ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

TECHNIQUES D'INSPECTION PAR ONDES GUIDÉES ULTRASONORES D'ASSEMBLAGES BRASÉS DANS DES RÉACTEURS AÉRONAUTIQUES

PAR
Pierre COMOT

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

MONTRÉAL, LE 03 AOÛT 2016

© Tous droits réservés, Pierre Comot, 2016

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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Pierre Bélanger, Directeur de Mémoire
Département génie mécanique, École de Technologie Supérieur

M. Philippe Bocher, Co-directeur
Département génie mécanique, École de Technologie Supérieur

M. Vincent Demers, Président du Jury
Département génie mécanique, École de Technologie Supérieur

M. Jean Fournier, Examinateur Externe
Groupe de développement des procédés spéciaux, Pratt & Whitney Canada

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

LE 18 JUILLET 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur de recherche Pierre Bélanger pour le soutient qu'il m'a apporté durant ces deux années, pour sa disponibilité, son efficacité, ses conseils et sa confiance qui m'ont été indispensable pour mener à bien ce projet. De même, je remercie mon co-directeur de recherche Philippe Bocher pour son soutien et sans qui je n'aurais pas eu la possibilité de faire ce mémoire.

Ensuite je voudrais remercier tous ceux qui ont apporté leurs compétences à ce travail de recherche, les membres du futur PulETS et notamment Guillaume Boivin, Frédéric Dupont-Marillia et Christophe Travaglini. De même je remercie les membres du LOPFA, et particulièrement Rémi Bertrand et Damien Texier.

Je tiens à souligner le support de la part du personnel de l'ETS, qui m'a été essentiel pour avancer dans mon travail. Et notamment celui de Mario Corbin, Éric Marcoux et Radu Ramanica. Ainsi que celui de Francesco D'Angelo et Daniel Turner, salariés de Pratt& Whitney Canada, qui m'ont fait profiter de leur expertise dans le domaine du brasage.

Je remercie également l'école des Arts et Métiers ParisTech pour m'avoir permis d'effectuer cette maitrise à l'ÉTS.

De plus je remercie mes amis rencontrés ou non à Montréal, Adèle, Audrey, Camille, Erwan et Nathan.

Enfin je remercie tout particulièrement mes parents pour leur soutien et leur confiance et également Arthur, Banou, Lilou et Nanney.

TECHNIQUES D'INSPECTION PAR ONDES GUIDÉES ULTRASONORES D'ASSEMBLAGES BRASÉS DANS DES RÉACTEURS AÉRONAUTIQUES

Pierre COMOT

RÉSUMÉ

L'industrie aéronautique, cherche à étudier la possibilité d'utiliser de manière structurelle des joints brasés, dans une optique de réduction de poids et de coût. Le développement d'une méthode d'évaluation rapide, fiable et peu couteuse pour évaluer l'intégrité structurelle des joints apparait donc indispensable. La résistance mécanique d'un joint brasé dépendant principalement de la quantité de phase fragile dans sa microstructure. Les ondes guidées ultrasonores permettent de détecter ce type de phase lorsqu'elles sont couplées à une mesure spatio-temporelle. De plus la nature de ce type d'ondes permet l'inspection de joints ayant des formes complexes.

Ce mémoire se concentre donc sur le développement d'une technique basée sur l'utilisation d'ondes guidées ultrasonores pour l'inspection de joints brasés à recouvrement d'Inconel 625 avec comme métal d'apport du BNi-2. Dans un premiers temps un modèle éléments finis du joint a été utilisé pour simuler la propagation des ultrasons et optimiser les paramètres d'inspection, la simulation a permis également de démontrer la faisabilité de la technique pour la détection de la quantité de phase fragile dans ce type de joints. Les paramètres optimisés sont la forme de signal d'excitation, sa fréquence centrale et la direction d'excitation. Les simulations ont montré que l'énergie de l'onde ultrasonore transmise à travers le joint aussi bien que celle réfléchie, toutes deux extraites des courbes de dispersion, étaient proportionnelles à la quantité de phase fragile présente dans le joint et donc cette méthode permet d'identifier la présence ou non d'une phase fragile dans ce type de joint.

Ensuite des expérimentations ont été menées sur trois échantillons typiques présentant différentes quantités de phase fragile dans le joint, pour obtenir ce type d'échantillons différents temps de brasage ont été utilisés (1, 60 et 180 min). Pour cela un banc d'essai automatisé a été développé permettant d'effectuer une analyse similaire à celle utilisée en simulation. Les paramètres expérimentaux ayant été choisis en accord avec l'optimisation effectuée lors des simulations et après une première optimisation du procédé expérimental. Finalement les résultats expérimentaux confirment les résultats obtenus en simulation, et démontrent le potentiel de la méthode développée.

Mots clés: ondes guidées, ultrasons, brasage, Inconel 625, phase fragile

ULTRASONIC GUIDED WAVE INSPECTION OF BRASED LAP JOINTS USED IN AERONAUTIC ENGINES

Pierre COMOT

ABSTRACT

The aerospace industry has been investigating the generalization of brazed structural assembly, to reduce weight and cost. There is therefore a need to develop a rapid, reliable, and cost-effective inspection technique to ensure the structural quality of these assemblies. The mechanical strength of a brazed assembly is mainly linked to the quantity of brittle phases in its microstructure. Ultrasonic guided waves enable the detection of such defect when a spatio-temporal measurement is used. Besides with that type of waves it is possible to assess complex shape joints.

This master thesis focuses on the development of a technique using ultrasonic guided waves to inspect brazed lap joints, which consist of two Inconel 625 plates brazed with BNi-2. Firstly, finite element simulations were performed to simulate the propagation of ultrasonic waves and to optimize the inspection parameters, these simulations have demonstrated the feasibility of this technique to estimate the amount of brittle phases in a brazed assembly. The optimized inspection parameters were the shape of the excitation signal, its center frequency and the direction of excitation. The simulations have shown that ultrasonic wave energy transmitted through the joint, as well as the reflected energy from the joint, were proportional to the amount of brittle phases.

Experimental validations were then performed on three distinctive samples with variable amount of brittle phases in the joint. The samples were brazed for different time (1, 60 and 180 minutes). In order to run the experiments with the same method used in the simulations, the measures were implemented on an automated test bench. The experimental parameters were chosen to validate the simulation results. Finally, experimental results were in accordance with simulations and demonstrate the potential of the inspection method.

Keywords: ultrasonic guided waves, Inconel 625, brazed lap joints, brittle phase, dispersion curves

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 5
1.1 Introduction aux ultrasons 5
1.1.1 Description générale des ultrasons 5
1.1.1.1 Les équations régissant leur comportement dans le cas d'un espace à une dimension 6
1.1.1.2 Le phénomène d'atténuation 8
1.1.1.3 Comportement à une interface solide/solide 8
1.1.2 Les ondes guidées ultrasonores 10
1.1.2.1 Les courbes de dispersion 10
1.1.2.2 Les déformées associées à chaque mode 13
1.1.3 Les méthodes de générations d'ondes ultrasonores 15
1.1.3.1 Les transducteurs acoustiques électromagnétiques 16
1.1.3.2 La génération d'ultrasons par laser 17
1.1.3.3 Les transducteurs à effet piézoélectrique 18
1.1.4 Les méthodes de mesure d'ondes ultrasonores 19
1.1.4.1 Mesure d'ondes ultrasonores par laser 19
1.1.5 Les méthodes d'analyse de signaux ultrasonores 21
1.1.5.1 La transformée de Fourier temporelle 21
1.1.5.2 La transformée de Fourier spatiotemporelle 23
1.1.5.3 La décomposition en valeurs singulières 26
1.2 Introduction au procédé de brasage 29
1.2.1 Description du procédé 29
1.2.2 Cas du brasage d'un joint à recouvrement simple d'Inconel 625 30
1.2.2.1 Phases en présence dans le joint 32
1.2.2.2 Lien entre les phases en présence et les caractéristiques mécaniques du joint 33
1.3 L'inspection par ultrasons de joints à recouvrement 34
1.3.1 Le type de joints inspectés 35
1.3.2 Le type de défauts étudiés 36
1.3.3 Méthodologie et résultats 37

CHAPITRE 2 SIMULATION ÉLÉMENTS FINIS DE LA PROPAGATION DES ULTRASONS 39
2.1 Le modèle éléments finis 39
2.1.1 Description du modèle 39
2.1.2 La méthode de traitement des résultats 41
2.2 Étude de faisabilité de la méthode de mesure 42
2.2.1 Influence de la fréquence et de la direction d'excitation 42

2.2.2 Effet des propriétés mécaniques du joint 45
2.3 Résultats de l'étude paramétrique 46
2.3.1 Influence du filtrage de mode 46
2.3.2 Effet de la largeur de la bande passante du signal d'excitation 49
2.3.3 Influence des paramètres géométriques 51
2.3.4 Sensibilité de la méthode aux variations du module d'Young de la phase eutectique 54
2.4 Conclusion 55

CHAPITRE 3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX 57
3.1 Système de mesure expérimental 57
3.1.1 Sous-système utilisé pour la génération du signal ultrasonore 58
3.1.2 Sous-système utilisé pour la mesure du signal ultrasonore 59
3.1.3 Sous-système d'automatisation utilisé pour permettre une mesure multi-points 61
3.1.4 Utilisation d'un absorbant 61
3.2 Échantillons testés 62
3.2.1 Microstructures des échantillons 63
3.3 Résultats préliminaires 64
3.3.1 Courbes de dispersion obtenues 64
3.3.2 Influence de la position des vibromètres 66
3.3.3 Influence de l'absorbant 67
3.3.4 Influence du nombre de cycles 68
3.4 Résultats 70

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 73

ANNEXE I PHOTOS DU SYSTÈME DE MESURE EXPÉRIMENTAL 77

ANNEXE II DONNÉES BRUTES EXPÉRIMENTALES 79

BIBLIOGRAPHIE 80

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Avantages et inconvénients de la technologie EMAT 17

Tableau 1.2 Avantages et inconvénients de la génération d'ondes ultrasonores par laser 17

Tableau 1.3 Avantages et inconvénients de la génération d'ondes ultrasonores par transducteur à effet piézoélectrique 19

Tableau 1.4 Propriétés d'échantillonage du signal spatiotemporelle $u(x,t)$ 25

Tableau 1.5 Liste des paramètres importants lors du brasage et les phénomènes physiques correspondants 30

Tableau 1.6 Composition chimique en pourcentage massique 31

Tableau 1.7 Propriétés mécaniques des matériaux utilisés 31

Tableau 1.8 Phases eutectiques présentes et leur module d'Young 32

Tableau 1.9 Résumé des articles sur l'inspection par ultrasons de joints à recouvrement simple 35

Tableau 2.1 Propriétés mécaniques des matériaux utilisés 40

Tableau 2.2 Paramètres de filtrage 48

Tableau 2.3 Paramètres optimaux, d'après les simulations, pour l'inspection par ondes guidées ultrasonores de joints brasés à recouvrement simple 56

Tableau 3.1 Propriétés du PZT-5H utilisé 58

Tableau 3.2 Recettes de brasage 62

Tableau 3.3 Épaisseurs moyennes du jeu et de la zone eutectique pour les différents échantillons 63

Tableau 3.4 Paramètres utilisés pour l'inspection des échantillons de joints brasés 70

Tableau 3.5 Valeurs moyennes de l'énergie $e_{trans/inc}$ pour le signal non filtré et filtré en fonction de l'échantillon 70

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Déformées à basse fréquence des ondes de cisaillement verticales (a), de compression (b) et de cisaillement horizontales (c). Les flèches rouges représentent la direction dominante du mouvement des particules dans le milieu 6

Figure 1.2 Diagramme de propagation des ultrasons à une interface solide/solide 9

Figure 1.3 Schéma de la propagation d'ultrasons dans un guide d'onde 12

Figure 1.4 Courbes de dispersion théoriques 13

Figure 1.5 Déformées associées aux quatre premiers modes des ondes SH 15

Figure 1.6 Fonctionnement d'un EMAT pour la génération d'ondes ultrasonore 16

Figure 1.7 Schéma principe de génération d'ultrasons par laser : mode ablation (a) et mode thermo-élastique (b) 18

Figure 1.8 Interféromètre hétérodyne 20

Figure 1.9 FFT-2D caractéristique (fréquence en fonction du nombre d'onde), l'amplitude est donnée en décibel et normalisée au maximum 24

Figure 1.10 Schéma de principe de la méthode SVD 26

Figure 1.11 Courbes de dispersion expérimentales du même signal ultrasonore obtenues par FFT-2D (a) et par SVD (b) 28

Figure 1.12 Principe du procédé de brasage 29

Figure 1.13 Les différents types de joints 31

Figure 1.14 Différentes microstructures observables, en fonction du temps de brasage (a) 15 min, (b) 80 min et (c) 150 min. Les mesures en gras correspondent à l'épaisseur du joint et les autres à celles de la zone eutectique 33

Figure 2.1 Schéma du modèle FE utilisé pour simuler la propagation des ondes guidées ultrasonores à travers un joint brasé 40

Figure 2.2 Schéma du principe de traitement des résultats de simulation 41

Figure 2.3 Schéma de la direction d'excitation pour les modes de Lamb (A et S) et le mode SH 42

Figure 2.4 Évolution de $R_{W/E}$ pour les modes A, S et SH, en fonction de la fréquence d'excitation 43

Figure 2.5 Évolution de l'énergie ultrasonore dans la zone eutectique pour les modes A, S et SH, en fonction de la fréquence 44

Figure 2.6 Ratios d'énergie $e_{trans/inc}$ et $e_{ref/inc}$, en fonction du module d'Young de la phase eutectique E_{eut} 45

Figure 2.7 FFT-2D caractéristique (fréquence en fonction du nombre d'onde), l'amplitude est donnée en décibel et normalisée au maximum 47

Figure 2.8 FFT-2D filtrée pour le mode SH_2 (fréquence en fonction du nombre d'onde), l'amplitude est donnée en décibel et normalisée au maximum 48

Figure 2.9 Variation du ratio d'énergie $R_{W/X}$, en fonction de E_{eut} pour les différents modes filtrés 49

Figure 2.10 Spectre du signal d'excitation, pour un signal de 5 cycles (a) et pour un signal de 30 cycles (b) 50

Figure 2.11 Évolution de $R_{W/E}$ pour le mode SH_0 en fonction du nombre de cycles 51

Figure 2.12 Schéma de la géométrie du joint avec en rouge les paramètres géométriques caractéristiques 52

Figure 2.13 Ratio d'énergie $e_{trans/inc}$ en fonction de la longueur de recouvrement du joint 53

Figure 2.14 Ratio d'énergie $e_{trans/inc}$ en fonction de l'épaisseur du jeu 53

Figure 2.15 Ratio d'énergie $e_{trans/inc}$ en fonction de la quantité d'eutectique dans le joint 54

Figure 2.16 Variation du ratio d'énergie $R_{W/X}$ en fonction du delta de module d'Young 55

Figure 3.1 Architecture du système de mesure 57

Figure 3.2 Géométrie du transducteur utilisé et axes utilisés pour définir les constantes piézoélectriques 59

Figure 3.3 Schéma du montage expérimental utilisé 60

Figure 3.4 Géométrie des échantillons (les dimensions sont en mm) 62

Figure 3.5 Les différentes microstructures observables, en fonction du temps de brasage (1) 1 min, (2) 60 min et (3) 180 min 64

Figure 3.6 Courbes de dispersions expérimentales caractéristiques, du signal en amont du joint 65

Figure 3.7 Courbes de dispersions expérimentales caractéristiques, du signal en aval du joint 65

Figure 3.8 Courbes de dispersion obtenues expérimentalement (a) et par simulation (b), les lignes rouges correspondent aux courbes théoriques 66

Figure 3.9 Courbes de dispersion obtenues avec les vibromètres L_1 et L_2 (a) et celles avec les vibromètres L_3 et L_2 (b) 67

Figure 3.10 Courbes de dispersion obtenues sans absorbant (a), avec de l'absorbant (b) et avec beaucoup d'absorbant (c) 68

Figure 3.11 Courbes de dispersion obtenues pour $N_{cyc} = 2$ en amont du joint 69

Figure 3.12 Courbes de dispersion obtenues en aval du joint pour $N_{cyc} = 20$ (a) et $N_{cyc} = 2$ (b) 69

Figure 3.13 Ratio d'énergie $e_{trans/inc}$ en fonction de l'épaisseur d'eutectique dans le joint par simulation et expérimentalement 71

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

EMAT	Transducteur acoustique électromagnétique
SVD	Décomposition en valeurs singulières (*Singular value decomposition*)
FFT	Transformé de Fourier rapide (*Fast Fourier transform*)
FFT-2D	Transformé de Fourier rapide spatiotemporelle
FE	Éléments finis (*Finite element*)
PZT	Matériau piézoélectrique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

E	Module d'Young (GPa)
G	Module de Cisaillement (GPa)
ρ	Masse volumique ($g.cm^{-3}$)
ν	Coefficient de Poisson
k	Nombre d'onde (m^{-1})
f	Fréquence (Hz)
e_{jeu}	Épaisseur jeu (μm)
e_{eut}	Épaisseur phase eutectique (μm)
e_{inc}	Énergie incidente (UA)
e_{trans}	Énergie transmise (UA)
e_{ref}	Énergie réfléchie (UA)

INTRODUCTION

Le brasage est un procédé très ancien connu depuis le IV^{e} siècle avant notre ère et permettait déjà de fabriquer des assemblages complexes à cette époque. Il a depuis été grandement amélioré et diversifié, en effet aujourd'hui le brasage est utilisé dans de nombreux secteurs industriels aussi bien pour assurer des fonctions esthétiques que techniques.

L'emploi de cette technique est très répandu dans le secteur aéronautique et surtout pour la fabrication des moteurs. En effet, sa simplicité permet l'assemblage de pièces complexes plus simplement que le soudage par exemple. De même, les fortes contraintes thermiques régnants dans un turboréacteur nécessitent l'utilisation de super-alliages pour lesquels le brasage est particulièrement approprié. Les injecteurs de carburant sont par exemple des pièces entièrement assemblées par brasage dans lesquels il assure l'étanchéité. Les super-alliages de nickel comme l'Inconel sont par exemple très utilisés. Par contre, le brasage est encore assez peu employé pour assurer une fonction structurelle dans ce type d'assemblages ; or l'utilisation structurelle de joints brasés est très attractive dans une perspective de réduction de poids et de coût dans le domaine de l'aéronautique. Dans cette optique, de nombreuses recherches sont menées actuellement pour comprendre les mécanismes enjeux lors du brasage et comment les propriétés mécaniques finales d'un assemblage en résultent. Il a été démontré notamment que la présence de phases eutectique dans la microstructure du joint influençait grandement les qualités structurelles finales. Ensuite, la recherche a permis d'identifier les paramètres optimaux, du procédé de fabrication, permettant de prévenir la formation de cette phase. Ainsi aujourd'hui il est possible de fabriquer des assemblages brasés ayant de bonnes caractéristiques mécaniques.

Si le procédé de brasage est maintenant bien maitrisé, il reste, dans une perspective d'une utilisation industrielle de ce type de joints, à développer des moyens de contrôle non destructif permettant d'assurer la qualité des pièces fabriquées. Ce qui est d'autant plus indispensable dans un secteur comme celui de l'aéronautique, dans lequel la qualité des pièces fabriquées se

doit d'être irréprochable. Donc le développement d'une méthode d'évaluation rapide, fiable et peu couteuse pour évaluer l'intégrité structurelle des joints brasés a été étudié lors de ce mémoire. L'inspection par ondes guidées ultrasonores a été retenue car elle présente de nombreux avantages répondant aux exigences liées au secteur de l'aéronautique et à ce type de joint. Les ondes guidées ultrasonores permettent de détecter des défauts liés à la microstructure et autorisent l'inspection de pièces ayant des formes complexes car il n'est pas nécessaire que la zone testée soit directement accessible. De plus, cette technique peut être mise en place facilement sans avoir à effectuer de pré-traitement sur les pièces et peut être facilement automatisée pour assurer une bonne répétabilité des mesures.

Ce travail de recherche a été accompli en partenariat avec Pratt & Whitney Canada (PWC), les pièces inspectées sont des joints à recouvrement simple d'Inconel 625 (un super-alliage de nickel) avec comme brasure du BNi-2. Ce sont ces matériaux qui sont étudiés car ils sont largement utilisés par PWC dans leurs processus de fabrication. Ce mémoire est séparé en trois chapitres reprenant les étapes du travail effectué pour développer cette méthode d'inspection.

Tout d'abord, le chapitre 1 permet d'introduire la théorie liée aux ultrasons, à travers l'explication des différents mécanismes enjeux lors de la propagation de ce type d'ondes dans un solide. Plus particulièrement, le cas des ondes guidées est détaillé en développant les outils mathématiques utilisés pour les décrire. Ensuite, les aspects plus technologiques liés aux ultrasons sont énumérés pour expliquer les différentes méthodes pouvant être utilisées pour générer et mesurer des ultrasons. De plus les méthodes de traitement et d'analyse des signaux ultrasonores sont détaillées, ces outils étant indispensables pour étudier des ultrasons. Dans une deuxième partie, c'est le procédé de brasage qui est décrit en se concentrant surtout sur le type de joints étudié dans le cadre de ce mémoire. De plus cette partie résume les résultats des recherches précédentes sur l'étude des joints brasés et notamment sur le lien entre caractéristiques mécaniques et micro-structure. Finalement la dernière partie de ce chapitre concerne les travaux

effectués sur l'inspection par ondes guidées ultrasonores de joints à recouvrement simple, mais assemblés avec des méthodes différentes du brasage.

Le chapitre 2 décrit comment une modélisation par éléments finis a été utilisée pour développer et optimiser le système d'inspection. Tout d'abord, le modèle utilisé est défini et la méthode de traitement des résultats est expliquée. Puis, il est vérifié si les variations du signal ultrasonore, causées par la présence d'une phase eutectique, sont bien mesurables expérimentalement. Enfin, les résultats de l'étude paramétrique, menée pour déterminer les paramètres optimaux d'inspection, sont exposés. De même cette étude est utilisée pour vérifier la fiabilité des mesures vis-à-vis des incertitudes qui peuvent exister sur la géométrie des joints étudiés.

Finalement, le chapitre 3 donne les résultats expérimentaux obtenus sur l'inspection par ondes guidées ultrasonores de trois échantillons représentatifs en utilisant les paramètres déterminés par simulation, ainsi que les résultats obtenus lors des micrographies pour vérifier la quantité de phases eutectique présente dans chaque joint. Les différentes composantes du système qui a été développé sont également décrites.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction aux ultrasons

1.1.1 Description générale des ultrasons

Une onde ultrasonore correspond à une onde mécanique que se propage à travers un support et à une fréquence supérieure au domaine audible pour l'homme d'où le terme ultrason. L'étude de ces ondes est un domaine à part entière de la physique et de nombreuses publications détaillant la physique des ultrasons sont disponibles : Kundu *et al.* (2003); Cheeke (2012); Gazanhes et Jessel (1970); Shull et Tittmann (2002). Ce chapitre présente donc uniquement les principaux mécanismes de propagation d'ultrasons utilisés dans le cadre de ce mémoire et pour des cas simples.

Tout d'abord, il est important de rappeler que lors de la propagation d'ondes ultrasonores dans un matériau solide (cas du travail réalisé dans ce mémoire) il peut exister différents types d'ondes, les ondes de volumes séparées en deux familles, les ondes longitudinales ou de compression et les ondes transversales ou de cisaillement. Sachant que la direction dominante de déplacement des particules caractérise chacun des types d'ondes. Il y a également les ondes de surface mais elles n'ont pas été utilisées lors de ce travail et donc ne seront pas détaillées. La figure 1.1 présente la déformée à basse fréquence du mode fondamental pour chaque type d'ondes de volumes.

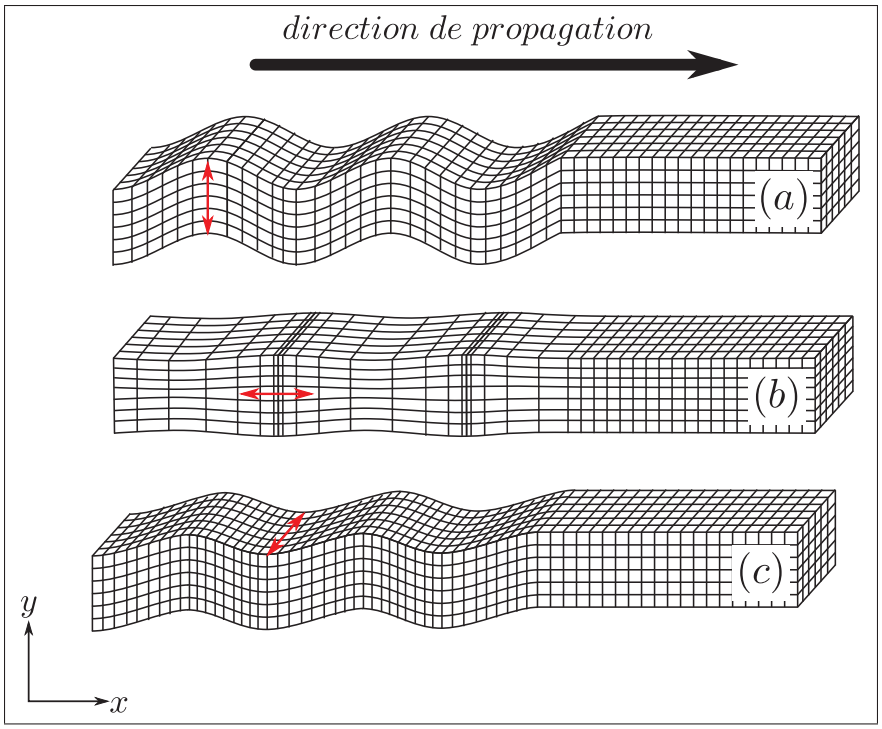


Figure 1.1 Déformées à basse fréquence des ondes de cisaillement verticales (a), de compression (b) et de cisaillement horizontales (c). Les flèches rouges représentent la direction dominante du mouvement des particules dans le milieu

1.1.1.1 Les équations régissant leur comportement dans le cas d'un espace à une dimension

Cette première partie détaille les équations permettant de décrire le comportement des ultrasons dans le cas d'un matériau linéaire, isotrope. Les déformations lors de la propagation d'ultrasons étant très faibles, le comportement uniquement linéaire est valide. Et l'isotropie est une hypothèse permettant de simplifier les équations et valable pour les matériaux utilisés lors de ce mémoire.

Les équations sont adaptées de Shull et Tittmann (2002). Considérons un élément dx du matériau soumis à un déplacement u provoqué par une onde ultrasonore longitudinale. La déformation correspondante est

$$\varepsilon = \frac{u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} \tag{1.1}$$

Or d'après la loi de Hooke, la contrainte causée par cette déformation est

$$\sigma = E \times \varepsilon = E \times \frac{\partial u}{\partial x} \tag{1.2}$$

avec E le module d'Young du matériau. Ensuite la force correspondante à cette contrainte est

$$F = A \times \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx - \sigma \right) = A \times dx \times \frac{\partial \sigma}{\partial x} \tag{1.3}$$

avec A la surface sur laquelle la force s'applique. Donc la force volumique f_v est

$$f_v = \frac{F}{V} = \frac{F}{A \times dx} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \tag{1.4}$$

Or la deuxième loi de Newton donne

$$f_v = \rho \times \frac{\partial^2 u}{\partial^2 t} \tag{1.5}$$

Finalement en remplaçant σ dans (1.4) par son expression dans (1.2) et avec l'équation précédente il vient

$$\frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} = \frac{\rho}{E} \times \frac{\partial^2 u}{\partial^2 t} \tag{1.6}$$

Il s'agit de l'équation d'onde. Comme l'explique Cheeke (2012); Shull et Tittmann (2002); Gazanhes et Jessel (1970), les solutions de cette équation sont de la forme :

$$u = Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)} \tag{1.7}$$

chacun des termes correspondant au sens de propagation possible des ondes ultrasonores. Où k et ω sont respectivement le nombre d'onde et la pulsation. Et la vitesse de propagation de l'onde est :

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{1.8}$$

Il est possible de généraliser le résultat, dans le cas de la propagation d'une onde ultrasonore dans un espace à 3 dimensions anisotrope. Il est alors sensiblement plus complexe car la loi de

Hooke devient :

$$\sigma_{ij} = K_{ijkl} \times \varepsilon_{kl} \tag{1.9}$$

Ces équations de propagation d'ondes servent de base à la théorie des ultrasons.

1.1.1.2 Le phénomène d'atténuation

L'un des phénomènes qu'il est important de considérer lors de l'analyse de la propagation d'ultrasons est l'atténuation. Elle correspond à une diminution de l'énergie ultrasonore lors de la propagation d'une onde au sein d'un même matériau.

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \tag{1.10}$$

où I_0 est l'intensité ultrasonore initiale, I l'intensité à la distance x et α le coefficient d'atténuation. Ce coefficient dépend de nombreux paramètres comme expliqué par Cheeke (2012). Les phénomènes physiques responsables de cette atténuation sont nombreux, il y a notamment les pertes d'énergies causées par les réflexions qui se produisent au sein du matériau à cause de ses caractéristiques (grains, porosités ou microfissures) ou la fréquence du signal ultrasonore. En effet pour des fréquences trop élevées l'onde ne pourra traverser qu'une épaisseur limitée du solide, Gazanhes et Jessel (1970) montrent que pour un matériau donné le rapport $\frac{\alpha}{f^2}$ est constant.

1.1.1.3 Comportement à une interface solide/solide

Le comportement des ultrasons à une interface est aussi un phénomène qu'il est important d'étudier. En effet, il est présent aussi bien à la limite entre deux matériaux en contact que lorsque différentes phases sont présentes dans un matériau. Le comportement est caractérisé grâce à la loi de Snell-Descartes qui dépend des vitesses de propagation des ondes dans chaque matériau ou phase. Dans le cas d'une incidence oblique, on obtient la figure 1.2.

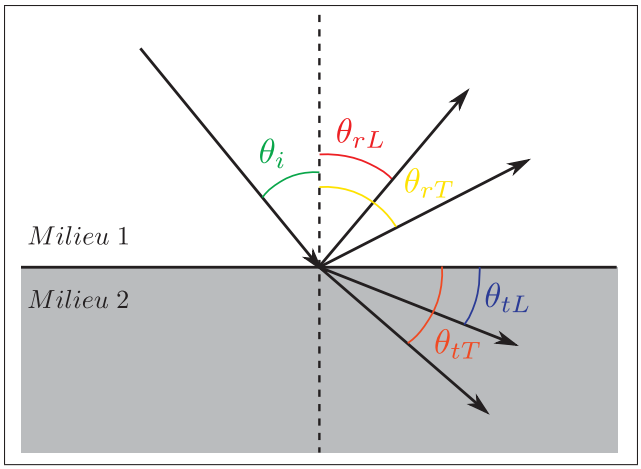


Figure 1.2 Diagramme de propagation des ultrasons à une interface solide/solide

Le cas considéré ici est celui d'une frontière entres deux solides, dans ce cas l'onde incidente donne naissance aussi bien à des ondes longitudinales que transversales. La loi de Snell-Descartes donne :

$$\frac{\sin\theta_i}{v_i} = \frac{\sin\theta_{tT}}{v_{tT}} = \frac{\sin\theta_{tL}}{v_{tL}} \tag{1.11}$$

avec respectivement θ_i, θ_{tT}, θ_{tL} l'angle de l'onde incidente, celui de l'onde transversale transmise et celui de l'onde longitudinale transmise. Et v_i, v_{tT}, v_{tL} sont les vitesses de ces différentes ondes. Cette équation permet donc de déterminer la direction de propagation des différentes ondes.

Il est aussi intéressant d'étudier la répartition de la puissance de l'onde ultrasonore incidente. Elle est définie par les coefficients de réflexions R et de transmission T qui eux même dépendent de l'impédance acoustique de chaque matériau. Le détail des équations se fera dans le cas d'une incidence normale. Soit Z_1 et Z_2 l'impédance acoustique de chaque matériau, alors :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad T = \sqrt{1-R^2} = \sqrt{1-\left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right)^2} \tag{1.12}$$

Et si les puissances ultrasonores, incidente, réfléchie et transmise sont notées comme suit P_i, P_r et P_t, alors :

$$P_r = P_i \times R^2 \qquad P_t = P_i \times T^2 \tag{1.13}$$

Donc la répartition de la puissance dépend aussi des caractéristiques de chaque matériau, l'impédance acoustique étant définie par :

$$Z = \rho \times v \tag{1.14}$$

avec ρ la masse volumique et v la vitesse de propagation de l'onde.

Cette première section a permis d'expliquer succinctement et pour des cas simples les principaux mécanismes présents lors de la propagation d'ondes ultrasonores dites classiques. Le chapitre suivant présente le cas des ondes guidées qui sont un cas particulier des ultrasons. C'est ce type d'ondes qui a été le plus étudié lors de ce travail de recherche.

1.1.2 Les ondes guidées ultrasonores

Les ondes guidées correspondent à la propagation d'ultrasons à travers un guide d'ondes. Ce dernier étant caractérisé par une épaisseur petite devant sa longueur. Même si en réalité le paramètre important n'est pas uniquement l'épaisseur mais aussi la fréquence comme il sera expliqué plus loin.

Cette section détaille les mécanismes liés aux ondes guidées, ce qui permettra de les étudier.

1.1.2.1 Les courbes de dispersion

Comme expliqué dans l'introduction de ce chapitre lors de la propagation d'ultrasons dans un matériau plusieurs familles de modes peuvent exister. Dans ce cas, les ondes de cisaillement verticales et de compressions sont notées respectivement *A* et *S*. Cette section présentera uniquement le cas des ondes de cisaillement horizontales (notées *SH*) car c'est ce type d'ondes qui a été le plus utilisé lors de ce mémoire, sachant que les résultats pour les deux autres types

d'ondes sont similaires. Une explication théorique détaillée est disponible dans Kundu *et al.* (2003). La théorie suivante va détailler le cas d'une plaque homogène isotrope dans le vide. Cette plaque ayant une épaisseur $2h$, un module de cisaillement G et dont la vitesse de propagation du mode fondamental des ondes de cisaillement c_S est

$$c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{1.15}$$

où ρ est la masse volumique du matériau. D'autre part, le nombre d'ondes k_S associé à la fréquence f est défini par la relation

$$k_S = \frac{2\pi f}{c_S} \tag{1.16}$$

Il est possible de montrer (Kundu *et al.*, 2003) que le champ de déplacement associé à une onde de cisaillement horizontale dans un milieu infini est

$$u_z = Ae^{ikx+i\beta y-i\omega t} = Ae^{ikx} \times e^{i\beta y} \times e^{-i\omega t} \tag{1.17}$$

avec A l'amplitude de l'onde et

$$\beta = \sqrt{k_s^2 - k^2} \tag{1.18}$$

Dans la suite la dépendance en fonction du temps $e^{-i\omega t}$ sera implicite. Maintenant dans le cas d'un guide d'onde comme défini dans la figure 1.3, le champ de déplacement u_z est différent, deux sens de propagation ($+y$ et $-y$) étant possibles. Son expression est

$$u_z = (Ae^{-i\beta y} + Be^{i\beta y})e^{ikx} \tag{1.19}$$

Ensuite l'utilisation des conditions aux limites associées au problème, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de contraintes en surface sur le guide d'onde (en $y = \pm h$) et la relation entre contrainte et déformation donne

$$\begin{cases} \sigma_{yz} = G(\frac{\partial u_z}{\partial y})_{y=h} &= 0 \\ \sigma_{yz} = G(\frac{\partial u_z}{\partial y})_{y=-h} &= 0 \end{cases} \tag{1.20}$$

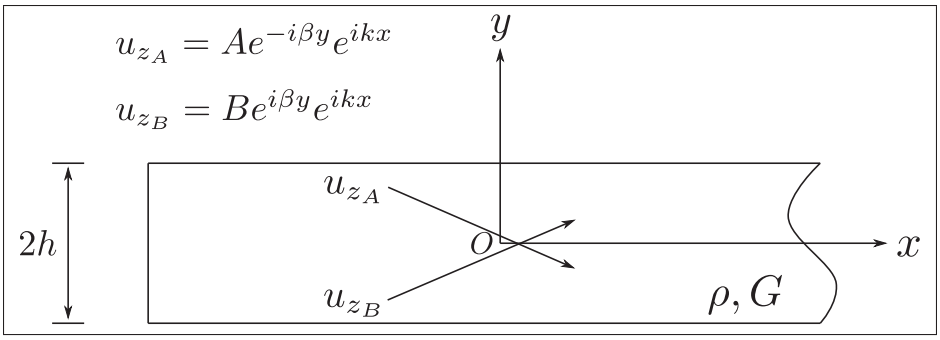


Figure 1.3 Schéma de la propagation d'ultrasons dans un guide d'onde
Adaptée de Kundu *et al.* (2003)

Et donc en remplaçant $\frac{\partial u_z}{\partial y}$ par son expression calculée avec l'équation 1.19

$$\begin{cases} iG\beta(-Ae^{-i\beta h} + Be^{i\beta h})e^{ikx} &= 0 \\ iG\beta(-Ae^{i\beta h} + Be^{-i\beta h})e^{ikx} &= 0 \end{cases} \tag{1.21}$$

Soit sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} -e^{-i\beta h} & e^{i\beta h} \\ -e^{i\beta h} & e^{-i\beta h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{1.22}$$

La résolution de l'équation 1.22 se faisant en calculant les valeurs de β pour lesquelles le déterminant de la première matrice est nul. C'est-à-dire quand

$$-e^{-2i\beta h} + e^{2i\beta h} = 2i\sin(2\beta h) = 0 \tag{1.23}$$

Or les solutions de l'équation 1.23 sont

$$\beta = \sqrt{k_S^2 - k^2} = \frac{n\pi}{2h}, \quad n = 0, 1, 2, ... \tag{1.24}$$

Il apparait donc qu'il existe plusieurs valeurs possibles pour k, notées k_n, qui si k_S est remplacé par son expression, sont égales à

$$k_n = \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c_S}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{2h}\right)^2}, \quad n = 0,1,2,... \tag{1.25}$$

Avec l'équation 1.25, il est alors possible de tracer n courbes dans l'espace (k, f) permettant d'obtenir la figure 1.4. Ces courbes sont appelées courbes de dispersion, elles représentent les différents modes qui peuvent exister dans un guide d'ondes. Par exemple, la figure 1.4 indique que pour $f \in [0,2]$ MHz, seulement les quatre premiers modes peuvent exister. De plus, il apparait que les modes, hormis le premier, n'existent pas en dessous d'une certaine fréquence, appelée fréquence de coupure. D'autre part, les différents modes sont notés SH_n dans leur ordre d'apparition.

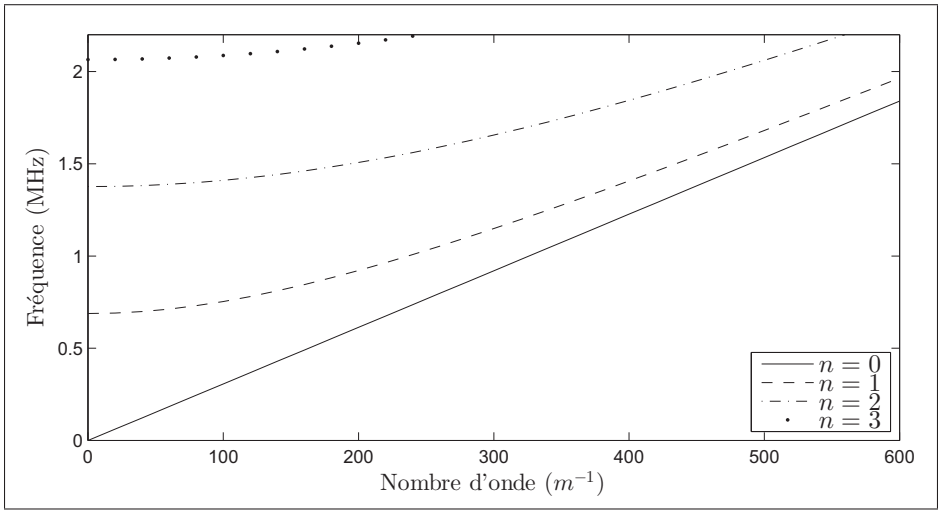


Figure 1.4 Courbes de dispersion théoriques

1.1.2.2 Les déformées associées à chaque mode

Si entre deux modes les courbes de dispersion sont différentes, leurs déformées associées le sont également. La déformée étant la forme du champ de déplacement u_z, créé par l'onde, dans

la direction y. Il est possible de calculer cette déformée en fonction du mode n. Tout d'abord d'après l'équation 1.22, il est possible de déterminer la relation entre A et B,

$$B = Ae^{i2\beta h} \tag{1.26}$$

Et ensuite en remplaçant β par son expression calculé dans l'équation 1.24, cette relation devient

$$B = Ae^{in\pi},\ n = 0,1,2,... \tag{1.27}$$

Et finalement en utilisant la relation de l'équation 1.27 et en remplaçant β par son expression dans le champ de déplacement u_z, donné dans l'équation 1.19, il vient

$$u_z = A\left(e^{-i\frac{n\pi}{2h}y} + e^{in\pi}e^{i\frac{n\pi}{2h}y}\right)e^{ikx},\ n = 0,1,2,... \tag{1.28}$$

Or le terme $e^{in\pi}$ est égal à 1 ou -1 en fonction de la parité de n ce qui donne

$$u_z = \begin{cases} A\left(e^{-i\frac{n\pi}{2h}y} + e^{i\frac{n\pi}{2h}y}\right)e^{ikx}, & n = 0,2,4,... \\ A\left(e^{-i\frac{n\pi}{2h}y} - e^{i\frac{n\pi}{2h}y}\right)e^{ikx}, & n = 1,3,5,... \end{cases} \tag{1.29}$$

Et finalement en utilisant les formules d'Euler il est possible de faire apparaitre les fonctions sinus et cosinus, ce qui donne

$$u_z = \begin{cases} 2A\cos\left(\frac{n\pi}{2h}y\right)e^{ikx}, & n = 0,2,4,... \\ -2Ai\sin\left(\frac{n\pi}{2h}y\right)e^{ikx}, & n = 1,3,5,... \end{cases} \tag{1.30}$$

Donc si n est paire la fonction u_z est symétrique par rapport à y, les modes correspondants sont appelés modes symétriques et s'il est impair alors u_z est antisymétrique par rapport à y et les modes correspondants sont appelés modes antisymétriques. Les déformées associées aux

premiers modes sont données dans la figure 1.5, où les flèches représentent l'amplitude du déplacement u_z. Il apparait donc que chaque mode associé à la famille d'ondes ultrasonore *SH* aura une influence différente en fonction de la position dans l'épaisseur du guide d'onde. Par exemple, les ondes antisymétriques (notées *A*) n'entrainent pas de déformation dans la direction z au milieu du joint.

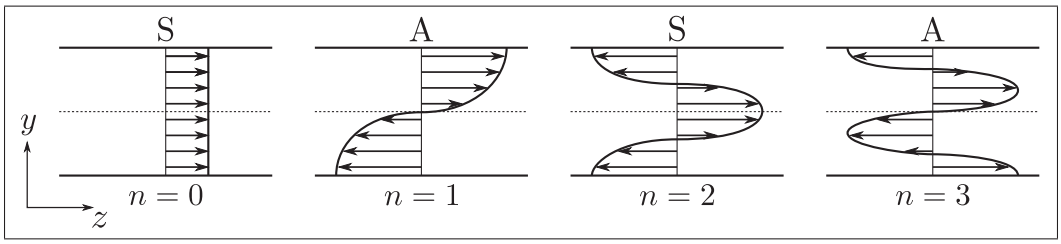


Figure 1.5 Déformées associées aux quatre premiers modes des ondes SH
Adaptée de Kundu *et al.* (2003)

Les deux sections précédentes ont introduit la théorie liée aux ultrasons dans des cas simples. Ce qui a permis de mettre en évidence les différents mécanismes lors de la propagation d'ultrasons. De plus certains paramètres liés aux ondes ultrasonores et des outils de représentations ont été définis, ceux-ci étant essentiels pour ensuite pouvoir analyser un signal ultrason comme il sera montré dans les chapitres suivants. Mais tout d'abord les sections 1.1.3 et 1.1.4 présentent un aspect plus technologique lié aux ultrasons, les méthodes de génération et de mesure d'ondes ultrasonores.

1.1.3 Les méthodes de générations d'ondes ultrasonores

Il existe de nombreuses manières de générer des ultrasons dans un matériau chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. Cette section présente les trois technologies les plus utilisées, sachant que le choix se fait selon les critères suivants

- nature du matériau dans lequel doit se propager l'onde
- accessibilité de l'échantillon
- coût

- conditions ambiantes

Les trois méthodes présentées ici sont la génération par transducteur acoustique électromagnétique (EMAT), celle par laser et enfin par transducteur à effet piézoélectrique

1.1.3.1 Les transducteurs acoustiques électromagnétiques

La génération d'ondes ultrasonores par EMAT consiste à induire des courants de Foucault $\vec{J}$, dans un matériau conducteur électrique, qui par interaction avec un champ électromagnétique $\vec{H}$ (généré par un aimant permanent) va créer des forces de Lorentz $\vec{F}$ qui vont elles-mêmes générer les ondes ultrasonores. Le principe est détaillé dans la figure 1.6

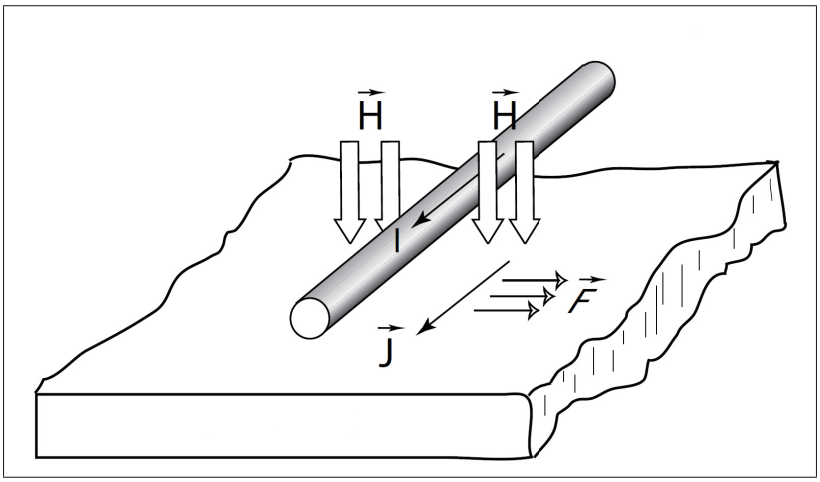


Figure 1.6 Fonctionnement d'un EMAT pour la génération d'ondes ultrasonore
Adaptée de Shull et Tittmann (2002)

Les avantages et inconvénients de cette technologie sont résumés dans le tableau 1.1

Tableau 1.1 Avantages et inconvénients de la technologie EMAT

Avantages	Inconvénients
- utilisation sans contact - possibilité de générer tout types d'ondes - peu sensible à la température	- possible uniquement avec des matériaux conducteurs - coût - encombrement

1.1.3.2 La génération d'ultrasons par laser

La génération d'ultrasons par laser est une technologie relativement simple dans son fonctionnement. Deux méthodes, utilisant des phénomènes physiques différents, peuvent être distinguées.

La première méthode est la méthode par ablation, elle consiste à concentrer un faisceau laser sur une zone avec une puissance importante. Ceci va entrainer la vaporisation d'une faible quantité de matériau à la surface de l'échantillon ce qui va générer une force de réaction et donc un déplacement c'est à dire une onde ultrasonore. La deuxième méthode est celle par effet thermo-élastique, là encore le faisceau laser est concentré sur une zone mais avec une puissance plus faible ce qui a pour conséquence d'augmenter la température localement. Ce gradient de température va générer une contrainte locale et donc là encore une onde ultrasonore. Le schéma de principe de ces méthodes est donné dans la figure 1.7.

Les avantages et inconvénients des deux modes de fonctionnement de cette technologie sont résumés dans le tableau 1.2

Tableau 1.2 Avantages et inconvénients de la génération d'ondes ultrasonores par laser

Avantages	Inconvénients
- utilisation sans contact et à grande distance - peu sensible à la température	- types d'ondes pouvant être générées limité - coût - encombrement - le mode par ablation n'est pas réellement non destructif

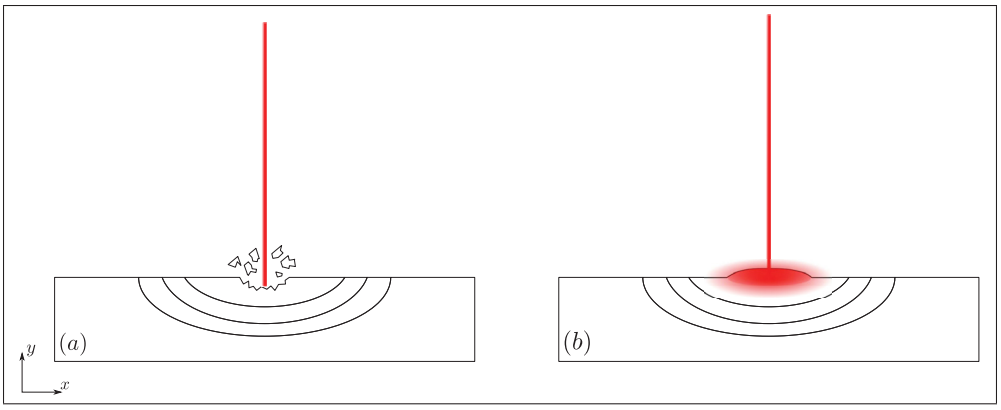


Figure 1.7 Schéma principe de génération d'ultrasons par laser : mode ablation (a) et mode thermo-élastique (b)

1.1.3.3 Les transducteurs à effet piézoélectrique

L'effet piézoélectrique

> La piézoélectricité est la propriété que présentent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique (effet direct) et de se déformer lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique (effet inverse). (Nogarede, 1996, p.2)

Cette propriété de certains matériaux vient de la non symétrie des microcristaux qui la compose. En effet cette dissymétrie va former un dipôle électrique, qui sous l'action d'un champ électrique va causer un mouvement et inversement sous une action mécanique un déplacement de charge. Dans le cas des céramiques PZT, très utilisées pour la génération d'ultrasons, la dissymétrie cristalline est générée par l'application d'un champ électrique intense. Les avantages et les inconvénients des transducteurs, composés d'un élément piézoélectrique, sont résumés dans le tableau 1.3. Sachant que la limite d'utilisation en température est donnée par la température de Curie du matériau piézoélectrique utilisé, celle-ci correspondant à la température pour laquelle la matériau se dépolarise.

Tableau 1.3 Avantages et inconvénients de la génération d'ondes ultrasonores par transducteur à effet piézoélectrique

Avantages	Inconvénients
- encombrement - tous les types d'ondes peuvent être générées - coût	- technologie par contact - sensible à la température

1.1.4 Les méthodes de mesure d'ondes ultrasonores

Comme pour la sous-section 1.1.3, il est possible de distinguer trois grandes techniques de mesure d'ondes ultrasonores. Les deux premières sont, la mesure par transducteur à effet piézoélectrique et la mesure par transducteur acoustique électromagnétique (EMAT), leurs principes de fonctionnement se basent sur le caractère réversible des phénomènes physiques utilisés pour la génération. Par conséquent leurs fonctionnements ne seront pas détaillés, sachant que les avantages et les inconvénients sont les mêmes que dans le cas de la génération.

La dernière technique est la mesure par laser et le fonctionnement est complètement différent de celui présenté pour la génération d'ultrasons par laser. Le principe sera donc explicité dans la partie suivante, d'autant plus que c'est cette technologie qui a été utilisée lors de ce travail de recherche.

1.1.4.1 Mesure d'ondes ultrasonores par laser

Cette section décrit uniquement la technologie des vibromètres OFV-50x, de Polytec®, fonctionnant selon le principe de l'interférométrie hétérodyne. Technique la plus couramment utilisée dans la mesure d'ondes ultrasonores par laser. Il est possible de trouver des explications plus détaillées dans les articles suivants Lipinski (1995) et Dewhurst et Shan (1999).

Cette technologie se base sur deux principes physiques, l'effet Doppler et le phénomène d'interférence.

Le premier indique, que pour un rayon laser (donc quasi-monochromatique, de fréquence centrale ν_0) arrivant sur une surface réfléchissante en mouvement, l'onde réfléchie va subir un décalage en fréquence, appelé décalage Doppler, noté $\delta\nu_d$ et finalement la fréquence de l'onde réfléchie sera $\nu_1 = \nu_0 + \delta\nu_d$.

Quant au phénomène d'interférence, il se produit quand deux faisceaux lumineux cohérents et parallèles se rencontrent. Si leurs fréquences sont notées ν_1 et ν_2. Le signal d'interférence est un nouveau signal lumineux, composé d'un premier signal dont la fréquence est la moyenne des fréquences ν_1 et ν_2, modulé par un signal de fréquence égale à la demi différence de ν_1 et ν_2.

Ainsi en appliquant ces deux principes physiques, il est possible de mesurer le décalage Doppler causé par le mouvement d'une surface (dû à une onde ultrasonore), ce décalage de fréquence permettant de remonter au déplacement de la surface. Le principe d'un interféromètre hétérodyne est détaillé dans la figure 1.8. La cellule de Bragg induit aussi un décalage de

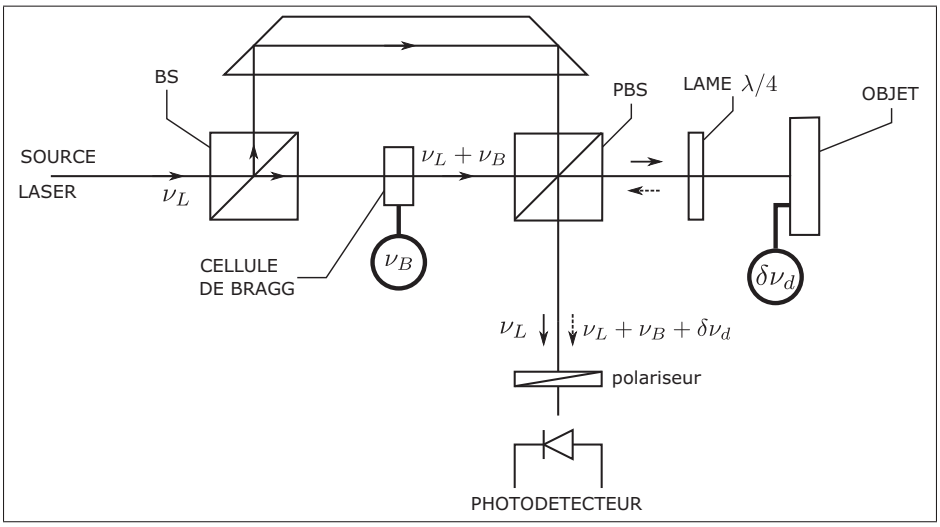


Figure 1.8 Interféromètre hétérodyne
Adaptée de Royer et Dieulesaint (1986)

fréquence mais cette fois-ci il est fixe, de 70 MHz par exemple. Il rend possible le fonctionnement même si le signal renvoyé par la surface est faible devant le signal de référence. Cette

technique présente de nombreux avantages, mais elle a surtout été utilisée lors de ce travail de recherche pour sa grande modularité.

1.1.5 Les méthodes d'analyse de signaux ultrasonores

De nombreuses méthodes d'analyse des signaux ultrasonores existent, mais dans le cadre de ce travail de recherche c'est surtout les transformés de Fourier temporelle et spatiotemporelle qui ont été utilisées, de même la possibilité d'utiliser la méthode de décomposition en valeurs singulières a été étudiée. Par conséquent, cette section présentera uniquement ces trois méthodes.

1.1.5.1 La transformée de Fourier temporelle

Un grand nombre de publications expliquent le fonctionnement de la transformée de Fourier temporel et ses applications, par exemple Le Roux (2007); Thrane (1979) les décrivent en détail. Il sera donc exposé ici uniquement le principe de base et comment elle peut être utilisée pour analyser des signaux ultrasonores.

La transformée de Fourier temporelle repose sur le principe des séries de Fourier mais appliquées à des fonctions non périodique. En effet la théorie des séries de Fourier indique que n'importe quelle fonction périodique peut être décomposée en une somme de fonctions sinusoïdales. Soit f une fonction T-périodique et intégrable sur $[\frac{-T}{2}, \frac{T}{2}]$ alors il existe des coefficients $c_n(f)$ tels que

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n(f) e^{j2\pi \frac{n}{T} t} \tag{1.31}$$

avec

$$c_n(f) = \frac{1}{T} \int_{\frac{-T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-j2\pi \frac{n}{T} t} dt \tag{1.32}$$

Le calcul partiel de la somme de l'équation 1.31 permet d'obtenir une approximation de la fonction f. Ensuite la transformée de Fourier consiste à appliquer la théorie des séries de Fourier à des signaux finis non-périodiques. Autrement dit soit u un signal temporel de longueur T. Tout d'abord ce signal est répété par translation afin d'obtenir un signal T-périodique et alors la transformée de Fourier permet de décomposer le signal en une somme de sinusoïdes tel que

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U(f) e^{j2\pi ft} df \tag{1.33}$$

où $U(f)$ représente l'amplitude de la composante du signal $u(t)$ ayant la fréquence f, avec

$$U(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f} dt \tag{1.34}$$

Cependant ce formalisme n'est pas directement applicable à des signaux obtenus par simulation ou expérimentation. En effet, en général, l'expression de la fonction $u(t)$ est connue uniquement de manière échantillonnée, il est alors nécessaire d'utiliser la transformée de Fourier discrète. Ainsi pour un signal $u(t)$ échantillonné en N termes avec un temps d'échantillonnage T_e, soit $T = N \times T_e$, la transformée de Fourier discrète, appelée aussi spectre, est

$$U(f) = \sum_{n=0}^{N-1} u(nT_e) e^{-j2\pi fnT_e} \tag{1.35}$$

Il est possible de noter alors que la quantité d'informations en fréquence dépendra des paramètres d'échantillonnage du signal temporel. Ainsi le spectre est obtenu pour des fréquences dans l'intervalle $[0, f_e]$ avec $f_e = \frac{1}{T_e}$ et la résolution fréquentielle est de $\Delta f = \frac{1}{NT_e} = \frac{f_e}{N}$. Sachant qu'à cause du phénomène de repliement, décrit par exemple dans Thrane (1979), le spectre admet comme limite supérieure f_{max} telle que $f_{max} \leqslant \frac{f_e}{2}$, T_e devra donc être choisi en conséquence.

En réalité dans le calcul du spectre l'équation 1.35 n'est pas utilisée telle quelle. En effet l'algorithme de transformée de Fourier rapide (FFT), décrit par J. W. Cooley et J. W. Tukey, permet de réduire considérablement le temps de calcul, comme indiqué dans Le Roux (2007), avec cet algorithme $Tlog_2T$ opérations sont nécessaires contre T^2 en résolvant directement l'équation 1.35.

La transformée de Fourier permet aussi le calcul de l'énergie du signal à l'aide du théorème de Parseval,

$$e = \sum_{n=0}^{N-1} |u(nT_e)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left| U(n\frac{f_e}{N}) \right|^2 \tag{1.36}$$

Le calcul peut donc être fait aussi bien dans le domaine temporel que fréquentiel. Ainsi il est possible d'extraire l'énergie du signal pour une plage de fréquence spécifique.

Finalement dans le cas de l'analyse des signaux ultrasonores la transformée de Fourier temporelle permet d'extraire les différentes fréquences présentent dans le signal et indique l'amplitude de chacune d'elles. Ce qui peut révéler par exemple l'apparition d'une nouvelle fréquence lorsque l'onde ultrasonore traverse un défaut ou si celui-ci modifie l'amplitude d'une fréquence spécifique. Par contre la transformée de Fourier temporelle présente un défaut majeur, elle ne donne pas d'information de temps sur les différentes fréquences. Par exemple en présence de deux ondes ayant des fréquences différentes, qu'elles apparaissent en même temps ou pas ne changera pas le spectre obtenu. Plusieurs méthodes permettent alors de remédier à ce défaut, comme le fenêtrage ou la transformée de Fourier spatiotemporelle par exemple.

1.1.5.2 La transformée de Fourier spatiotemporelle

Dans le cadre de ce mémoire c'est la transformée de Fourier spatiotemporelle, ou FFT-2D, qui a été utilisée notamment car elle permet d'obtenir les courbes de dispersion comme décrit dans la section 1.1.2. C'est à dire qu'elle permet de différencier les ondes en fonction de leurs fréquences et de leurs vitesses. La figure 1.9 présente une FFT-2D caractéristique, résultat

obtenu par simulation éléments finis de la propagation d'ondes ultrasonores. Comme expliqué plus haut la FFT-2D permet de différencier les ondes en fonction de leurs vitesses aussi bien si elles se propagent plus ou moins vite que dans des sens différents. Par conséquent, comme indiqué sur la figure 1.9, la FFT-2D peut être séparée en deux courbes de dispersion avec à gauche les ondes se propageant dans le sens positif (les ondes incidentes) et à droite les ondes se propageant dans le sens négatif (les ondes réfléchies).

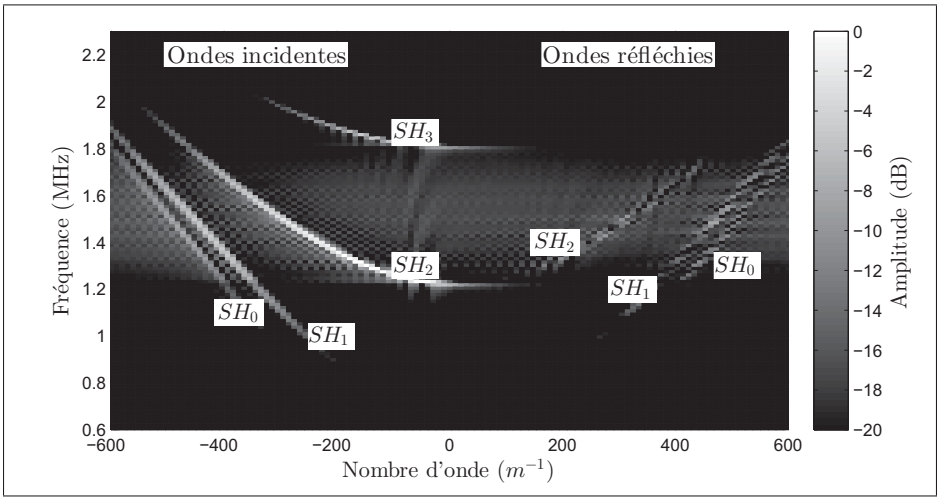


Figure 1.9 FFT-2D caractéristique (fréquence en fonction du nombre d'onde), l'amplitude est donnée en décibel et normalisée au maximum

Cette fois-ci les données ne sont pas obtenues uniquement en mesurant le déplacement d'un point du solide dans lequel l'onde ultrasonore se propage mais en effectuant cette même mesure en plusieurs points et selon la direction de propagation de l'onde, les données sont alors de la forme $u(x,t)$. La transformée de Fourier spatiotemporelle ou FFT-2D consiste donc à effectuer successivement deux transformées de Fourier mono-dimensionnelles une selon t et une autre selon x. Sachant que là encore les mesures correspondent à une mesure discrète dont les paramètres sont résumés dans le tableau 1.4. Finalement les transformées de Fourier discrètes donnent

$$U(k,f) = \sum_{n_x=0}^{N_x-1} \sum_{n_t=0}^{N_t-1} u(n_t T_e, n_x X_e) e^{-j(k n_x X_e + 2\pi f n_t T_e)} \tag{1.37}$$

avec k l'équivalent spatial de la fréquence, appelé nombre d'onde. De plus comme dans la section précédente la résolution fréquentielle est de $\Delta f = \frac{1}{N_t T_e} = \frac{f_e}{N_t}$ dans l'intervalle $[0, \frac{f_e}{2}]$ et pour les nombres d'ondes $\Delta k = \frac{1}{N_x X_e}$ dans l'intervalle $[0, \frac{1}{2X_e}]$. Les paramètres N_t, T_e, N_x et X_e devront donc être choisi avec précision pour obtenir une FFT-2D de bonne qualité sachant que pour les paramètres temporels il est facile d'adapter leurs valeurs, la fréquence d'échantillonnage f_e et le temps d'enregistrement $N_t T_e$ étant limités uniquement par la capacité de mémoire du système de mesure. Par contre les paramètres N_x et X_e sont limités respectivement par la taille de l'échantillon et la précision sur le positionnement du point de mesure, ces paramètres sont donc critiques pour effectuer une FFT-2D.

Tableau 1.4 Propriétés d'échantillonage du signal spatiotemporelle $u(x,t)$

Domaine	**Taux d'échantillonnage**	**Nombres de termes**
x	X_e	N_x
t	T_e	N_t

Le théorème de Parseval pouvant être généralisé il est aussi possible de calculer l'énergie du signal ultrasonore.

$$e = \frac{1}{N_x N_t} \sum_{n_x=0}^{N_x-1} \sum_{n_t=0}^{N_t-1} \left| U(n_x \frac{1}{N_x X_e}, n_t \frac{f_e}{N_t}) \right|^2 \tag{1.38}$$

Cette méthode d'analyse permet donc de déterminer l'énergie du signal ultrasonore pour une plage de fréquences et de nombres d'ondes spécifiques. Par contre l'une de ses limites, comme décrit plus haut, est qu'elle nécessite une mesure en plusieurs points ce qui rend indispensable une automatisation. Sachant que là encore c'est l'algorithme de transformée de Fourier rapide qui est utilisé pour calculer la FFT-2D.

1.1.5.3 La décomposition en valeurs singulières

La troisième méthode d'analyse des signaux ultrasonores étudiée dans le cadre de ce mémoire est la décomposition en valeurs singulières ou SVD. Elle consiste à effectuer plusieurs FFT-2D en modifiant la position du point d'application de l'excitation générant le signal ultrasonore. La figure 1.10 présente le principe de cette méthode, avec N_E le nombre de points d'excitations et N_R le nombre de points de réception.

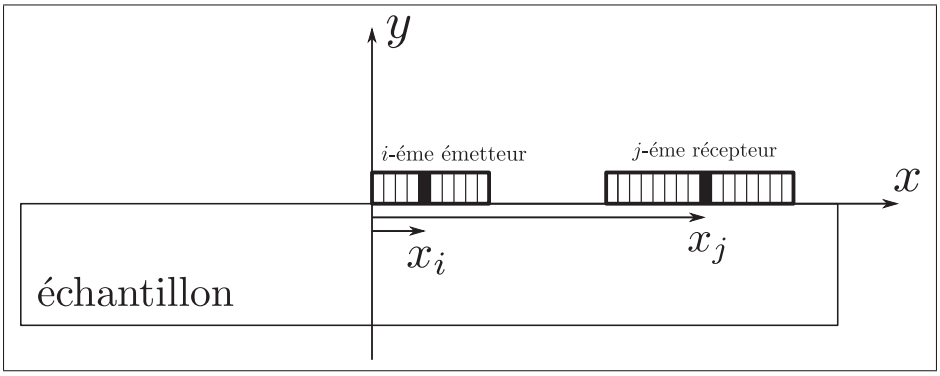


Figure 1.10 Schéma de principe de la méthode SVD
Adaptée de Minonzio *et al.* (2010)

Finalement la mesure permet d'obtenir une matrice, de taille $N_E \times N_R \times N_t$, contenant le signal temporel, échantillonné en N_t échantillon séparé de T_e secondes, en chaque point de mesure pour chaque position d'excitation possible. L'étape suivante consiste à appliquer une transformée de Fourier temporelle sur chacun de ces signaux pour obtenir une nouvelle matrice de taille $N_E \times N_R \times N_f$, car maintenant la matrice donne l'amplitude du signal pour chaque fréquence et non pas pour chaque instant, sachant que $N_f = N_t$. Ensuite la décomposition en valeurs singulières intervient, cette décomposition est un théorème mathématique applicable à toute matrice de taille $M \times N$ à coefficient complexes ou réels. Le théorème est le suivant :

Théorème 1. $\forall\, A \in M_{m,n}(\mathbb{C})$, $\exists\, R \in M_{m,m}(\mathbb{C})$, $E \in M_{n,n}(\mathbb{C})$ et $\Sigma \in M_{m,n}(\mathbb{C})$ tel que

$$A = R\Sigma E$$

Avec :

- Σ une matrice diagonale, les coefficients correspondants aux valeurs singulières de A
- R contenant un ensemble de vecteurs formant une base orthonormée de $\mathbb{C}^m$
- E contenant un ensemble de vecteurs formant une base orthonormée de $\mathbb{C}^n$

Donc la décomposition en valeurs singulières est appliquée à chacune des matrices de taille $N_E \times N_R$ correspondant à chaque fréquence du spectre. Les matrices R, E et Σ obtenues permettent ensuite d'analyser le contenu énergétique du signal, en effet cette décomposition permet d'obtenir pour chaque fréquence du spectre N_E triplets composés d'une valeur singulière, d'un vecteur émission de taille N_E et un vecteur réception de taille N_R. Or il a été montré par Minonzio *et al.* (2010) que les valeurs singulières représentent le niveau d'énergie des modes pour chaque fréquence et que la matrice R forme une base de l'espace des signaux de réception. Donc ensuite uniquement les vecteurs de la base de réception associés aux valeurs singulières les plus élevées sont gardés. En effet les valeurs singulières faibles correspondent à un niveau d'énergie faible et donc peuvent être considérées comme du bruit. Ensuite le vecteur normalisé suivant est défini.

$$v(k,f) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{N_R}} e^{jkx_1} \\ \frac{1}{\sqrt{N_R}} e^{jkx_2} \\ \vdots \\ \frac{1}{\sqrt{N_R}} e^{jkx_i} \\ \vdots \\ \frac{1}{\sqrt{N_R}} e^{jkx_{N_R}} \end{pmatrix} \tag{1.39}$$

Il représente une onde plane ultrasonore quelconque avec x_j la distance entre le premier point d'excitation et le j-ème point de réception comme indiqué dans la figure 1.10. Puis ce vecteur est projeté sur la base de l'espace de réception R. Finalement, à partir du nouveau vecteur projeté, le calcul de la racine de la somme du carré de ces coordonnées donne l'amplitude des ondes ultrasonore se propageant dans l'espace (k,f). Donc cette méthode permet aussi d'ob-

tenir les courbes de dispersion mais cette fois-ci elle normalise l'énergie du signal ultrasonore et donc permet de faire apparaitre les modes de plus faible énergie. De plus il est possible de filtrer le signal pour en éliminer le bruit. La figure 1.11 présente les courbes de dispersion expérimentales, pour des ondes ultrasonores se propageant le long d'une plaque d'Inconel625. Les premières courbes étant obtenues par FFT-2D et les deuxièmes par SVD. La figure 1.11 montre donc que la technique SVD donne une bien meilleure résolution par rapport à la méthode FFT-2D par contre l'énergie de chaque onde étant normalisée la SVD ne peut être utilisée que pour comparer la position et la forme des courbes de dispersion.

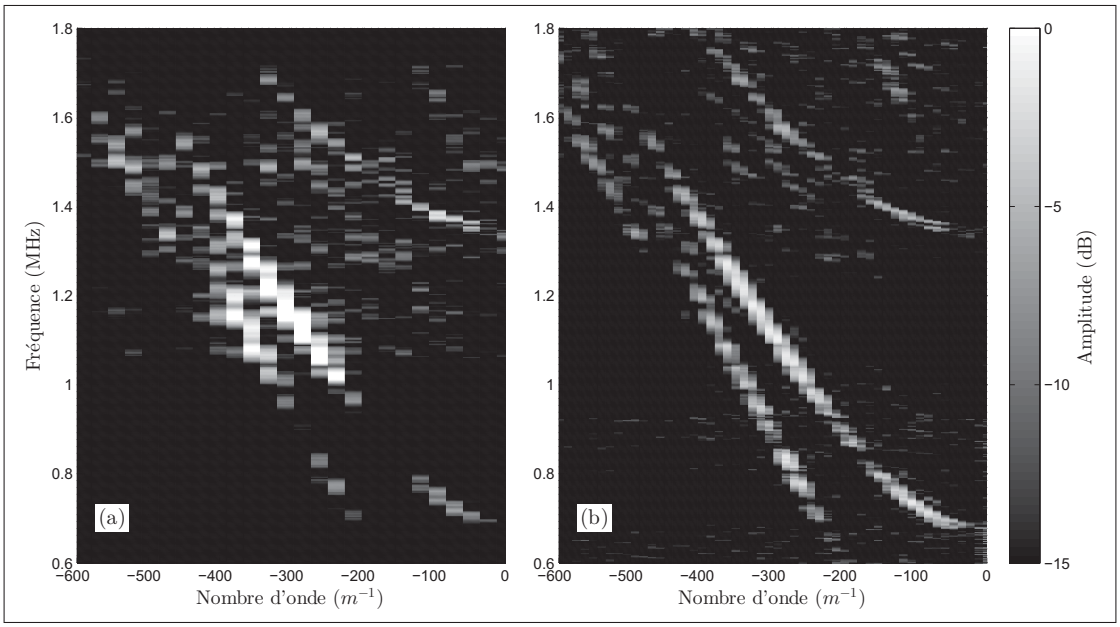


Figure 1.11 Courbes de dispersion expérimentales du même signal ultrasonore obtenues par FFT-2D (a) et par SVD (b)

Une description complète de cette méthode est donnée dans Minonzio *et al.* (2010).

1.2 Introduction au procédé de brasage

1.2.1 Description du procédé

Le procédé de brasage est un procédé qui permet d'assembler entre elles deux pièces à l'aide d'un matériau d'apport fondu, appelé aussi brasure, dont la température de fusion est inférieure à celle des deux autres matériaux. Le brasage est donc très différent du soudage car pour ce dernier, les pièces assemblées entrent en fusion au niveau du joint.

Cette définition est relativement générale car ce procédé peut être réalisé avec de nombreux matériaux différents et par des techniques toutes aussi variées. Une définition complète est donnée dans le manuel de l'ASM, Olson *et al.* (1993). Lors de ce mémoire, c'est le brasage d'un joint composé de deux plaques d'Inconel 625 avec comme matériau d'apport un alliage de nickel (BNi-2) qui a été étudié. La description du procédé sera donc faite dans ce cadre là.

Le brasage consiste à positionner les deux pièces à assembler, puis à ajouter la brasure liquide pour qu'elle puisse se répartir dans la zone du joint par capillarité. Finalement l'ensemble est refroidi de manière contrôlée afin d'obtenir l'assemblage final. Le principe est détaillé dans la figure 1.12.

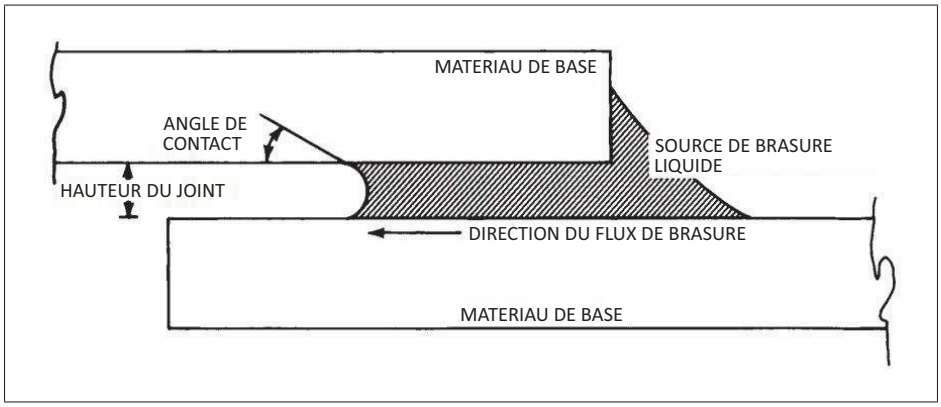


Figure 1.12 Principe du procédé de brasage
Adaptée de AWS (2007)

Au regard de la description de ce procédé, il est possible d'établir une liste des paramètres importants lors d'une opération de brasage, chacun de ces paramètres devant être choisi en fonction d'un ou plusieurs phénomènes physiques précis. La liste est donnée dans le tableau 1.5

Tableau 1.5 Liste des paramètres importants lors du brasage et les phénomènes physiques correspondants

Paramètres	**Phénomènes physiques**
Température de brasage	Phénomène de diffusion Point de fusion de la brasure Point de fusion du matériau de base
Temps de brasage	Solidification (types de phases se formant dans la brasure) Phénomènes de diffusion
État de surface du matériau de base	Mouillabilité Phénomènes de diffusion Capillarité

Il est important de noter que dans le cadre de cette étude c'est le temps de brasage qui est le paramètre le plus important. Il correspond à la durée pendant laquelle la pièce est maintenue à la température de brasage. En effet, en fonction de sa valeur certaines phases peuvent se former dans la brasure et nuire alors à la qualité du joint. Mais ce phénomène sera détaillé dans la suite.

1.2.2 Cas du brasage d'un joint à recouvrement simple d'Inconel 625

Comme expliqué plus haut, cette recherche à été effectuée sur des joints brasés composés de deux plaques d'Inconel 625, un alliage de nickel, et une brasure de BNi-2. La composition chimique de ces deux matériaux est donnée dans le tableau 1.6. De même les caractéristiques mécaniques de ces matériaux sont données dans le tableau 1.7. Ce type d'alliage de nickel est classiquement utilisé, car il présente une très grande résistance à la corrosion dans des environnements sévères caractéristiques d'un turboréacteur.

Tableau 1.6 Composition chimique en pourcentage massique
Tirée de ASM (1998)

Matériau	**Ni**	**Cr**	**Mo**	**Fe**	**Nb**	**Co**	**Autres**
Inconel 625	58.0 min	20.0-23.0	8.0-10.0	5.0	3.15-4.15	1.0	1.9
Matériau	**Ni**	**Cr**	**Si**	**B**	**Fe**	**C**	**Autres**
BNi-2	Bal.	6.0-8.0	4.0-5.0	2.75-3.5	2.5-3.5	0.06	0.82

Tableau 1.7 Propriétés mécaniques des matériaux utilisés
Tirée de ASM (1998)

Matériau	$\boldsymbol{E}$ (GPa)	$\boldsymbol{\nu}$	$\boldsymbol{\rho}$ $(kg.m^{-3})$
Inconel 625	206	0.3	8440
Nickel	210	0.3	8900

Le terme recouvrement simple désigne le type de joint, il existe également les joints bords à bords ou les joints en biseaux. La figure 1.13 explicite la forme de ces joints.

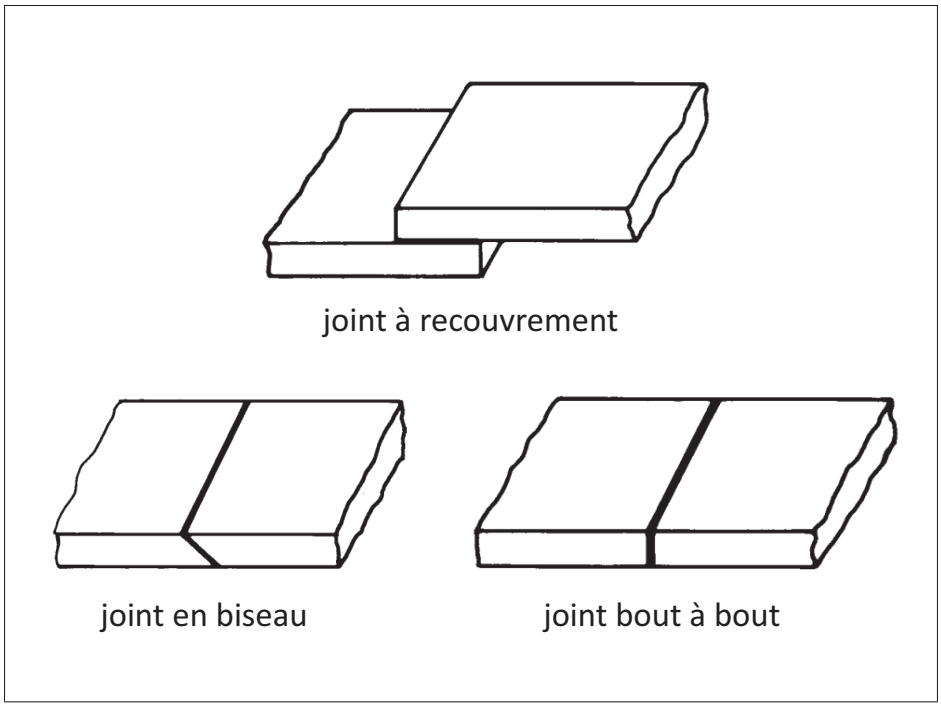


Figure 1.13 Les différents types de joints
Adaptée de AWS (2007)

1.2.2.1 Phases en présence dans le joint

Comme précisé dans la section 1.2.1, le temps de brasage a un rôle très important dans la formation des différentes phases dans le joint. Ce qui est d'autant plus vrai lors de l'utilisation du BNi-2 comme brasure. Ceci vient du fait que le BNi-2 contient du bore et du silicium afin de diminuer sa température de fusion (permettant d'optimiser l'opération de brasage). Mais, ces deux éléments sont responsables de la formation de phases eutectiques, dures et fragiles, qui diminuent les caractéristiques mécaniques du joint. Ainsi plus le temps de brasage sera long plus ces éléments vont diffuser dans le matériaux de base et prévenir la formation de ces phases fragiles. Comme le précise Rockvam (2011), il est possible d'identifier trois types de phases eutectique et leurs modules d'Young (E) peuvent être trouvé dans la littérature, ces données sont résumées dans le tableau 1.8. Sachant que ces valeurs ont été obtenues par le calcul et ne représentent pas nécessairement la valeur réelle du module d'Young de la zone dans laquelle se forme les phases eutectiques.

Tableau 1.8 Phases eutectiques présentes et leur module d'Young
Tirée de Kong *et al.* (2010); Cao *et al.* (2013); Pan *et al.* (2013)

Type d'eutectique	**Phase**	**Module d'Young (*GPa*)**
Binaire	Ni_3B	167
Binaire	CrB	176
Ternaire	Ni_3Si et Ni_3B	330

La figure 1.14 présente diverses microstructures qu'il est possible d'observer en fonction des paramètres de brasage. Ainsi plus le temps de brasage est long plus la quantité de phases eutectiques se formant est faible. Dans la suite, il sera détaillé l'influence de cette phase eutectique sur les caractéristiques du joint.

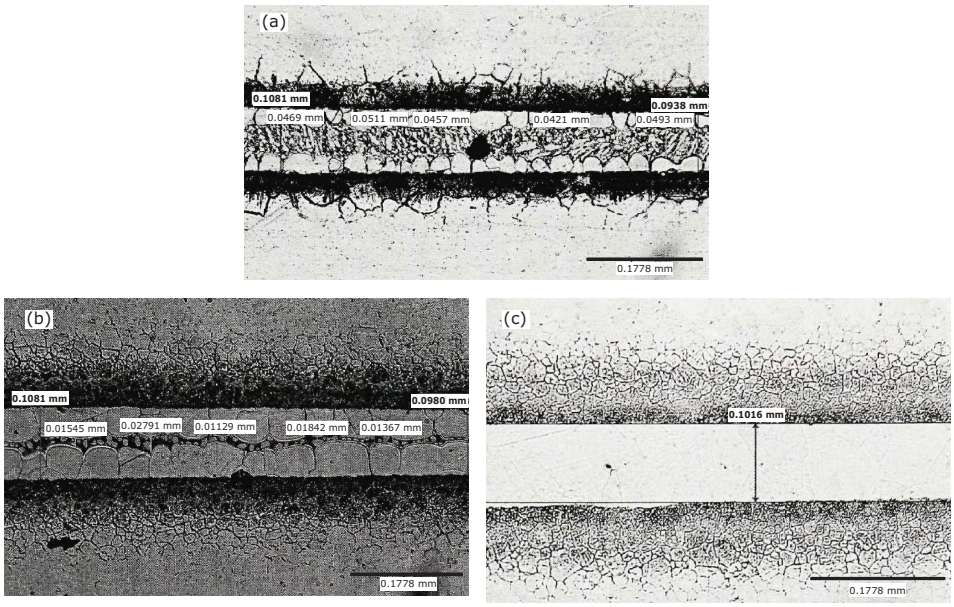


Figure 1.14 Différentes microstructures observables, en fonction du temps de brasage (a) 15 min, (b) 80 min et (c) 150 min. Les mesures en gras correspondent à l'épaisseur du joint et les autres à celles de la zone eutectique
Adaptée de Tsoungui (2010)

1.2.2.2 Lien entre les phases en présence et les caractéristiques mécaniques du joint

Comme indiqué précédemment le type de microstructure présente dans le joint a une influence importante sur leurs caractéristiques mécaniques, ce phénomène étant connu depuis longtemps. Ceci a été démontré par exemple par Tsoungui (2010), notamment à travers des essais de tractions et des analyses fractographiques réalisées sur des joints brasés à recouvrement simple. Les matériaux utilisés étant de l'Inconel 625 et du BNi-2 comme brasure.

Les essais de traction ont été analysés en suivant la norme AWS C3.2, ce qui permet d'obtenir les contraintes en tension et en cisaillement. La conclusion de cette analyse est la suivante :

> En cisaillement pur, il y a une différence assez nette entre les joints sans eutectiques et les joints avec eutectiques et ce, quelles que soient les valeurs de gap [...]. Pour des recouvrements intermédiaires et grands, la différence est moins significative [...]. L'effet est complètement opposé pour la résistance en tension. À très faible recouvrement tous les joints ont presque la même résistance mécanique, mais les joints sans eutectiques sont nettement plus résistants pour des recouvrements intermédiaires, avec des écarts proches de 50%. Les écarts se réduisent ensuite pour des grands recouvrements, il semble alors à ce moment que le recouvrement ait tendance à compenser l'effet néfaste des eutectiques. Tsoungui (2010)

De même l'étude des mécanismes de rupture, à travers l'analyse fractographique, montre l'influence prépondérante de la quantité de phases eutectique dans le joint.

> En se basant sur les analyses fractographiques, on comprend mieux l'importance de la présence des eutectiques sur l'amorçage et la propagation de fissures. Tous les joints testés possédant des eutectiques ont rompu à travers la zone eutectique centrale. Les fissures ont toujours été initiées au niveau du filet, une partie fortement riche en phases eutectiques. Tsoungui (2010)

Il est donc démontré que c'est la présence d'une phase eutectique dans le joint qui sera responsable de la détérioration des qualités mécaniques du joint. Ces résultats justifient la nécessité de développer un moyen de contrôle non destructif permettant de valider la qualité d'un joint brasé, dans lequel il peut se former une phase eutectique, lors de sa fabrication. De plus, la valeur du module d'Young ternaire donnée dans le tableau 1.8 et la dégradation des propriétés mécaniques du joint suggère que le module d'Young moyen de la phase eutectique est supérieur à celui du nickel.

1.3 L'inspection par ultrasons de joints à recouvrement

La revue bibliographique a permis d'identifier un certain nombre d'articles traitant de l'inspection par ultrasons de joints à recouvrement. Cependant il semble qu'aucune recherche n'ait été effectuée dans le cas où les joints sont fabriqués par brasage, par conséquent les résultats des travaux étudiés ici n'ont pas pu être directement utilisés. Ce chapitre décrira ces travaux afin de déterminer leur intérêt par rapport au travail effectué lors de ce mémoire. Le type de

joints étudiés ainsi que le type de défaut seront présentés puis la méthode d'inspection utilisée sera décrite. Les résultats de trois articles représentatifs, He *et al.* (1988); Lanza di Scalea *et al.* (2004); Castaings (2014), seront présentés dans ce chapitre et résumé dans le tableau 1.9.

Tableau 1.9 Résumé des articles sur l'inspection par ultrasons de joints à recouvrement simple

Articles	He *et al.* (1988)	Lanza di Scalea *et al.* (2004)	Castaings (2014)
Matériau plaque	Acier bas carbone	Aluminium	Aluminium
Matériau joint	Colle époxy commerciale	2 Ton® Époxy Devcon	Film adhésif époxy AF3109
Défauts étudiés	Géométriques et adhésion	Cohésion	Cohésion et adhésion
Types d'ondes	*SH*, *A* et *S*	*A* et *S*	*SH*
Modes	NaN	A_0	SH_0 et SH_1
Fréquences (MHz)	1 et 1.8	$[0.1, 1.4]$	0.260
Type de données	Déplacement et énergie	Énergie	Déplacement
Méthodes de traitement	Signal temporel	Analyse temps-fréquence + Transformée en ondelettes	Signal temporel
Méthode de génération	EMAT	Laser (Nd :YAG)	EMAT
Méthode de mesure	EMAT	Transducteur couplé à l'air	EMAT

1.3.1 Le type de joints inspectés

Pour correspondre avec le type de joints étudiés dans ce mémoire, uniquement les articles étudiants le cas de joints à recouvrement simple ont été retenus. Par contre, si la géométrie du joint est sensiblement la même, les matériaux utilisés et le procédé de fabrication sont très différents et notamment pour le matériau utilisé dans la zone du joint. La liste des différents

matériaux utilisés est résumée dans la première section du tableau 1.9. Comme indiqué dans la section 1.2 ce sont des assemblages composés de plaques d'alliage de Nickel (l'Inconel 625) avec un autre alliage de nickel au niveau du joint (le BNi-2) qui sont étudiés dans ce mémoire. La différence des matériaux utilisés avec ceux des articles disponibles dans la littérature justifie donc le développement d'une méthode d'inspection permettant de les caractériser. De plus les échantillons étudiés dans ces articles sont fabriqués avec des procédés légèrement différents notamment dans Castaings (2014) les joints subissent un sablage afin d'améliorer le collage. Il est important de noter également que l'utilisation d'une colle époxy nécessite un traitement thermique afin d'assurer le durcissement du joint dans Castaings (2014); He *et al.* (1988). D'ailleurs, comme pour le brasage les paramètres (température et temps) de ce traitement influencent les caractéristiques finales de l'échantillon comme indiqué dans la sous-section 1.3.2. Par contre dans Lanza di Scalea *et al.* (2004) le durcissement se fait à température ambiante mais la qualité du joint est contrôlée par le ratio du mélange résine/durcissant utilisé.

1.3.2 Le type de défauts étudiés

Trois caractéristiques des joints sont étudiées dans ces articles. Tout d'abord il y a les défauts géométriques étudiés notamment dans He *et al.* (1988), qui sont l'épaisseur du joint, la largeur de la zone de recouvrement et sa longueur. Ensuite il y a les défauts liés au joint en lui même avec l'étude de la qualité de la liaison entre la colle époxy et les plaques (appelé défaut d'adhésion) puis les défauts de caractéristiques mécaniques de la colle (appelé défaut de cohésion). La deuxième section du tableau 1.9 donne les différents défauts étudiés dans chacun des articles. C'est le contrôle des paramètres de fabrications des joints qui permet la fabrication d'échantillons présentant les différents défauts étudiés. Dans He *et al.* (1988), les défauts d'adhésion sont générés par un recuit du joint après sa fabrication à une température de 50°C pour différents temps compris dans l'intervalle $[0, 50]$ min et les défauts géométriques sont obtenus simplement en modifiant la géométrie des joints lors de la fabrication. Comme expliqué dans la sous-section 1.3.1, les défauts de cohésion étudiés par Lanza di Scalea *et al.* (2004) sont générés en modifiant le ratio du mélange résine/durcissant sachant que trois types

de joints sont étudiés. Le premier est un joint complètement durci dont le ratio utilisé et celui recommandé par la fabriquant c'est à dire 1 :1. Le second est faiblement durci, avec un ratio de 2 :1. Et finalement le dernier type de joint représente un joint dit "glissant" dont la colle époxy est remplacée par une fine couche d'eau. Dans Castaings (2014) les quatre types d'échantillons étudiés sont les suivants. Tout d'abord celui de référence est un joint ayant subi un sablage permettant d'assurer la meilleure adhésion possible, ensuite il y a les joints non sablés et les joints sablés avec l'ajout d'un polluant huileux sur les surfaces de contacts qui ont donc une adhésion plus faible. Et le dernier type d'échantillon est identique à celui de référence sauf qu'un tissu est ajouté ce qui donne un défaut de cohésion.

1.3.3 Méthodologie et résultats

La littérature présentée ici traite uniquement de l'inspection par ultrasons mais comme expliqué dans le chapitre 1.1, de nombreux types d'ondes peuvent se propager, les ondes de cisaillements horizontales (*SH*) et les ondes de Lamb séparées entre les ondes de compressions (*S*) et les ondes de cisaillement (*A*). La troisième section du tableau 1.9 donne les différents types d'ondes, les modes et la plage de fréquence étudiés dans chaque article. Il apparait donc qu'aucun mode ou fréquence n'est à privilégier pour étudier ce type de joints. Et donc dans le cas de l'étude de joints brasés il sera nécessaire dans un premier temps de déterminer le ou les couples modes/fréquences les plus intéressants pour les étudier. Dans les trois articles, la méthodologie est globalement la même, elle consiste à générer des ondes ultrasonores d'un côté du joint puis les mesurer après le joint pour détecter les variations de signal obtenues en fonctions des défauts présents dans le joint. La méthode d'analyse des résultats est par contre différente d'une publication à l'autre, là encore les différentes méthodes sont résumées dans la quatrième section du tableau 1.9.

De même différentes techniques de génération et de mesure des ondes ultrasonores ont été utilisées dans ces travaux de recherche. Ces techniques sont résumées dans la cinquième section tableau 1.9. Il apparait que c'est principalement la technologie de transducteur acoustique élec-

tromagnétique qui a été utilisée car comme indiqué dans les différents articles elle permet une grande modularité et évite les problèmes qui peuvent exister avec les technologies par contact.

Finalement les différents articles montrent que l'amplitude et/ou l'énergie du signal ultrasonore sont bien influencées par les caractéristiques géométriques, d'adhésion ou de cohésion du joint. De plus dans Castaings (2014), un modèle éléments finis a été utilisé pour modéliser le joint et la propagation des ultrasons. Cette simulation a permis de retrouver les résultats obtenus expérimentalement et d'identifier les différentes constantes mécaniques caractéristiques de ce type de joint comme le module de cisaillement d'adhésion et la rigidité en cisaillement de l'interface époxy/aluminium.

La revue bibliographique sur l'inspection de joints à recouvrement justifie donc le besoin de mener une étude dans le cas de joints brasés d'alliage de Nickel, ce type de joints n'ayant pas ou peu été étudié jusqu'à présent. Par contre, les différents articles proposent des pistes qui peuvent être étudiées pour mener cette recherche.

CHAPITRE 2

SIMULATION ÉLÉMENTS FINIS DE LA PROPAGATION DES ULTRASONS

Ce chapitre étudie la possibilité d'utiliser l'inspection par ondes guidées ultrasonores pour détecter la présence d'une phase fragile dans des assemblages brasés afin d'estimer leurs résistances mécaniques. Cette étude a été menée à l'aide de simulations éléments finis pour permettre une étude paramétrique. La première section décrit le modèle éléments finis utilisé ainsi que la méthode utilisée pour traiter les résultats. Ensuite les sections suivantes présentent les résultats de l'étude paramétrique.

Ce chapitre reprend les résultats de l'article Comot *et al.* présentés dans le cadre de la conférence "*SPIE : Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure X*".

2.1 Le modèle éléments finis

2.1.1 Description du modèle

Le modèle éléments finis (FE) a été développé à l'aide du logiciel Abaqus. Le joint à recouvrement a été modélisé par des éléments 2D linéaires élastiques. Ces éléments étant définis par leur module d'Young (E), leur coefficient de Poisson (ν) et leur masse volumique (ρ). Le joint à recouvrement a été modélisé par 5 couches en accord avec les micrographies décrites dans la section 1.2 et comme le montre la figure 2.1.

La première et la dernière couche sont de l'Inconel 625, la deuxième et la quatrième sont du nickel. Et finalement la troisième couche correspond à la phase eutectique. Pour cette couche le coefficient de Poisson et la masse volumique sont égaux à ceux du nickel, mais son module d'Young (noté E_{eut}) est variable afin d'étudier l'effet de la quantité de phases eutectique. L'hypothèse étant que la présence d'une phase eutectique correspond à une augmentation de la phase fragile et donc du module d'Young local comme expliqué dans la section 1.2.2. Autre-

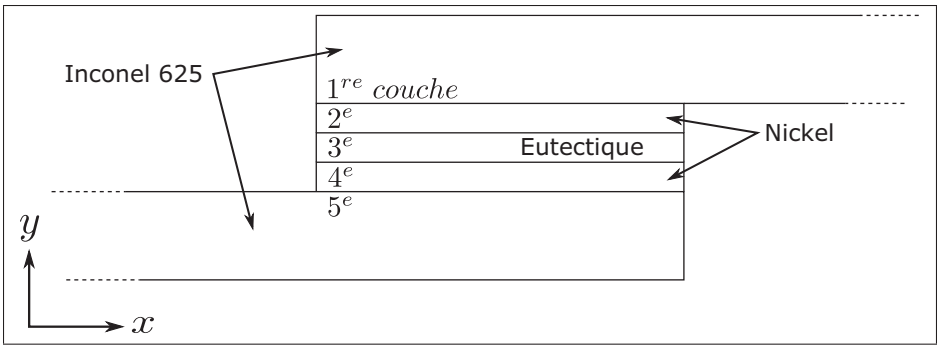


Figure 2.1 Schéma du modèle FE utilisé pour simuler la propagation des ondes guidées ultrasonores à travers un joint brasé

ment dit, la valeur du module d'Young reflète la présence ou non de phases eutectique au centre du joint. Les caractéristiques mécaniques utilisées pour définir ces couches sont données dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Propriétés mécaniques des matériaux utilisés
Tirée de (ASM, 1998)

Matériau	$\boldsymbol{E}$ (GPa)	$\boldsymbol{\nu}$	$\boldsymbol{\rho}$ $(kg.m^{-3})$
Inconel 625	206	0.3	8440
Nickel	210	0.3	8900

Le signal d'excitation source de l'onde guidée ultrasonore est simulé par une contrainte de déplacement sur les nœuds de surface de la plaque d'Inconel. La direction du déplacement étant choisie en fonction de la direction dominante des particules associée au mode généré. Par contre, en accord avec la théorie décrite dans la section 1.1, dans le cas des ondes SH dont le déplacement dominant des particules est perpendiculaire à la direction de propagation, il est nécessaire d'utiliser un modèle pseudo-2D, celui-ci est défini selon la méthode proposée par Belanger (2014). Ce modèle est composé d'une épaisseur d'éléments 3D pour lesquels uniquement le déplacement hors plan est permis et par conséquent uniquement des ondes SH peuvent se propager. De même, pour assurer un comportement identique à un modèle 2D, l'ensemble des nœuds de la première couche sont liés aux nœuds de la deuxième couche pour imposer le même déplacement.

2.1.2 La méthode de traitement des résultats

Ensuite la méthode de traitement des résultats est la suivante et reprend notamment les résultats théoriques développés dans la section 1.1.5. Tout d'abord deux simulations sont effectuées, une sans phase eutectique (indice W) dans le joint (*i.e.* avec $E_{eut} = E_{nickel} = 210\ GPa$) et une autre avec $E_{eut} = 4 \times E_{nickel} = 840\ GPa$ (indice E). À noter que le facteur de 4 a été choisi arbitrairement, car le module d'Young réel de la phase eutectique est inconnu. Cette valeur va permettre d'étudier la sensibilité de la technique aux variations des différents paramètres de simulation. De plus une étude de l'influence de la valeur choisie sur la méthode va être menée dans la section 2.3.4 pour valider les résultats obtenus même dans des cas où le module d'Young réel serait plus faible. Pour chaque simulation une FFT-2D est calculée en amont et en aval du joint comme indiqué dans la figure 2.2.

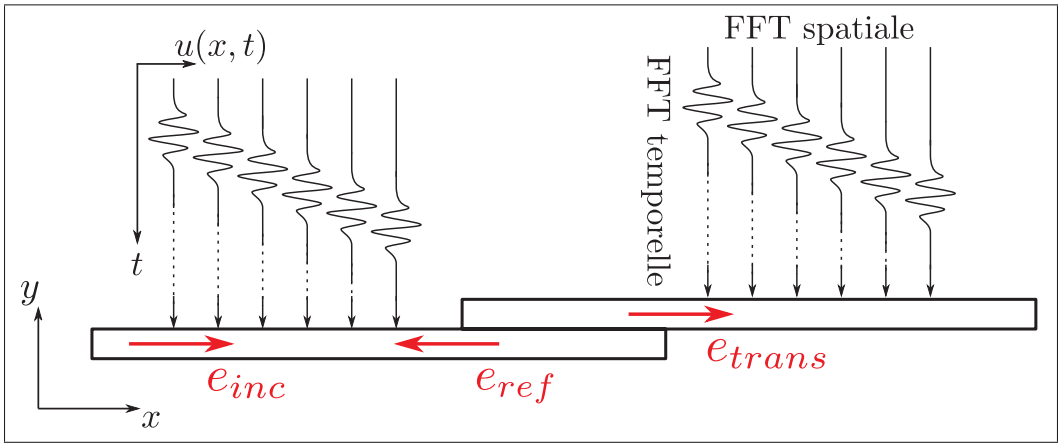


Figure 2.2 Schéma du principe de traitement des résultats de simulation

Puis les énergies incidente (e_{inc}), réfléchie (e_{ref}) et transmise (e_{trans}) sont évaluées à partir du théorème de Parseval discret en séparant la somme sur le nombre d'onde entre les valeurs positives et négatives de k. Et finalement pour estimer la sensibilité des paramètres de simulation à la présence ou non de phases eutectique, le pourcentage de facilité de détection ($R_{W/E}$) est défini.

$$R_{W/E} = \frac{e_{trans/inc_W}}{e_{trans/inc_E}} \times 100 \tag{2.1}$$

La facilité de détection de la présence de phases eutectique augmente donc avec $R_{W/E}$. L'énergie $e_{trans/inc}$ correspond simplement à la normalisation de l'énergie transmise par l'énergie incidente. De même, il est possible de définir un pourcentage équivalent utilisant l'énergie réfléchie. Cette méthode de traitement a été développée également pour pouvoir traiter les résultats expérimentaux comme il sera expliqué dans le chapitre 3. Les sections suivantes présentent les résultats de l'étude paramétrique qui a été menée, les paramètres étant : la direction et la fréquence d'excitation, la géométrie du joint, la largeur de la bande passante du signal d'excitation et le filtrage des modes.

2.2 Étude de faisabilité de la méthode de mesure

2.2.1 Influence de la fréquence et de la direction d'excitation

Le signal d'excitation utilisé est un train d'ondes Gaussien de 5 cycles. Trois directions d'excitations ont été étudiées afin de produire les trois types d'ondes possibles en accord avec la théorie détaillée dans la section 1.1 et comme indiqué dans la figure 2.3.

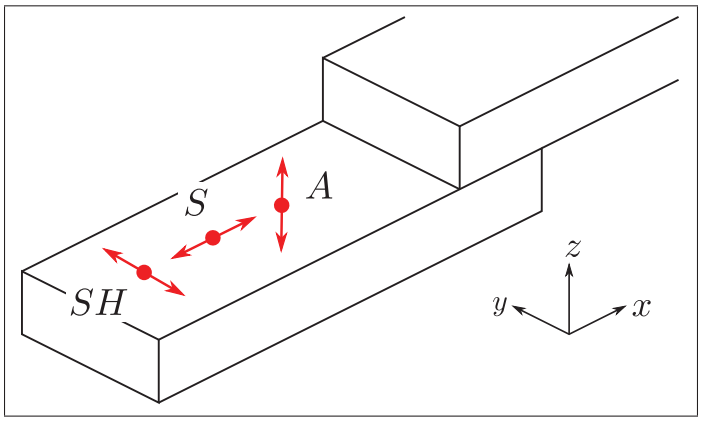


Figure 2.3 Schéma de la direction d'excitation pour les modes de Lamb (A et S) et le mode SH

Le pourcentage de facilité de détection calculé par simulation en fonction de la fréquence et de la direction d'excitation est donné dans la figure 2.4.

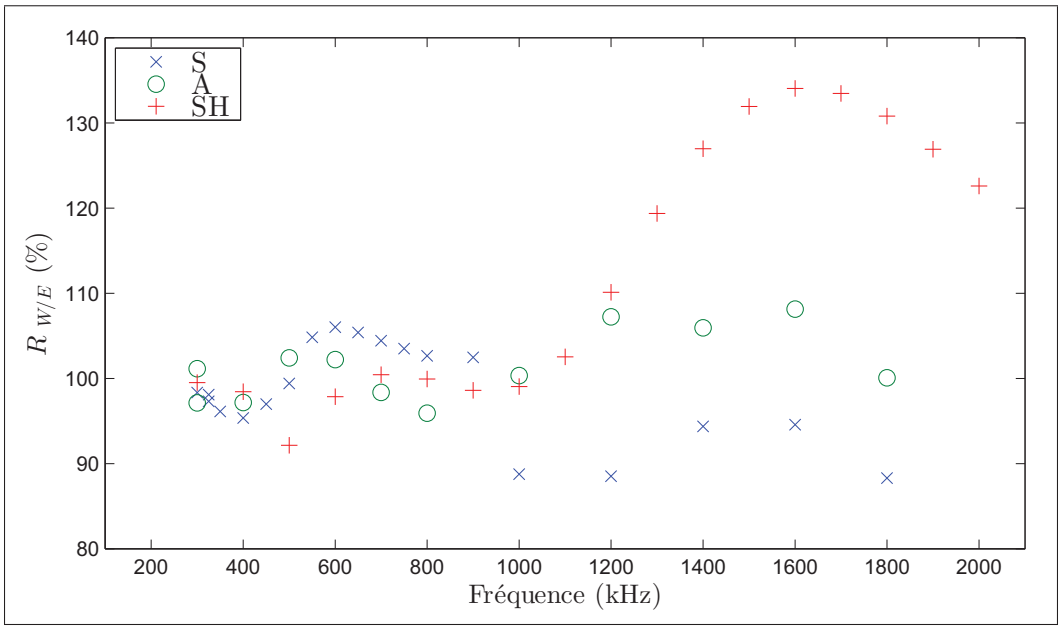


Figure 2.4 Évolution de $R_{W/E}$ pour les modes A, S et SH, en fonction de la fréquence d'excitation

Ces résultats montrent que le pourcentage de facilité de détection est maximum pour une excitation en cisaillement horizontale et à une fréquence d'environ 1.5 MHz avec $R_{W/E} = 135\%$. Ce résultat confirme que l'utilisation du mode *SH* est la plus pertinente pour étudier ce type de joints comme le montre la revue de la littérature sur l'inspection par ultrasons de joints à recouvrement présentée à la section 1.3. Les grandes variations de comportement d'un mode à l'autre s'expliquent par la façon dont chaque mode sollicite la zone eutectique du joint. De plus, les variations en fréquence peuvent être confirmées par l'observation de l'énergie de l'onde ultrasonore dans le joint. L'hypothèse étant que le type de mode et la fréquence les plus sensibles aux variations du module d'Young de la zone eutectique sont ceux pour lesquels l'énergie de l'onde ultrasonore traversant cette zone est maximum. Cette énergie peut être calculée analytiquement avec le logiciel Disperse™, dont le fonctionnement est détaillé par Pavlakovic *et al.* (1997), ce qui permet alors de tracer l'évolution de l'énergie au milieu du joint (la zone eutec-

tique) pour chaque famille de mode et en fonction de la fréquence, comme le montre la figure 2.5.

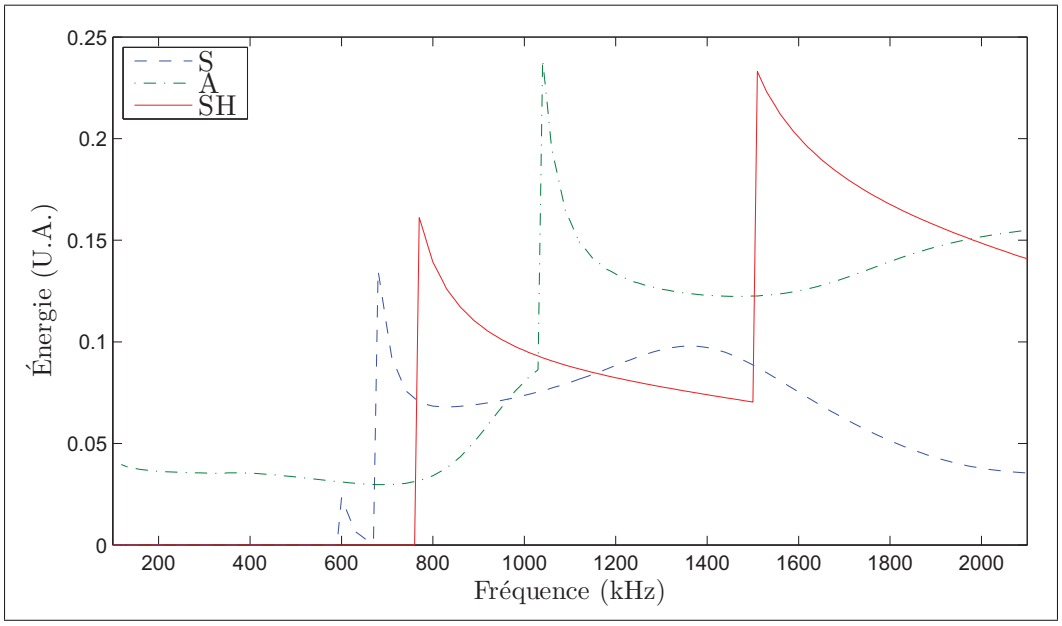


Figure 2.5 Évolution de l'énergie ultrasonore dans la zone eutectique pour les modes *A*, *S* et *SH*, en fonction de la fréquence

Pour le mode *SH*, il apparait que les pics d'énergie correspondent aux maximums de $R_{W/E}$ dans la figure 2.4 ce qui confirme cette hypothèse. Par contre, dans le cas des modes *A* et *S*, la corrélation est moins évidente ; ces différences peuvent être expliquées par la conversion de mode qui se produit entre la zone du joint et la plaque d'Inconel. En effet comme indiqué dans la section 1.1, l'épaisseur du milieu dans lequel les ondes ultrasonores se propagent change les modes présents donc quand des ultrasons traversent des zones avec des épaisseurs différentes il se produit une conversion de mode. Le même phénomène s'observe également aux interfaces. Sachant que les modes de la famille *A* et *S* peuvent se convertir en mode de ces deux familles, alors que les modes *SH* se convertissent nécessairement en mode *SH*. Or, le calcul de la FFT-2D utilisée pour déterminer $R_{W/E}$ est fait en amont et en aval du joint comme expliqué précédemment et donc sur la plaque d'Inconel, tandis que la figure 2.5 donne directement l'énergie dans la zone eutectique.

2.2.2 Effet des propriétés mécaniques du joint

Ensuite l'effet d'une variation du module d'Young de la phase eutectique a été étudié en modifiant E_{eut}. Les résultats sont donnés dans la figure 2.6, qui représente l'évolution des énergies transmises et réfléchies normalisées en fonction du module d'Young. Il apparait que le module E_{eut} a une influence linéaire sur ces énergies. Ceci permet d'affirmer que même si le module d'Young réel de la phase eutectique est différent de celui utilisé lors des simulations, les résultats obtenus resteront valides, uniquement la facilité de détection sera impactée et donc il sera peut être nécessaire d'améliorer la précision du système de mesure.

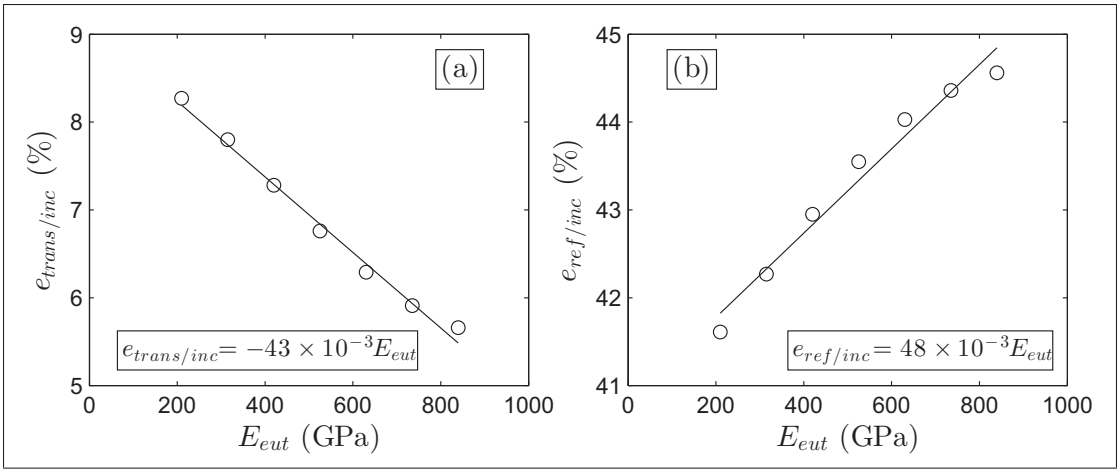


Figure 2.6 Ratios d'énergie $e_{trans/inc}$ et $e_{ref/inc}$, en fonction du module d'Young de la phase eutectique E_{eut}

De plus le comportement entre l'énergie transmise et l'énergie réfléchie est inverse, comme le prédit la théorie décrite dans la section 1.1.1.3. Ainsi en reprenant l'équation 1.14 donnant la relation entre l'impédance acoustique et la vitesse de propagation des ondes et sachant que cette même vitesse est proportionnelle à $\sqrt{E}$, il apparait que $Z \propto \sqrt{E}$. De plus l'équation 1.12 indique que les coefficients de réflexion et de transmission dépendent de l'impédance acoustique et avec l'équation 1.13, il est possible d'écrire que

$$\begin{cases} e_{ref} = R^2 \times e_{inc} \\ e_{trans} = \left(1 - R^2\right) \times e_{inc} \end{cases} \tag{2.2}$$

Par contre, l'énergie totale ($e_{tot} = e_{ref} + e_{trans}$) est égale à 50% de l'énergie incidente pour l'ensemble des simulations. Ceci peut être expliqué par le fait que lors des simulations uniquement le déplacement en surface est mesuré. De plus, cette mesure est faite en amont et en aval du joint et donc l'énergie située au niveau du joint n'est pas détectée. Mais dans tous les cas, uniquement les variations relatives d'énergies sont utiles dans cette étude.

Finalement ces premiers résultats, obtenus par simulation, démontrent qu'il serait possible de détecter la présence d'une phase eutectique dans la zone du joint, si expérimentalement le procédé permet de détecter une variation de 35% de l'énergie. Et l'évolution linéaire des énergies en fonction de E_{eut} indique que même si le module d'Young réel de la phase eutectique est plus faible que celui utilisé en simulation le comportement sera le même. Par contre il exigera une sensibilité plus élevée du système pour permettre la détection.

2.3 Résultats de l'étude paramétrique

Ensuite une étude paramétrique a été menée afin d'optimiser les différents paramètres utilisés et ainsi augmenter le pourcentage de variation d'énergie pour faciliter la détection de la présence d'eutectique. De même cette étude est utilisée pour vérifier l'influence d'éventuels défauts liés au procédé de brasage.

2.3.1 Influence du filtrage de mode

Tout d'abord, pour améliorer les résultats précédents, l'influence du filtrage de modes sur les ratios d'énergies a été étudiée. La méthode de filtrage se base sur les courbes de dispersion obtenues par FFT-2D. La figure 2.7 est une courbe de dispersion typique.

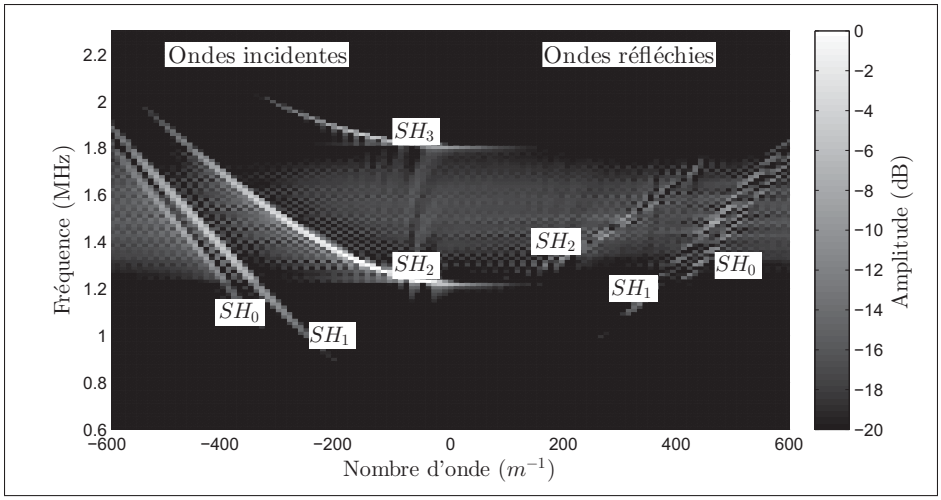


Figure 2.7 FFT-2D caractéristique (fréquence en fonction du nombre d'onde), l'amplitude est donnée en décibel et normalisée au maximum

Comme expliqué dans la section 1.1.5 et comme indiqué sur la figure, il est possible d'identifier facilement les différents modes qui se propagent. La méthode de filtrage consiste donc à extraire séparément chacun de ces modes, l'algorithme utilisé est tiré de Hayashi et Kawashima (2003). La fonction utilisée pour le filtrage étant une fenêtre de Hann définie par l'équation 2.3.

$$W(k,f) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left(\frac{2\pi(k-k_x)}{w}\right), & |k-k_x| < \frac{w}{2} \\ 0, & |k-k_x| \geq \frac{w}{2} \end{cases} \tag{2.3}$$

où w est la largeur de la fenêtre en nombre d'ondes. Cette fonction dépend du nombre d'onde k et de la fréquence f car le centre de la fenêtre k_x est calculé pour chaque f à partir de l'équation des modes dans l'espace (k,f), lesdites équations étant calculées par régression. Et le filtrage se fait donc en multipliant, pour tous les couples (k,f) possibles, chacun des coefficients de la matrice de dispersion avec cette fonction. La figure 2.8 est un exemple de résultat obtenu lors du filtrage du mode SH_2.

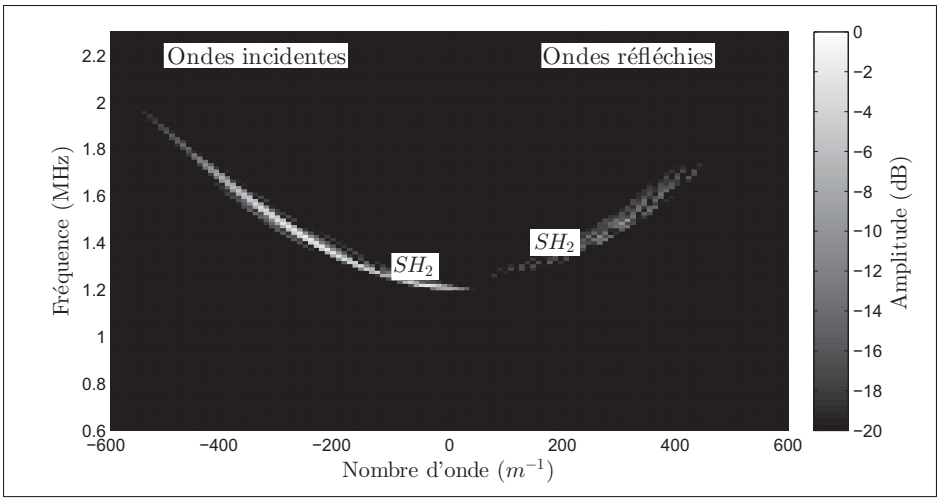


Figure 2.8 FFT-2D filtrée pour le mode SH_2 (fréquence en fonction du nombre d'onde), l'amplitude est donnée en décibel et normalisée au maximum

De plus l'algorithme de filtrage est utilisé sur une certaine bande passante en fréquence, différente pour chaque mode, afin de réduire le temps de calcul et en accord avec leurs fréquences de coupures. Les paramètres utilisés sont résumés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Paramètres de filtrage

Mode	$\boldsymbol{W}$ (m^{-1})	**Bande passante fréquentielle** (MHz)
SH_0	75	[0.9 , 2.0]
SH_1	100	[0.9 , 2.0]
SH_2	100	[1.1 , 2.0]
SH_3	75	[1.8 , 2.2]

Finalement les résultats, obtenus en filtrant les différents modes existants, sont donnés dans la figure 2.9, dans ce cas c'est le ratio $R_{W/X}$ qui est utilisé. Il correspond à la variation d'énergie pour différentes valeurs du module d'Young et la référence est la simulation sans eutectique. L'objectif ici est d'identifier les modes les plus sensibles aux variations du module d'Young de la phase eutectique. Il s'agit donc des modes dont les courbes présentent la pente la plus importante. D'après la figure 2.9, les modes pertinents sont SH_0 et SH_1, avec une variation

respectivement de 177% et 181% du ratio d'énergie entre la simulation avec $E_{eut} = 210\ GPa$ et celle avec $E_{eut} = 840\ GPa$, ces ratios correspondent donc à $R_{W/E}$. Ainsi le filtrage des modes permet bien d'augmenter la sensibilité de la méthode sachant que sans filtrage $R_{W/E} = 135\%$ comme calculé dans la section 2.2.1.

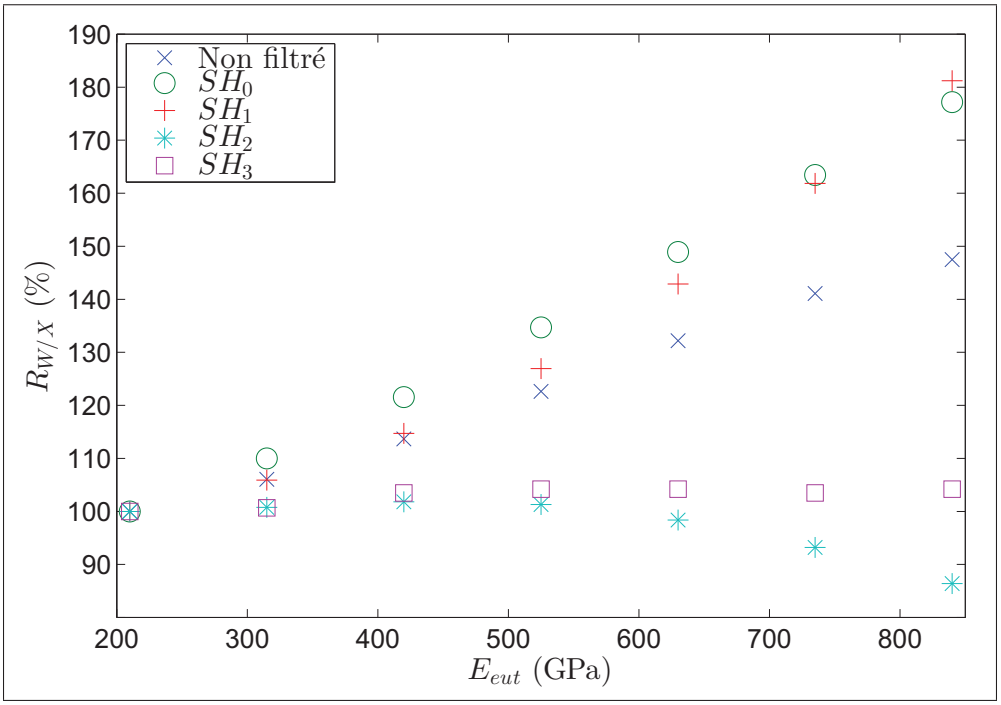


Figure 2.9 Variation du ratio d'énergie $R_{W/X}$, en fonction de E_{eut} pour les différents modes filtrés

2.3.2 Effet de la largeur de la bande passante du signal d'excitation

Ensuite l'influence de la bande passante du signal d'excitation a été étudiée. Pour cela le nombre de cycles du signal a été modifié. En effet plus le nombre de cycles du signal est important plus la bande passante est faible autrement dit le signal est concentré autour de sa fréquence centrale, comme le montre la figure 2.10 qui donne le spectre du signal d'excitation pour des nombres de cycles différents.

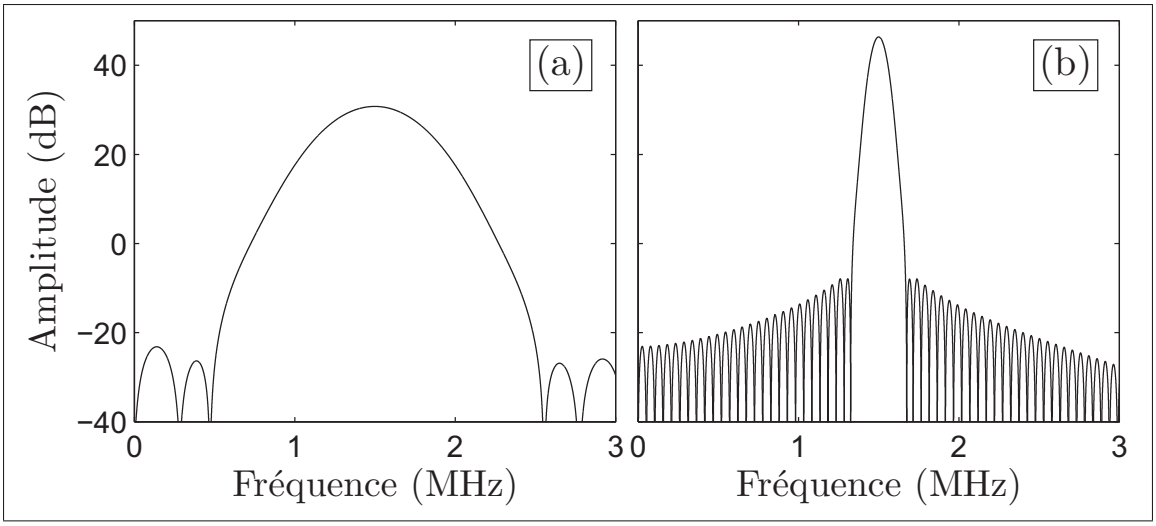


Figure 2.10 Spectre du signal d'excitation, pour un signal de 5 cycles (a) et pour un signal de 30 cycles (b)

Par contre il est nécessaire de limiter le nombre de cycles pour différentes raisons. Tout d'abord, la longueur spatiale du signal est directement liée au nombre de cycles. En effet, à 1.5 MHz, la longueur d'onde (λ) du signal est

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3000}{1.5 \times 10^6} = 2 \times 10^{-3}\, m \tag{2.4}$$

avec c la vitesse du mode fondamental. Et donc la longueur spatiale du signal (W) est égale à

$$W = N_{cyc} \times \lambda \tag{2.5}$$

Ainsi il sera nécessaire de limiter W en fonction des dimensions de l'échantillon pour éviter une superposition des ondes transmises et réfléchies. Ensuite plus le nombre de cycles est important plus la durée du signal l'est, ce qui peut être un problème lors des mesures expérimentales car cela nécessite d'augmenter le temps ente deux points de mesures mais ceci sera détaillé dans le chapitre 3. Mais pour éviter ces problèmes, il existe une autre méthode permettant d'obtenir le même résultat. Au lieu de concentrer le signal sur la fréquence centrale, c'est le calcul de l'énergie qui est fait sur une bande passante en fréquence différente.

Finalement, l'évolution du pourcentage $R_{W/E}$ en fonction des deux méthodes possibles est donnée dans la figure 2.11. Il apparait donc que $R_{W/E}$ augmente lorsque le signal d'excitation ou le calcul est concentré autour de la fréquence centrale, ce résultat est prévisible car comme le démontre les résultats de la section 2.2.1 la fréquence est un paramètre important. De plus les deux méthodes donnent des résultats équivalents, avec un maximum pour 15 cycles ce qui correspond à une bande passante en fréquence d'environ $\Delta f = 200\,kHz$.

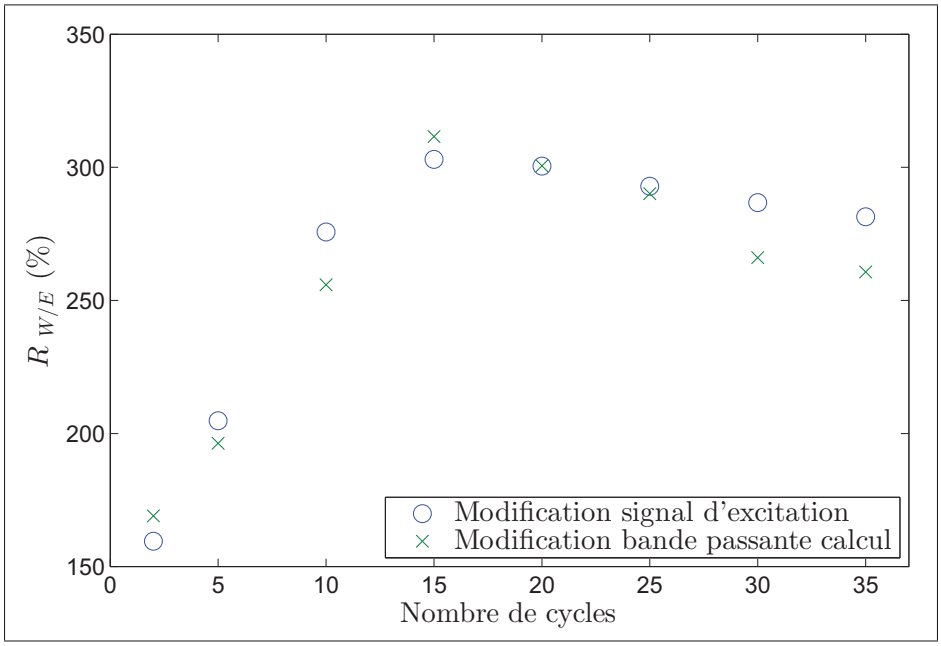


Figure 2.11 Évolution de $R_{W/E}$ pour le mode SH_0 en fonction du nombre de cycles

2.3.3 Influence des paramètres géométriques

Dans cette section, l'influence des paramètres géométriques qui caractérisent le joint a été étudiée. Ces paramètres sont la longueur de recouvrement (l), l'épaisseur de la zone eutectique (e_{eut}) et l'épaisseur du jeu (e_{jeu}), c'est à dire la distance entre les deux plaques d'Inconel 625, comme détaillé dans la figure 2.12.

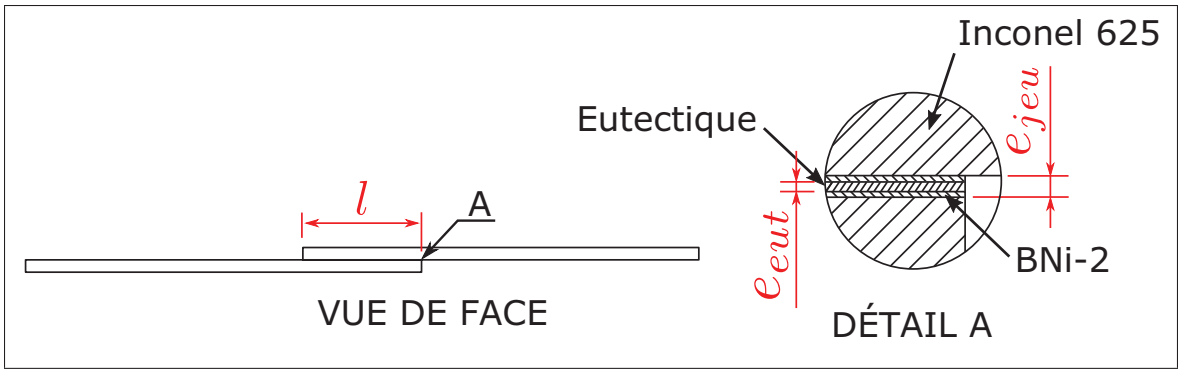


Figure 2.12 Schéma de la géométrie du joint avec en rouge les paramètres géométriques caractéristiques

L'étude de la longueur de recouvrement et de l'épaisseur du jeu a pour but d'assurer que les défauts géométriques intrinsèques au procédé de brasage n'auront pas d'influence sur la méthode de mesure. Un tolérancement de 0.5 mm pour la longueur de recouvrement a été retenu. La figure 2.13 donne l'évolution du ratio d'énergie en fonction de l. Il apparait que pour des valeurs de $l \in [22;24]$ mm, le ratio d'énergie reste entre 5.5% et 6.5% et donc la variation Δe n'excède pas 1%, en conclusion un défaut éventuel sur la longueur de recouvrement aura une influence minime sur cette méthode d'inspection et pour ce type de joint.

Ensuite, c'est l'influence de l'épaisseur du jeu qui est étudiée. Dans ce cas le tolérancement est de 100 μm, sachant qu'une augmentation de l'épaisseur du jeu est modélisée uniquement par l'augmentation de l'épaisseur de BNi-2 et donc e_{eut} reste constant. La figure 2.14 donne l'évolution du ratio d'énergie en fonction de e_{jeu} pour le mode SH_0 et avec $N_{cyc} = 15$. Il apparait que pour des valeurs de $e_{jeu} \in [100;200]$ μm, le ratio d'énergie reste entre 9% et 13% et donc la variation Δe n'excède pas 4%, en conclusion un défaut éventuel sur l'épaisseur du jeu aura également une influence minime.

Finalement, l'étude de l'épaisseur de la zone eutectique a pour but d'analyser les différences de résultats obtenues en fonction de la recette brasage utilisée. En effet comme expliqué dans la section 1.2.2, le temps de brasage influence la quantité de phases eutectique présente dans le joint. La figure 2.15 présente les résultats obtenus pour le mode SH_0 et avec $N_{cyc} = 15$, sachant que pour ces simulations l'épaisseur du jeu est fixée à 200 μm pour pouvoir simuler toutes les

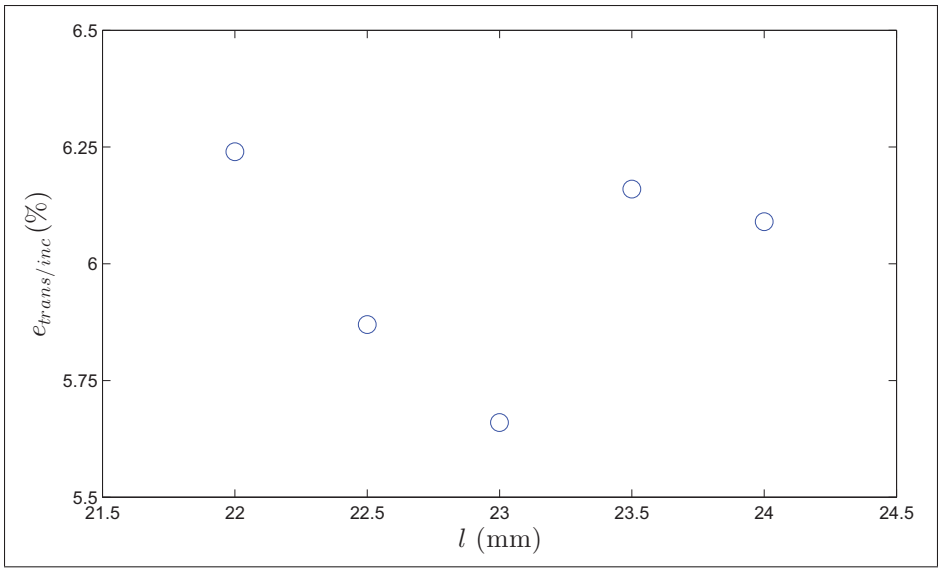


Figure 2.13 Ratio d'énergie $e_{trans/inc}$ en fonction de la longueur de recouvrement du joint

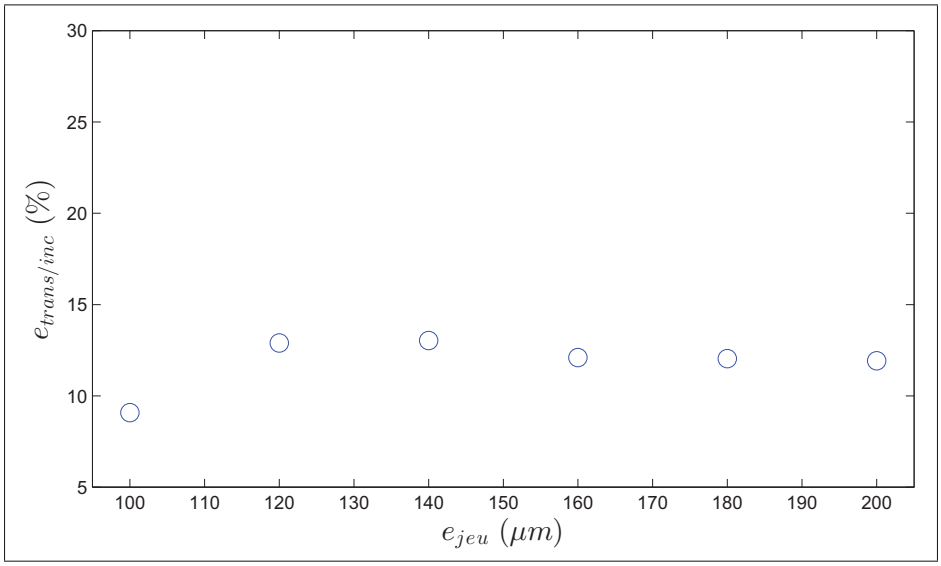


Figure 2.14 Ratio d'énergie $e_{trans/inc}$ en fonction de l'épaisseur du jeu

valeurs possibles de e_{eut} qui sont typiquement observable pour ce type de joint. Les résultats indiques que entre 0 et 70 μm d'eutectique dans le joint, plus la quantité de phases eutectique est importante plus l'énergie $e_{tans/inc}$ diminue. Par contre après le rapport d'énergie augmente légèrement et au-delà de 100 μm il se stabilise. Par conséquent, en fonction de la précision du

système de mesure il sera possible de détecter uniquement les échantillons ayant un minimum de quantité de phases eutectique et une variation de cette même quantité sera observable si celle-ci est suffisamment importante.

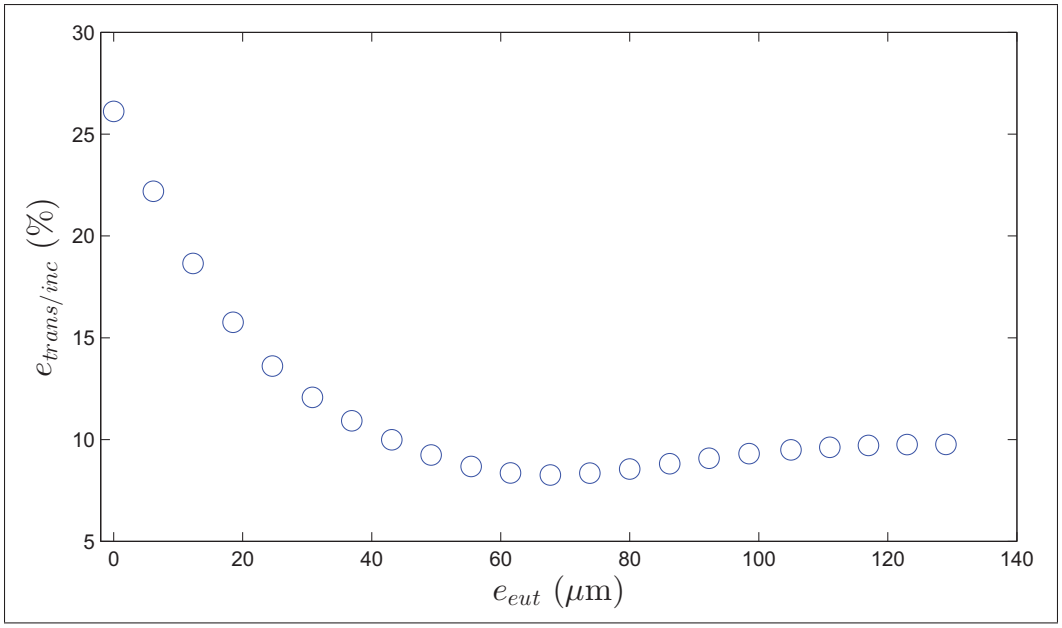


Figure 2.15 Ratio d'énergie $e_{trans/inc}$ en fonction de la quantité d'eutectique dans le joint

2.3.4 Sensibilité de la méthode aux variations du module d'Young de la phase eutectique

Cette dernière section consiste à estimer la sensibilité de la méthode développée à de faibles variations du module d'Young de la phase eutectique. En effet comme expliqué dans la section 2.1.2, le module d'Young de cette phase est inconnu. De plus les résultats de la section 2.2.2 montre que l'influence de E_{eut} est linéaire mais il reste à déterminer quelle valeur minimum du module d'Young est nécessaire pour que la variation d'énergie soit mesurable. Le rapport $R_{W/X}$ est calculé avec les paramètres optimaux trouvés précédemment et pour des variations du module d'Young de 20 *GPa*. Les résultats sont donnés dans la figure 2.16. Ainsi, une variation de 30% du ratio $R_{W/X}$, considéré comme le minimum détectable expérimentalement, correspond à $\Delta E_{eut} = 80$ *GPa*.

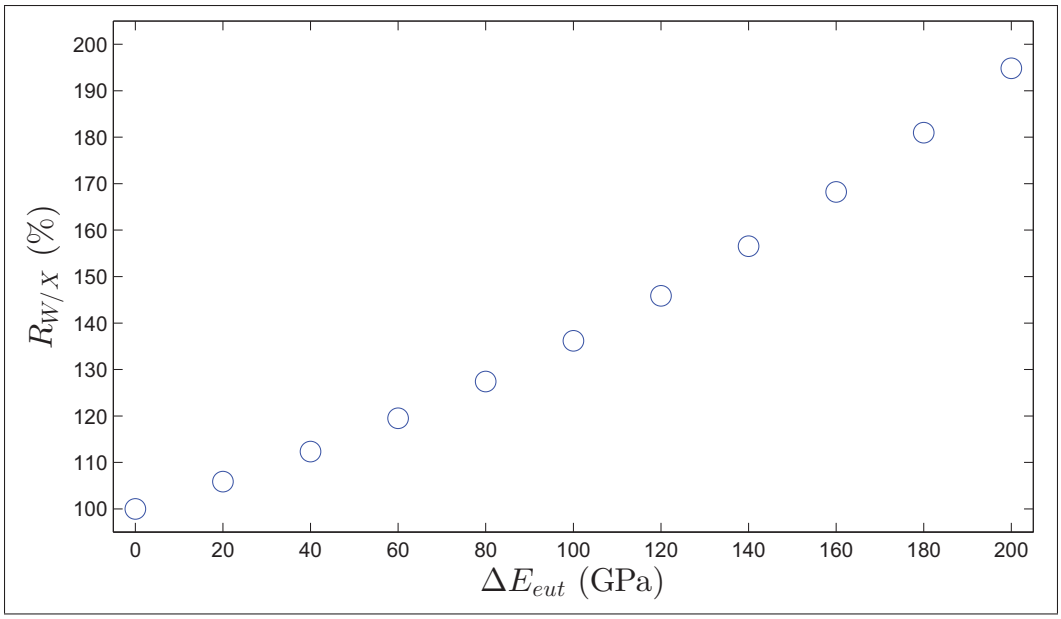


Figure 2.16 Variation du ratio d'énergie $R_{W/X}$ en fonction du delta de module d'Young

2.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté le modèle éléments finis développé pour simuler la propagation des ultrasons à travers un joint brasé. Ce modèle a été construit en accord avec la méthode de mesure envisagée et avec les caractéristiques aussi bien géométriques que mécaniques des joints devant être inspectés. Dans un premier temps les simulations ont été utilisées pour prouver la faisabilité de la méthode d'inspection mais sous l'hypothèse que le module d'Young de la phase eutectique était égale à 840 GPa. Ensuite une étude paramétrique a été menée pour optimiser par simulation les paramètres d'inspections, ces paramètres concernant aussi bien la méthode de mesure, que l'algorithme de traitement des résultats. Les paramètres optimaux identifiés sont résumés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 Paramètres optimaux, d'après les simulations, pour l'inspection par ondes guidées ultrasonores de joints brasés à recouvrement simple

Paramètre	**Valeur**
Type d'onde	*SH*
Mode filtré	SH_0
Fréquence d'excitation	1500 kHz
Nombre de cycles du signal	15
Largeur bande passante calcul	200 kHz

Finalement le modèle a été utilisé pour étudier l'influence de l'hypothèse sur le module d'Young de la phase eutectique. De même que l'influence de la quantité de phases eutectique dans le joint. Ainsi les simulations permettent de conclure que si la variation du module d'Young, dû à la présence d'une phase eutectique, est suffisamment élevée et en utilisant les paramètres optimaux, il est possible de détecter la présence d'une phase eutectique dans un joint brasé à recouvrement simple. Le chapitre suivant va donc chercher à appliquer la méthode développée sur des échantillons de joints brasés.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Le chapitre 2 a permis de démontrer que l'inspection par ondes guidées ultrasonores de joints brasés à recouvrement simple pour détecter la présence ou non de phase fragile devrait être possible. De plus les simulations éléments finis ont été utilisées pour identifier les paramètres optimaux permettant la détection. Ce chapitre a donc pour objectif d'infirmer ou des confirmer expérimentalement ces résultats.

3.1 Système de mesure expérimental

Pour accomplir ces expériences, un système de mesure expérimental a été développé en accord avec la méthode utilisée en simulation pour traiter les résultats, des photos du système de mesure sont données dans l'annexe I. En résumé, le système est composé d'un émetteur d'ondes guidées ultrasonores et d'un récepteur permettant de mesurer le déplacement à la surface de l'échantillon et en plusieurs points. L'architecture globale du système est donnée dans la figure 3.1. L'ensemble des acquisitions sont faites avec un oscilloscope (DSO9024H) Agilent™ fonctionnant sous Windows™, servant également à contrôler les différents éléments du système à l'aide du logiciel LabVIEW™.

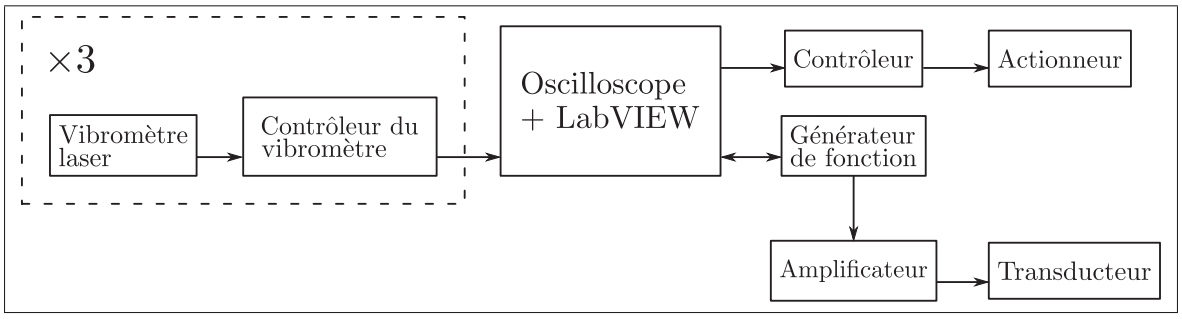


Figure 3.1 Architecture du système de mesure

3.1.1 Sous-système utilisé pour la génération du signal ultrasonore

Tout d'abord le générateur de fonction 33500B d'Agilent™ est utilisé pour générer le signal d'excitation en fonction de la fréquence et du nombre de cycles choisi, ensuite ce signal est amplifié par l'amplificateur RPR-4000 de Ritec™ pour que la tension appliquée sur le transducteur soit suffisamment importante pour générer le signal. Et donc ce signal amplifié est appliqué sur un transducteur PZT-5H de chez Boston Piezo-Optics Inc. dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Propriétés du PZT-5H utilisé
Tirée de Erturk et Inman (2011)

Constantes piézoélectriques	**Valeurs** ($\times 10^{-12}\ m.V^{-1}$)
d_{33}	585
d_{31}	-265
d_{15}	730

C'est ce type de piézoélectrique qui a été utilisé car il présente une constante piézoélectrique d_{15} élevée, ce qui permet de générer facilement des ondes de cisaillements horizontales comme détaillé dans la figure 3.2, la direction 3 correspondant à la direction de polarisation du transducteur. La constante d_{ij} est la déformation principale obtenue dans la direction j, pour un champ électrique appliqué dans la direction i.

D'autre part les transducteurs utilisés sont découpés de telle manière que leurs dimensions finales sont de $25.4 \times 3\ mm^2$. La largeur de 25.4 *mm* est imposée pour le fournisseur mais convient à cette application car elle permet d'obtenir un front d'onde relativement plat dans la direction de propagation. Ensuite la longueur de 3 *mm* est choisie en fonction de la longueur d'onde (λ) du signal, en effet afin de maximiser l'amplitude du signal généré il faut éviter que la largeur du transducteur soit égale à un multiple de λ. Finalement la longueur de 3 *mm* correspond à $\frac{3}{2}\lambda$, donc respecte ce critère et n'est pas trop faible pour permettre une découpe aisée du transducteur PZT.

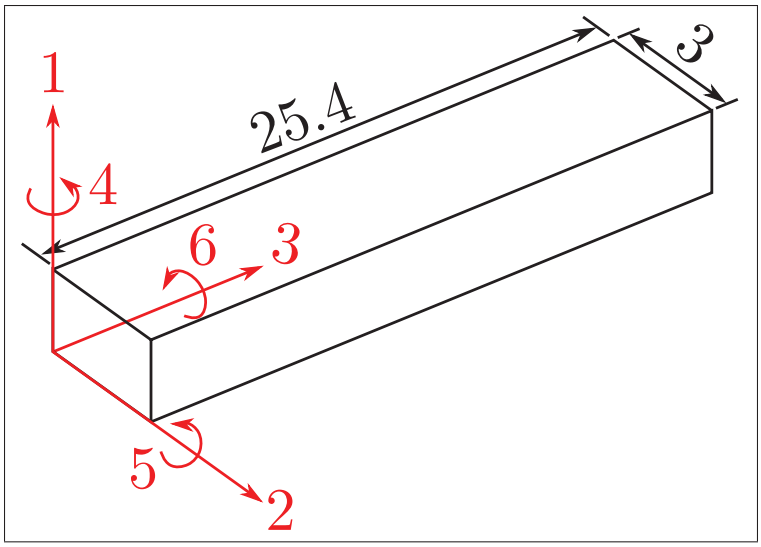


Figure 3.2 Géométrie du transducteur utilisé et axes utilisés pour définir les constantes piézoélectriques

Et enfin le transducteur est fixé à la surface de l'échantillon à l'aide d'une pâte d'argent (SPI Supplies Silver Paste Plus™) assurant aussi bien le contact mécanique nécessaire à la transmission de l'onde, que le contact électrique indispensable pour appliquer le champ électrique.

3.1.2 Sous-système utilisé pour la mesure du signal ultrasonore

Le signal ultrasonore est mesuré par trois vibromètres lasers Polytec (OFV-505) couplés avec trois contrôleurs (OFV-2570) permettant d'obtenir le déplacement à la surface de l'échantillon dans trois directions différentes. La position des différents lasers est donnée dans la figure 3.3, les trois vibromètres sont positionnés dans un même plan qui est perpendiculaire à l'échantillon et donc à la direction de propagation de l'onde.

Cette configuration est utilisée car il n'est pas possible de mesurer directement le déplacement en cisaillement horizontal à la surface d'un échantillon. En effet cela nécessiterait de faire une mesure tangentielle ce qui n'est pas possible. Donc finalement le principe de changement de base, détaillé dans Dongkyu *et al.* (2014), est utilisé et permet de démontrer que si l'amplitude A du déplacement selon trois directions quelconques $(1,2,3)$ est connue alors il est possible de calculer l'amplitude du déplacement selon les directions (x,y,z) à partir de l'équation 3.1.

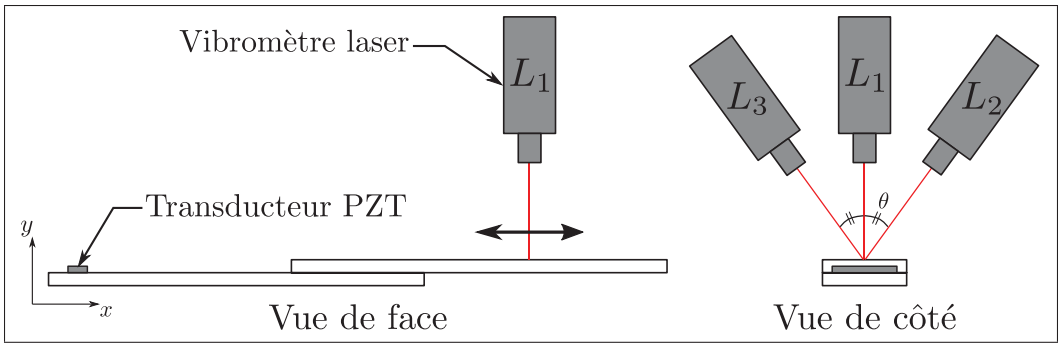


Figure 3.3 Schéma du montage expérimental utilisé

$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_1) & \cos(\beta_1) & \cos(\gamma_1) \\ \cos(\alpha_2) & \cos(\beta_2) & \cos(\gamma_2) \\ \cos(\alpha_3) & \cos(\beta_3) & \cos(\gamma_3) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

où les angles α_i, β_i et γ_i correspondent respectivement à l'angle que fait la direction i avec les directions (x,y,z). Donc si les directions $(1,2,3)$ correspondent aux trois vibromètres de la figure 3.3, la matrice de passage devient

$$\begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2}) & \cos(0) & \cos(\frac{\pi}{2}) \\ \cos(\frac{\pi}{2}) & \cos(\theta) & \cos(\frac{\pi}{2}-\theta) \\ \cos(\frac{\pi}{2}) & \cos(-\theta) & \cos(\frac{\pi}{2}+\theta) \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{pmatrix}^{-1} \tag{3.2}$$

Donc en développant l'équation 3.1, il vient

$$\begin{cases} A_1 = A_y \\ A_2 = A_y \times \cos(\theta) + A_z \times \sin(\theta) \\ A_3 = A_y \times \cos(\theta) - A_z \times \sin(\theta) \end{cases} \Longleftrightarrow \begin{cases} A_y = A_1 \\ A_z = \frac{A_2 - A_1 \times \cos(\theta)}{\sin(\theta)} \\ A_z = \frac{A_2 - A_3}{2 \times \sin(\theta)} \end{cases} \tag{3.3}$$

Il apparait que dans cette configuration seulement deux vibromètres sont suffisants pour calculer l'amplitude du déplacement en cisaillement horizontale (A_z) mais une comparaison entre les deux solutions de calcul sera détaillée dans la section 3.3.

De plus la surface de l'échantillon est préparée en appliquant un adhésif rétroréfléchissant pour assurer une réflexion suffisante de la lumière vers le vibromètre, ce qui est indispensable notamment pour les vibromètres L_2 et L_3 à cause de leur position.

3.1.3 Sous-système d'automatisation utilisé pour permettre une mesure multi-points

Ensuite la méthode d'analyse (FFT-2D) utilisée lors des simulations nécessite de connaitre le déplacement en plusieurs points le long de l'échantillon. De plus comme expliqué dans la section 1.1.5, la distance entre chaque point de mesure (Δx) et le nombre total de points (N_x) sont des paramètres importants car ils influencent directement la plage de nombre d'ondes et la résolution de la FFT-2D. Et donc, d'après les courbes de dispersion obtenues en simulation, il faut que $k \in [-600, 600]\ m^{-1}$ c'est à dire avoir une distance entre les points de mesures $\Delta x \leq 8.3 \times 10^{-4}\ m$. De plus la résolution sur k doit être au moins inférieur à $10\ m^{-1}$ ce qui correspond à une distance totale de $0.1\ m$ et donc si $\Delta x = 8.3 \times 10^{-4}\ m$ cela signifie faire une mesure sur $N_x = 120$ points.

Par conséquent le déplacement d'un point à un autre ne peut pas être fait manuellement. Un actionneur automatisé a donc été développé. Il est composé d'un système de vis à bille couplé avec un ensemble moteur à courant continu + codeur incrémental. Et le tout est asservi par un contrôleur (DMC-30012) piloté sous LabVIEW. Ce système a une résolution en déplacement de $10^{-6}\ m$ et une amplitude de déplacement de 0.8 m. Il répond donc aux spécifications énoncées plus haut.

3.1.4 Utilisation d'un absorbant

Finalement, un matériau absorbant a été utilisé pour limiter les réflexions parasites et pour que les expérimentations correspondent le plus possible au modèle éléments finis. En effet

l'utilisation d'un modèle pseudo-2D suppose que la largeur de l'échantillon est infinie, ce qui correspond à une absence de réflexion provenant des bords de l'échantillon. Son efficacité sera étudiée dans la section 3.3.

3.2 Échantillons testés

Différents types d'échantillons ont été testés. Ils ont été fabriqués par Pratt&Whitney Canada, trois échantillons ont pu être fabriqués chacun sous des conditions de brasage différentes. Les trois recettes de brasage sont données dans le tableau 3.2. Comme expliqué dans la section 1.2.2, avec ces recettes de brasage les joints présentent trois quantités d'eutectiques différentes, l'échantillon numéro 1 présentant la plus grande quantité d'eutectique.

Tableau 3.2 Recettes de brasage

Numéro échantillon	**Température de brasage** (*K*)	**Temps de brasage** (*min*)
1	1325	1
2	1325	60
3	1325	180

De plus la géométrie des échantillons est donnée dans la figure 3.4 et reprend la géométrie du modèle éléments finis.

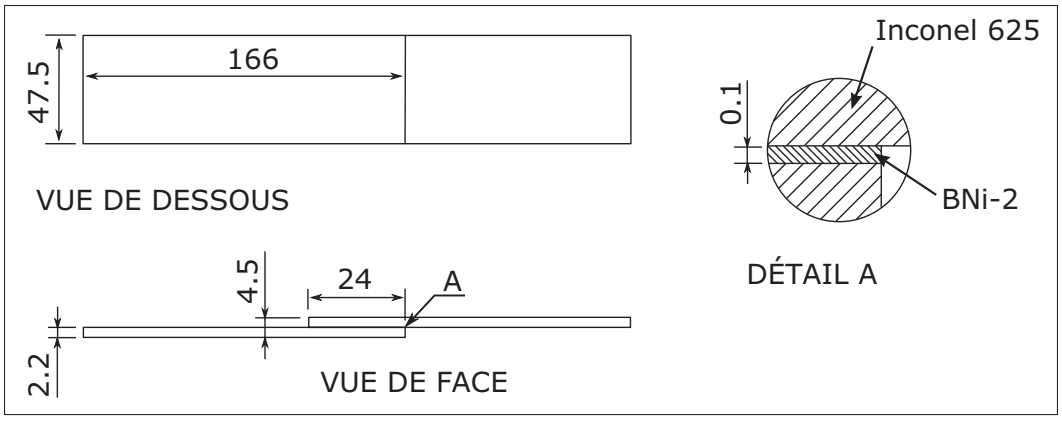


Figure 3.4 Géométrie des échantillons (les dimensions sont en mm)

3.2.1 Microstructures des échantillons

Afin de confirmer les microstructures attendues en fonction des recettes de brasage, des échantillons ont été extraits des joints puis observés avec un microscope optique (Olympus DSX500). Dans un premier temps les échantillons sont polis manuellement à l'aide d'une polisseuse (Buehler Metaserv 2000), en utilisant des disques abrasifs de carbure de silicium de 120, 240, 320, 600 et 1200 pendant environ 1 min par finesse. Ensuite des solutions diamantées de 3 μm et 1 μm sont utilisées respectivement pendant 10 min et 20 min pour la finition du polissage. Enfin, les échantillons sont chimiquement attaqués pendant 10 s pour révéler les différentes phases présentes, à l'aide d'une solution Kalling dont la composition est la suivante :

- 5 g $CuCl_2$
- 100 mL HCL
- 100 mL Éthanol

Finalement les microstructures obtenues sont données dans la figure 3.5. Comme attendu, la quantité d'eutectique est inversement proportionnelle au temps de brasage. De plus le tableau 3.3 donne l'épaisseur du jeu et celle de la zone eutectique. Il apparait que l'épaisseur du jeu présente une grande variabilité d'un échantillon à l'autre mais reste dans la plage de tolérance décrite dans la section 2.3.3, donc cela ne devrait pas influencer les résultats de l'inspection par ultrasons.

Tableau 3.3 Épaisseurs moyennes du jeu et de la zone eutectique pour les différents échantillons

Échantillon	**Épaisseur jeu (μm)**	**Épaisseur eutectique (μm)**	**Proportion (%)**
1	157.5 $\pm$ 3.2	117.4 $\pm$ 8.4	74.5
2	196.8 $\pm$ 15.0	57.2 $\pm$ 8.3	29.1
3	101.3 $\pm$ 3.9	15.8 $\pm$ 3.3	15.6

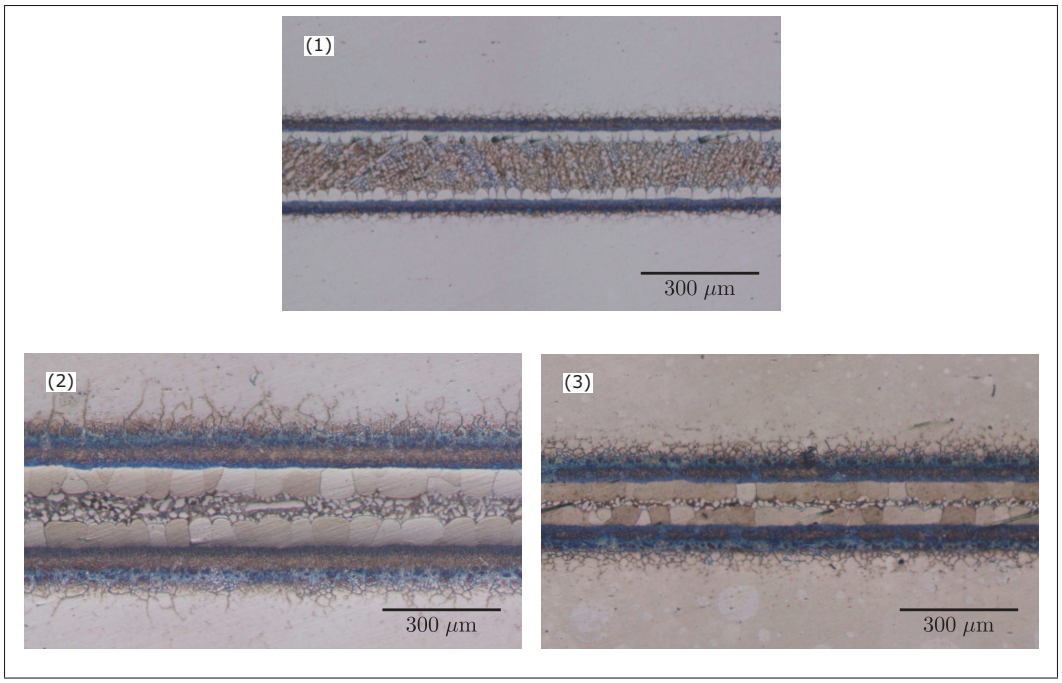


Figure 3.5 Les différentes microstructures observables, en fonction du temps de brasage (1) 1 min, (2) 60 min et (3) 180 min

3.3 Résultats préliminaires

Cette section va décrire les résultats préliminaires obtenus et les différents paramètres expérimentaux qui ont été améliorés lors des premières expériences. De même une comparaison entre les courbes de dispersion expérimentales, théoriques et celles obtenues par simulation va permettre de valider le procédé expérimental.

3.3.1 Courbes de dispersion obtenues

Les figures 3.6 et 3.7 présentent les courbes de dispersion caractéristiques obtenues par FFT-2D, lors des expérimentations. Dans ce cas il s'agit d'un signal d'excitation de 5 cycles avec une fréquence centrale de 1.5 MHz, la figure 3.6 correspondant au signal en amont du joint et la figure 3.7 à celui en aval.

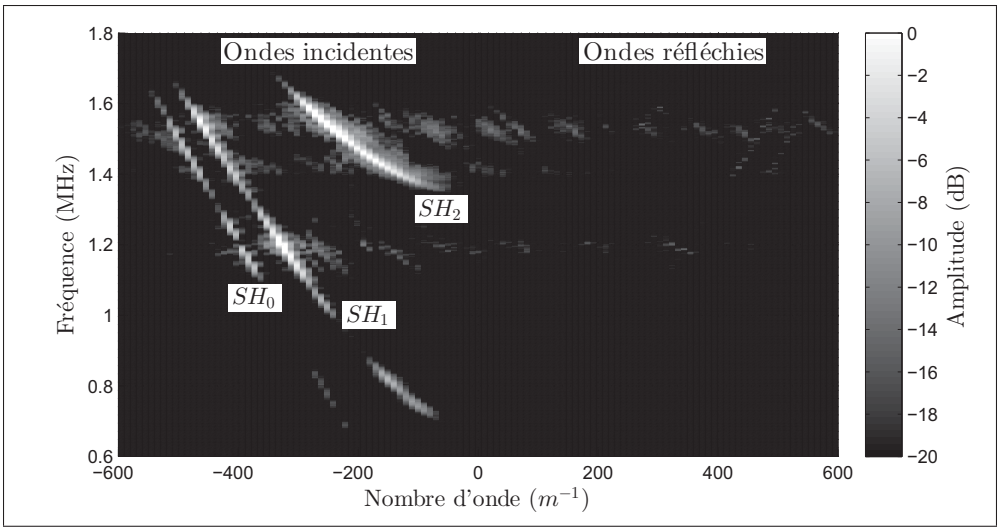


Figure 3.6 Courbes de dispersions expérimentales caractéristiques, du signal en amont du joint

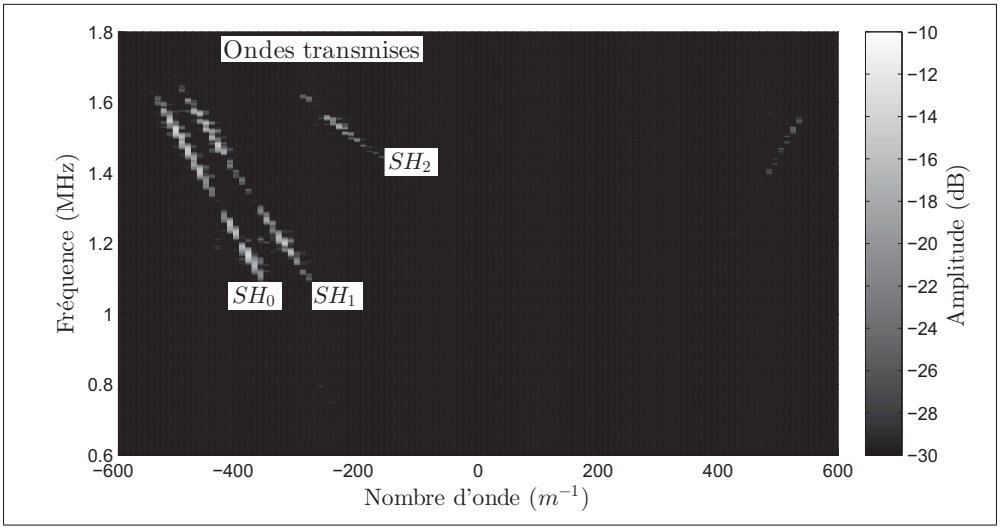


Figure 3.7 Courbes de dispersions expérimentales caractéristiques, du signal en aval du joint

Il apparait donc que les ondes incidentes sont observables facilement et qu'elles se confondent peu avec le bruit. À l'inverse aucune onde réfléchie n'est observée ou plus précisément celle-ci se confond avec le bruit. Et finalement, pour les ondes transmises le signal est plus faible (environ -10 dB) que pour les ondes incidentes mais reste observable comme le montre la figure 3.7. D'autre part pour vérifier la validité des résultats expérimentaux, la figure 3.8 compare

les résultats obtenus expérimentalement avec ceux obtenus par simulation. Il apparait que la forme des courbes est identique donc les résultats expérimentaux reproduisent globalement ceux obtenus en simulation en tous cas concernant les courbes de dispersion. Le même résultat est obtenu en comparant avec les courbes de dispersion théoriques, les lignes rouges sur les graphiques.

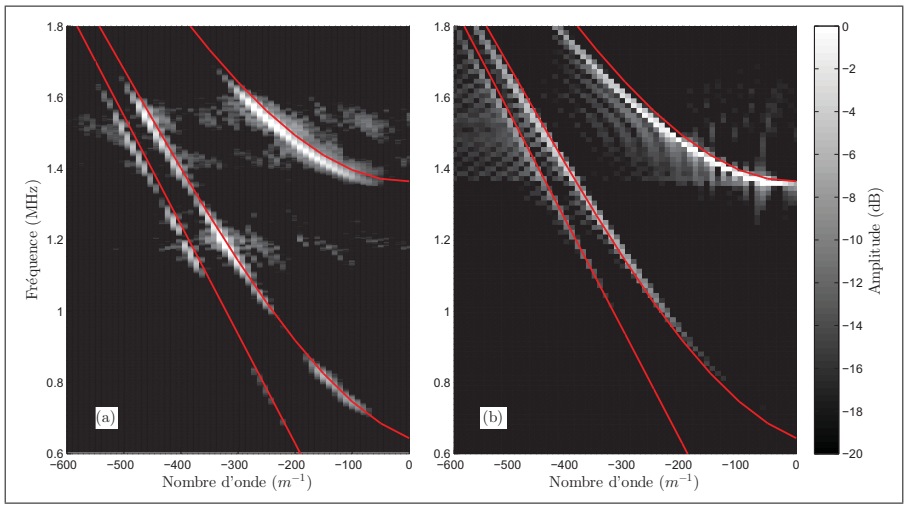


Figure 3.8 Courbes de dispersion obtenues expérimentalement (a) et par simulation (b), les lignes rouges correspondent aux courbes théoriques

3.3.2 Influence de la position des vibromètres

Ensuite, l'influence de la position des vibromètres a été étudiée, en effet comme expliqué dans la section 3.1.2 seulement deux vibromètres sont suffisants pour calculer le déplacement en cisaillement horizontal à la surface de l'échantillon. La figure 3.9 présente les courbes de dispersion obtenues en fonction des vibromètres utilisés. Il apparait que l'utilisation des vibromètres L_1 et L_2 pour le traitement des résultats cause bien plus de bruit que celle des vibromètres L_2 et L_3. Ceci peut être expliqué par le fait que L_1 mesure uniquement la composante de déplacement normale à la surface de l'échantillon, pour être ensuite soustraite au déplacement mesuré

par L_2. Contrairement à L_3 qui mesure aussi une composante de déplacement en cisaillement horizontal, tout comme L_2 et donc augmente la précision de la mesure sur cette composante.

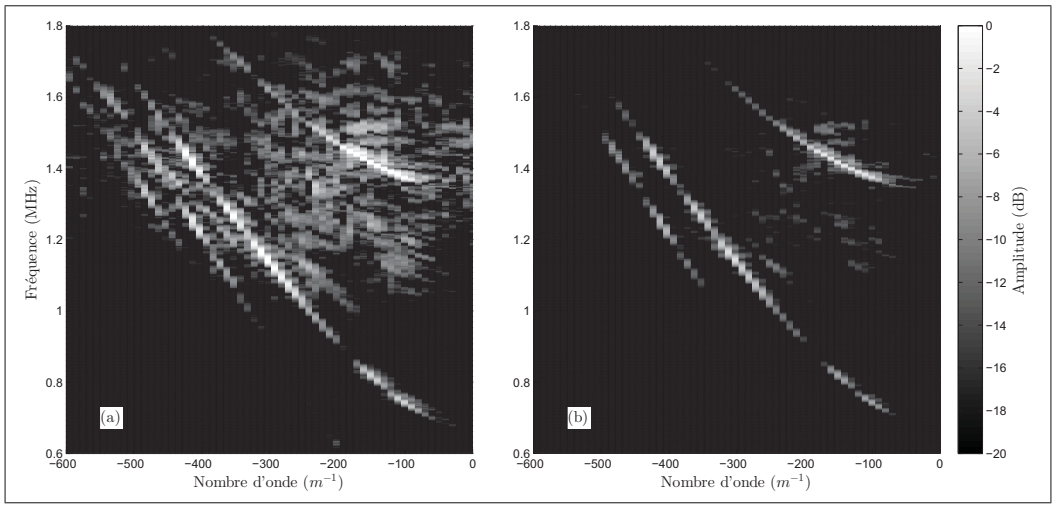


Figure 3.9 Courbes de dispersion obtenues avec les vibromètres L_1 et L_2 (a) et celles avec les vibromètres L_3 et L_2 (b)

3.3.3 Influence de l'absorbant

L'impact de la quantité d'absorbant a été analysé. La figure 3.10 présente les courbes de dispersion obtenues pour trois quantités différentes d'absorbant. Tout d'abord la comparaison entre les figures 3.10.(a) et 3.10.(b) montre que l'utilisation de l'absorbant améliore nettement le rapport signal/bruit. Ensuite la figure 3.10.(c) indique qu'une augmentation de la quantité d'absorbant améliore sensiblement la qualité du signal obtenu, en effet il apparait que dans ce cas les modes sont mieux définis sur la FFT-2D.

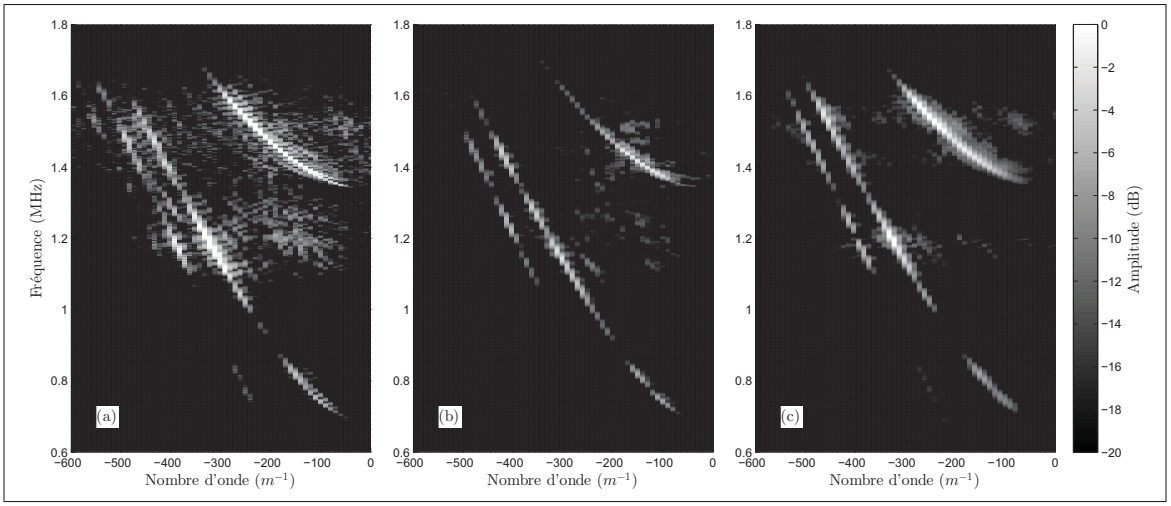


Figure 3.10 Courbes de dispersion obtenues sans absorbant (a), avec de l'absorbant (b) et avec beaucoup d'absorbant (c)

Des photos détaillant les quantités d'absorbants appliquées, en fonction des trois cas, sont données dans la figure I-4 à l'annexe I. D'autre part, l'étude des propriétés de ce matériau absorbant est un sujet de recherche à part entière, menée notamment à l'université de Sherbrooke. Donc l'optimisation de son utilisation pour effectuer ces mesures n'a pas été plus poussée que celle présentée ici car la dernière configuration présentée est suffisante pour répondre aux besoins de la méthode développée.

3.3.4 Influence du nombre de cycles

Les résultats de la section 2.3.2 ont démontré que, d'augmenter le nombre de cycles du signal d'excitation ou concentré le calcul sur une bande passante équivalente donné des résultats similaires en simulation. Cependant, il s'avère que ce résultat n'est pas vrai expérimentalement. En effet comme le montre la figure 3.11, quand $N_{cyc} = 2$ l'énergie du signal ultrasonore ne se répartit par uniformément autour de la fréquence centrale ($f = 1.5\ MHz$). Ceci peut être expliqué par le fait que le transducteur utilisé vibre plus facilement pour des fréquences plus basses et donc aura tendance à générer des ondes guidées autour de ces fréquences.

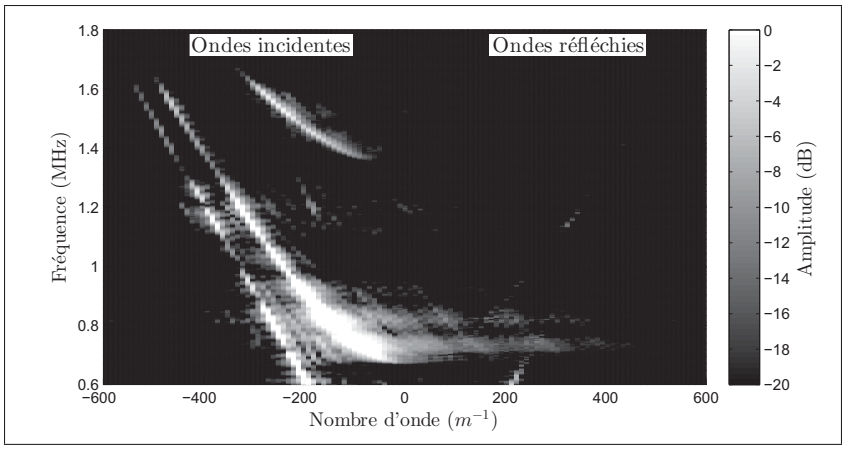


Figure 3.11 Courbes de dispersion obtenues pour $N_{cyc} = 2$ en amont du joint

Ainsi, même si ce résultat peut ne pas être un problème pour le calcul de l'énergie incidente, il l'est pour le calcul de l'énergie transmise comme le montre la figure 3.12 qui correspond aux courbes de dispersion obtenues en aval du joint pour $N_{cyc} = 2$ et $N_{cyc} = 20$.

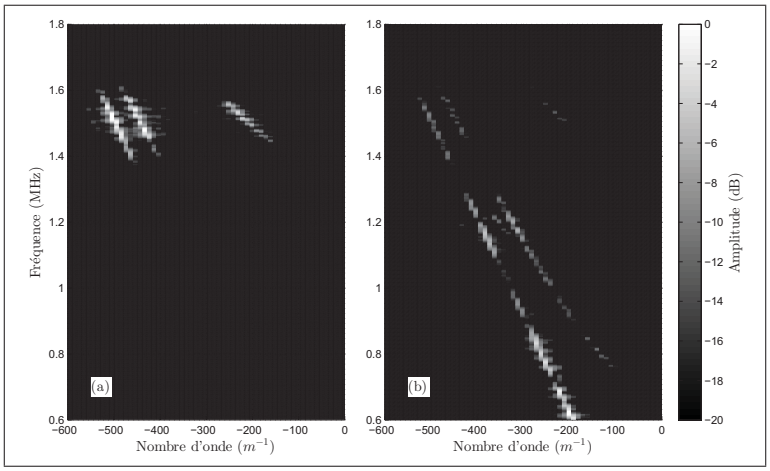


Figure 3.12 Courbes de dispersion obtenues en aval du joint pour $N_{cyc} = 20$ (a) et $N_{cyc} = 2$ (b)

Ces premiers résultats expérimentaux ont permis d'optimiser la procédé expérimental et la section suivante va décrire les résultats obtenus pour la détection de la quantité de phases eutectique présente dans un joint brasé.

3.4 Résultats

Au regard des résultats obtenus en simulation et des premiers résultats expérimentaux décrits dans la section 3.3, les paramètres retenus pour l'inspection sont donnés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 Paramètres utilisés pour l'inspection des échantillons de joints brasés

Paramètre	**Valeur utilisée**
Type d'onde	*SH*
Mode filtré	SH_0
Fréquence d'excitation	1500 kHz
Nombre de cycles du signal	15
Largeur de la bande passante de calcul	200 kHz

Sachant que même si le signal est concentré autour de sa fréquence centrale en utilisant un signal d'excitation de 15 cycles, une bande passante de 200 kHz est utilisée pour le calcul car cela permet de réduire l'écart-type sur le calcul de l'énergie. Les données brutes, des 15 mesures effectuées sur chacun des échantillons, sont données dans l'annexe II. Et le tableau 3.5 résume les données obtenues avec le calcul de l'énergie $e_{trans/inc}$ moyenne pour chacun des échantillons ainsi que l'écart-type correspondant.

Tableau 3.5 Valeurs moyennes de l'énergie $e_{trans/inc}$ pour le signal non filtré et filtré en fonction de l'échantillon

Échantillon	$e_{trans/inc}$ / Non filtré (%)	$e_{trans/inc}$ / Mode SH_0 (%)
1	2.04 ± 0.57	15.61 ± 1.57
2	3.08 ± 1.78	8.37 ± 3.65
3	5.36 ± 1.74	20.20 ± 7.35

Finalement la figure 3.13 est obtenue en compilant les résultats, calculés en simulation, de la figure 2.15, ceux du tableau 3.3 donnant l'épaisseur de la phase eutectique dans chacun des échantillons et ceux des mesures par ultrasons du tableau 3.5. Cette figure démontre que le pro-

cédé expérimental développé permet bien de détecter la quantité de phases eutectique présente dans un joint brasé à recouvrement simple, de même les résultats expérimentaux correspondent relativement bien aux résultats obtenus par simulation. Cependant, le niveau d'énergie obtenu pour l'échantillon contenant la plus grande quantité de phases eutectique donne une valeur trop importante par rapport à ce qui est attendu. Cet écart pourrait être expliqué par le fait que les trois échantillons n'ont pas tous exactement la même épaisseur de jeu, comme expliqué dans la section 3.2.1, et les résultats obtenus par simulation dans la section 2.3.3 montrent que cela fait varier la proportion de l'énergie transmise. De plus l'hypothèse sur la valeur du module d'Young utilisé pour modéliser la phase eutectique peut expliquer aussi cette erreur. Par contre la valeur obtenue révèle une limite de cette méthode. En effet elle pourrait indiquer que l'épaisseur de la phase eutectique est autour de 25 μm et non pas 118 μm, il est donc nécessaire d'améliorer encore la précision du système de mesure expérimental. De plus la forme de la courbe obtenue par simulation montre que pour des valeurs de e_{eut} supérieures à 50 μm, il existe deux épaisseurs possibles pour un même niveau d'énergie donc au-delà de cette valeur la méthode permet uniquement de dire si la pièce testée a une épaisseur de phases eutectique supérieure ou non à 50 μm.

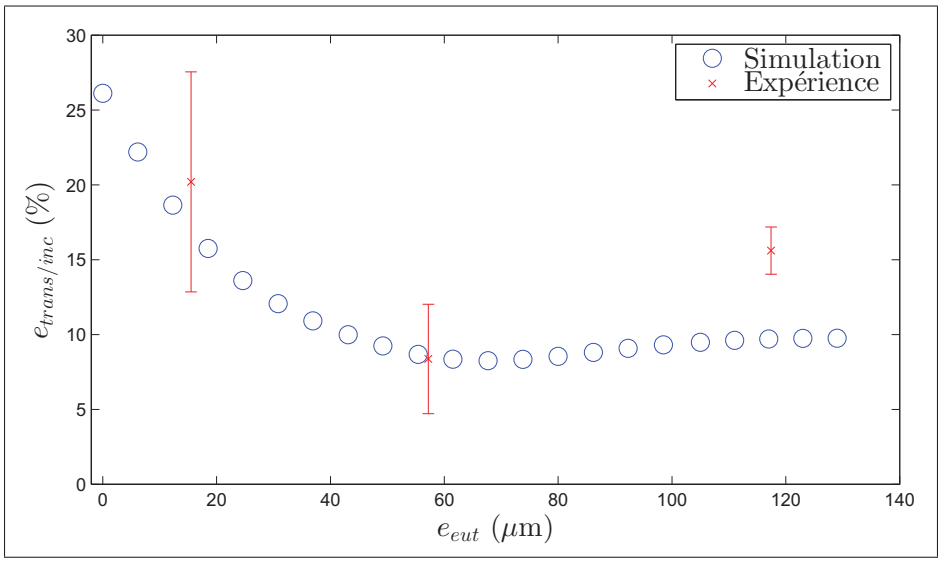


Figure 3.13 Ratio d'énergie $e_{trans/inc}$ en fonction de l'épaisseur d'eutectique dans le joint par simulation et expérimentalement

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La conclusion de ce mémoire est qu'il est possible de détecter la présence ou non d'une phase eutectique dans un joint brasé, en utilisant des ondes guidées ultrasonores. Avec le système expérimental développé, il est facile de distinguer un joint sans phase eutectique d'un joint avec phase eutectique à condition que la quantité de phase fragile soit supérieur à 15%. Et donc cette méthode permet d'identifier les joints en fonction de leurs caractéristiques mécaniques qui résultent de leurs micro-structures. Par contre, ce résultat a été démontré uniquement dans le cas de joints à recouvrement simple ayant une géométrie précise et composés d'Inconel 625 avec comme brasure du BNi-2. De plus l'hypothèse faite lors des simulations, concernant le module d'Young de la phase eutectique, nécessiterait d'être démontré pour affiner la modèle éléments finis, même si le fait que les résultats expérimentaux soient proches de la courbe obtenue par simulation montre que cette valeur n'est pas éloignée de la valeur réelle.

Le modèle éléments finis de la propagation des ultrasons a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Cette méthode d'inspection permet bien de différencier les joints contenant une phase eutectique de ceux sans phase eutectique, ce qui prouve la faisabilité de l'utilisation d'ondes guidées ultrasonores.
- Les ondes de cisaillement horizontales sont les plus sensibles à la présence de phases eutectique dans ce type de joint car elles sollicitent préférentiellement cette zone.
- La fréquence du signal d'excitation est un paramètre important car il influence le nombre de modes présents dans la zone du joint.
- Le filtrage du mode SH_0 améliore la précision de la méthode.
- Concentrer le signal d'excitation ou le calcul de l'énergie autour de la fréquence optimale permet d'augmenter encore la sensibilité.

- Les défauts liés au procédé de brasage sur ce type de joint ont une influence limitée sur la méthode d'inspection.

Ensuite, un système expérimental a été développé pour permettre l'inspection d'échantillons en utilisant la méthode optimisée par simulation. Il apparait que ce dispositif de mesure permet bien d'identifier les joints en fonction de la quantité de phases eutectique présente dans leurs micro-structures. Et il a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La position des vibromètres lasers utilisés pour mesurer les ondes ultrasonores générées influence la précision du système. De meilleurs résultats étant obtenus en privilégiant une position oblique pour les deux vibromètres.
- L'utilisation d'un absorbant pour limiter les réflexions parasites améliore le rapport signal/bruit.
- Concentrer le signal d'excitation en modifiant sa forme donne de meilleurs résultats que de le faire lors du traitement des résultats.

Finalement, l'objectif de ce mémoire, c'est-à-dire développer un système de mesure non destructif pour l'inspection de joints brasés, a été atteint même si de nombreuses améliorations peuvent encore être apportées, certaines pistes sont d'ailleurs proposées dans les recommandations. Mais, dans tous les cas, la méthode de travail utilisée, notamment par simulation, peut servir de base pour étudier la possibilité d'inspecter d'autres formes de joints brasés ou des joints composés de matériaux différents.

Face aux résultats obtenus, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- Le modèle éléments finis proposé reste relativement simple, il pourrait donc être intéressant de l'affiner pour rapprocher le modèle de la réalité. Par exemple, faire une modélisation de la limite entre phase eutectique et joint non pas comme une

ligne mais en dents de scie. Faire un modèle prenant en compte l'anisotropie du joint. Ou vérifier l'influence d'éventuelles porosités dans le joint.

- Pour affiner le modèle éléments finis il serai également intéressant de mesurer le module d'Young réel de la phase eutectique en fabricant des éprouvettes de micro-traction.
- Améliorer le rapport signal/bruit lors des expérimentations, car cela permettrait d'améliorer la précision du système et permettrait aussi l'inspection de pièces plus grandes sans que l'atténuation ne devienne un problème.
- Réduire la dispersion sur les résultats expérimentaux, pour augmenter la précision du système et pour permettre la détection de la quantité de phases eutectique avec une seule mesure.
- Dans une perspective d'industrialisation du système de mesure, il serait intéressant de développer un transducteur multiéléments pour la réception du signal ultrasonore car l'utilisation de vibromètres lasers peut être contraignante dans un environnement industriel. De même que de trouver une solution permettant d'éviter d'avoir à coller le transducteur piézoélectrique sur la pièce à tester.

ANNEXE I

PHOTOS DU SYSTÈME DE MESURE EXPÉRIMENTAL

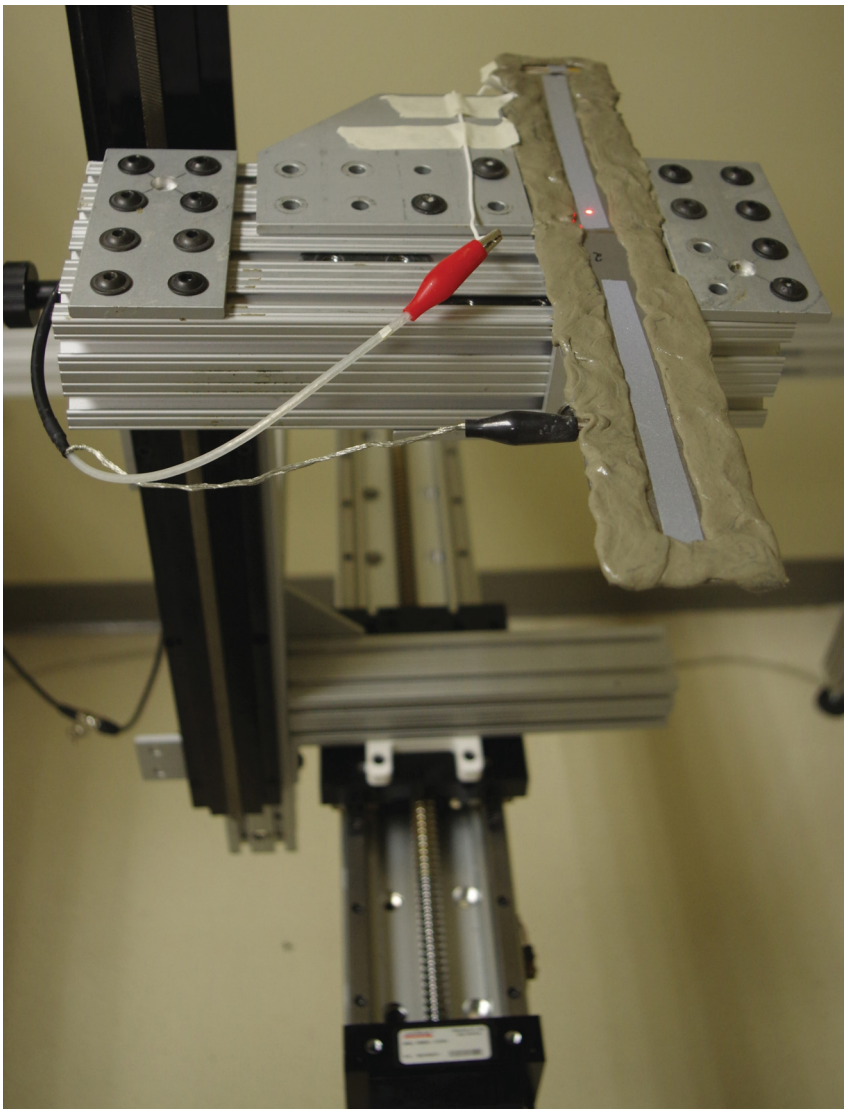


Figure-A I-1 Photo d'un échantillon fixé à l'actionneur linéaire permettant la mesure multipoints

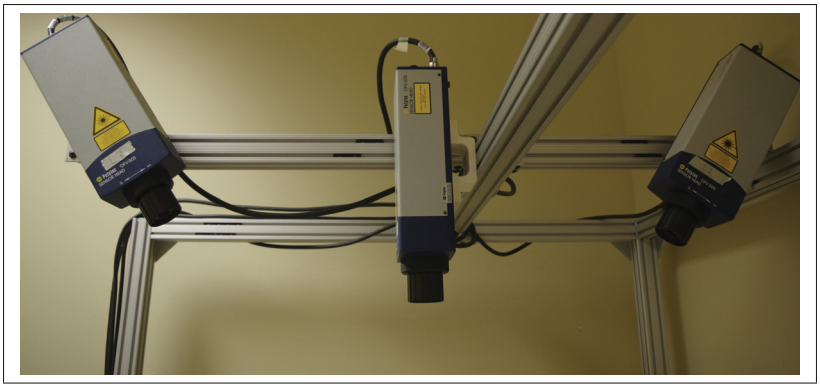


Figure-A I-2 Photo des trois vibromètres laser utilisés pour mesurer le signal ultrasonore

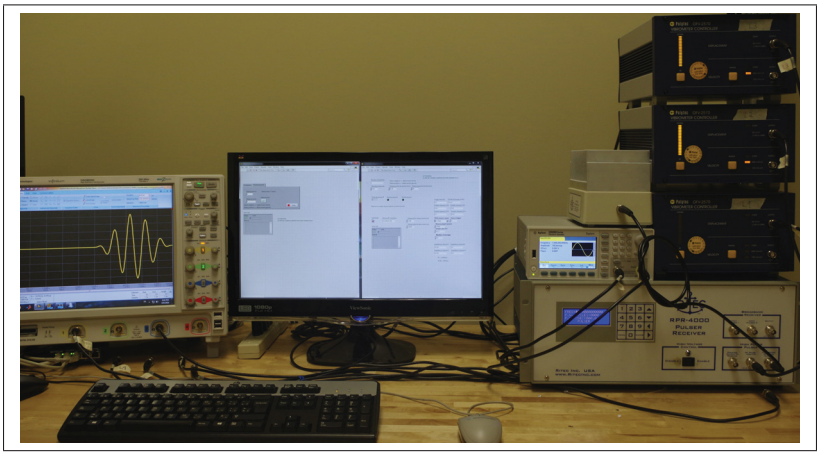


Figure-A I-3 Photo des équipements utilisés pour la génération et la réception du signal ultrasonore

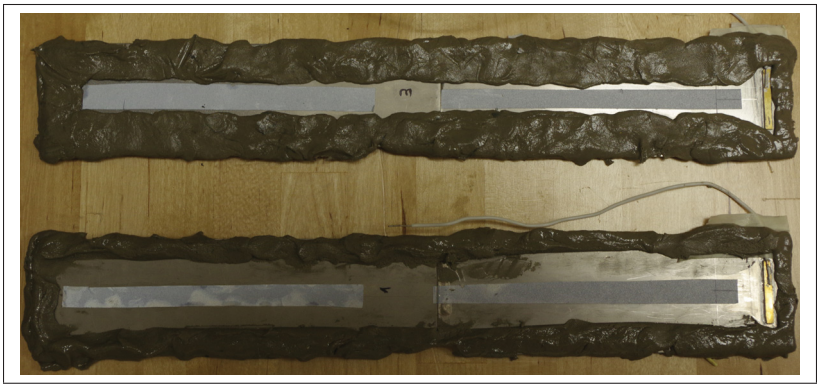


Figure-A I-4 Photo de deux échantillons avec les différentes quantités d'absorbants utlisées

ANNEXE II

DONNÉES BRUTES EXPÉRIMENTALES

Tableau-A II-1 Tableau de $e_{trans/inc}$ (%) calculée pour chacune des mesures

Échantillon 1		Échantillon 2		Échantillon 3	
Non filtré	**Mode SH_0**	**Non filtré**	**Mode SH_0**	**Non filtré**	**Mode SH_0**
2.20	12.16	4.06	9.86	6.68	28.62
2.34	14.34	4.42	8.85	5.88	23.11
2.91	15.71	4.47	10.14	5.33	21.50
2.66	15.47	3.88	7.76	5.49	15.64
1.95	17.93	4.33	7.11	7.17	30.90
1.94	15.86	5.83	16.18	3.68	11.45
2.03	17.97	4.95	13.84	3.65	11.98
1.99	15.42	5.51	14.17	3.87	13.20
1.87	17.90	1.40	3.72	3.24	10.64
1.43	14.49	1.42	6.73	3.20	15.53
1.63	16.78	1.20	5.01	10.03	36.58
1.35	15.11	1.21	4.89	4.64	23.34
1.30	16.25	1.16	6.26	5.59	18.03
1.56	15.02	1.17	5.55	6.24	20.09
3.39	13.69	1.12	5.52	5.68	22.39

BIBLIOGRAPHIE

ASM, 1998. *Nickel and Nickel Alloys*. Metals Handbook desk Edition.

AWS, 2007. *Brazing Handbook (5th Edition)*.

Belanger, P. 2014. « High order shear horizontal modes for minimum remnant thickness ». *Ultrasonics*, vol. 54, n° 4, p. 1078-1087.

Cao, Y., J. Zhu, Y. Liu, Z. Nong, et Z. Lai. 2013. « First-principles studies of the structural, elastic, electronic and thermal properties of Ni3Si ». *Computational Materials Science*, vol. 69, p. 40-45.

Castaings, M. 2014. « SH ultrasonic guided waves for the evaluation of interfacial adhesion ». p. 1760-1775. Elsevier.

Cheeke, J., 2012. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves, Second Edition*.

Comot, P., P. Bocher, et P. Belanger. « Ultrasonic guided wave inspection of Inconel 625 brazed lap joints ». In *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*.

Dewhurst, R. J. et Q. Shan. 1999. « Optical remote measurement of ultrasound ». *Measurement Science and Technology*, vol. 10, n° 11, p. R139.

Dongkyu, K., S. Hajun, H. Khalil, L. Jongsuh, W. Semyung, et P. Kyihwan. 2014. « 3-D Vibration Measurement Using a Single Laser Scanning Vibrometer by Moving to Three Different Locations ». *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 63, n° 8, p. 2028-2033.

Erturk, A. et D. J. Inman, 2011. *Piezoelectric Energy Harvesting*. 373-374 p.

Gazanhes, C. et M. Jessel. 1970. « Ultrasons ».

Hayashi, T. et K. Kawashima. 2003. « Single mode extraction from multiple modes of lamb wave and its application to defect detection ». *JSME International Journal, Series A (Solid Mechanics and Material Engineering)*, vol. 46, n° 4, p. 620-6.

He, F., S. I. Rokhlin, et L. Adler. 1988. « Application of SH and Lamb wave EMAT's for evaluation of adhesive joint in thin plate ». *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 7 B, p. 911-918.

Kong, Y., W. Xiong, H. Guo, W. Sun, Y. Du, et Y. Zhou. 2010. « Elastic and thermodynamic properties of the Ni–B system studied by first-principles calculations and experimental measurements ». *Calphad*, vol. 34, n° 2, p. 245-251.

Kundu, T., D. Placko, D. E. Bray, J. Qu, L. Jacobs, J. H. Cantrell, S. Krishnaswanny, B. Maxfield, J.-B. Ihm, F.-K. Chang, M. G. Beghi, A. G. Every, P. V. Zinin, W. Weise, J. Bereiter-Hahn, C. Blase, K. Raum, et Y. Saijo, 2003. *Ultrasonic Nondestructive Evaluation*.

Lanza di Scalea, F., P. Rizzo, et A. Marzani. 2004. « Propagation of ultrasonic guided waves in lap-shear adhesive joints ». p. 78-88.

Le Roux, J. 2007. « La transformée de Fourier et ses applications ». *Techniques de l'ingénieur Applications des mathématiques*, vol. base documentaire : TIB102DUO, n° ref. article : af1440.

Lipinski, G. 1995. « Mesures dimensionnelles par interférométrie laser ». *Techniques de l'ingénieur Mesures de longueurs et d'angles*, vol. base documentaire : TIB408DUO, n° ref. article : r1320.

Minonzio, J.-G., M. Talmant, et P. Laugier. 2010. « Guided wave phase velocity measurement using multi-emitter and multi-receiver arrays in the axial transmission configuration ». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, n° 5, p. 2913-2919.

Nogarede, B. 1996. « Moteurs piézoélectriques ». *Techniques de l'ingénieur Différents types de machines électriques tournantes*.

Olson, D. L., T. A. Siewert, S. Liu, et G. R. Edwards, 1993. *Welding, Brazing, and Soldering*, volume 6 of *ASM Handbook*.

Pan, Y., W. M. Guan, et K. H. Zhang. 2013. « First-principles calculation of the phase stability and elastic properties of ZrPt compounds at ground state ». *Physica B : Condensed Matter*, vol. 427, p. 17-21.

Pavlakovic, B., M. Lowe, D. Alleyne, et P. Cawley, 1997. *Disperse : A General Purpose Program for Creating Dispersion Curves*, p. 185-192. Springer US, Boston, MA.

Rockvam, M. 2011. *Caractérisation de microstructures de joints brasés avec les alliages bcu-1, bag-13a, bau-4, bau-6, bni-1a, bni-2, bni-3 et palnicro 36m ayant pour métal de base un superalliage base nickel*. Report.

Royer, D. et E. Dieulesaint. 1986. « Optical probing of the mechanical impulse response of a transducer ». *Applied Physics Letters*, vol. 49, n° 17, p. 1056-1058.

Shull, P. J. et B. R. Tittmann, 2002. *Ultrasound*, book section 3. Dekker Mechanical Engineering. CRC Press.

Thrane, N., 1979. *Discrete Fourier Transform and FFT Analyzers*. 32 p.

Tsoungui, F. 2010. *Caractérisation mécanique et microstructurale des joints brasés d'alliages aéronautiques avec du bni-2 comme métal d'apport*. Report.