 2015b. Acoustic attenuation coefficients for polycrystalline materials containing crystallites of any symmetry class. *J. Acoust. Soc. Am.* 137, EL476–EL482. <https://doi.org/10.1121/1.4921676>
- Kumaran, S.M., 2011. Evaluation of precipitation reaction in 2024 Al-Cu alloy through ultrasonic parameters. *Mater. Sci. Eng. - Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.* 528, 4152–4158. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.112>
- Kupperman, D., Reimann, K., 1980. Ultrasonic Wave-Propagation and Anisotropy in Austenitic Stainless-Steel Weld Metal. *IEEE Trans. Sonics Ultrason.* 27, 7–15. <https://doi.org/10.1109/T-SU.1980.31137>
- Kupperman, D.S., Reimann, K.J., 1978. Effect of shear-wave polarization on defect detection in stainless steel weld metal. *Ultrasonics* 16, 21–27. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(78\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0041-624X(78)90005-7)
- Lanceleur, P., Ribeiro, H., De Belleval, J., 1993. The use of inhomogeneous waves in the reflection–transmission problem at a plane interface between two anisotropic media. *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 1882–1892. <https://doi.org/10.1121/1.406703>
- Langenberg, K.J., Hannemann, R., Kaczorowski, T., Marklein, R., Koehler, B., Schurig, C., Walte, F., 2000. Application of modeling techniques for ultrasonic austenitic weld inspection. *NDT E Int.* 33, 465–480. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00018-9)
- Langlois, L., 2000. Évolutions propres de la microstructure de dislocations et conséquences sur le comportement élastoplastique des métaux (thesis). Metz.
- Leblond, J.-B., 2003. *Mécanique de la rupture fragile et ductile* - Jean-Baptiste Leblond - Librairie Eyrolles, Hermès-Lavoisier. ed.
- Ledbetter, H., Austin, M., 1985. Texture in Stainless-Steel Welds - an Ultrasonic Study. *J. Mater. Sci.* 20, 1720–1724. <https://doi.org/10.1007/BF00555276>
- Lee, C., Lahham, M., Martin, B., 1990. Experimental-Verification of the Kramers-Kronig Relationship for Acoustic-Waves. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 37, 286–294. <https://doi.org/10.1109/58.56489>
- Leibowitz, L., Chasanov, M.G., Blomquist, R., 2003. Speed of Sound in Liquid Sodium to 1000°C. *J. Appl. Phys.* 42, 2135–2137. <https://doi.org/10.1063/1.1660502>

- Leymarie, N., Imperiale, A., Fortuna, T., Dorval, V., Demaldent, E., 2022. Simulation of ultrasonic inspection in a highly heterogeneous media: strategies and modelling tools applied to austenitic welds.
- Lhuillier, P.E., Chassignole, B., Oudaa, M., Kerhervé, S.O., Rupin, F., Fouquet, T., 2017. Investigation of the ultrasonic attenuation in anisotropic weld materials with finite element modeling and grain-scale material description. *Ultrasonics* 78, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.03.004>
- Li, J., Rokhlin, S.I., 2015. Propagation and scattering of ultrasonic waves in polycrystals with arbitrary crystallite and macroscopic texture symmetries. *Wave Motion* 58, 145–164. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2015.05.004>
- Li, X., Song, Y., Ni, P., Wang, Z., Liu, F., Du, H., 2015. Grain size evaluation of structural materials in nuclear power plant using a thickness independent ultrasonic method. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. At.* 351, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03.053>
- Lillamand, I., Chaix, J.-F., Ploix, M.-A., Garnier, V., 2010. Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading. *NDT E Int.* 43, 655–660. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.07.001>
- Liu, Q., Wirdelius, H., 2014. Estimation of Grain Orientation in an Anisotropic Weld by Using a Model of Ultrasonic Propagation in an Inverse Scheme. *Model. Simul. Eng.* 2014, e637476. <https://doi.org/10.1155/2014/637476>
- Liu, Q., Wirdelius, H., 2007. A 2D model of ultrasonic wave propagation in an anisotropic weld. *NDT E Int.* 40, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.10.004>
- Locqueteau, C., 1992. Etude des cibles triplanes utilisées en télémétrie ultrasonore (Study of triplane targets used in ultrasonic telemetry) (Thèse de doctorat). Université d'Aix-Marseille II. Faculté des sciences, France.
- Lubeigt, E., 2017. Manuscrit_These_Emma_Lubeigt_2017.pdf (Thèse de doctorat). Aix-Marseille Université.
- Mark, A.F., Fan, Z., Azough, F., Lowe, M.J.S., Withers, P.J., 2014. Investigation of the elastic/crystallographic anisotropy of welds for improved ultrasonic inspections. *Mater. Charact.* 98, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.09.012>
- Marsac, Q., 2020. Modélisation de la macrostructure de soudures TIG épaisses multipasses en acier inoxydable austénitique. Application au contrôle ultrasonore de soudures du circuit primaire des RNR-Na (Thèse de doctorat). Aix-Marseille Université.
- Marsac, Q., Gueudré, C., Ploix, M.-A., Forest, L., Baqué, F., Corneloup, G., 2020. Realistic Model to Predict the Macrostructure of GTAW Welds for the Simulation of Ultrasonic Non destructive Testing. *J. Nondestruct. Eval.* 39, 80. <https://doi.org/10.1007/s10921-020-00724-y>
- Martini, M., Dell'Agnello, S., Currie, D., Delle Monache, G., Vittori, R., Chandler, J.F., Cantone, C., Boni, A., Berardi, S., Patrizi, G., Maiello, M., Garattini, M., Lops, C., March, R., Belletini, G., Tauraso, R., Intaglietta, N., Tibuzzi, M., Murphy, T.W., Bianco, G., Ciocci, E., 2012. MoonLIGHT: A USA-Italy lunar laser ranging retroreflector array for the 21st century. *Planet. Space Sci.* 74, 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.09.006>
- Mason, W.P., McSkimin, H.J., 1948. Energy losses of sound waves in metals due to scattering and diffusion. *J. Appl. Phys.* 19, 940–946. <https://doi.org/10.1063/1.1697900>
- Massacret, N., 2014. Etude d'une méthode ultrasonore d'estimation des températures locales du sodium liquide en sortie coeur RNR-Na (Thèse de doctorat). Aix-Marseille Université.
- Massacret, N., Moysan, J., Ploix, M.-A., Jeannot, J.P., Chaouch, N., 2016. Study of ultrasonic propagation through Kelvin-Helmoltz instabilities for monitoring high-temperature fluid. Presented at the 19th Conference WCNDT 2016 (World Conference on Non-Destructive Testing), Munich, Germany.
- Massacret, N., Moysan, J., Ploix, M.A., Jeannot, J.P., Corneloup, G., 2014. Modelling of ultrasonic propagation in turbulent liquid sodium with temperature gradient. *J. Appl. Phys.* 115, 204905. <https://doi.org/10.1063/1.4875876>
- Maurel, A., Pagneux, V., Barra, F., Lund, F., 2005a. Interaction between an elastic wave and a single pinned dislocation. *Phys. Rev. B* 72, 174110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.174110>
- Maurel, A., Pagneux, V., Barra, F., Lund, F., 2005b. Wave propagation through a random array of pinned dislocations: Velocity change and attenuation in a generalized Granato and Lücke theory. *Phys. Rev. B* 72. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.174111>
- McKnight, J.A., Macleod, I.D., Burton, E.J., 1985. Remote temperature measurement. GB patent document 2153999/A/.
- Miao, X., Hong, H., Hong, X., Peng, J., Bie, F., 2022. Effect of Constraint and Crack Contact Closure on Fatigue Crack Mechanical Behavior of Specimen under Negative Loading Ratio by Finite Element Method. *Metals* 12, 1858. <https://doi.org/10.3390/met12111858>
- Morvan, B., 2003. Lamb wave reflection at the free edge of a plate. *J. Acoust. Soc. Am.* 113, 1417.
- Moysan, J., Apfel, A., Corneloup, G., Chassignole, B., 2003. Modelling the grain orientation of austenitic stainless steel multipass welds to improve ultrasonic assessment of structural integrity. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 80, 77–85. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(03\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(03)00024-3)
- Moysan, J., Ploix, M.A., Corneloup, G., Guy, P., Guerjouma, R.E., Chassignole, B., 2008. Advances in Ultrasonic Testing of Austenitic Stainless Steel Welds. *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.* 28, 245–253.
- Mujica, N., Cerda, M.T., Espinoza, R., Lisoni, J., Lund, F., 2012. Ultrasound as a probe of dislocation density in aluminum. *Acta Mater.* 60, 5828–5837. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.07.023>

- Murry, G., 2010. *Métallurgie métaux, alliages, propriétés*. Dunod : L'Usine nouvelle.
- Nagaso, M., 2018. *Étude de la propagation des ultrasons dans un milieu fluide hétérogène en vue de la surveillance en fonctionnement d'un réacteur nucléaire à caloporteur sodium (Thèse de doctorat)*. Aix-Marseille Université.
- Nagaso, M., Moysan, J., Benjeddou, S., Massacret, N., Ploix, M.A., Komatitsch, D., Lhuillier, C., 2016. Ultrasonic thermometry simulation in a random fluctuating medium: Evidence of the acoustic signature of a one-percent temperature difference. *Ultrasonics* 68, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.02.011>
- Nagaso, M., Moysan, J., Lhuillier, C., Komatitsch, D., 2021. Four dimensional wave propagation simulation in liquid metal with realistic thermal fluctuation. *Ultrasonics* 117, 106528. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106528>
- Nagy, P.B., 1998. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization. *Ultrasonics* 36, 375–381. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00040-1)
- Narayanan, M.M., Singh, N., Kumar, A., Babu Rao, C., Jayakumar, T., 2014. An absolute method for determination of misalignment of an immersion ultrasonic transducer. *Ultrasonics* 54, 2081–2089. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.06.021>
- Nayfeh, A.H., 1995. *Wave Propagation in Layered Anisotropic Media: with Application to Composites*. Elsevier.
- Nayfeh, A.H., 1991. The general problem of elastic wave propagation in multilayered anisotropic media. *J. Acoust. Soc. Am.* 89, 1521–1531. <https://doi.org/10.1121/1.400988>
- Nicoletti, D., Bilgutay, N., Onaral, B., 1992. Power-law relationships between the dependence of ultrasonic attenuation on wavelength and the grain size distribution. *J. Acoust. Soc. Am.* 91, 3278–3284. <https://doi.org/10.1121/1.402862>
- Nowers, O., Duxbury, D.J., Drinkwater, B.W., 2016. Ultrasonic array imaging through an anisotropic austenitic steel weld using an efficient ray-tracing algorithm. *NDT E Int.* 79, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.12.009>
- Nowers, O., Duxbury, D.J., Velichko, A., Drinkwater, B.W., 2015. Modelling grain-scattered ultrasound in austenitic stainless-steel welds: A hybrid model, in: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 34. AIP Conf. Proc., pp. 1797–1804. <https://doi.org/10.1063/1.4914804>
- O'Donnell, M., Jaynes, E.T., Miller, J.G., 1981. Kramers–Kronig relationship between ultrasonic attenuation and phase velocity. *J. Acoust. Soc. Am.* 69, 696–701. <https://doi.org/10.1121/1.385566>
- Ogilvy, J., 1986. Ultrasonic Beam Profiles and Beam Propagation in an Austenitic Weld Using a Theoretical Ray Tracing Model. *Ultrasonics* 24, 337–347. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(86\)90005-3](https://doi.org/10.1016/0041-624X(86)90005-3)
- Ogilvy, J.A., 1985. Computerized ultrasonic ray tracing in austenitic steel. *NDT E Int.* 18, 67–77. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(85\)90100-2](https://doi.org/10.1016/0308-9126(85)90100-2)
- Ohara, Y., Nakajima, H., Hauptert, S., Tsuji, T., Mihara, T., 2019. Nonlinear ultrasonic phased array with fixed-voltage fundamental wave amplitude difference for high-selectivity imaging of closed cracks. *J. Acoust. Soc. Am.* 146, 266–277. <https://doi.org/10.1121/1.5116017>
- Palanichamy, P., Joseph, A., Jayakumar, T., Raj, B., 1995. Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel. *NDT E Int.* 28, 179–185. [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(95\)00011-L](https://doi.org/10.1016/0963-8695(95)00011-L)
- Papadakis, E.P., 1959. Influence of grain structure on ultrasonic attenuation in steel. *J. Appl. Phys.* 30, 1463–1463. <https://doi.org/10.1063/1.1735368>
- Payan, C., Quiviger, A., Garnier, V., Chaix, J.F., Salin, J., 2013. Applying diffuse ultrasound under dynamic loading to improve closed crack characterization in concrete. *J. Acoust. Soc. Am.* 134, EL211–EL216. <https://doi.org/10.1121/1.4813847>
- Pierce, A.D., 1989. *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Acoustical Society of America.
- Pippan, R., Hohenwarter, A., 2017. Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 40, 471–495. <https://doi.org/10.1111/ffe.12578>
- Pitkänen, J., Laukkanen, A., Kempainen, M., Virkkunen, I., 2007. Effect of Stress on Ultrasonic Response in Detection and Sizing of Cracks. *Mater. Test.* 49, 299–309. <https://doi.org/10.3139/120.100815>
- Ploix, M.-A., 2006. *Étude de l'atténuation des ondes ultrasonores. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique (Thèse de doctorat)*. INSA Lyon.
- Ploix, M.A., Corneloup, G., Moysan, J., Jeannot, J.P., 2016. Investigation of ultrasonic backward energy from various edges as a function of their 2D/3D geometry and of the incidence angle, for application to ultrasonic thermometry at the outlet of a tube. *Case Stud. Nondestruct. Test. Eval.* 6, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.csndt.2016.09.001>
- Ploix, M.-A., El Guerjouma, R., Moysan, J., Corneloup, G., Chassignole, B., 2005. Acoustical characterization of austenitic stainless steel welds for experimental and modeling NDT. *J. Adv. Sci.* 17, 76–81. <https://doi.org/10.2978/jsas.17.76>
- Ploix, M.-A., Garnier, V., Breyse, D., Moysan, J., 2011. NDE data fusion to improve the evaluation of concrete structures. *NDT E Int.* 44, 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.04.006>
- Ploix, M.-A., Gueudré, C., Corneloup, G., Baqué, F., 2023. A new retroreflector named “quatriplan” based on the corner-cube principle, for advanced ultrasonic telemetry applications. *Ultrasonics* 132, 106999. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2023.106999>

- Ploix, M.-A., Guy, P., Chassignole, B., Moysan, J., Corneloup, G., El Guerjouma, R., 2014. Measurement of ultrasonic scattering attenuation in austenitic stainless steel welds: Realistic input data for NDT numerical modeling. *Ultrasonics* 54, 1729–1736. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.04.005>
- Ploix, M.-A., Kauffmann, P., Chaix, J.-F., Lillamand, I., Baqué, F., Corneloup, G., 2020. Acoustical properties of an immersed corner-cube retroreflector alone and behind screen for ultrasonic telemetry applications. *Ultrasonics* 106, 106149. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106149>
- Potel, C., De Belleval, J., 1993. Propagation in an Anisotropic Periodically Multilayered Medium. *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 2669–2677. <https://doi.org/10.1121/1.405842>
- Prada, C., Fink, M., 1994. Eigenmodes of the Time-Reversal Operator - a Solution to Selective Focusing in Multiple-Target Media. *Wave Motion* 20, 151–163. [https://doi.org/10.1016/0165-2125\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0165-2125(94)90039-6)
- Prada, C., Wu, F., Fink, M., 1991. The Iterative Time-Reversal Mirror - a Solution to Self-Focusing in the Pulse Echo Mode. *J. Acoust. Soc. Am.* 90, 1119–1129. <https://doi.org/10.1121/1.402301>
- Prasad, R., Kumar, S., 1994. Study of the influence of deformation and thermal treatment on the ultrasonic behaviour of steel. *J. Mater. Process. Technol.* 42, 51–59. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90074-4)
- Rasolofosaon, P., Zinsner, B., Johnson, P.A., 1997. Propagation des ondes élastiques dans les matériaux non linéaires Aperçu des résultats de laboratoire obtenus sur les roches et des applications possibles en géophysique. *Rev. Inst. Fr. Pétrole* 52, 585–608. <https://doi.org/10.2516/ogst:1997061>
- Recho, N., 1995. Rupture par fissuration des structures, Hermes Science Publications. ed.
- Rodriguez, S., Sahuguet, P., Gibiat, V., Jacob, X., 2012. Fast topological imaging. *Ultrasonics* 52, 1010–1018. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.08.002>
- Rokhlin, S.I., Wang, L., 2002. Stable recursive algorithm for elastic wave propagation in layered anisotropic media: Stiffness matrix method. *J. Acoust. Soc. Am.* 112, 822–834. <https://doi.org/10.1121/1.1497365>
- Rose, J.L., 2004. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press.
- Royer, D., Valier-Brasier, T., 2021. *Ondes élastiques dans les solides*, Collecion Ondes. ISTE éditions, London.
- Sachse, W., Pao, Y., 1978. Determination of Phase and Group Velocities of Dispersive Waves in Solids. *J. Appl. Phys.* 49, 4320–4327. <https://doi.org/10.1063/1.325484>
- Sobolev, V., 2011. Database of thermophysical properties of liquid metal coolants for GEN-IV, Open Report of the Belgian Nuclear Research Centre. SCK•CEN, Mol, Belgium.
- Solodov, I., Wackerl, J., Pfliederer, K., Busse, G., 2004. Nonlinear self-modulation and subharmonic acoustic spectroscopy for damage detection and location. *Appl. Phys. Lett.* 84, 5386–5388. <https://doi.org/10.1063/1.1767283>
- Solodov, I.Y., 1998. Ultrasonics of non-linear contacts: propagation, reflection and NDE-applications. *Ultrasonics* 36, 383–390. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00041-3)
- Stanke, F.E., Kino, G.S., 1984. A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 75, 665–681. <https://doi.org/10.1121/1.390577>
- Stephanis, C.G., Mourmouras, D.E., 1995. Trihedral rectangular ultrasonic reflector for distance measurements. *NDT E Int.* 28, 95–96. [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(94\)00012-9](https://doi.org/10.1016/0963-8695(94)00012-9)
- Szabo, T.L., 1995. Causal theories and data for acoustic attenuation obeying a frequency power law. *J. Acoust. Soc. Am.* 97, 14–24. <https://doi.org/10.1121/1.412332>
- Szabo, T.L., Wu, J.R., 2000. A model for longitudinal and shear wave propagation in viscoelastic media. *J. Acoust. Soc. Am.* 107, 2437–2446. <https://doi.org/10.1121/1.428630>
- Tabatabaeipour, S.M., Honarvar, F., 2010. A comparative evaluation of ultrasonic testing of AISI 316L welds made by shielded metal arc welding and gas tungsten arc welding processes. *J. Mater. Process. Technol.* 210, 1043–1050. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.013>
- Thiele, S., Matlack, K.H., Kim, J.-Y., Qu, J., Wall, J.J., Jacobs, L.J., 2014. Assessment of precipitation in alloy steel using nonlinear Rayleigh surface waves. pp. 682–689. <https://doi.org/10.1063/1.4864886>
- Tomlinson, J.R., Wagg, A.R., Whittle, M.J., 1980. Ultrasonic inspection of austenitic welds. Presented at the IAEA-IWGFR specialists meeting on in-service inspection and monitoring of LMFBRs, International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Toozandehjani, M., Matori, K.A., Ostovan, F., Mustapha, F., Zahari, N.I., Oskoueian, A., 2015. On the correlation between microstructural evolution and ultrasonic properties: a review. *J. Mater. Sci.* 50, 2643–2665. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-8855-x>
- Trousil, R.L., Waters, K.R., Miller, J.G., 2001. Experimental validation of the use of Kramers-Kronig relations to eliminate the phase sheet ambiguity in broadband phase spectroscopy. *J. Acoust. Soc. Am.* 109, 2236–2244. <https://doi.org/10.1121/1.1365114>
- Turner, J.A., 1999. Elastic wave propagation and scattering in heterogeneous, anisotropic media: Textured polycrystalline materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 106, 541–552.

- Vallée, J.-C., 2022. Génération et propagation d'ondes de Lamb dans les structures multiplaques. Apport du retournement temporel pour le contrôle non destructif par ultrasons des cuves de réacteurs de génération IV (Thèse de doctorat). Aix-Marseille Université.
- Vallée, J.-C., Ploix, M.-A., Baqué, F., Cavaro, M., Chaix, J.-F., 2022. Edge and Notch Detection in a Plate Using Time Reversal Process of Leaky Lamb Waves. *Appl. Sci.* 12, 228. <https://doi.org/10.3390/app12010228>
- Van Den Abeele, K.E., 1996. Elastic pulsed wave propagation in media with second- or higher-order nonlinearity. Part I. Theoretical framework. *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 3334–3345. <https://doi.org/10.1121/1.414890>
- Van Den Abeele, K.E., Johnson, P.A., 1996. Elastic pulsed wave propagation in media with second- or higher-order nonlinearity. Part II. Simulation of experimental measurements on Berea sandstone. *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 3346–3352. <https://doi.org/10.1121/1.414891>
- Van Pamel, A., Brett, C.R., Huthwaite, P., Lowe, M.J.S., 2015. Finite element modelling of elastic wave scattering within a polycrystalline material in two and three dimensions. *J. Acoust. Soc. Am.* 138, 2326–2336. <https://doi.org/10.1121/1.4931445>
- Van Pamel, A., Sha, G., Lowe, M.J.S., Rokhlin, S.I., 2018. Numerical and analytic modelling of elastodynamic scattering within polycrystalline materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 143, 2394–2408. <https://doi.org/10.1121/1.5031008>
- Wang, L., Rokhlin, S.I., 2001. Stable reformulation of transfer matrix method for wave propagation in layered anisotropic media. *Ultrasonics* 39, 413–424. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(01\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(01)00082-8)
- Wang, T., Wang, W., Du, P., Geng, D., Kong, X., Gong, M., 2013. Calculation of the light intensity distribution reflected by a planar corner-cube retroreflector array with the size of centimeter and above. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 124, 5307–5312. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.03.056>
- Waters, K. R., Hughes, M.S., Brandenburger, G.H., Miller, J.G., 2000. On a time-domain representation of the Kramers-Kronig dispersion relations. *J. Acoust. Soc. Am.* 108, 2114–2119. <https://doi.org/10.1121/1.1315294>
- Waters, Kendall R., Hughes, M.S., Mobley, J., Brandenburger, G.H., Miller, J.G., 2000. On the applicability of Kramers-Kr[ö]m[ö]l[ä]nig relations for ultrasonic attenuation obeying a frequency power law. *J. Acoust. Soc. Am.* 108, 556–563. <https://doi.org/10.1121/1.429586>
- Waters, K.R., Mobley, J., Miller, J.G., 2005. Causality-imposed (Kramers-Kronig) relationships between attenuation and dispersion. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 52, 822–833. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2005.1503968>
- Weaver, R.L., 1990. Diffusivity of ultrasound in polycrystals. *J. Mech. Phys. Solids* 38, 55–86.
- Wu, P., Stepinski, T., 2000. Quantitative estimation of ultrasonic attenuation in a solid in the immersion case with correction of diffraction effects. *Ultrasonics* 38, 481–485. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00037-2)
- Xue, C., Blanc, N., Soulié, F., Bordreuil, C., Deschaux-Beaume, F., Guillemot, G., Bellet, M., Gandin, C.-A., 2022. Structure and texture simulations in fusion welding processes – comparison with experimental data. *Materialia* 101305. <https://doi.org/10.1016/j.mta.2021.101305>
- Yang, L., Lobkis, O.I., Rokhlin, S.I., 2011. Shape effect of elongated grains on ultrasonic attenuation in polycrystalline materials. *Ultrasonics* 51, 697–708. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2011.02.002>
- Yang, R.-B., Mal, A.K., 1994. Multiple scattering of elastic waves in a fiber-reinforced composite. *J. Mech. Phys. Solids* 42, 1945–1968. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0022-5096(94)90020-5)
- Ye, J., Moysan, J., Song, S.-J., Kim, H.-J., Chassignole, B., Gueudre, C., Dupond, O., 2012. Influence of welding passes on grain orientation - The example of a multi-pass V-weld. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 93–94, 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.02.007>
- Yoneyama, H., Shibata, S., Kishigami, M., 1978. Ultrasonic Testing of Austenitic Stainless-Steel Welds - False Indications and Cause of Their Occurrence. *NDTE Int.* 11, 3–8. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(78\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0308-9126(78)90002-0)
- Zellouf, D., Jayet, Y., Saint-Pierre, N., Tatibouët, J., Baboux, J.C., 1996. Ultrasonic spectroscopy in polymeric materials. Application of the Kramers-Kronig relations. *J. Appl. Phys.* 80, 2728–2732. <https://doi.org/10.1063/1.363190>
- Zhang, J., Hunter, A., Drinkwater, B.W., Wilcox, P.D., 2012. Monte Carlo inversion of ultrasonic array data to map anisotropic weld properties. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 59.

Résumé

La **contrôlabilité ultrasonore** d'un matériau ou d'une structure désigne la facilité avec laquelle on peut pratiquer un **CND par ultrasons**. Les caractéristiques d'un milieu réel, rencontré dans l'industrie, influencent la propagation ultrasonore, qui peut donc s'écarter de la théorie établie dans un milieu parfait. **Améliorer la contrôlabilité** nécessite de bien comprendre la propagation ultrasonore, et donc le milieu dans lequel les ondes se propagent. Cette expertise dans la complexité des interactions entre ultrasons et matériau réel est à la base des travaux de recherche présentés dans ce manuscrit.

C'est le cas des **soudures austénitiques épaisses**, qui sont des matériaux métalliques anisotropes et hétérogènes, soudés, dont la structure dépend du procédé de soudage. Ces structures très particulières impliquent un contrôle ultrasonore réputé complexe, du fait des fortes déviations et atténuation subies par le faisceau ultrasonore. Le dépôt des passes successives pour remplir le chanfrein implique des croissances de grains non aléatoires, déterminées par des processus qu'il faut connaître, pour ainsi prévoir la propagation des ondes et donc le contrôle ultrasonore. L'objectif est donc de comprendre et fiabiliser le diagnostic, en améliorant la modélisation. Cela passe par l'étude de l'orientation des grains, de l'évaluation de l'atténuation, et d'autres paramètres d'influence de la modélisation comme les constantes d'élasticité.

D'autres milieux et structures complexes sont également étudiés, tout d'abord dans le cadre des réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération, refroidis au sodium liquide (RNR-Na). Ce métal liquide est opaque et interdit tout contrôle visuel interne. On étudie la mesure de **télémetrie** d'objets ou de structures positionnés derrière des écrans (plaques d'acier). Pour cela, on introduit des cibles dont la réponse acoustique spécifique est analysée. On s'intéresse ensuite à la problématique du **contrôle de structures multi-plaques immergées**, en utilisant de manière originale les ondes de Lamb associées au retournement temporel, afin de détecter et localiser des défauts dans chaque plaque. L'application visée est le contrôle, depuis l'extérieur, des structures internes de la cuve de réacteur nucléaire. Puis la propagation ultrasonore dans des **fluides avec écoulement et hétérogénéité de température** est analysée et modélisée, avec pour objectif la mesure de température du sodium liquide en sortie du cœur.

D'autres cas complexes de CND sont étudiés : la présence d'une **fissure partiellement fermée**, invisible aux méthodes ultrasonores classiques, l'évaluation de structures en **béton**, et la modélisation de la propagation dans les matériaux **composites** épais. A chaque fois, l'objectif est soit de contrôler les structures (et caractériser les éventuels défauts), soit d'évaluer un ou plusieurs paramètres du milieu de propagation.

Enfin des matériaux d'apparence simple, comme des **métaux homogènes isotropes**, peuvent également perturber un diagnostic de CND. On montre que des caractéristiques micrométriques comme les distributions de tailles de grains, ou encore les défauts dans le réseau cristallin (comme les dislocations ou les macles), peuvent influencer de manière non négligeable la propagation des ultrasons, en particulier la vitesse et l'atténuation.