

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

GENERAL ELECTRIC ALGERIA TURBINES

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en **Génie des matériaux**

Vérification de la contrôlabilité par ultrasons conventionnels et multiéléments d'assemblages en acier inoxydable austénitique de tuyauteries de turbine à gaz

Présenté par : Zakia SIDHOUM

Sous la direction de : M. Merzak LARIBI (ENP)

M. Robert MICELI (GENERAL ELECTRIC)

Présenté et soutenu publiquement le 02 juillet 2018

Composition du Jury :

Président	M. Kamel ABADLI	Docteur	ENP
Promoteur	M. Merzak LARIBI	Professeur	ENP
Co-promoteur	M. Robert MICELI	Directeur Manufacturing	GEAT
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER	Maître de conférences	ENP
Examineur	M. Mabrouk BOUABDALLAH	Professeur	ENP
Invité	M. Nazim BENBEY	DRH	GEAT
Invité	M ^{me} Lamia AMRANI	Ingénieur Méthodes	GEAT

ENP 2018



Département de Métallurgie

GENERAL ELECTRIC ALGERIA TURBINES

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en **Génie des matériaux**

**Vérification de la contrôlabilité par ultrasons
conventionnels et multiéléments d'assemblages en acier
inoxydable austénitique de tuyauteries de turbine à gaz**

Présenté par : Zakia SIDHOUM

Sous la direction de : M. Merzak LARIBI (ENP)

M. Robert MICELI (GENERAL ELECTRIC)

Présenté et soutenu publiquement le 02 juillet 2018

Composition du Jury :

Président	M. Kamel ABADLI	Docteur	ENP
Promoteur	M. Merzak LARIBI	Professeur	ENP
Co-promoteur	M. Robert MICELI	Directeur Manufacturing	GEAT
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER	Maître de conférences	ENP
Examineur	M. Mabrouk BOUABDALLAH	Professeur	ENP
Invité	M. Nazim BENBEY	DRH	GEAT
Invité	M ^{me} Lamia AMRANI	Ingénieur Méthodes	GEAT

Dédicaces

*A mes très chers parents auprès de qui je puise ma force,
A mes sœurs aînées qui auront nourri mes rêves et mes ambitions,
A mon frère aîné qui m'aura appris de belles leçons de vie,
Aux AIBECHE, ma seconde famille, sans qui rien de tout ceci n'aurait été possible.*

*A l'audace de ceux qui s'investissent dans la réalisation de leurs rêves ;
Au courage de ceux qui s'arment de fougue et défient le statu quo ;
A ceux-là qui carburent à la passion, travaillent dur et ne renoncent jamais.
Vous êtes ma source d'inspiration.*

Zakia

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce projet, et avec qui j'ai eu des échanges m'ayant permis de rédiger ce mémoire.

Je remercie Monsieur Merzak LARIBI pour l'accompagnement pédagogique et pour toute l'aide et le soutien apportés.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers M^r Nazim BEN BEY, Directeur des ressources humaines au sein de GEAT qui m'aura donné la chance de vivre une belle aventure à la fois humaine et professionnelle.

Je remercie M^r Robert MICELI, Directeur Manufacturing, de m'avoir proposé ce projet et d'avoir mis à ma disposition l'ensemble des moyens nécessaires à la réalisation de ce travail, me permettant ainsi d'apporter ma pierre à l'édifice à travers un projet industriel s'inscrivant dans le développement d'une entité aussi prometteuse que GEAT.

Je tiens également à remercier deux brillantes personnes en particulier, Lamia AMRANI et Serine ALITOUVERT, Ingénieurs Méthodes, pour m'avoir accueillie, soutenue et accompagnée dans la gestion du projet. Leur clairvoyance ainsi que leurs conseils avisés auront éclairé mon immersion dans le monde professionnel.

De plus, je remercie M^{me} Radia AMRANI pour sa gentillesse et ses précieuses orientations, Soumeya HAMIDI pour son incontestable gentillesse, M^r Rochedi KHAMLA, Ingénieur Qualité, avec qui j'ai pu enrichir mes connaissances en ultrasons, ainsi que M^r Alexandre BARRAUD et Diego HERMANN qui m'auront aidé à rassembler toutes les pièces du puzzle.

Je remercie M^r Fabien THEVENOT ainsi que M^r Idir YETTOU avec qui j'ai eu l'occasion d'avoir d'enrichissants échanges qui me permettent aujourd'hui d'avoir une vision plus élargie ainsi qu'une meilleure compréhension du secteur de l'énergie.

Sans oublier, l'ensemble de l'équipe GEAT basée à Alger et Batna qui m'aura offert un accueil mémorable, des plus chaleureux.

Je souhaite également remercier Hidayette KHALFI pour sa bonne humeur, son enthousiasme communicatif et ses précieux conseils.

Je tiens à remercier profondément Inès MEDELICI pour son énergie, son enthousiasme et son humour qui aura égayé les moments les plus difficiles de notre projet de fin d'études.

Par ailleurs, je dédie mes remerciements à tout le corps professoral du département de Métallurgie pour la formation d'ingénieur prodiguée.

Merci à tous.

Zakia

ملخص:

هذه الدراسة اندرجت في إطار مشروع شركة GEAT، والتي تمحور حول إيجاد حلا بديلا للتصوير بالأشعة الصناعية العادية للإختبار الغير التدميري للحامات على مستوى الأنابيب الرئيسية والانايبب الثانوية المساعدة للتر بينات الغازية. تتطلب طريقة المراقبة هذه إنجاز محل للتصوير (BLOCKHAUS) في ورشات الإنتاج الخاصة بالمصنع، وهذا ينطوي على استثمار كبير في الهياكل الأساسية، تكوين العمال، احترام ومتابعة الإجراءات والتدابير الأمنية وتعزيز الحماية من الأشعة. تبدوا تقنيات الموجات فوق الصوتية الوسيلة الأكثر تقدما لمواجهة العراقيل والقيود الاقتصادية، التنظيمية والصحية. لدراسة قابلية الاختبار عن طريق الموجات فوق الصوتية لمختلف المجمعات التي تتطلب المراقبة، من الضروري أخذ بعين الاعتبار العوامل التي تؤثر على مراقبة الموجات فوق الصوتية : هندسة المجمعات ونوع المادة. إن طريقة تبرير أداء الموجات فوق الصوتية التقليدية ومتعددة المكونات بدأت بواسطة محاكات كما أن الدراسة تهدف الى تحديد معالم المراقبة الأكثر ملاءمة وتقارن بين العنصر الأحادي والعناصر المتعددة.

الكلمات الدالة: الإختبار الغير التدميري، اللحام، تقنيات الموجات فوق الصوتي، العناصر المتعددة، المحاكاة، سيفا.

Abstract :

This study has been conducted as part of GEAT project aiming to determine a suitable substitute for radiographic testing for construction/fabrication weld inspection of gas turbine piping. Industrial radiography involves the use of risk-significant radiations which imply safety procedures and periodic check on personnel exposure and also requires expensive facilities for exposure, film, processing, viewing and storage. Modern ultrasound inspection equipment today is easy-to-use and less expensive making the opportunity to replace radiography with ultrasound easier than ever. Therefore, ultrasonic inspection techniques present a significant leverage effect out of these economic, regulatory and health constraints. In order to study the reliability of ultrasonic examination of the assemblies to be inspected, it is necessary to take into consideration the factors impacting the UT inspection : the geometry of the assembly and its materials. A justification approach for the use of the conventional ultrasonic and Phased Array techniques has been performed using CIVA® software. The simulation aims to determine appropriate inspection parameters and establish a comparison between single element and Phased Array transducers' performances.

Key words : NDT, Welding, Ultrasound, Phased Array, simulation, CIVA.

Résumé :

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet de GEAT portant sur la détermination d'une solution alternative à la radiographie industrielle standard pour le contrôle non-destructif de soudures au niveau des tuyauteries et auxiliaires de turbines à gaz. Cette méthode de contrôle requiert la réalisation d'un local de prises de vues (Blockhaus) dans les ateliers de fabrication de l'usine. Ceci implique un investissement conséquent dans l'infrastructure, la formation du personnel en charge et des mesures de radioprotection renforcées. A priori, les techniques ultrasonores présentent un effet de levier considérable pour s'affranchir de ces contraintes économiques, réglementaires et sanitaires. Afin d'étudier la contrôlabilité par ultrasons des différents assemblages nécessitant inspection, il est nécessaire de prendre en considération les facteurs pouvant influencer le contrôle ultrasonore : la géométrie et le type de matériau. Une démarche de justification des performances des techniques ultrasonores conventionnelles et multiéléments a été entamée par voie de simulation à l'aide du logiciel CIVA®. L'étude vise à déterminer les paramètres de contrôle les mieux adaptées et établit une comparaison entre le mono-élément et le multiéléments.

Mots clés : Contrôle non-destructif, soudage, ultrasons, multiéléments, simulation, CIVA.

TABLES DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE	12
Chapitre I : Contexte de l'étude.....	15
I.1 Introduction	15
I.2 Techniques de contrôle non-destructif proposées à l'étude.....	15
I.2.1 Ultrason conventionnel	16
I.2.2 Ultrasons multi-éléments	17
I.2.3 Radiographie RX	17
I.2.4 Radiographie avec source Gamma – Prox	18
I.3 Bref descriptif des assemblages étudiés	18
I.3.1 Soudure d'angle	19
I.3.2 Assemblage en bout à bout	20
I.3.3 Piquage.....	20
I.4 Caractéristiques métallurgiques des assemblages	20
I.5 Normes du soudage et codes de construction suivis.....	22
I.6 Synthèse de l'étude théorique.....	22
I.7 Conclusion.....	23
Chapitre II : Propagation des ultrasons dans les milieux anisotropes	25
II.1 Introduction	25
II.2 Métallurgie des soudures en acier austénitique	25
II.2.1 Métallurgie des aciers austénitiques de type AISI 304/304L.....	25
II.2.2 Soudage d'assemblage en acier austénitique de nuances AISI 304/304L	27
II.3 Modes de Solidification.....	29
II.3.1 Evolution microstructurale de la zone fondue.....	29
II.3.1.1 Mode de solidification de type A	31
II.3.1.2 Mode de solidification AF.....	31
II.3.1.3 Mode de solidification de type FA	32
II.3.1.4 Mode de solidification F.....	32
II.4 Anisotropie et hétérogénéité des soudures multi-passes en acier austénitique	34
II.5 Propagation des ultrasons dans les milieux anisotropes	35
II.5.1 Généralités.....	35
II.5.2 Définitions	35
II.5.3 Equation de propagation.....	37
II.6 Conclusion.....	39

Chapitre III : Technologies ultrasons Mono et Multiéléments	41
III.1 Introduction	41
III.2 Piézoélectricité.....	42
III.2.1 Différents types de transducteurs ultrasonores	45
III.2.1.1 Transducteur Piézoélectrique	45
III.2.1.2 Transducteur Electromagnétique acoustique (EMAT).....	47
III.2.1.3 Génération d'ondes ultrasonores par l'intermédiaire d'un laser.....	48
III.3 Contrôle par US conventionnels principe et mise en œuvre	49
III.3.1 Généralités.....	49
III.3.2 Méthodes de contrôle conventionnelles	50
III.3.2.1 Modalités de contrôle.....	50
III.3.3 Technologie multiéléments (Phased Array).....	52
III.3.3.1 Transducteurs multiéléments et caractéristiques	53
III.3.4 Représentation des résultats	53
III.3.5 Conclusion.....	54
Chapitre IV : Étude de la contrôlabilité par ultrasons par voie de simulation.....	57
IV.1 Introduction	57
IV.2 Démarche de justification des performances du contrôle ultrasons	57
IV.3 Paramètres influençant la contrôlabilité	59
IV.3.1 Impact de la géométrie sur le contrôle	59
IV.3.2 Impact du matériau.....	60
IV.3.3 Performance de l'opérateur	60
IV.4 Paramètres variables dans le CND ultrasons.....	61
IV.5 Défauts et critères d'acceptabilité.....	61
IV.6 Principe de fonctionnement et rôle des simulations	61
IV.7 Aperçu sur le simulateur – Logiciel CIVA.....	62
IV.7.1 Choix et caractérisation des transducteurs.....	63
IV.7.1.1 Les sondes multiéléments et leurs caractéristiques dimensionnelles.....	63
IV.7.1.2 Champ proche	65
IV.7.1.3 Intérêt du paramètre de focalisation pour la mise en œuvre du Phased Array	66
IV.7.1.4 Conclusion	68
IV.7.2 Etude de la couverture de zone par monoélément et multiéléments	68
IV.7.2.1 Interprétation.....	77
IV.7.3 Conclusion.....	77
CONCLUSION GENERALE	80
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1. Composition chimique des nuances 304/304L d'acier austénitique [16].....	26
Tableau II. 2. Familles d'acier inoxydable et leurs caractéristiques [17] [18]	27
Tableau II. 3. Composition Electrodes : E308L-XX et ER308L [22].....	29
Tableau II. 4. Modes de solidifications, réactions et microstructures résultantes [23]	30
Tableau II. 5. VITESSE DE PROPAGATION SONORE DANS QUELQUES MATERIAUX ($\times 10^5 \text{cm. s}^{-1}$) [24]	36
Tableau IV. 1 Caractéristiques des faisceaux associés aux traducteurs mono-élément et PA.	65
Tableau IV. 2 Caractéristiques dimensionnelles des configurations représentatives.....	69
Tableau IV. 3. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN33.4mm	72
Tableau IV. 4. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN60.3mm	73
Tableau IV. 5. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN88.9mm	74
Tableau IV. 6. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN114.3mm	75
Tableau IV. 7. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN168.3mm	75
Tableau IV. 8. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN273.1mm	76

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1. Appareil de recherche de défauts par ultrasons conventionnels - EPOCH 650 [46]	16
Figure I. 2. Equipements de contrôle ultrasons multiéléments - Olympus COBRA Scanner Phased Array [38]	17
Figure I. 3. Principe de la Radiographie à Rayons X [44]	17
Figure I. 4. Dispositif du Gamma Prox développé par l'Institut de Soudure [3]	18
Figure I. 5. Répartition d'un échantillon représentatif d'assemblages de tuyauteries proposés à l'inspection par ultrasons selon différents couples diamètre-épaisseur	18
Figure I. 6. Différents types d'assemblages constituant les tuyauteries de turbines à gaz fabriquées par GEAT	19
Figure I. 7. Schéma type de soudures d'angle (assemblage à recouvrement, assemblage en T, assemblage d'angle) [47]	19
Figure II. 8. Schéma d'un assemblage de deux pipes en bout à bout [48]	20
Figure I. 9. Piquage [5]	20
Figure I. 10. Assemblage tube sur bride (Epaisseur = 4mm, Diamètre = 139,7mm) [6]	21
Figure I. 11. Estimation théorique de la proportion d'assemblages contrôlable par ultrasons multiéléments	23
Figure II. 1. Mode de solidification de type A (totalement austénitique) [19]	31
Figure II. 2. Solidification selon le mode FA [19]	31
Figure II. 3. Solidification selon le mode FA. Structure en « lattes » et Structure « squelettique » [19]	32
Figure II. 4. Solidification selon le mode F [19]	33
Figure II. 5. Macrographie d'une soudure multi-passes en acier austénitique [16]	35
Figure II. 6. Principales applications des ultrasons selon leurs fréquences [23]	35
Figure II. 7 Modes de propagation des ondes [25]	37
Figure III.1. Contrôle ultrasons [49] [50]	42
Figure III. 2. Illustration de l'effet piézoélectrique d'un matériau en céramique - Effet direct [29]	43
Figure III. 3. Illustration de l'effet piézoélectrique d'un matériau en céramique - Effet inverse [29]	43
Figure III. 4. Transition de phase dans la structure pérovskite de $BaTiO_3$ [30]	44
Figure III. 5. Composition d'un transducteur ultrasonore piézoélectrique [33]	46
Figure III. 6. Principe de contrôle par immersion [34]	46

Figure III. 7. Principe du contrôle par contact [34].....	47
Figure III. 8. Principe de fonctionnement d'un transducteur de type EMAT [35].....	48
Figure III. 9. Système de détection laser [36]	48
Figure III. 10. Principe du contrôle ultrasons - Phase d'excitation [34].....	49
Figure III. 11. Principe du contrôle ultrasons - Phase de perturbation [34].....	49
Figure III. 12. Principe du contrôle ultrasons - Phase d'observation [34].....	50
Figure III. 13. Principe de la méthode Pulse-Echo d'un contrôle ultrasonore.....	51
Figure III. 14. Principe du mode en transmission [34].....	51
Figure III. 15. Configuration d'un contrôle ultrasons en tandem [34].....	52
Figure III. 16. Représentation du mode TOFD [38]	52
Figure III. 18. Représentation transducteur multiéléments [39]	52
Figure III. 18. Différents types de transducteurs multiéléments [40].....	53
Figure III. 19. Représentation des données ultrasonores [40].....	54
Figure IV. 1. Listing des assemblages à contrôler au niveau des tuyauteries et auxiliaires de turbine à gaz produite par GEAT	58
Figure IV. 2. Contrôle ultrasonore d'un assemblage à géométrie complexe [41]	60
Figure IV. 3. Mise en œuvre d'un contrôle par ultrasons	61
Figure IV. 4. Plateforme logicielle CIVA	63
Figure IV. 5. Sondes multiéléments [43]	63
Figure IV. 6. Paramètres dimensionnels d'une sonde multi-éléments [43].....	64
Figure IV. 7. Champ proche (Near Field) et champ lointain (Far Field)	65
Figure IV. 8. Modélisation du faisceau émis par le transducteur Phased Array.....	66
Figure IV. 9. Modélisation du faisceau émis par le transducteur conventionnel.....	66
Figure IV. 10. Modélisation du faisceau focalisé émis par le transducteur PA à différentes profondeurs.....	67
Figure IV. 11. Modélisation du faisceau focalisé émis par le transducteur conventionnel à différentes profondeurs	67
Figure IV. 12. Surfaces (mm ²) des tâches focales associées aux faisceaux des transducteurs mono-élément et PA en fonction de la profondeur.....	68
Figure IV. 13. Géométrie de la zone à inspecter	69
Figure IV. 14. Illustration d'un balayage sectoriel.....	70
Figure IV. 15. Distance face avant sabot/axe de soudure	71
Figure IV. 16. Exemples de Focalisation en mono-élément et PA	71

Figure IV. 17. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN33.4mm.....	72
Figure IV. 18. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN60.3mm.....	73
Figure IV. 19. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN88.9mm.....	73
Figure IV. 20. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN114.3mm.....	74
Figure IV. 21. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN168.3mm.....	75
Figure IV. 22. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN273.1mm.....	76
Figure IV. 23. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN168.3mm.....	76

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

De la conception à l'opération en passant par la fabrication, au cours du cycle de vie d'un produit ou d'une structure, il pourrait être nécessaire d'examiner, de vérifier et de suivre l'évolution des caractéristiques prévues lors de la conception. La détection anticipée de défauts dans les pièces et assemblages soudés a pour objectif de maîtriser au mieux les risques liés qui peuvent survenir en service.

Dans le cadre des activités de production de GEAT seront fabriquées, dans un premier temps, tuyauteries et auxiliaires de turbines à gaz. Ces tuyauteries, conçues pour fonctionner à haute température et à haute pression, sont élaborées avec des matériaux comme l'acier inoxydable austénitique reconnu pour ses propriétés métallurgiques de soudabilité, de résistance aux variations de températures ainsi qu'à la corrosion.

Par ailleurs, étant donné le domaine d'application et la criticité de ces tuyauteries, il est inenvisageable de tolérer le moindre risque de fuite. Une approche prévisionnelle de l'évolution de potentiels défauts, tels que l'amorçage et la propagation de fissure, relève donc de la sûreté.

Le raccordement par soudure éliminant tout risque de fuite, ces tuyauteries sont assemblées par soudage. C'est pourquoi un contrôle de qualité de l'intégrité des soudures est indispensable pour détecter et identifier les défauts potentiellement nuisibles.

En outre, les spécifications de fabrication de ces tuyauteries telles que dictées par General Electric, exigent un contrôle non-destructif par radiographie à rayons X pour les assemblages les plus critiques. Cependant, cette méthode de contrôle requiert la réalisation d'un local de prises de vues (Blockhaus) dans un atelier de fabrication et de montage, ce qui implique en amont et en règle générale un investissement conséquent dans l'infrastructure, la formation du personnel en charge, et en aval, des mesures de sécurité et de radioprotection renforcées.

C'est à l'aune de ces éléments que le contrôle par ultrasons a été proposé à l'étude en tant que solution alternative à la radiographie industrielle standard. En effet, en offrant de nombreux avantages sur le plan pratique, les techniques ultrasonores présentent un effet de levier considérable pour s'affranchir des contraintes économiques, réglementaires et sanitaires.

Afin de pouvoir remplacer la radiographie industrielle standard par le contrôle ultrasonore, il est nécessaire d'en justifier les performances compte-tenu des soudures à contrôler. Toutefois, bien que les techniques ultrasonores se soient révélées efficaces en termes de localisation et de dimensionnement de défauts, plusieurs paramètres peuvent affecter la contrôlabilité de certains types d'assemblages.

Dans le contexte de cette étude, les soudures multi-passes en acier austénitique peuvent présenter des caractères d'anisotropie et d'hétérogénéité à échelle macrostructurale. Phénomènes résultant d'une croissance cristalline se produisant lors de la solidification du métal d'apport, et d'une croissance de grains suivant une direction préférentielle. Ces particularités perturbent la propagation des ondes ultrasonores et génèrent des déformations du faisceau. Néanmoins, les tuyauteries étudiées présentent des assemblages de faibles épaisseurs

(<15mm), il peut donc être envisageable de considérer le matériau comme isotrope pour des besoins de modélisation et de simulation.

En vue de contrôler un cordon de soudure sur toute sa longueur, il est nécessaire de prendre en considération les contraintes géométriques qui peuvent entraver le parcours du dispositif ultrasons (capteur/traducteur) sur toute la zone à contrôler. Certains assemblages du fait d'une géométrie complexe, peuvent présenter une zone d'encombrement qui limite l'accès à toute ou une partie de la soudure.

Pour ce faire, le présent manuscrit est scindé en (05) cinq parties :

Le premier chapitre présente l'entreprise General Electric Algeria Turbines ainsi que le contexte de cette étude en relevant les grandes lignes d'une première étude théorique effectuée par l'Institut de Soudure.

Le deuxième chapitre met en exergue les contraintes qu'impose la métallurgie des soudures multi-passes en acier austénitique dans la propagation des ondes ultrasonores. Ce faisant, est expliqué le phénomène de propagation des ultrasons ainsi que les mécanismes amenant à l'obtention de caractéristiques structurales particulières aux milieux anisotropes.

Le troisième chapitre établit une comparaison entre les deux techniques de contrôles mono-élément et multi-éléments (Phased Array) en mettant en avant leur principe de fonctionnement, avantages, inconvénients, limites ainsi que quelques dernières avancées technologiques relatives à l'évolution des dispositifs.

Dans le quatrième chapitre sont étudiées et comparées les performances des deux techniques mono-élément et multiéléments à l'aide de la plateforme logicielle CIVA. Cette simulation porte sur l'étude de la couverture de zone de contrôle par deux types de traducteurs : conventionnel et Phased array.

Ce manuscrit est clôturé par une conclusion générale qui présente l'apport des résultats de cette étude ainsi que les perspectives s'offrant au projet.

CHAPITRE I : CONTEXTE DE L'ETUDE

Chapitre I : Contexte de l'étude

I.1 Introduction

Aux fins de l'évaluation de la qualité d'une fabrication, celle-ci doit être assurée suivant des exigences initiales imposées par le constructeur ou le fabricant. Cette certification, représentant un gage de sécurité, offre une garantie optimale d'une bonne tenue du matériel en service.

Comme introduit précédemment, le contrôle non-destructif s'impose comme un des chaînons intermédiaires d'une démarche qualité rigoureuse. Dans le contexte de cette étude, les tuyauteries nécessitant un contrôle affichent un degré de criticité élevé. En effet, considérées comme équipements sous pression avec épaisseur inférieure à 15mm, le risque d'apparition de défauts de soudures pouvant affecter l'étanchéité y est élevé. C'est pourquoi pour ce type de composants, identifier les imperfections et défauts survenant dans l'épaisseur des joints soudés est primordial. Pour ce faire, il est indispensable de faire appel à une méthode de contrôle dite interne ou volumique.

Le caractère nuisible d'un défaut est intrinsèquement lié aux propriétés mécaniques du matériau et des contraintes auxquelles sont soumises les zones potentiellement défectueuses. La méthode alternative proposée à l'étude doit donc présenter des aptitudes d'évaluation de la nocivité d'une indication avec une sensibilité égale ou supérieure à celle obtenue par radiographie industrielle standard [1].

En ce qui concerne le contrôle radiographique, bien qu'il offre une sensibilité de détection sans pareille, la méthode apporte son lot de contraintes réglementaires et sanitaires. En effet, les autorités imposent des directives strictes quant à l'aspect de radioprotection des opérateurs [2]. A contrario, les ultrasons présentent un risque sanitaire nul pour les opérateurs, ce qui leur attribue une place préférentielle parmi les solutions alternatives suggérées. Cependant, dans certains cas l'emploi des ultrasons peut s'avérer techniquement complexe à réaliser.

L'avantage que présentent les rayons X est l'acquisition d'informations directement exploitables sur tout le volume de la zone inspectée. En revanche, l'interprétation des images nécessite un niveau d'expertise élevé de la part de l'opérateur et demande des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement.

I.2 Présentation de l'entreprise

Créée en juillet 2014, GENERAL ELECTRIC ALGERIA TURBINES (GEAT), située à Ain Yagout dans la Wilaya de Batna, se présente comme étant une Joint-Venture découlant d'un accord de partenariat – à long terme – entre GENERAL ELECTRIC et SONELGAZ.

Première en Algérie et en Afrique dans son secteur d'activité, GEAT est un complexe industriel se donnant pour mission la production de turbines à gaz, de turbines à vapeur, mais aussi la réalisation d'alternateurs, de systèmes de contrôle commande et d'équipements de centrales électriques.

Dans l'optique de pouvoir satisfaire des besoins énergétiques croissants, GEAT se place dans une perspective de développement socio-économique durable et aspire à devenir un des acteurs clés de l'énergie à échelle internationale. Ce faisant, GEAT s'engage dans une dynamique d'investissements en capital humain et met la compétence locale au cœur de son développement.

Ainsi, c'est dans le cadre d'une relation GE – SONEGAS régie par un accord de transfert technologique que GEAT compte aiguiser son savoir-faire en tirant parti de l'ouverture internationale offerte par ce partenariat.

GEAT est implantée sur deux sites : Batna (Usine) et Alger (Administration, siège social). Le lancement des activités de l'usine est prévu pour 2019.

Les opérations seront découpées en plusieurs phases, à savoir :

2019 « Première phase » : Lancement de la production des auxiliaires (modules) ;

2020 « Seconde phase » : Lancement de la production des turbines ;

2021 « Dernière phase » : Lancement de toutes les activités de GEAT.

I.3 Techniques de contrôle non-destructif proposées à l'étude

Une première étude théorique a été menée en collaboration avec l'Institut de Soudure afin de réaliser une estimation de la contrôlabilité par plusieurs méthodes volumiques d'un nombre limité d'assemblages. Les paramètres principalement pris en compte sont les matériaux ainsi que les caractéristiques dimensionnelles et géométriques. Parmi les méthodes de contrôle proposées, on retrouve :

I.3.1 Ultrasons conventionnels

Dispositif reposant sur l'émission d'un faisceau d'ultrasons de haute fréquence à partir d'un transducteur (palpeur), que l'on place sur la surface de l'objet à contrôler.



Figure I. 1. Appareil de recherche de défauts par ultrasons conventionnels - EPOCH 650 [46]

I.3.2 Ultrasons multi-éléments

Même principe que les ultrasons conventionnels mais dotés d'une technologie multiéléments reposant sur l'utilisation de sondes à ultrasons constituées de différents éléments piézoélectriques individuels qui peuvent tous fonctionner séparément comme émetteurs et récepteurs.



Figure I. 2. Equipements de contrôle ultrasons multiéléments - Olympus COBRA Scanner Phased Array [38]

I.3.3 Radiographie RX

Technique d'imagerie de transmission utilisant les rayons X permettant la prise de clichés afin d'obtenir une image du volume de la pièce inspectée. Cette technique présente l'avantage de ne pas émettre de rayonnement ionisant lorsque le générateur de rayons X n'est plus sous tension.

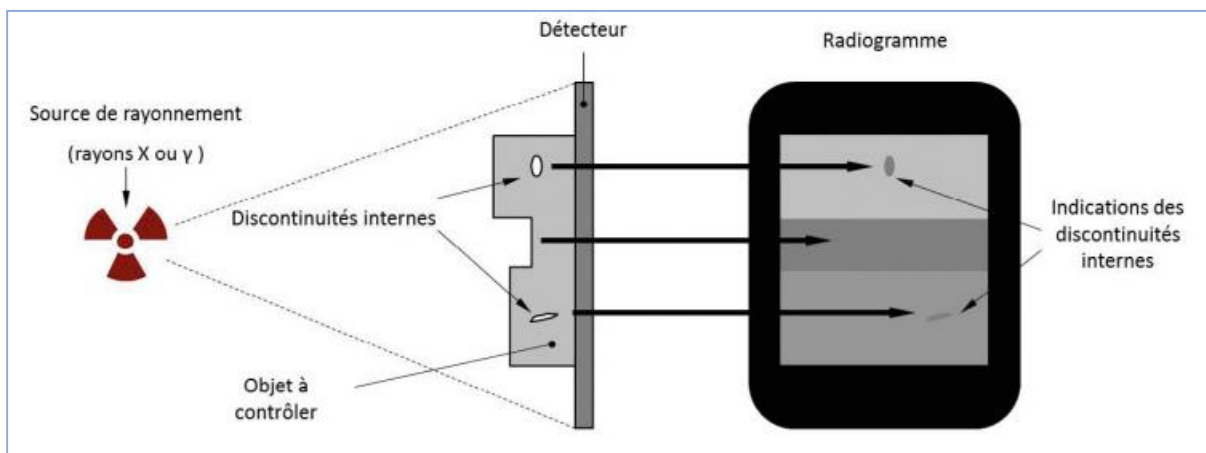


Figure I. 3. Principe de la Radiographie à Rayons X [44]

I.3.4 Radiographie avec source Gamma – Prox

Un atténuateur spécifique étudié et développé par l'Institut de soudure afin de limiter les distances de la zone d'opération à environ 10 m, et de réduire la dosimétrie opérationnelle des agents radiologiques. Sa fixation mécanique permet de s'affranchir des risques de chute ou de déviation du faisceau lors des expositions.



Figure I. 4. Dispositif du Gamma Prox développé par l'Institut de Soudure [3]

I.4 Bref descriptif des assemblages étudiés

En se basant sur plusieurs gammes de diamètres et d'épaisseurs, la contrôlabilité d'assemblages soudés de composants tubulaires, par les différentes méthodes citées précédemment, a été théoriquement étudiée en s'appuyant sur l'expertise de l'IS en termes de contrôles non-destructifs.

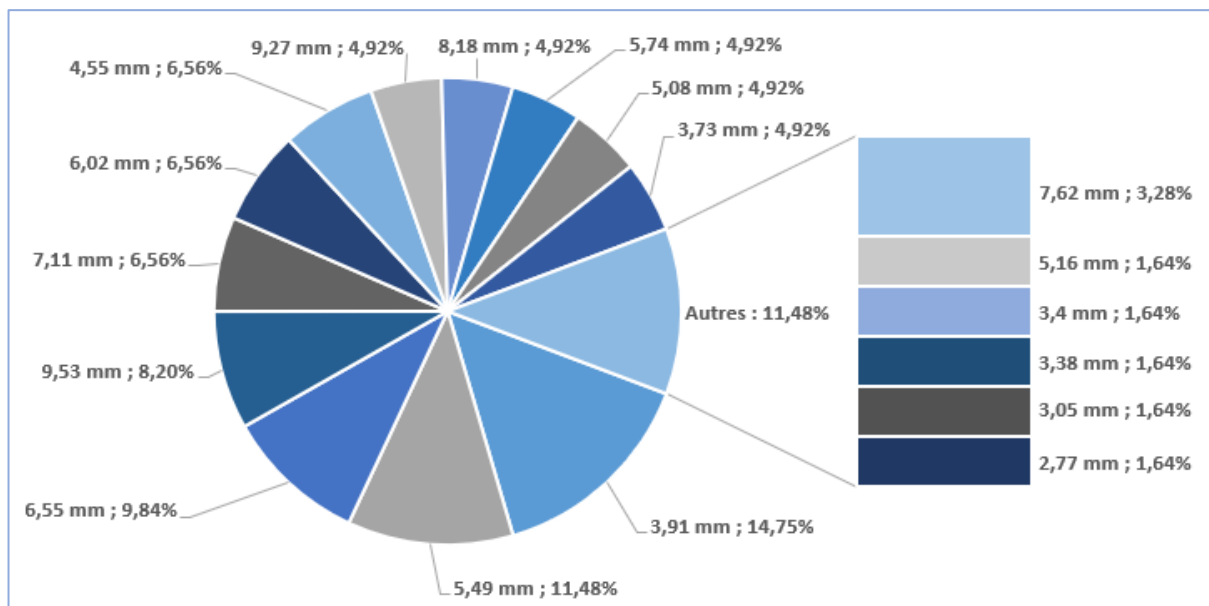


Figure I. 5. Répartition d'un échantillon représentatif d'assemblages de tuyauteries proposés à l'inspection par ultrasons selon différents couples diamètre-épaisseur

Un recensement d'une variété de configurations soudées a alors été effectué. Liste correspondant aux configurations retrouvées dans les tuyauteries et auxiliaires de turbines à gaz. Parmi ces configurations [4] :

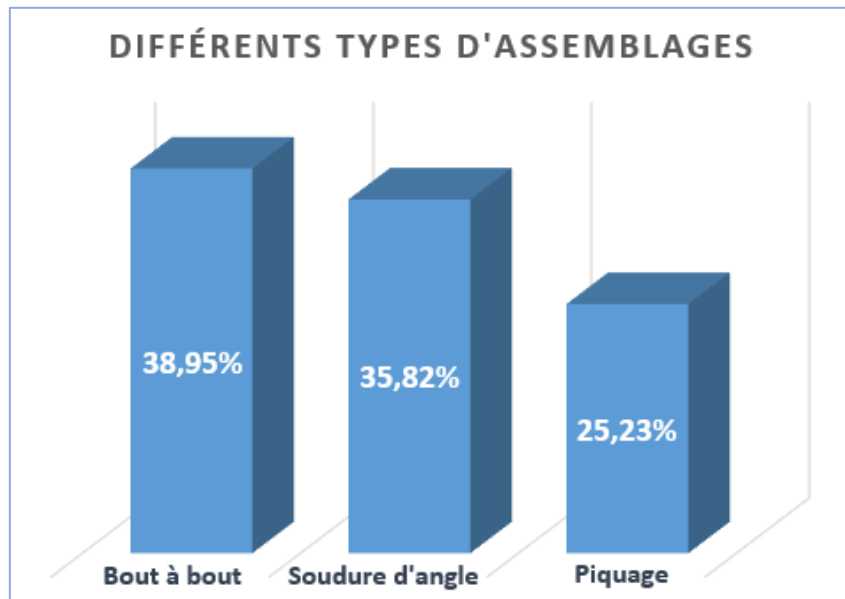


Figure I. 6. Différents types d'assemblages constituant les tuyauteries de turbines à gaz fabriquées par GEAT

I.4.1 Soudure d'angle

Soudure dont la section transversale est approximativement triangulaire joignant deux surfaces disposées l'une par rapport à l'autre selon des angles droits dans des configurations par assemblage à recouvrement, assemblage d'angle, cruciforme et en T.

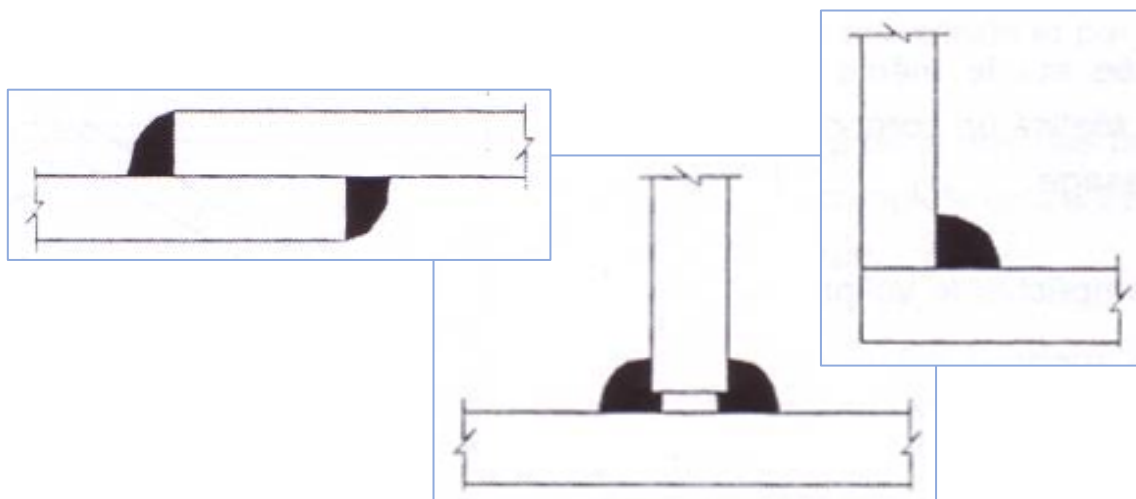


Figure I. 7. Schéma type de soudures d'angle (assemblage à recouvrement, assemblage en T, assemblage d'angle) [47]

I.4.2 Assemblage en bout à bout

Assemblage par soudage des extrémités de deux ou plusieurs pièces disjointes alignées sur un même plan.

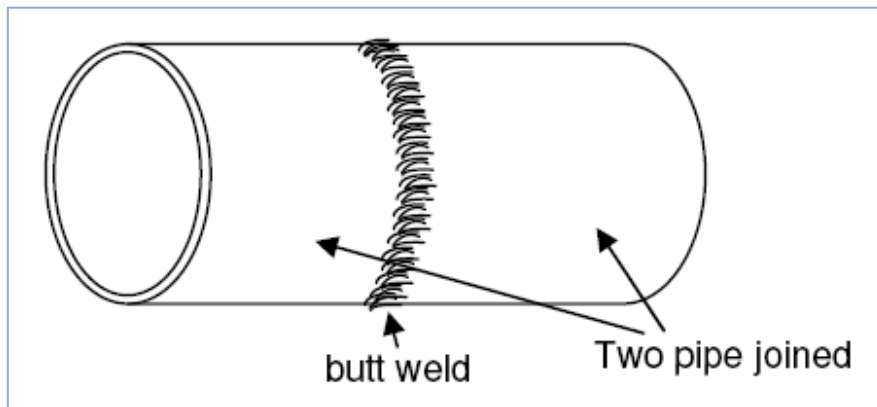


Figure II. 8. Schéma d'un assemblage de deux pipes en bout à bout [48]

I.4.3 Piquage

Un piquage est un assemblage de deux composants tubulaires. L'un sur l'autre peut être posé, pénétrant ou traversant.

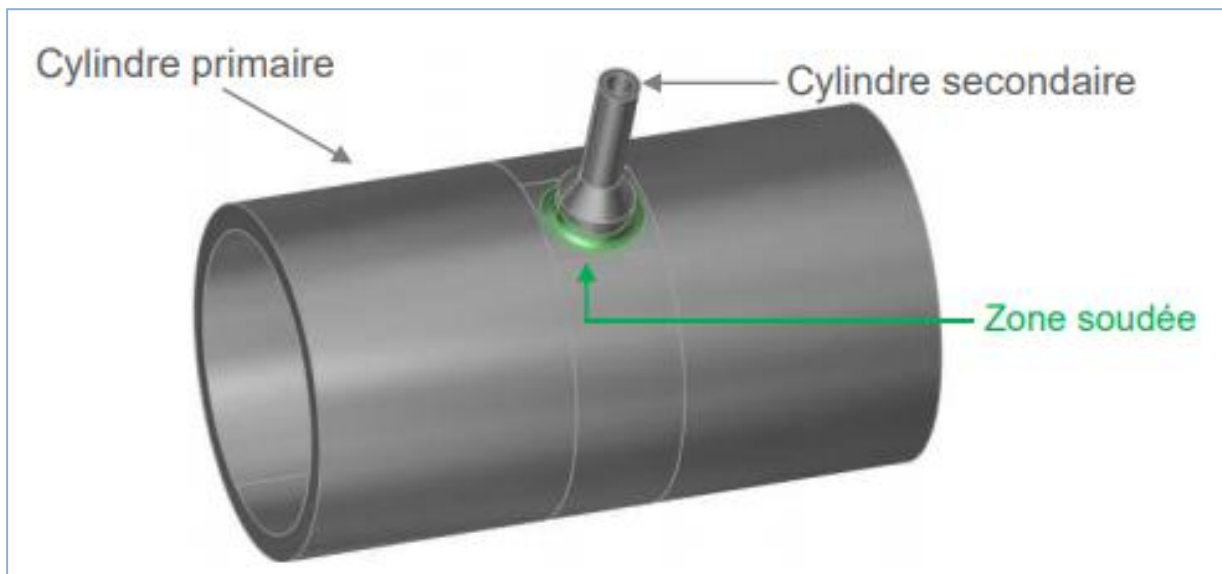


Figure I. 9. Piquage [5]

I.5 Caractéristiques métallurgiques des assemblages

Les nuances de matériaux des assemblages à examiner sont ferritiques et austénitiques. Dans le cadre de cette étude seront uniquement abordées les soudures en acier austénitique étant donné une criticité plus élevée pour ce type d'assemblages.

Cependant, deux spécificités majeures relatives aux dimensions et aux caractéristiques des matériaux ont été mises en relief.

Pour les assemblages de faibles épaisseurs, un contrôle par ultrasons peut se révéler complexe à réaliser par la présence d'une zone de détection limitée. Cette zone se trouve devant le transducteur ultrasonore et résulte d'un phénomène appelé « post-oscillation », du fait d'une vibration continue de l'élément piézoélectrique après l'impulsion d'excitation. Elle représente une profondeur minimale de quelques centimètres à laquelle la sonde peut déterminer un objet. Cette zone est dite de non mesure et est communément appelée « *zone morte* ».

Les assemblages en acier inoxydable quant à eux, peuvent présenter des soudures de structure anisotrope et hétérogène. Caractéristiques pouvant entraver le contrôle par ultrasons, en causant déviation, division et dissipation du faisceau ultrasonore. L'anisotropie et l'hétérogénéité résultent de la présence de grains présentant une orientation préférentielle. Ces aspects sont abordés en détails dans le chapitre suivant.

Le contrôle par ultrasons d'assemblages de géométrie complexes peut également s'avérer difficile, étant donné une accessibilité limitée du transducteur à la surface de la pièce à contrôler. Les assemblages en bout à bout de type tube sur tube restent facilement contrôlables car l'accès aux deux côtés de la soudure est possible, en revanche lorsqu'il s'agit d'une soudure tube sur bride, le transducteur n'a accès à la soudure que d'un seul côté. C'est la raison pour laquelle les contraintes d'accessibilité doivent être prises en considération dans la définition de la stratégie de contrôle.



Figure I. 10. Assemblage tube sur bride (Épaisseur = 4mm, Diamètre = 139,7mm) [6]

I.6 Normes de soudage et codes de construction suivis

Par ailleurs, en ingénierie, des standards élaborés par des organismes internationaux sont suivis pour l'évaluation et l'inspection des structures. Parmi ces institutions :

- **American Welding Society (AWS)** dont la procédure d'inspection ultrasonore est employée pour le contrôle de soudures de construction [7].
- **American Society of Mechanical Engineers (ASME)** dont les normes et codes couvrent les disciplines d'ingénierie mécanique. La procédure de contrôle ultrasonore découle du code ASME BPVC qui présente des règles pour la fabrication et l'évaluation de composants soudés de chaudières et d'appareils à pression [8].
- **American Petroleum Institute (API)** dont les bonnes pratiques publiées sont des codes incontournables pour l'industrie pétrolière. La procédure de contrôle ultrasons est appliquée au contrôle de soudures de lignes de pipes [8].

Par ailleurs, les spécifications de fabrication exigent une réalisation de contrôles non-destructifs suivant le code **ASME B31.3 « Process Piping »** [9], qui est un ensemble de règles régissant les installations de tuyauterie industrielle. Ce code renvoie à l'**ASME Section V** pour les méthodes de contrôles non-destructif [10] :

- *Inspection par radiographie de soudures* doit être réalisée conformément au Code Boiler & Pressure Vessel (B&PV), Section V, Article 2
- *Inspection par ultrasons de soudures* doit être réalisée conformément au Code Boiler & Pressure Vessel (B&PV), Section V, Article 4.

I.7 Synthèse de l'étude théorique

En tenant compte des différents couples (diamètre, épaisseur), 69% des tuyauteries présentées à l'étude est contrôlable par ultrasons. Ce taux représente environ 60% des tuyauteries dites « critiques » auxquelles est imposée l'inspection des assemblages soudés.

En ce qui concerne les assemblages en acier austénitique, un essai radiographique est envisageable en cas de difficultés. Cependant ces assemblages devront faire l'objet d'une étude expérimentale permettant la vérification de leur contrôlabilité par ultrasons. Etude ayant pour but l'élaboration de procédures de contrôle adaptées.

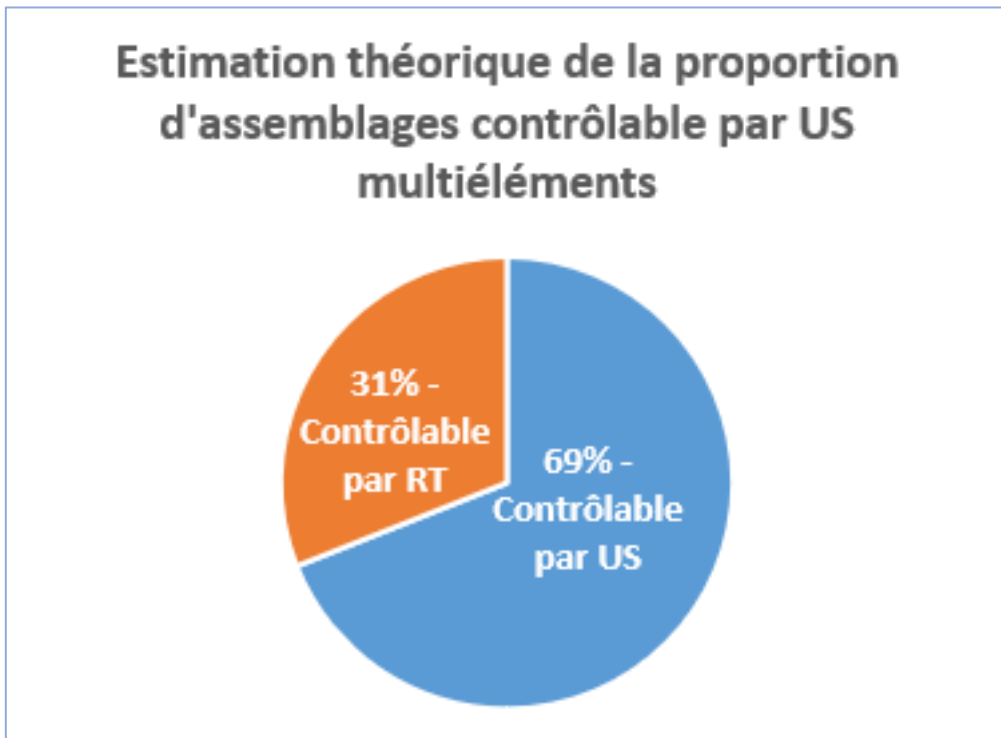


Figure I. 11. Estimation théorique de la proportion d'assemblages contrôlable par ultrasons multiéléments

De ces observations a découlé la recommandation suivante en termes de contrôle non-destructif par ultrasons :

- Mise en œuvre d'un contrôle ultrasonore basé sur la technologie multi-éléments plutôt qu'un contrôle ultrasons manuel.

I.8 Conclusion

A partir de cette pré-étude ont été relevés les principaux facteurs pouvant contraindre la faisabilité du contrôle ultrasonore des assemblages en acier austénitique qui constituent le réseau de tuyauteries des turbines à gaz. L'anisotropie et l'hétérogénéité ainsi que les technologies ultrasons sont abordées en détails dans les prochains chapitres.

CHAPITRE II : PROPAGATION DES ULTRASONS DANS LES MILIEUX ANISOTROPES

Chapitre II : Propagation des ultrasons dans les milieux anisotropes

II.1 Introduction

Les soudures multi-passes en acier austénitique présentent le plus souvent des propriétés d'anisotropie et d'hétérogénéité. Ces propriétés structurales génèrent des difficultés quant au contrôle non-destructif par ultrasons.

Holmes et Beasley ont été les premiers à étudier l'influence des propriétés physiques des soudures en acier austénitique sur l'inspection ultrasonore en 1961. A l'aide des techniques de diffraction aux rayons X, ils ont constaté que l'axe des grains colonnaires correspondait à la direction cristallographique $\langle 100 \rangle$. Ils ont également observé que le matériau présentait une structure texturée et que la propagation des ondes ultrasonores n'était pas celle habituellement retrouvée [11].

C'est à partir de ces observations qu'ils ont déduit que la soudure austénitique était dotée d'une structure anisotrope et qu'il y avait potentiellement un lien étroit entre cette caractéristique structurale et la difficulté survenant lors de l'inspection ultrasonore du matériau.

En effet, pour cette famille d'aciers inoxydables, le contrôle par ultrasons est complexe. Ceci est dû à une taille de grain importante et d'une possible anisotropie du matériau résultant de la présence de grains présentant une orientation préférentielle. Cependant, il y a généralement de possibles ajustements à effectuer afin de réhausser la qualité du contrôle tels que la diminution de la fréquence utilisée, utilisation d'onde longitudinale inclinée et de transducteurs à émetteur récepteur séparés [12].

L'objectif de ce chapitre est de mieux comprendre le phénomène de propagation des ondes ultrasonores dans les milieux anisotropes, et de mettre en exergue les caractéristiques structurales métallurgiques susceptibles d'influencer le contrôle par ultrasons de soudures en acier austénitique. Ce faisant, les principaux mécanismes régissant la solidification dans les soudures en acier austénitique sont décrits.

II.2 Métallurgie des soudures en acier austénitique

II.2.1 Métallurgie des aciers austénitiques de type AISI 304/304L

Les aciers sont des alliages de fer et carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% (en masse). Des aciers au carbone non alliés aux aciers alliés, il en existe différentes familles réparties principalement selon leur composition et domaines d'application. Compte tenu de leur résistance à la corrosion à l'air ambiant ou à haute température et dans des milieux corrosifs, les aciers inoxydables se placent comme matériaux majeurs dans les divers secteurs de l'industrie, notamment dans le secteur de l'énergie.

Par ailleurs, ce qui confère à ces alliages de fer leur caractère inoxydable est la présence de chrome avec une teneur minimum de 12%. En effet, au contact de l'oxygène, une telle teneur

permet la formation d'une couche passive d'oxyde de chrome à la surface du matériau. Cette couche agit comme un film protecteur et a la particularité de s'auto-régénérer, ce qui contribue à la prévention de la corrosion et l'oxydation [13].

Parmi les familles d'acier inoxydable, on retrouve la famille *AISI 300* dont les aciers austénitiques de types 304 et 304L sont les plus souvent utilisés dans l'industrie alimentaire, pharmaceutique et énergétique. Anciennement désignés comme aciers de type 18/8, cette appellation dérive de leur composition (en masse) minimale de 18% en chrome et de 8% de nickel. De ce fait, bien qu'une augmentation de la teneur en chrome à 17% fragilise le matériau, elle permet en combinaison d'une faible teneur en carbone (pour le cas du 304L), de contribuer à l'amélioration de la résistance à la corrosion. A cette fragilisation et pour garantir la structure austénitique finale, intervient le nickel qui est un élément gammagène entre 8% et 20% [14]. Ce qui leur attribue de meilleures propriétés que les aciers ferritiques et martensitiques. De plus, ces nuances d'acier présentent de bonnes caractéristiques mécaniques notamment quand il s'agit de soudabilité par des procédés électriques.

Tableau II. 1. Composition chimique des nuances 304/304L d'acier austénitique [16]

Grade	Norme EU		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
304	X5CrNi18.10	1.4301	≤0.08	≤2.00	≤1.00	≤0.045	≤0.030	18.0-20.0	8.0-11.0
304L	X2CrNi18.9	1.4307	≤0.03	≤2.00	≤1.00	≤0.045	≤0.030	18.0-20.0	8.0-12.0

En outre, le choix d'usage du 304 ou du 304L dépend principalement de facteurs économiques et de possibilité d'approvisionnement, l'utilisation d'un acier à faible teneur en carbone comme le 304L peut s'avérer onéreuse bien que cette nuance soit préférable afin d'éviter toute corrosion intergranulaire. Ceci est possible car avec une teneur en carbone inférieure à 0,03%, le carbone reste en solution solide et ne s'associe pas au chrome pour générer des carbures de chrome. Lors du soudage des aciers inoxydables à forte teneur en chrome, des carbures riches en chrome se forment sur le joint de grains. Les zones adjacentes sont fortement appauvries en chrome et deviennent, à terme, des zones de ruptures potentielles.

En plus du chrome et du nickel, d'autres éléments d'alliage (N, Mn, Cu) sont ajoutés pour stabiliser l'austénite à haute température. Quant au titane et au niobium, ces éléments d'alliages permettent de limiter la formation de carbures du type $Cr_{23}C_6$ aux joints de grains en raison de leurs affinités avec le carbone.

Tableau II. 2. Familles d'acier inoxydable et leurs caractéristiques [17] [18]

AISI designation	Type	Structure	Caractéristiques
200 series	Austénitique (Cr-Mn)	CFC	Amagnétique Très bonne résistance à la corrosion
300 series	Austénitique (Cr-Ni)	CFC	Très ductile %A = 45% Non durcissable par trempe
400 series	Ferritique	CC (même structure que le fer à température ambiante)	Magnétique Moyennement ductile %A = 18% Faible teneur en carbone %C _{min} = 0,07%
	Martensitique	Quadratique	Teneur élevée en carbone %C _{min} = 0,08% Bonne résistance mécanique Magnétiques Très bonne trempabilité Moins résistant à la corrosion que les ferritiques Teneur en chrome %Cr _{min} = 13%
-	Duplex (austenitic-ferritic)	Austénoferritique	Bonne résistance à la fatigue et à la corrosion Haute résistance à l'usure Bonne soudabilité et aptitudes à l'usinage Faible coefficient d'allongement

II.2.2 Soudage d'assemblage en acier austénitique de nuances AISI 304/304L

La production/fabrication sous licence d'équipements de General Electric nécessite un respect de normes, procédures et spécifications particulières [15]. C'est pourquoi les soudures en acier inoxydable de gammes d'assemblages en 304/304L d'épaisseur inférieure à 3mm se font au procédé TIG (Tungsten Inert Gas) avec une électrode de type E308L – 15/16.

Pour les assemblages en acier inoxydable 304/304L d'épaisseur supérieure à 3mm, les premières passes (passes de fonds-de pénétration) se font au TIG avec les mêmes spécifications précédemment citées, et avec un remplissage à l'électrode enrobée de type ER308L.

Le soudage au procédé TIG est principalement utilisé pour souder les passes de pénétration surtout lorsque les coutures sont soumises à des exigences de qualité extrêmement rigoureuses. Ce choix est donc dicté par des impératifs techniques de qualité. En outre, le soudage à l'arc à

l'électrode enrobée pour les nuances inoxydables austénitiques est plus difficile car le bain de fusion est relativement fluide.

Le procédé TIG se prête au soudage manuel ou automatique et produit des soudures de très haute qualité d'une propreté exceptionnelle. Comme il n'y a aucun laitier, les risques d'inclusion de laitier dans le bain sont éliminés et les soudures ne nécessitent aucun nettoyage. Il est très utilisé pour le soudage de l'aluminium et les aciers inoxydables de faible épaisseur de paroi allant jusqu'à 3mm et pour le soudage en position de tubes.

En ce qui concerne le métal d'apport, l'électrode au 308L possède une composition en masse de 19,5%Cr et e 10%Ni. Elle est d'une faible teneur en carbone et intervient lors du soudage d'aciers austénitiques de composition similaire, souvent les aciers *AISI 304L*. Le dépôt métallique de cette électrode contient au maximum 0,04% de carbone. Par conséquent, cette électrode permet de juguler la précipitation de carbures de chrome dans les joints de grains, et ce sans faire intervenir des stabilisateurs comme le niobium ou le titane. De cette façon, il y a réduction de la sensibilité à la corrosion intergranulaire. Avec un taux de déposition élevé, elle peut également être utilisée dans toutes les positions de soudage.

L'électrode *E308L – 16* a été développée pour le soudage de *AISI 304L* mais peut également être utilisée pour le soudage d'autres nuances d'aciers telles que les grades 321 et 347. De plus, le cordon de soudure résultant, avec un taux de ferrite résiduelle contrôlée, donne une excellente résilience.

L'électrode *ER308L* ou alliage 308L, possède quant à elle, une composition en masse de 21%Cr et 10%Ni [16] et est également souvent utilisé pour le soudage de métaux de base de même composition comme les aciers du grade 304. Sa teneur en carbone est de maximum 0,03%C. A des taux équilibrés en chrome et nickel, elle fournit assez de ferrite pour prévenir les fissurations à chaud.

Les microségrégations (ségrégations interdendritique) sont des composés concentrés en impuretés et ayant une température de fusion basse. L'enjeu lié à la formation de ces ségrégations étant l'amorce de fissure sous l'effet de contraintes thermiques et de retrait (fissuration à chaud), donne tout son rôle à la ferrite résiduelle δ [17]. En effet, la présence de ferrite delta amène à la dissolution des impuretés et freine donc la formation de microségrégations. En ce sens qu'une proportion située entre 5 et 8% contribue à maintenir un équilibre dans la composition chimique des aciers austénitiques [18]. Cependant, la ferrite tend également à fragiliser l'alliage dans certaines conditions de vieillissements thermiques.

Ces deux électrodes sont adaptées aux procédés de soudage à l'arc à l'électrode enrobée ainsi que pour le procédé TIG.

Tableau II. 3. Composition Electrodes : E308L-XX et ER308L [22]

	C_{max}	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Mo	Cu
E308L – XX	0.04	18 – 21	9 – 11	0.5 – 2.5	0.9	0.04	0.03	0.75	0.75
ER308L	0.03	19,5 – 22	9 – 11	1.0 – 2.5	0.30 – 0.65	0.03	0.03	0.75	0.75

II.3 Modes de Solidification

La microstructure de la zone de fusion (zone fondue, ZF) dépend du comportement de solidification ainsi que des transformations à l'état solides résultantes.

Tous les aciers inoxydables austénitiques se solidifient dans l'une des deux phases : *austénitique ou ferritique*. De légères modifications dans la composition de ces alliages peuvent promouvoir le passage de la ferrite primaire à l'austénite. De plus, durant le processus de solidification, des transformations supplémentaires peuvent se produire à l'état solide, et ce lors du refroidissement à température ambiante.

Ces transformations sont plus importantes dans les alliages subissant une solidification en ferrite primaire étant donné que la plupart de la ferrite se transforme en austénite.

II.3.1 Evolution microstructurale de la zone fondue

Il existe quatre modes de solidification et de transformation à l'état solide pour les soudures en acier inoxydable austénitique [19] :

- **A(austénite)** et **F(ferrite)** sont des modes de solidification associés à la solidification en austénite primaire, selon laquelle l'austénite est la première phase à se former durant la solidification.
- **FA (ferrite+austénite)** et **AF (ferrite+austénite)** se solidifient en ferrite δ en tant que phase primaire. Durant la solidification, d'autres transformations microstructurales se produisent à l'état solide pour les modes de types **FA** et **F**. Ceci est principalement dû à l'instabilité de la ferrite à de basses températures.

Les modes de solidification dépendent du ratio C_{req}/Ni_{req} . Une petite valeur de ce ratio favorisera une formation selon le mode **A** tandis qu'une valeur plus élevée favorisera à son tour une formation selon le mode **F**. Dans le mode **AF**, l'austénite est la phase primaire alors que dans le mode **FA**, la ferrite est la phase primaire.

Tableau II. 4. Modes de solidifications, réactions et microstructures résultantes [23]

<i>Phase primaire</i>	<i>Mode</i>	<i>Réactions</i>	<i>Microstructure</i>
γ	<i>A</i>	$L \rightarrow L + A \rightarrow A$	100% austénitique
	<i>AF</i>	$L \rightarrow L + A \rightarrow L + A + (A + F)$ $\rightarrow A + F$	Ferrite δ eutectique à la frontière des structures cellulaires et dendritiques
δ	<i>FA</i>	$L \rightarrow L + F \rightarrow L + F + (F + A)$ $\rightarrow F + A$	Ferrite squelettique et/ou en lattes de ferrite issues de la transformation $\delta \rightarrow \gamma$
	<i>F</i>	$F \rightarrow F + A$	Ferrite aciculaire δ ou matrice ferritique avec de l'austénite de Widmanstätten aux joints de grains

II.3.1.1 Mode de solidification de type A

Le chauffage enclenche divers mécanismes lors de la solidification, dont la diffusion des atomes. En effet, il y a migration des éléments d'alliages et d'impuretés vers les joints de grains, mais la diffusivité de ces éléments à des températures élevées étant relativement faible, ces conditions génèrent une structure *cellulaire dendritique* bien distincte. Cette caractéristique est propre au mode de solidification de type A [19] [20].

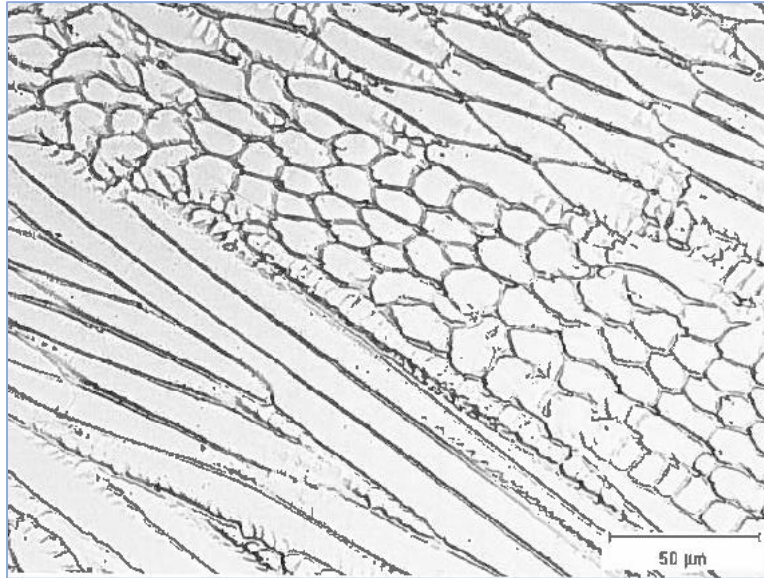


Figure II. 1. Mode de solidification de type A (totalement austénitique) [19]

II.3.1.2 Mode de solidification AF

S'il y a formation de ferrite à la fin de la solidification en austénite primaire par une réaction eutectique, alors la solidification est de mode **AF**. Ceci se produit quand il y a suffisamment de promoteur de ferrite comme le chrome, qui provoquent un enrichissement à la frontière entre deux dendrites lors de la solidification.

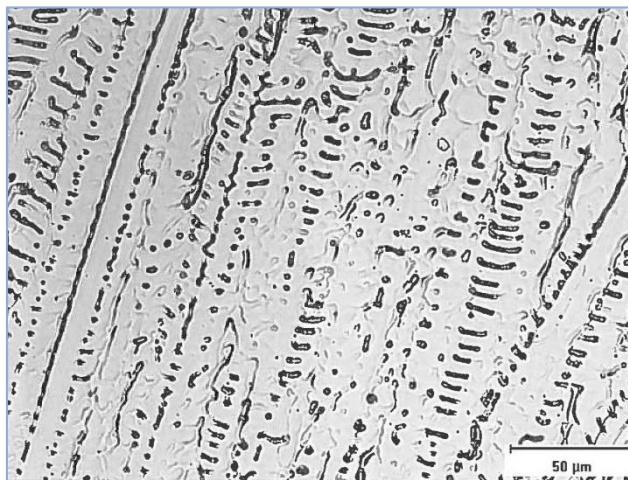


Figure II. 2. Solidification selon le mode FA [19]

La ferrite qui se forme le long des joints de grains est relativement stable et résiste à la transformation en austénite durant le refroidissement de la soudure étant donné l'enrichissement en chrome ayant déjà eu lieu.

II.3.1.3 Mode de solidification de type FA

Dans le cas d'une solidification en ferrite primaire, si de l'austénite se forme à la fin de la solidification alors elle suivra le mode **AF**.

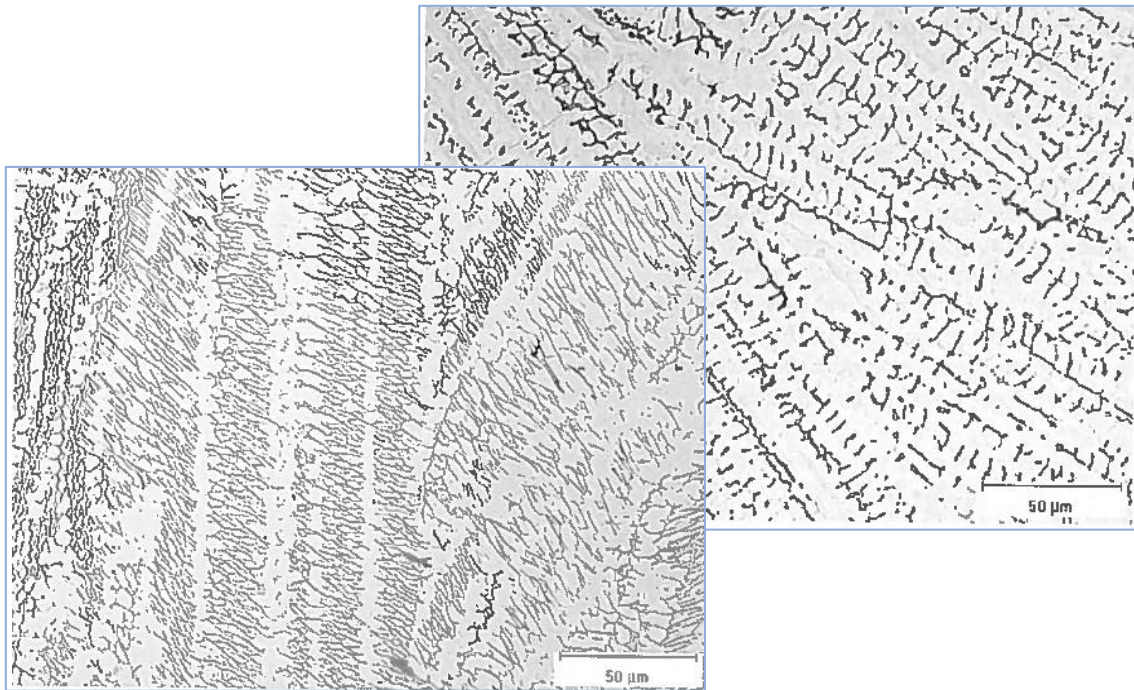


Figure II. 3. Solidification selon le mode FA. Structure en « lattes » et Structure « squelettique » [19]

Cette austénite se forme par réaction *eutectique péritectique* et existe à la frontière de la solidification ferritique. Ceci se poursuit avec une transformation à l'état solide de toute la ferrite en austénite.

Quand le taux de refroidissement de la soudure et/ou le rapport $\frac{Cr_{req}}{Ni_{req}}$ est faible (*dans le mode FA*), de la ferrite résiduelle dite « *squelettique* » ou « *vermiculaire* » apparaît. Cette apparition de ferrite découle d'un enrichissement en chrome et d'un appauvrissement en nickel.

II.3.1.4 Mode de solidification F

Lors du refroidissement au-dessous du solvus δ , l'austénite s'active autour des joints de grains de la ferrite δ afin de s'y précipiter. En outre, au cours de la solidification, entre la ligne du solidus et la ligne du solvus δ , la diffusion élimine la plupart des gradients chimiques résultant.

La microstructure résultant du mode **F** dans les aciers austénitiques est fonction de la composition et donc du ratio C_{req}/Ni_{req} mais aussi de la vitesse de refroidissement. Ainsi, quand la transformation débute, la microstructure est principalement constituée de grains de ferrite homogènes.

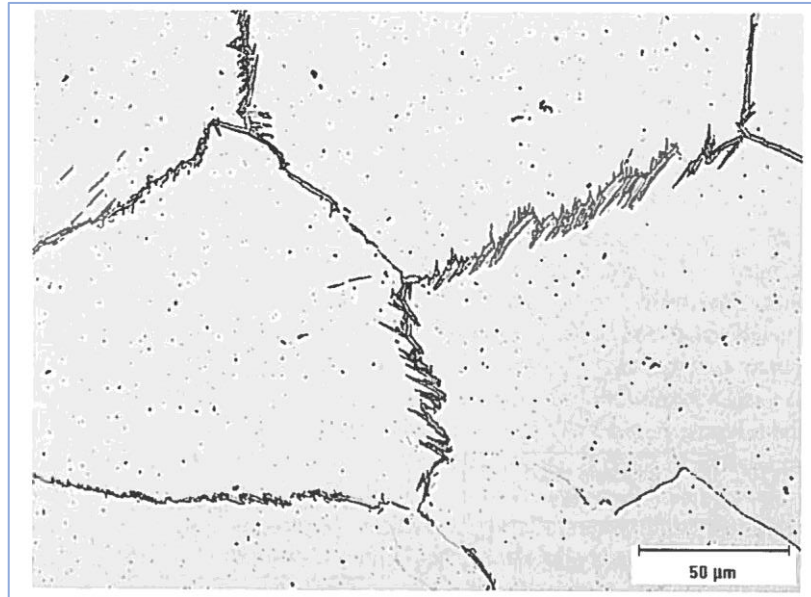


Figure II. 4. Solidification selon le mode F [19]

Par ailleurs, le degré de transformation en austénite dépend du rapport C_{req}/Ni_{req} [19] et de la vitesse de refroidissement, tel que :

- Si le ratio C_{req}/Ni_{req} est petit et la vitesse de refroidissement modérée alors une grande partie de la ferrite δ est transformée.
- Si la vitesse de refroidissement est élevée, la diffusion est éliminée et l'austénite ne consomme pas autant de ferrite.
- Si le ratio C_{req}/Ni_{req} est élevé alors la transformation se produit à basse température.

Dans la pratique, ce mode de solidification est inhabituel pour les soudures en acier austénitique. Il est plus souvent une caractéristique des aciers inoxydables duplex.

Remarque : dans les deux derniers cas, la soudure résultante contiendra une proportion en ferrite élevé.

II.4 Anisotropie et hétérogénéité des soudures multi-passes en acier austénitique

Parmi les facteurs affectant la faisabilité d'un contrôle de soudure par ultrasons figurent les caractéristiques propres au matériau à contrôler.

Dans le cas de soudures austénitiques multi-passes, la structure finale est caractérisée par une anisotropie et une hétérogénéité. Ces deux particularités génèrent des perturbations des ondes ultrasonores observées par des déformations du faisceau ainsi qu'une diminution d'amplitude due à la diffusion aux joints de grains. Des irrégularités pouvant biaiser les résultats du contrôle. Il est alors nécessaire de comprendre l'ensemble des mécanismes contribuant à l'apparition de ces deux particularités afin de déterminer les paramètres à prendre en considération avant d'effectuer le contrôle [21].

Lors de l'enchaînement successif de passes de soudures austénitiques, et en tenant compte du mécanisme de solidification du métal d'apport, il se produit, entre deux passes consécutives, un alignement des cristaux déposés avec les cristaux sur lesquels ils reposent tel qu'ils héritent de l'orientation de ces derniers [18].

En outre, la croissance des grains tend à se produire le long de certaines directions cristallographiques préférentielles. Dans le cas de métaux cristallisant en Cubique Centré (*CC*) ou en Cubique à Faces Centrées (*CFC*), la croissance est plus rapide suivant l'axe cristallographique $\langle 100 \rangle$, direction de l'arrangement le plus dense. Il en survient alors une croissance cristalline selon la direction du gradient thermique [14].

Ce phénomène est dit d'*Epitaxie* et est en cause dans l'apparition d'une anisotropie dans les soudures multi-passes en acier austénitique.

Alors que la croissance *Epitaxique* entraîne que les cristaux du métal déposé se cristallisent comme une extension du métal de base, la plupart de ces grains n'achèvent pas leur croissance. Ceci est dû à un mécanisme de croissance compétitif.

En effet, la croissance des grains suivant la direction du gradient thermique étant plus rapide dans l'axe cristallographique $\langle 100 \rangle$, les grains possédant une orientation désavantageuse subissent une croissance lente et leur développement est rapidement interrompu, étant donné le déplacement du front de solidification [22].

Ce phénomène dit de « *croissance sélective* » et est à l'origine de l'apparition d'une hétérogénéité dans la structure finale de soudures multi-passes en acier austénitique. Ainsi, les grains présentent des directions de croissance préférentielles suivant les passes et leur enchaînement.

De l'intervention de ces deux phénomènes résulte une microstructure *colonnaire* dans les joints soudés. Lors de l'inspection par ultrasons, l'interaction des ondes ultrasonores avec une texture aussi distincte entraîne déviation et division du faisceau.

II.5 Propagation des ultrasons dans les milieux anisotropes

II.5.1 Généralités

Dans la première partie de ce chapitre, la métallurgie des soudures en acier inoxydable a révélé de ces dernières une caractéristique structurale en cause dans l'apparition d'une anisotropie dans le matériau. Ces soudures présentent des structures cristallographiques texturées et bien distinctes.

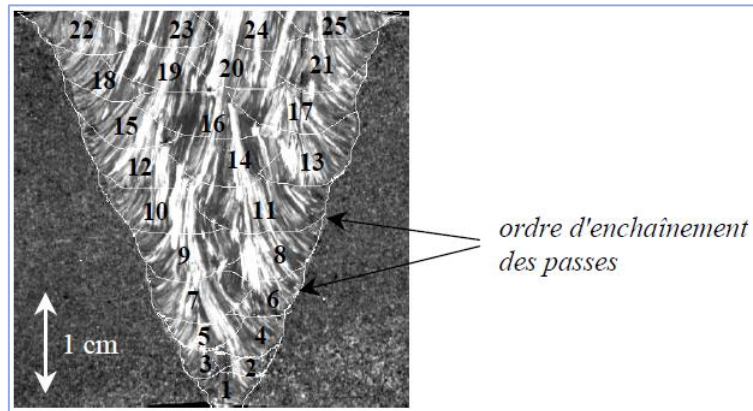


Figure II. 5. Macrographie d'une soudure multi-passes en acier austénitique [16]

Dans ce cas, l'onde ultrasonore adopte un comportement à part quant à son interaction avec la microstructure du matériau, et est sujette à des déformations importantes. Par conséquent, la vérification de la contrôlabilité par ultrasons de tels assemblages requiert la connaissance et la compréhension des lois régissant le phénomène de propagation des ondes ultrasonores dans les milieux anisotropes.

II.5.2 Définitions

Avec une propagation possible dans les milieux fluides et solides, les ondes ultrasonores sont des ondes élastiques de fréquence allant de 20kHz à 100MHz.

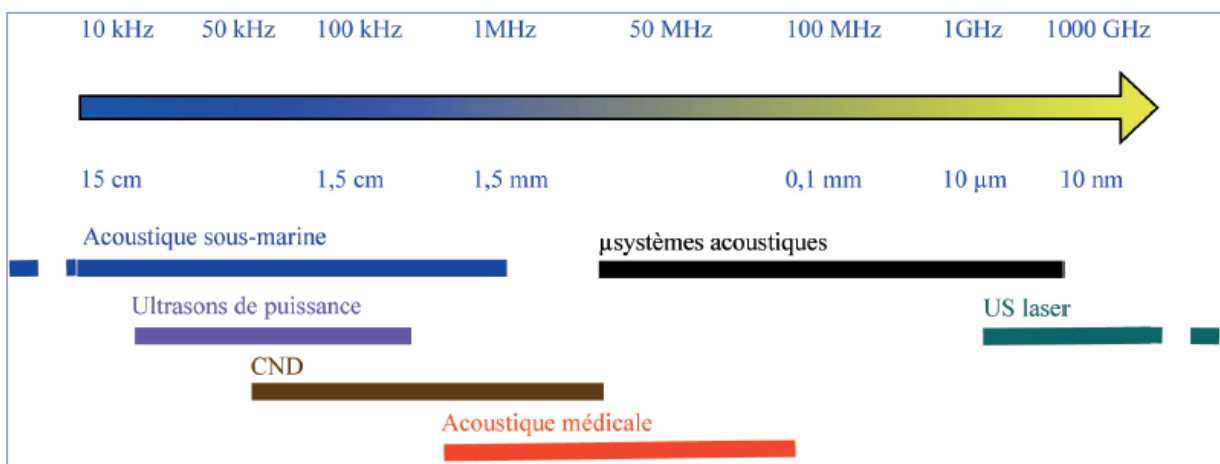


Figure II. 6. Principales applications des ultrasons selon leurs fréquences [23]

Durant sa propagation, l'onde ultrasonore est encline à divers phénomènes dont la réflexion, la réfraction, la diffusion et l'interférence. Par ailleurs, lors de l'émission d'une onde, cette dernière parcourt une certaine distance pendant une période donnée. Elle est donc définie par une longueur d'onde et une fréquence qui sont liées par la relation suivante :

$$\lambda = v/f$$

$v =$ vitesse de propagation de l'onde dans le milieu

L'onde ultrasonore se caractérise également pas un coefficient d'absorption qui exprime la perte d'énergie subie par unité de longueur dans le milieu traversé.

Chaque milieu traversé par l'onde sonore est caractérisé par une impédance acoustique notée « Z ». Elle représente une résistance du milieu à la propagation de l'onde, elle dépend donc principalement du matériau. La vitesse de propagation dépend également des propriétés élastiques du milieu. Elle est donnée par : $v = (E/\rho)^{1/2}$ où E et ρ sont respectivement le module d'Elasticité et la densité. L'impédance acoustique quant à elle est exprimée par : $Z = \rho v$.

Tableau II. 5. VITESSE DE PROPAGATION SONORE DANS QUELQUES MATERIAUX
($\times 10^5 \text{ cm. s}^{-1}$) [24]

Material	Longitudinal	Transverse
Aluminium	6.32	3.13
Laiton	4.28	2.03
Cuivre	4.66	2.26
Or	3.24	1.20
Fer	5.90	3.23
Plomb	2.16	0.70
Acier	5.89	3.24
Plexiglas	2.70	1.40
Eau	1.43	-
Huile	1.39	-
Air	0.33	-

D'autre part, la propagation des ultrasons dans un milieu solide se produit selon deux modes :

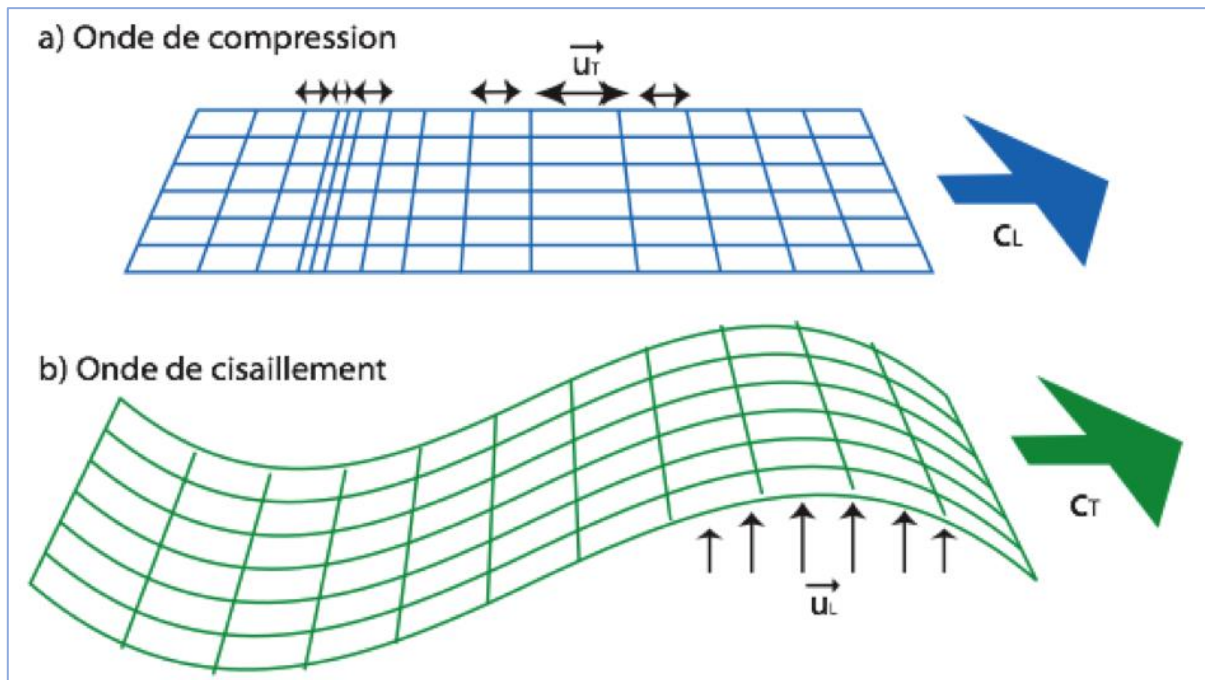


Figure II. 7 Modes de propagation des ondes [25]

1. *Mode longitudinal ou de compression* qui n'est autre qu'un déplacement des particules suivant la direction de propagation en générant des fronts de compression-dilatation. Au cours de la propagation, il y a variation de la distance entre deux plans d'ondes parallèles, ce qui entraîne une compression-dilatation du volume réunissant les particules.
2. *Mode transversal ou de cisaillement* est une succession de vibrations de particules perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde. Du fait de cette orientation, il n'y a pas de variation volumique comme pour le mode longitudinal.

Remarque : les ondes longitudinales sont les plus souvent employées dans le contrôle ultrasonore du fait d'un moyen de génération d'ondes relativement facile et d'une précision de détection satisfaisante [24].

II.5.3 Equation de propagation

La transmission d'une onde ultrasonore à un matériau anisotrope élastique génèrent des déplacements de particules variant dans le temps. Il en résulte des déformations provoquées par des contraintes.

La loi de comportement dite Loi de Hooke mettant en relation contraintes et déformations s'écrit : $T_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl}$

T_{ij} : tenseur des contraintes internes de rang deux

ε_{kl} : tenseur des déformations

C_{ijkl} : tenseur de rang quatre des constantes élastiques ou rigidités élastiques

Relation entre le tenseur des déformations ε_{kl} et le vecteur de déplacement $\vec{u}_l(x_k, t)$:

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right)$$

Les tenseurs des contraintes des déformations étant symétriques, il en découle :

$$C_{ijkl} = C_{jikl} \text{ et } C_{ijkl} = C_{jilk}$$

Tel que : $C_{ijkl} = C_{mn}$

Etant donné cette symétrie, il est possible de représenter le tenseur de rang 4 des constantes d'élasticité par une matrice 6x6 symétrique. La loi de Hooke est de l'allure suivante :

$$T_m = C_{mn} \varepsilon_n, \quad m, n = 1, 2, \dots, 6$$

Avec :

$$C_{mn} = \begin{pmatrix} C_{11} & \dots & C_{16} \\ & C_{33} & \vdots \\ Sym & & C_{66} \end{pmatrix}$$

D'après le principe fondamental de la dynamique sur une unité de volume du milieu insonifié de masse volumique ρ (la force de pesanteur est négligée) permet d'obtenir la relation suivante :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}$$

En introduisant la loi de Hooke dans l'équation précédente, il en découle l'équation de propagation pour des petits déplacements définie par :

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

Cette équation de propagation est valable pour les a solution de cette équation est une onde plane progressive monochromatique, se propageant à la vitesse V dans la direction \vec{n} et de vecteur de polarisation \vec{u}^0 l'équation :

$$u_i = u_i^0 F\left(t - \frac{n_j x_j}{V}\right)$$

De l'introduction de l'expression précédente dans l'équation de propagation, il résulte :

$$\rho V^2 u_i^0 = \Gamma_{il} u_l^0$$

Tenseur de Christoffel : $\Gamma_{il} = C_{ijkl} n_j n_k$

Remarques :

- La propagation des ondes élastiques dans les milieux homogènes est régie par l'équation de Christoffel. Pour une direction donnée, il peut y avoir trois ondes planes avec des vitesses différentes : une onde quasi-longitudinale ainsi que deux ondes quasi-transversales.
- Γ_{il} est un tenseur symétrique dont les valeurs propres sont réelles et ses vecteurs propres orthogonaux.
- La polarisation \vec{u}^0 est un vecteur propre du tenseur de Christoffel avec une valeur propre correspondant à $\lambda = \rho V^2$.

II.6 Conclusion

Ces propriétés physiques des soudures austénitiques sont en cause dans les déformations du faisceau et l'atténuation des ondes ultrasonores. La déviation du faisceau ne se produit pas dans des milieux isotropes comme les soudures ferritiques, mais la dispersion des ultrasons se produit dans tous les matériaux polycristallins. C'est pour cette raison, que les soudures austénitiques seront toujours plus difficiles à examiner que les soudures ferritiques. Néanmoins, des progrès considérables ont été fait ces dernières années en ce qui concerne les techniques d'inspection employées pour les deux types de soudures [21]. Tout laisse à croire qu'un bon choix de matériaux, de paramètres géométriques, de procédure de soudage lors de la phase de conception, permet une nette amélioration de la sensibilité de détection de défauts. Il est aussi à reconnaître qu'en plus des difficultés susmentionnées, l'inspection des soudures austénitiques est aussi sujettes à des problèmes communs associés à la géométrie des raccords, de la surface et des caractéristiques des défauts.

Des travaux de recherche se sont également articulés autour de l'amélioration de la contrôlabilité par ultrasons. Afin de réduire l'anisotropie, agir sur la croissance des grains durant le procédé de soudage permettrait de produire des grains plus fins et moins grossiers, et donc d'améliorer les propriétés acoustiques des soudures austénitiques [26].

Il existe différentes approches impliquant ce genre de modifications durant le processus de fabrication. L'une d'entre-elles se base sur l'apport de modifications géométriques au niveau du joint soudé par réduction du volume de la soudure ou l'optimisation de la forme de la soudure afin d'en améliorer la couverture de zone à contrôler. Dans une seconde approche, il est question d'agir au moment de la solidification du métal d'apport durant le processus de soudage afin de générer des grains plus fins [22].

C'est à la lumière de ces approches théoriques de la propagation des ondes ultrasonores, que dans le prochain chapitre est abordée, de façon détaillée, la technologie des ultrasons telle qu'elle est aujourd'hui sollicitée dans le domaine du contrôle non-destructif. Une comparaison entre les deux techniques de contrôles conventionnelles et multiéléments est présentée afin d'en distinguer les avantages, les inconvénients ainsi que les limites conformément aux conditions imposées par le contexte de cette étude.

CHAPITRE III : TECHNOLOGIES ULTRASONS MONO ET MULTIÉLÉMENTS

Chapitre III : Technologies ultrasons Mono et Multi-éléments

III.1 Introduction

La science du son, également appelée « acoustique », étudie les phénomènes de propagation des ondes mécaniques dans les solides et les fluides, et ce quelques soient les fréquences (infrasons, sons et ultrasons). Le son étant un phénomène résultant de vibrations mécaniques ou déplacement de particules de matière sur une certaine distance, dans le vide, il ne se propage pas du fait de ne retrouver aucun support matériel [21].

Au-delà de la transmission d'un signal, l'onde sonore est porteuse d'informations. Généralement, lors de l'émission d'une onde ultrasonore dans un spécimen/matériau, une onde est réfléchiée et récupérée pour analyser les informations portées par cette dernière.

Le plus souvent, dans le but de déterminer les propriétés mécaniques d'un matériau donné, les méthodes mécaniques sont les méthodes les plus souvent employées pour leur efficacité. Ces opérations consistant à prélever un échantillon et à le « déformer » ou à le « détruire » mécaniquement, ces contrôles sont dits « destructifs », comme les essais de traction, de pliage, de résilience, etc. En revanche, les ultrasons offrent, pour les mêmes objectifs, l'avantage de ne détériorer, à aucun moment du contrôle, le matériau inspecté. Ce contrôle rejoint la catégorie des essais non-destructifs qui regroupent un ensemble de méthodes telles que : la radiographie industrielle, la magnétoscopie, le ressuage, etc.

Un essai non destructif permet donc d'établir un pronostic fiable de l'état et du comportement d'une structure ou d'un composant par le biais de l'acquisition de données. Ceci afin d'évaluer les potentiels dommages qui peuvent éventuellement survenir lorsque l'équipement est en service. Ces données gravitent autour de :

- La géométrie des défauts ;
- Du stade de dégradation du matériau ;
- Des paramètres du matériau ;
- Des contraintes limites du matériau.

Les technologies ultrasons (US) comptent un large spectre de techniques reposant sur des principes physiques différents. Toutes permettent de contrôler les matériaux jusqu'à plusieurs centaines de millimètres d'épaisseur. Elles dimensionnent et positionnent les indications dans le volume du joint soudé ou de la pièce, mais possèdent certaines limitations à prendre en considération avant le contrôle. D'une part, elles nécessitent une bonne préparation de la surface pour en garantir un bon état avant l'application des sondes ultrasonores, et d'autre part, une transmission ultrasonore par l'intermédiaire d'un milieu de couplage est requise, même si, aujourd'hui, des dispositifs de contrôle ultrasonore sans contact sont mis au point [27]. Comme mentionné dans les précédents chapitres, la géométrie des assemblages ou des pièces peut également se présenter comme un handicap au contrôle.

De plus, les appareils à ultrasons émergeant dans un contexte de convergence numérique, le contrôle non-destructif se retrouve facilité. En ce sens que la numérisation de la technique permet l'archivage et la traçabilité des mesures, mais aussi et grâce au pouvoir de l'intelligence artificielle reposant sur des algorithmes de reconnaissance d'images, il y a même assistance de l'opérateur lors du diagnostic.



Figure III.1. Contrôle ultrasons [49] [50]

En somme, le CND Ultrasons est en voie de devenir de facto un outil universel essentiel à l'identification d'anomalies volumiques des pièces les plus complexes. Contrairement à la radiographie à rayons X qui impose des conditions strictes quant à l'utilisation de sources ionisantes, et de ce fait rend de plus en plus réticents les industriels.

Dans le présent chapitre, deux des technologies de contrôle par ultrasons seront mises en exergue. Notamment, les ultrasons conventionnels et multiéléments, chacune de ces méthodes étant sollicitées dans des conditions bien particulières qui seront présentées.

III.2 Piézoélectricité

Une catégorie remarquable de matériaux intelligents est à la source du phénomène physique piézoélectrique régissant le contrôle non-destructif ultrasonore. Dans la littérature, les matériaux intelligents sont dotés d'une sensibilité aiguisée, de capacités d'adaptation et d'évolution hors pair. Ils possèdent par ailleurs des fonctionnalités leur permettant d'actionner, de capter/détecter des signaux et même de stocker de l'information. Ils sont reconnus pour modifier sous certaines conditions particulières et en réponse à des excitations externes ou internes, certaines de leurs propriétés physiques. Les matériaux considérés pour cette application sont dits « piézoélectriques ».

La piézoélectricité (du grec piézein presser, appuyer) est une propriété que possèdent certains éléments à se déformer sous l'effet de contraintes mécaniques ou d'un champ électrique. Elle regroupe cependant deux phénomènes considérés comme indissociables [21] :

Le premier phénomène est appelé effet piézoélectrique direct. Ce dernier a été découvert par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880 qui ont démontré la piézoélectricité du Quartz. En soumettant le cristal de quartz à une tension électrique, ils montrèrent qu'il vibrait à une fréquence bien définie [21] [28].

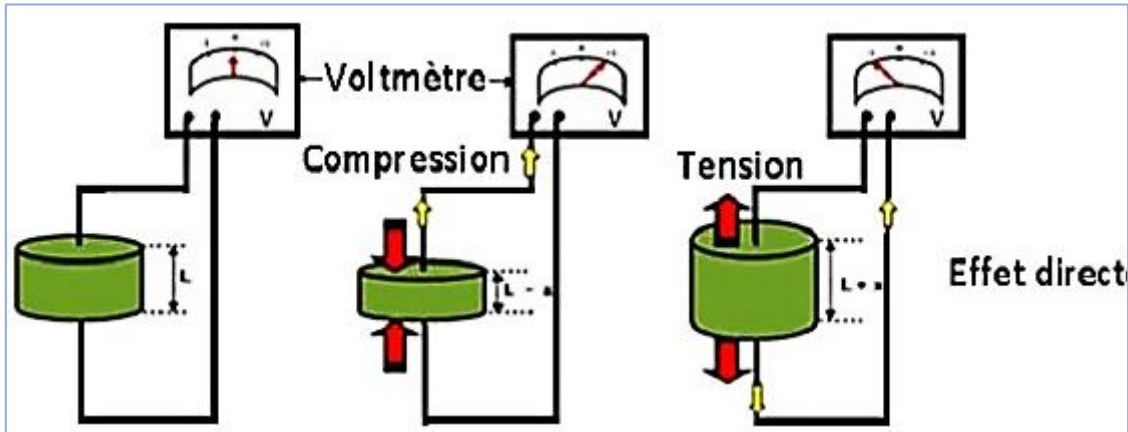


Figure III. 2. Illustration de l'effet piézoélectrique d'un matériau en céramique - Effet direct [29]

Le second effet dit « phénomène inverse » ou « effet piézoélectrique inverse » a été découvert peu de temps après, en 1881. Il stipule que si le matériau PZT est placé entre deux électrodes, alors celui-ci change de forme lorsqu'un potentiel électrique est appliqué.

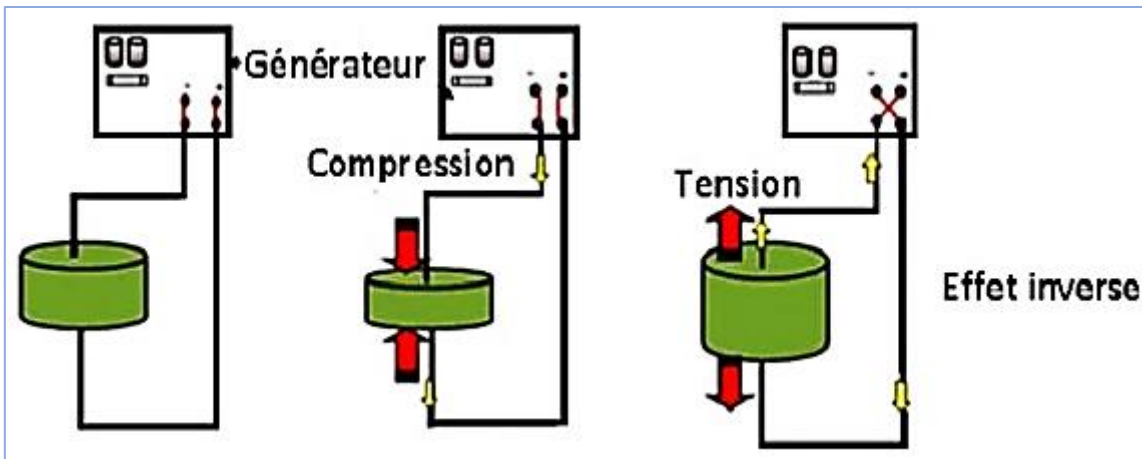


Figure III. 3. Illustration de l'effet piézoélectrique d'un matériau en céramique - Effet inverse [29]

En somme, un solide qui peut se polariser électriquement sous contrainte (effet direct) et se déformer à la suite de l'application d'un champ électrique (effet inverse) est considéré comme piézoélectrique. Cependant, afin d'expliquer le phénomène piézoélectrique à échelle structurale, on prendra l'exemple du Titanate de Baryum ($BaTiO_3$), car d'une part, il possède

une structure de maille élémentaire des plus simples, et d'autre part, car il est le plus utilisé en ultrasons.

Le Titanate de Baryum, tout comme un bon nombre de céramiques piézoélectriques, possède une structure dite « pérovskite ». La maille élémentaire du $BaTiO_3$ au-dessus d'une certaine température appelée température de « Curie » ou de « transformation » et qui vaut 120°C pour cet exemple, possède avec un ion Ti^{4+} au centre du cube et des ions Ba^{2+} aux coins et des ions O^{2-} au centre de chaque face, une structure cubique stable [30].

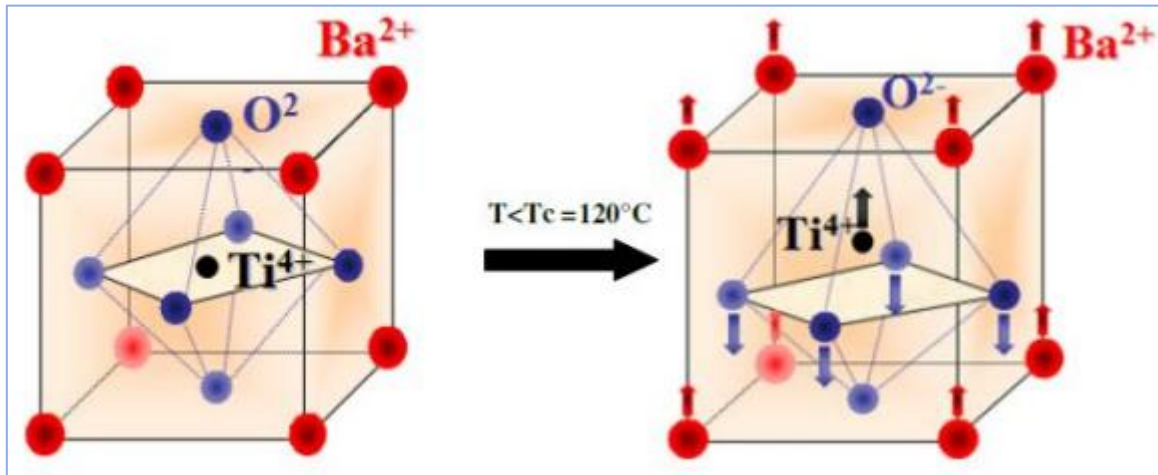


Figure III. 4. Transition de phase dans la structure pérovskite de $BaTiO_3$ [30]

En dessous de cette température, les ions se déplacent avec les ions de coin Ba^{2+} , et puisque les ions Ti^{4+} et O^{2-} se déplacent dans des directions opposées, les centres de charges positives et négatives ne sont pas identiques. La cellule unitaire n'est donc plus cubique. Un matériau tel que $BaTiO_3$ voit ses dimensions modifiées en subissant un champ électrique puisqu'il y a déplacement des charges négatives vers l'électrode positive et les charges positives vers l'électrode négatives [31]. Cette séquence d'effets est celle permettant la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique et vice versa. Cette conversion d'énergie peut être traduite par un indicateur d'efficacité [28] nommé « coefficient de couplage électromécanique k (CCEM) » qui est un paramètre essentiel à la description d'une telle catégorie de matériaux [32].

$$k^2 = \frac{\text{Energie mécanique transformée}}{\text{Energie électrique fournie}}$$

Ce paramètre dépend principalement de la forme des céramiques et de leur mode de vibration. En prenant en considération que la pastille piézoélectrique compose des transducteurs utilisés pour les traducteurs à ondes longitudinales, il est plus approprié d'intégrer le coefficient électromécanique k_t avec t pour thickness (épaisseur).

Par ailleurs, les monocristaux piézoélectriques tels que le Quartz (SiO_2), Niobate de Lithium ($LiNbO_3$) ou Tantalate de Lithium ($LiTaO_3$) sont rarement utilisés dans les applications CND.

La raison pour laquelle le Quartz n'est pas utilisé est sa faible sensibilité et donc un faible coefficient de couplage électromécanique ($k_t = 0.1$).

Pour certaines de ces céramiques, parmi les contraintes pouvant freiner leur usage figure la température. En effet, la température de Curie se situant entre 200 Et 400°C selon le type de céramique, n'est autre qu'une limite au-dessus de laquelle la piézoélectricité de l'élément disparaît. Par conséquent, les céramiques de type PZT sont les plus sollicitées pour des applications CND, car leur coefficient de couplage est relativement élevé. Ce qui permet une bonne conversion du signal électrique en vibration ultrasonore.

Parmi les applications qui illustrent ces deux phénomènes, on retrouve l'effet piézoélectrique dans la réalisation de capteurs à des fins de mesures, en l'occurrence dans les capteurs ultrasons mais également la réalisation de manomètres, de cartouches phonographiques ainsi que des moteurs et d'actionneurs piézoélectriques.

III.2.1 Différents types de transducteurs ultrasonores

Les ultrasons peuvent être produits à partir de plusieurs types de dispositifs communément appelés « transducteurs », « sondes » ou « capteurs » qui fonctionnent le plus souvent par effet piézoélectrique. Cependant, chaque dispositif émet des ultrasons selon un phénomène physique qui lui est propre. Il existe donc plusieurs méthodes pour générer une onde ultrasonore d'un point de vue physique.

Les ultrasons se situent à une fréquence supérieure à la gamme audible qui s'étend de 20Hz à 20KHz. Quelques centaines de KHz peuvent être utilisés en contrôle non-destructif. La longueur d'onde et la fréquence dépendent des dimensions géométriques de la pièce à insonifier, de la structure métallographique du matériau ainsi que des dimensions des défauts recherchés.

Les deux propriétés de piézoélectricité citées précédemment sont à la base du fonctionnement des transducteurs/capteurs, qui permettent la génération/émission des ondes ultrasonores. Comme déjà décrit, le principe de base d'un contrôle ultrasons repose en définitif sur la conversion d'une énergie électrique en énergie acoustique et vice versa. Ceci est possible grâce aux transducteurs.

Il existe trois principaux types de transducteurs : *piézoélectrique*, *électromagnétique acoustique (EMAT)* et au *laser*. Le choix du transducteur impose la prise en considération de plusieurs facteurs déterminants, notamment les limitations imposées par la pièce à contrôler ainsi que la précision des résultats souhaitée.

III.2.1.1 Transducteur Piézoélectrique

Etant le type de transducteur le plus utilisé en ultrasons, il permet la conversion de l'énergie électrique en énergie acoustique et vice versa, fonctionnement reposant sur l'effet piézoélectrique présenté dans les paragraphes précédents.

Par définition, un traducteur est un système constitué d'un transducteur, d'une lame quart d'onde et d'un *backing*. Le transducteur est un dispositif composé d'un élément dit « cristal piézoélectrique » sous forme d'une pastille. Cette pastille est placée entre deux électrodes et fixée d'un côté sur une semelle en matière plastique et de l'autre côté sur un *backing*, matériau absorbant visant à amortir l'onde émise par la face arrière de la pastille et donc, les vibrations du transducteur.

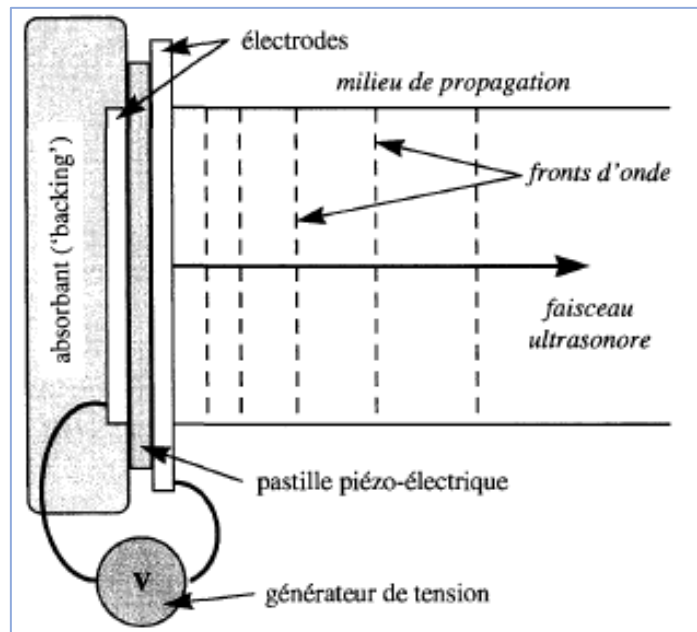


Figure III. 5. Composition d'un traducteur ultrasonore piézoélectrique [33]

Quand un courant est appliqué, la pastille se contracte et se dilate, créant ainsi une onde ultrasonore. Inversement, si une onde ultrasonore est réceptionnée par la pastille, cette dernière se dilatera et se contractera créant une tension alternative entre les électrodes. C'est ainsi qu'un traducteur piézoélectrique fonctionne à la fois comme émetteur et récepteur.

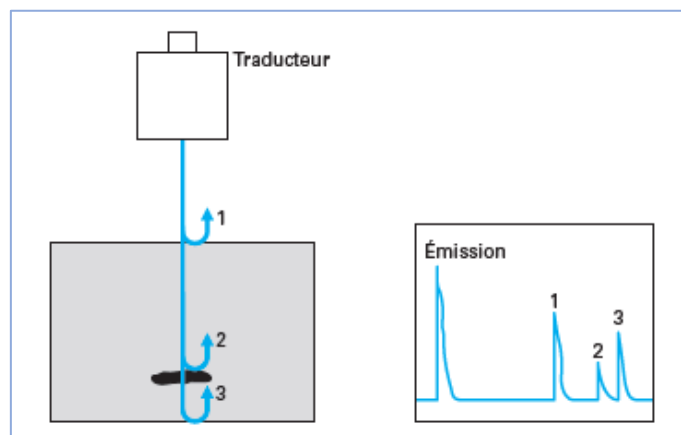


Figure III. 6. Principe de contrôle par immersion [34]

Cependant, la qualité des ondes générées et reçues dépend principalement des propriétés des matériaux du transducteur. Les transducteurs piézoélectriques sont divisés en deux catégories : transducteurs *par contact* et transducteurs *par immersion*.

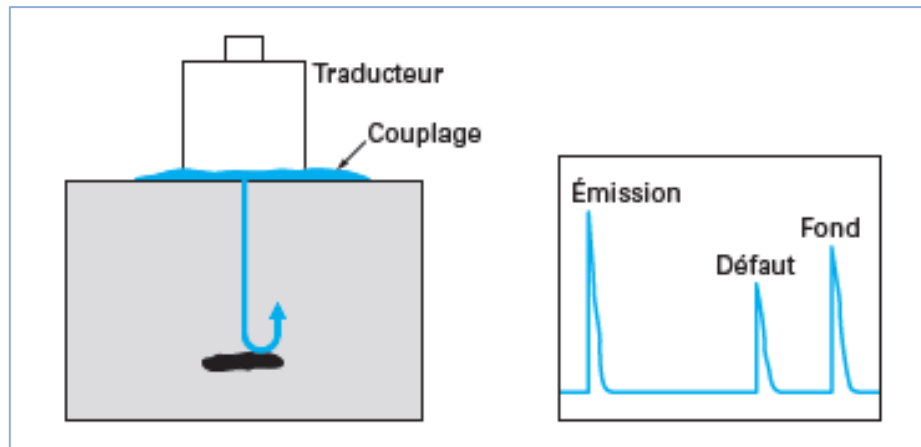


Figure III. 7. Principe du contrôle par contact [34]

Pour la première catégorie, la technique est dite de « palpage » car le transducteur est placé directement sur la surface de l'objet à inspecter. Les pellicules d'air réfléchissent l'énergie ultrasonique émise, c'est pourquoi afin d'amoinrir les pertes causées par les irrégularités de surface, un couplant est généralement appliqué entre la surface de l'objet et le transducteur afin de permettre un transfert d'énergie plus efficace. Le couplant peut-être sous forme de graisse industrielle, l'eau, l'huile, la paraffine, etc.

En ce qui concerne la seconde catégorie qui n'est pas très différente de la première, il s'agit de transducteurs placés à une certaine distance de la surface de l'objet à contrôler avec une colonne d'eau qui les sépare agissant comme couplant. L'immersion peut être totale ou partielle de la pièce dans une cuve de contrôle.

III.2.1.2 Transducteur Electromagnétique acoustique (EMAT)

Ce transducteur permet la génération, l'émission et la réception d'ondes ultrasonores grâce à une technique de contrôle sans contact qui ne requiert aucunement l'utilisation d'un couplant entre le transducteur et la pièce. Tout ceci devient possible grâce aux éléments composant l'EMAT tels que les bobines inductrices et les aimants permanents qui induisent des courants de Foucault et excitations électromagnétiques. Ces derniers, quel que soit la nature du milieu (conducteur, magnétique ou amagnétique), s'immiscent dans la microstructure de la pièce générant ainsi, les sources dynamiques à l'origine des ultrasons émis par le transducteur. Ces interactions plutôt particulières avec la matière sont décrites comme résultant d'un *couplage électro-magnéto élastique* [35].

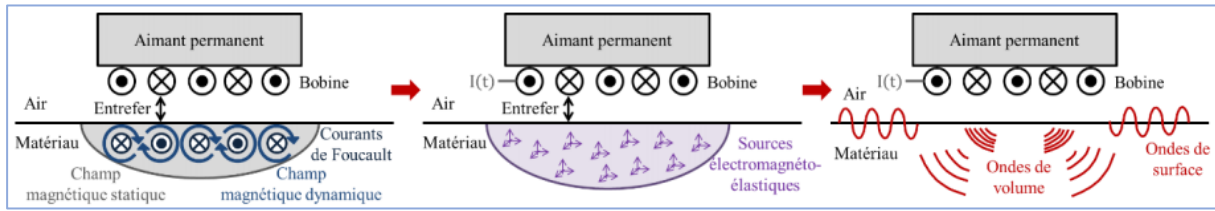


Figure III. 8. Principe de fonctionnement d'un transducteur de type EMAT [35]

A priori, cette technique sans contact présente de nombreux avantages. En effet, pouvant être employée dans des conditions de pression et de température extrêmes, elle s'adapte aux environnements les plus hostiles. L'état de surface du matériau à inspecter n'est également plus un frein à l'acquisition des informations surfaciques et volumiques recherchées.

Cependant, l'EMAT bien que prometteur, il n'en demeure pas moins que la portée de la technique qui en découle reste limitée à l'inspection de matériaux métalliques. De plus, l'équipement nécessaire au contrôle étant relativement lourd, il ne permet de générer que de faibles amplitudes ultrasonores en comparaison avec les transducteurs piézoélectriques ; ce qui mène à une certaine complexité des résultats qui sont alors difficilement exploitables.

III.2.1.3 Génération d'ondes ultrasonores par l'intermédiaire d'un laser

Tout comme pour l'EMAT, la génération d'ondes ultrasonore par l'intermédiaire d'un laser rend possible l'opération du CND sans contact avec la surface de la pièce et donc sur géométries quelconques. Le principe de fonctionnement se base sur la conversion en onde élastique de la dilatation thermique résultant de l'intensité lumineuse rayonnée par le laser dans la zone inspectée. Ce type de couplage est dit « thermoélastique ».

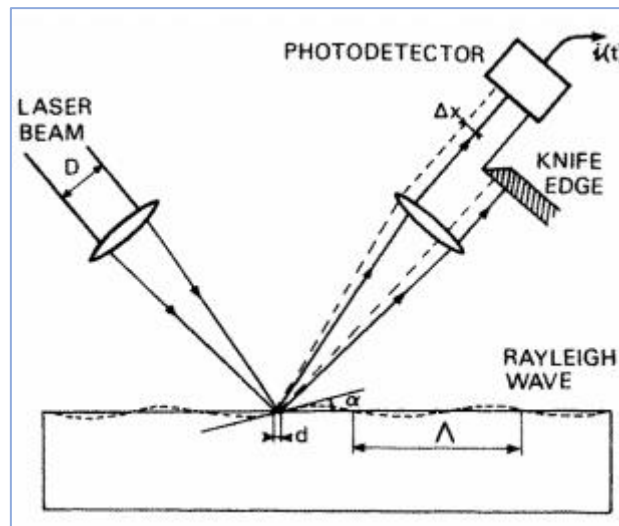


Figure III. 9. Système de détection laser [36]

La technique présente l'avantage d'une utilisation à de hautes températures allant jusqu'à 1000°C tandis que l'EMAT et le transducteur piézoélectrique se limitent respectivement à 600 et 250°C. Cependant, certaines limites peuvent laisser sceptique quant à l'exécution de cette

technique à un plus large spectre d'applications. La méthode requiert une formation spéciale de l'opérateur, et la complexité du signal récolté fait qu'il soit nécessaire d'opérer un traitement préalablement à l'analyse des données.

III.3 Principe de mise en œuvre du contrôle par US conventionnels

III.3.1 Généralités

Tout comme pour l'échographie, la méthode de contrôle ultrasonore telle mise en œuvre se base sur la recherche de signaux d'échos réfléchis par les anomalies rencontrées lors de l'inspection de la pièce contrôlée.

On observe trois phases distinctes lors d'un contrôle ultrasons. Une première phase dite d'excitation au cours de laquelle il y a propagation dans le matériau les vibrations mécaniques générées par l'élément piézoélectrique. Vibrations qui s'apparentent à des ondes ultrasonores qui sont réfléchies sur les faces internes de la pièce.

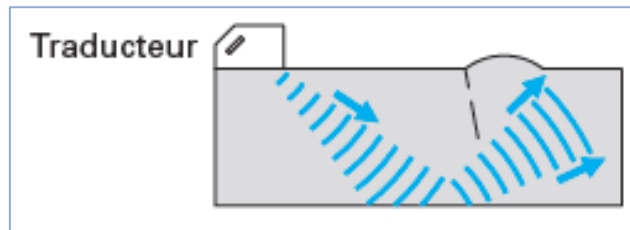


Figure III. 10. Principe du contrôle ultrasons - Phase d'excitation [34]

La seconde phase correspond à la « perturbation » durant laquelle le faisceau ultrasonore rencontre un défaut, est divisé et réfléchi vers le traducteur qui transmute l'onde reçue en signal électrique.

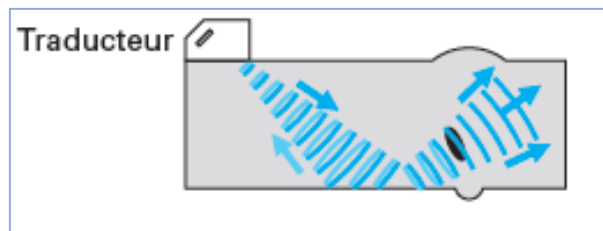


Figure III. 11. Principe du contrôle ultrasons - Phase de perturbation [34]

Tout au long de ces deux premières phases, des signaux correspondant à chacune d'entre-elles peuvent être observés sur l'écran de visualisation du dispositif. Il s'agit alors d'une phase dite de « révélation » ou « d'observation ». Pour reconnaître une potentielle interaction avec une indication, il suffit d'observer un écho représenté sur l'oscilloscope comme un « pic ». Cependant, on distingue trois types d'écho : un écho de départ, un écho du défaut ainsi qu'un écho de fond.

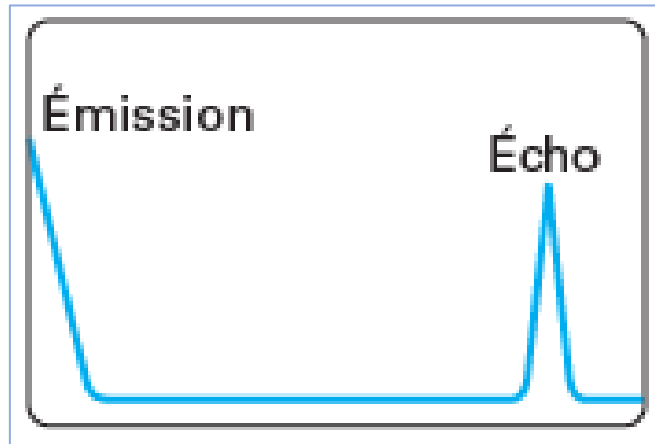


Figure III. 12. Principe du contrôle ultrasons - Phase d'observation [34]

Le principe de mise en œuvre du contrôle par ultrasons repose donc sur l'insonification d'une pièce ou d'un assemblage afin d'en déceler les anomalies volumiques. Pour ce faire, deux types de transducteurs interviennent : l'un considéré comme émetteur et l'autre comme récepteur. Ils permettent respectivement de générer l'onde ultrasonore et de détecter les défauts. La présence de toute hétérogénéité dans le milieu de propagation perturbe l'onde incidente en réfléchissant toute ou une partie de celle-ci vers le transducteur récepteur qui la convertira en signal électrique interprétable sur l'écran du dispositif.

Sur la base de ce principe découlent de nombreuses techniques de contrôles par ultrasons. Cependant, il est de l'intérêt de cette étude de se focaliser uniquement sur deux méthodes de contrôle ultrasonores régies par le même phénomène physique (effet piézoélectrique), soit les méthodes ultrasonores conventionnelles et multiéléments.

III.3.2 Méthodes de contrôle conventionnelles

Les méthodes conventionnelles sont des techniques faisant intervenir des transducteurs dits mono-éléments plans qui peuvent être au contact de la surface de la pièce ou en immersion. A l'émission de l'onde, une impulsion ultrasonore est réfléchi au premier contact avec la surface du matériau, ce qui engendre un écho de départ. Lorsque les ultrasons rencontrent la surface de fond, ils sont réfléchis au capteur qui les transforme en impulsions électriques et donne lieu à un écho de fond. Enfin, la détection d'un défaut est traduite par l'apparition d'un écho sous la forme d'un pic sur le système de visualisation de l'appareil ultrasons. Ainsi, toute discontinuité est mise en relief et aisément localisée. Ceci grâce à l'élément piézoélectrique composant les transducteurs.

III.3.2.1 Modalités de contrôle

Bien qu'il existe plusieurs méthodes de génération d'ondes ultrasonores comme décrites précédemment, on distingue différentes modalités de contrôle, selon que les transducteurs soient confondus ou séparés, dont :

- **Le mode « émission-réception confondues » (pulse-echo) :** le transducteur est utilisé à la fois comme émetteur et récepteur ;

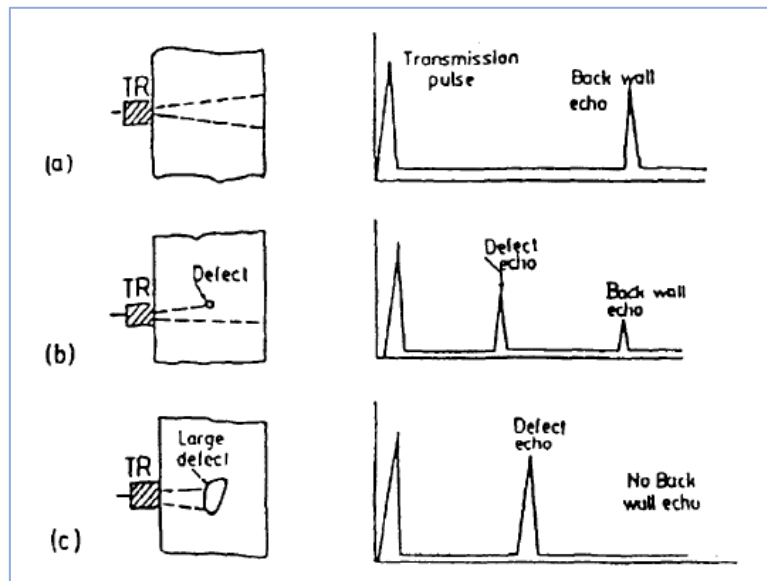


Figure III. 13. Principe de la méthode Pulse-Echo d'un contrôle ultrasonore

(a) Spécimen sans défauts. Echo de départ et écho de fond sont observés.

(b) Spécimen avec un petit défaut. Echo de départ, écho d'indication de défaut et écho de fond sont observés.

(c) Spécimen avec un défaut de dimensions relativement importante. Uniquement l'écho de départ et l'écho d'indication de défaut sont observés. [24]

- **Le mode en « transmission » :** deux transducteurs, un émetteur et un autre récepteur, sont placés de part et d'autre de la pièce ou du cordon de soudure à inspecter ;

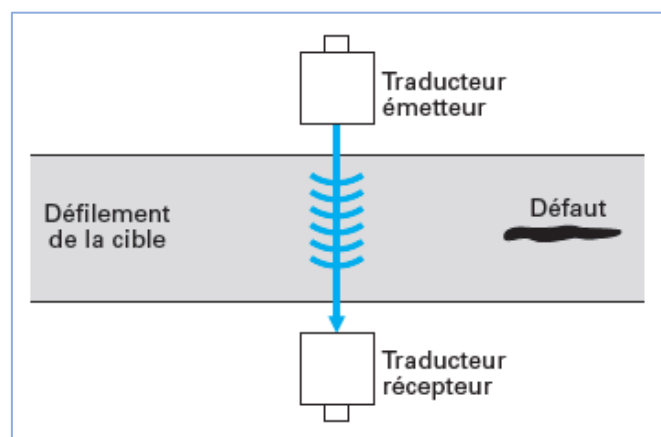


Figure III. 14. Principe du mode en transmission [34]

- **Le mode en « tandem » :** l'émetteur et le récepteur sont placés l'un devant l'autre ;

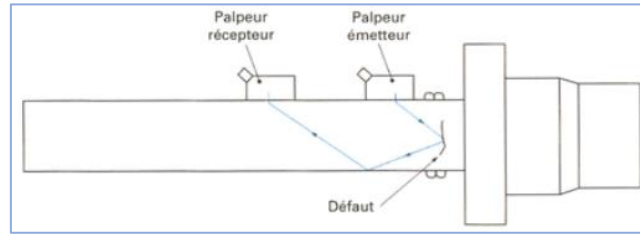


Figure III. 15. Configuration d'un contrôle ultrasons en tandem [34]

- **Le mode « TOFD » (Time Of Flight Diffraction)** : l'émetteur et le récepteur sont placés face à face ;

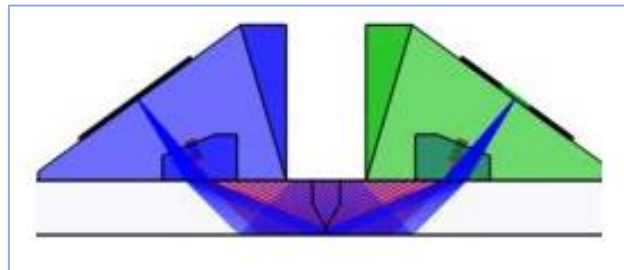


Figure III. 16. Représentation du mode TOFD [38]

- **Le mode émetteur-récepteur séparés ou SE** : l'émetteur et le récepteur sont placés côte à côte. Configuration employée pour s'affranchir du bruit rétrodiffusé lors de l'examen des soudures austénitiques.

III.3.3 Technologie multiéléments (Phased Array)

L'examen ultrasonore par transducteurs multiéléments représente une évolution de la technique conventionnelle. La particularité de ce contrôle réside dans le réseau ultrasons qui constitue les transducteurs. Ce réseau est constitué d'une série de pastilles émettrices piézoélectriques ou piézo-composites aux propriétés similaires et indépendants d'un point de vue fonctionnel. Le modèle simplifié d'un transducteur multiélément serait représenté par la disposition d'un nombre limité de sondes mono-éléments auxquels est appliqué une loi de retards permettant un déphasage à l'émission ultrasonore entre les éléments de manière à augmenter la couverture de zone ou la vitesse de l'inspection. Les ultrasons multiéléments sont sollicités pour l'obtention de cartographies d'épaisseur, analyse et caractérisation des défauts ainsi que le contrôle de soudures.

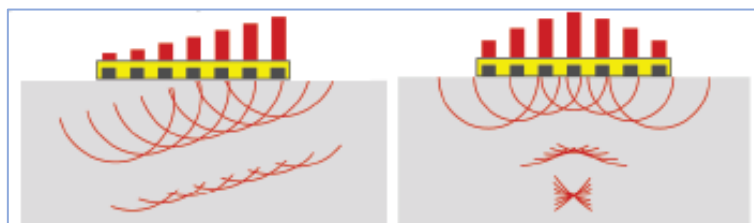


Figure III. 18. Représentation transducteur multiéléments [39]

III.3.3.1 Traducteurs multiéléments et caractéristiques

D'aspect, les traducteurs multiéléments se présentent comme des traducteurs conventionnels. Ils peuvent être employés pour pratiquer des examens par immersion et au contact, avec ou sans sabot. Cependant, il existe plusieurs types de traducteurs multiéléments, parmi les plus couramment utilisés :

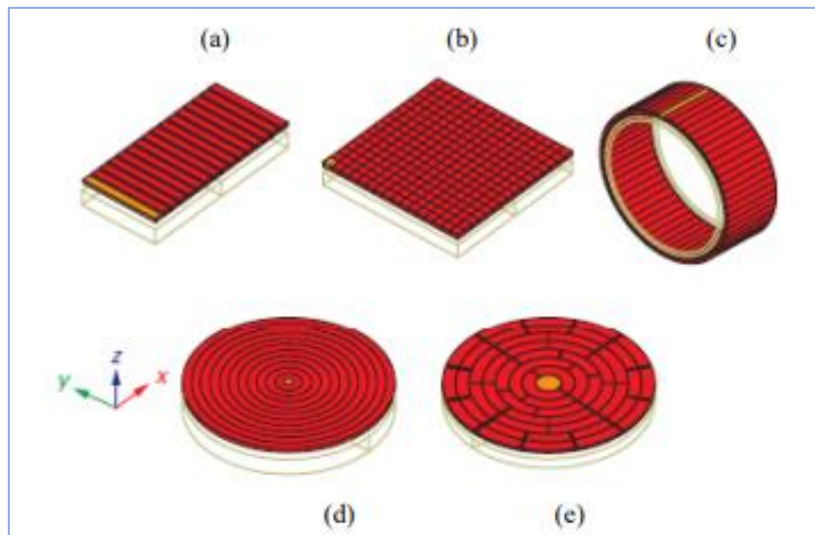


Figure III. 18. Différents types de traducteurs multiéléments [40]

- (a) *Linéaire* : éléments alignés selon un seul axe (1D) ;
- (b) *Matriciel* : ces traducteurs dont les éléments sont placés dans les deux dimensions permettent d'effectuer des contrôles en 3D ;
- (c) *Annulaire* : ces traducteurs permettent la focalisation du faisceau à différentes profondeurs, le long d'un axe. Les éléments en forme d'anneaux concentriques ;
- (d) (e) *Circulaire/sectoriel* : souvent utilisés pour le contrôle de tube, les éléments sont disposés sur une couronne ;

De plus, un assemblage ultrasons multiéléments comporte plusieurs composants dont un sabot en plastique qui est également utilisé en mono-élément. Le sabot a pour objectif de permettre un couplage de l'énergie acoustique sur la pièce inspectée telle que l'onde soit réfractée selon l'angle souhaité.

III.3.4 Représentation des résultats

Les appareils ultrasons répertorient deux paramètres fondamentaux d'un écho : sa taille (amplitude) et la position dans le temps où il apparaît par rapport au point zéro qui est le temps d'émission. Il existe trois types de formats pour la présentation des données : A-Scan, B-Scan, C-Scan. Chaque format apporte à l'inspection son lot d'avantages, en termes de détection, de positionnement et d'évaluation.

- *Echographie de type A ou A-Scan* : représentation de bases des données de l'amplitude de l'onde enregistrée par l'élément récepteur (de l'écho) en une position d'acquisition en fonction du temps et donc sur un tracé chronologique.
- *Echographie de type B ou B-Scan* : représentation résultant de la juxtaposition de l'ensemble des A-Scan d'une ligne de balayage. Une image représentant la structure interne de la pièce suivant un plan de coup est obtenue.
- *Echographie de type C ou C-Scan* : représente l'amplitude maximale du signal reçu. Le principe demeure le même que celui de l'Echographie B-Scan mais réalisé avec plusieurs plans de coupes.

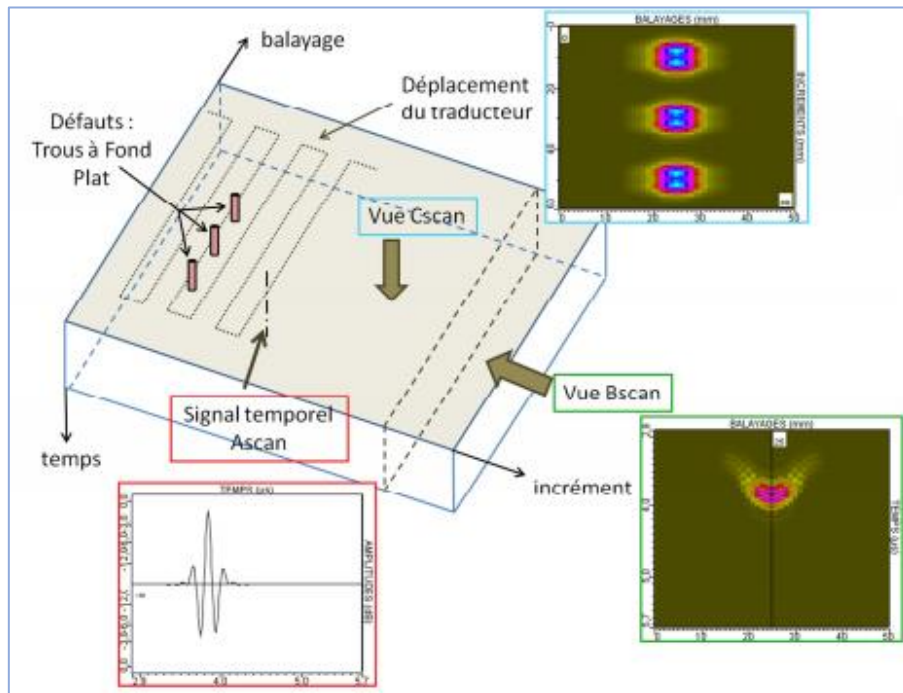


Figure III. 19. Représentation des données ultrasonores [40]

III.3.5 Conclusion

Dans ce chapitre ont été présentés les principaux aspects du contrôle non-destructif par ultrasons. Dans le secteur de la production de l'énergie, l'exigence est croissante en termes de détection, de localisation et de caractérisation des défauts. Raison pour laquelle, le choix de la meilleure méthode d'inspection ainsi que l'élaboration de procédures adaptées à la complexité des assemblages est une nécessité.

Ainsi, dans le cadre du contrôle au contact d'assemblages de géométrie complexe que l'on retrouve dans les tuyauteries de turbines à gaz, les transducteurs conventionnels présentent des performances très limitées en termes de détection, de localisation et de caractérisation des défauts.

Bien que toutes les méthodes non-destructives dépendant du niveau d'expertise de l'opérateur, cette exigence est amplifiée dans le cas des ultrasons conventionnels. Il s'avère même que dans

certain cas, il soit nécessaire de vérifier les résultats obtenus par radiographie. Cependant, les nouvelles technologies d'ultrasons multiéléments apportent un plus considérable à la méthode conventionnelle surtout en termes d'acquisition et d'interprétation de données.

CHAPITRE IV : SIMULATION POUR L'ÉTUDE DE LA CONTRÔLABILITÉ PAR ULTRASONS

Chapitre IV : Simulation pour l'étude la contrôlabilité par ultrasons

IV.1 Introduction

Comme mentionné dans les précédents chapitres, il est nécessaire pour vérifier la contrôlabilité par ultrasons des différents assemblages constituant les tuyauteries et auxiliaires de turbines à gaz, d'entreprendre une démarche de justification des performances des techniques alternatives proposées à l'étude. Cette démarche est élaborée en prenant en considération les différents facteurs influençant la contrôlabilité.

Dans le cadre de cette étude, les deux facteurs pouvant éventuellement avoir un impact sur la contrôlabilité par ultrasons sont la géométrie des assemblages ainsi que la structure des soudures multi-passes austénitiques. Le premier facteur est étudié par voie de simulation tandis que le second point devant impérativement être étudié par voie expérimentale n'a pas été abordé dans cette étude.

IV.2 Démarche de justification des performances du contrôle ultrasons

La démarche telle qu'elle a été conjointement élaborée en collaboration avec l'Institut de Soudure est comme suit :

1^{ère} étape – Étude préliminaire des potentielles méthodes alternatives au contrôle par radiographie industrielle standard :

Cette étude qui est brièvement détaillé dans le chapitre I a porté sur l'étude des différentes méthodes présentant des potentialités en matière de substitution à la radiographie industrielle standard.

En effet, 69% des assemblages présentés ont été déterminés comme contrôlables par ultrasons, tandis que 31% demeurent contrôlables uniquement par radiographie. Cependant, parmi ces tuyauteries et suivant les spécifications prescrites par le constructeur, seulement 60% figuraient parmi les assemblages critiques à contrôler.

Cette étude a permis d'appuyer le choix du contrôle par ultrasons multiéléments comme présentant le plus d'avantages étant donné les configurations des assemblages étudiés. En outre, elle a également permis de mettre en exergue deux potentielles contraintes pouvant influencer la contrôlabilité des assemblages par ultrasons : la géométrie et le type de matériau.

Toutes ces données permettent d'orienter la suite de l'étude selon deux volets. Un premier volet par voie de simulation qui englobe l'étude de la géométrie et des performances des contrôles mono-élément et multi-éléments, ainsi qu'un second volet expérimental qui étudie la faisabilité du contrôle en prenant en compte l'anisotropie du matériau. Pour ce faire une opération préliminaire est nécessaire. Elle est décrite dans l'étape ci-dessous.

2^{ème} étape – Détermination des spécifications des assemblages à contrôler :

Cette étude a permis de lister l'ensemble des assemblages à contrôler au niveau des tuyauteries et auxiliaires de turbines à gaz, et d'en inventorier les spécifications suivantes :

1. Types de configurations (bout à bout, soudure d'angle, piquage) ;
2. Géométries des configurations (tube/tube, tube/bride, tube/coude, etc) ;
3. Dimensions des assemblages (diamètre, épaisseur) ;
4. Types de matériaux constituant les assemblages ;
5. Type d'inspection telle que préconisée par le constructeur ;
6. Type de métal d'apport.

Description	Weld joint	Buttweld	UW	ERT	SP
PIPE 10", Sch 40S	ASME B16.9 LONG RADIUS 45 ELBOW	Buttweld	250	273,1	\$
	ASME B16.9 SHORT RADIUS BUTTWELD ELBOW	Buttweld			
	ASME B16.9 BUTTWELD STRAIGHT TEE	Buttweld			
ASME B16.9 LONG RADIUS 45 ELBOW	THREDOLET CLASS 3000	Fillet weld	250	273,1	\$
	ASME B16.9 SHORT RADIUS BUTTWELD ELBOW	Buttweld			
BW REDUCER, CONCENTRIC	ASME B16.9 BUTTWELD STRAIGHT TEE	Buttweld	300	323,9	\$
PIPE 12", Sch 40S	SLIP ON FLG, RF, 300 LB	Fillet weld	300	323,9	\$
	BW REDUCER, CONCENTRIC	Buttweld			
PIPING, CLG & SEG AIR					
PIPE 12", Sch 40S	FLG 10-300# RFSD F304L	Fillet weld			
	ASME B16.9 BUTTWELD REDUCING TEE	Buttweld	300	323,9	
	ASME B16.9 BUTTWELD REDUCING TEE	Buttweld			
PIPE 10", Sch 40S	FLG 10-300# RFSD F304L	Fillet weld			
	ASME B16.9 BUTTWELD REDUCING TEE	Buttweld	250	273,1	9,27 304/304L AE-L 100% X-Ray
	THREDOLET CLASS 3000	Fillet weld			
PIPE 8", Sch 40S	FLG 8-300# RFSD F304L	Fillet weld			
	ASME B16.9 BUTTWELD REDUCING TEE	Buttweld	200	218,1	8,18 304/304L AE-L 100% X-Ray
	THREDOLET CLASS 3000	Fillet weld			
PIPING, CLG & SEG AIR					
PIPE 8", Sch 40S	ASME B16.9 SHORT RADIUS BUTTWELD ELBOW	Buttweld			
	ASME B16.5 SLIP-ON PIPE FLANGE	Fillet weld	200	218,1	8,18 304/304L AE-L 100% X-Ray
	THREDOLET CLASS 3000	Fillet weld			
PIPE 10", Sch 40S	THREDOLET CLASS 3000	Fillet weld	250	273,1	9,27 304/304L AE-L 100% X-Ray
	ASME B16.5 SLIP-ON PIPE FLANGE	Fillet weld			
	THREDOLET CLASS 3000	Fillet weld			
PIPING, CLG & SEG AIR					
PIPE 10", Sch 40S	FLG 10-300# RFSD F304L	Fillet weld			
	ASME B16.9 BUTTWELD STRAIGHT TEE	Buttweld	250	273,1	9,27 304/304L AE-L 100% X-Ray
	THREDOLET CLASS 3000	Fillet weld			
PIPE 10", Sch 40S	THREDOLET CLASS 3000	Fillet weld			
	B16.9 BUTTWELD REDUCING TEE	Buttweld	125	143	6,55 304/304L AE-L 100% X-Ray
	THREDOLET CLASS 3000	Fillet weld			
PIPE 10", Sch 40S	SHORT RADIUS BUTTWELD ELBOW	Buttweld			
	B16.9 BUTTWELD REDUCING TEE	Buttweld	250	273,1	9,27 304/304L AE-L 100% X-Ray
	THREDOLET CLASS 3000	Fillet weld			
PIPE 10", Sch 40S	FLANGE, JACKING	Fillet weld			
	FLANGE, JACKING	Fillet weld			

Figure IV. 1. Listing des assemblages à contrôler au niveau des tuyauteries et auxiliaires de turbine à gaz produite par GEAT

Toutes ces informations relatives aux assemblages servent de base de données pour l'étude expérimentale permettant de vérifier la contrôlabilité par ultrasons d'assemblages en acier austénitique. Cette étude nécessite une étude préliminaire par voie de simulation décrite dans le point suivant.

3^{ème} étape – Étude par voie de simulation :

La simulation concerne uniquement les assemblages en bout à bout et permet l'étude du champ ultrasonore émis par un transducteur dans le but de vérifier les performances du contrôle ultrasonore en suivant les étapes suivantes :

- 1) La détermination des paramètres des techniques de contrôle adaptées aux assemblages présentés ci-dessus :

L'étude porte sur la caractérisation des techniques de contrôle appropriées et des transducteurs à employer en mono-élément et multi-éléments sur six configurations représentatives de plusieurs couples diamètre/épaisseur. Pour les besoins de ce paramétrage, il est nécessaire dans

cette première étape de considérer les assemblages de type tube/tube et donc qui ne présentent aucune limitation géométrique.

- 2) Étude de la couverture de zone à inspecter (prise en compte des limitations géométriques) :

Dans un second temps, un exemple présentant une limitation géométrique comme un assemblage de type tube sur pièce de forme est sélectionné afin d'évaluer les performances du contrôle en termes de couverture de zone.

- 3) Vérification des performances des techniques du contrôle ultrasons mono et multiéléments en termes de détection et de dimensionnements de défauts. Cet aspect de l'étude n'est pas abordé dans la présente étude.

La présente étude englobe la 2^{ème} ainsi qu'une partie de la 3^{ème} étape qui servent de base importante pour les étapes restantes. Les 4^{ème}, 5^{ème}, 6^{ème} étapes correspondent respectivement à la validation des résultats par voie expérimentale, la définition des équipements et la rédaction des procédures de contrôle ne rentrent pas dans le cadre de cette étude.

IV.3 Paramètres influençant la contrôlabilité

IV.3.1 Impact de la géométrie sur le contrôle

La géométrie est un des facteurs les plus importants influant sur la contrôlabilité. En effet, elle peut éventuellement limiter à l'opérateur l'accès aux zones à contrôler, car il ne peut facilement manœuvrer le palpeur sur les surfaces et inspecter l'objet. Ce qui entraîne des erreurs commises par l'opérateur car la complexité de la géométrie rend le contrôle difficile à effectuer. Un autre effet de la géométrie est qu'elle peut générer des échos qui peuvent pousser à confondre entre ondes réfléchies, indications et défauts. Ce qui fausse les résultats et induit en erreur l'opérateur qui peut même ne détecter aucun défaut dans l'objet inspecté. Le choix du traducteur dépend également de l'épaisseur de l'assemblage à contrôler. Pour des épaisseurs inférieures à 8mm des palpeurs spéciaux sont généralement requis pour le contrôle.

Le contrôle ultrasonore est adapté au contrôle d'épaisseurs soudées comprises entre 6 et 100 mm et grâce aux nouvelles technologies ultrasons, les paramètres de l'inspection peuvent être ajustables pour adapter le contrôle à des épaisseurs en dehors de cette fourchette.

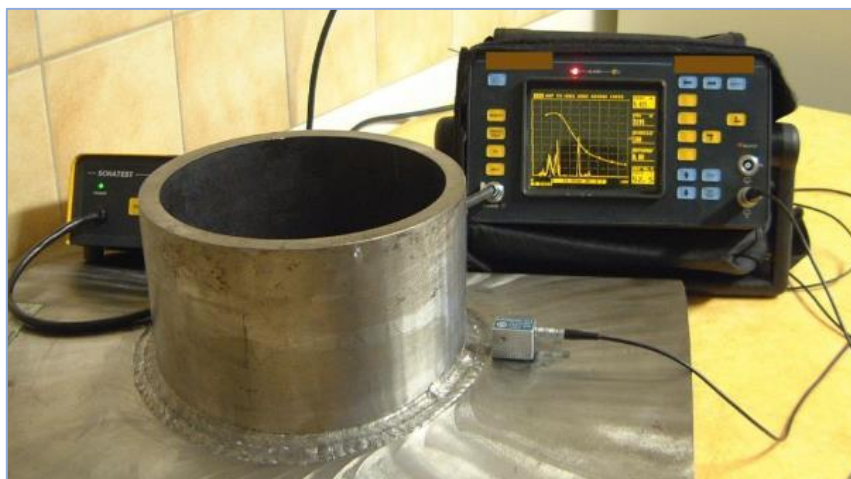


Figure IV. 2. Contrôle ultrasonore d'un assemblage à géométrie complexe [41]

IV.3.2 Impact du matériau

Les matériaux peuvent posséder des propriétés qui déforment et atténuent le faisceau ultrasonore, comme dans le cas des soudures en acier austénitique. Ces matériaux nécessitent des dispositifs particuliers pour la mise en œuvre d'un contrôle ultrasonore. La déformation des faisceaux peut générer un rapport signal sur bruit important et mener sur une fausse piste l'opérateur, l'empêchant ainsi de repérer les défauts. Les opérateurs ont donc besoin d'une qualification et de compétences particulières pour assurer le contrôle ultrasonore de tels types de matériaux.

IV.3.3 Performance de l'opérateur

La qualification des opérateurs a un impact significatif sur les résultats des tests. Comme pour le contrôle radiographique, l'interprétation des résultats nécessite une certaine expertise car les échos et les bruits de fond peuvent rendre le diagnostic difficile à réaliser. Le contrôle US repose en partie sur les performances de l'opérateur, son degré de vigilance tout au long du test d'inspection. La manœuvre du traducteur le long de la surface inspectée selon certains angles particuliers, lecture des résultats sur l'écran du dispositif, tous les paramètres dépendent de l'expertise de l'opérateur.



Figure IV. 3. Mise en œuvre d'un contrôle par ultrasons

Afin d'éviter toute mauvaise interprétation et erreur, un temps raisonnable pour le contrôle doit être déterminé au préalable et de permettre à l'opérateur autant de pauses entre chaque inspection. Il est recommandé que chaque test soit répété plusieurs fois et l'utilisation de dispositif semi-automatique doit être envisagée.

IV.4 Paramètres variables dans le CND ultrasons

Les paramètres variables du contrôle sont les caractéristiques des ondes ultrasonores ainsi que les propriétés du matériau à inspecter. Afin d'obtenir des résultats les plus précis, l'équipement doit mis au point conformément aux variables citées ci-dessous [42] :

- *Fréquence* : le contrôle ultrasons s'effectue généralement à des fréquences situées entre 2MHz et 10MHz ;
- *Sensibilité de détection* : capacité de l'équipement à identifier de petites indications. La probabilité de détection de défauts de petites dimensions augmente avec de hautes fréquences (courtes longueurs d'ondes) ;
- *Résolution* : capacité de l'équipement à identifier simultanément si une discontinuité existe sur la surface ou position latérale ;
- *Pénétration* : est la distance parcouru par l'onde ultrasonore. La pénétration diminue avec l'augmentation de la fréquence et diminue également dans le cas où il y a présence d'une structure de grains grossiers.
- *Propagation du faisceau/angle d'ouverture du faisceau* : est la divergence d'un faisceau ultrasons. En diminuant la fréquence, le faisceau ultrasonore dévie de la trajectoire idéale. Les paramètres du traducteurs comme le diamètre, la fréquence, la sensibilité, la résolution et la focalisation affectent la propagation du faisceau.

IV.5 Défauts et critères d'acceptabilité

Conformément à l'ASME B31.3, Process Piping Code, les catégories auxquelles appartiennent les fluides circulant dans les tuyauteries à contrôler dans le cadre de cette étude étant « Normal Fluid Service » ou « Category D Fluid Service » sont celles présentant le moins de risque en service. Ces fluides ne sont ni inflammables ni toxiques, ne sont pas nocifs pour les tissus du corps humain, et sont à une pression inférieure à 1035 kPa (150psi) selon une plage de température allant de -29°C à 186°C. Les soudures appartenant à ces catégories doivent être 100% examinés visuellement pour vérifier la conformité aux exigences de l'ASME B31.3.

Toute indication est inacceptable si l'amplitude enregistrée à la suite du contrôle ultrasons dépasse le niveau de référence établi par l'ASME B&PV Code, Section V, Article 5. Lorsque les signaux présentent des indications susceptibles de désigner des fissures, un manque de fusion ou un manque de pénétration, alors ces dernières ne sont pas acceptables.

IV.6 Principe de fonctionnement et rôle des simulations

Conformément aux normes de qualité et de satisfaction clients, et faisant face à une multitude de nouvelles contraintes et conditions notamment en matière d'innovation technologique, les besoins de l'industrie sont aujourd'hui en constante mouvance. C'est la raison pour laquelle l'ingénierie se dote d'outils adéquats alliant performance et fiabilité permettant l'allègement de ces contraintes.

La simulation est un outil présentant un avantage concurrentiel du fait de son accessibilité, efficacité, coût et qualités des résultats. Ce moyen d'évaluation est fréquemment utilisé dans le cadre d'études préliminaires portant sur l'analyse comportementale d'un système avant son implémentation. De plus, à partir d'une simple évaluation, des prévisions peuvent être faites quant au comportement du produit avant sa mise en service.

En raison de la complexité croissante des environnements dans lesquels sera éventuellement employé le produit, il est des plus intéressants d'anticiper les besoins qui en découlent.

La simulation l'emporte sur les méthodes traditionnelles car elle permet une acquisition des résultats à la fois complète et rapide avec une précision nettement plus importante. En outre, l'ingénierie peut intégrer différentes caractéristiques et variations de conception tout en mesurant un plus grand nombre de facteurs suivant un plus grand nombre de situations corrélées avec l'utilisation réelle du dispositif.

La simulation s'appuie sur l'élaboration de modèles mathématiques régis par des codes permettant de reproduire avec des approximations suffisamment bonnes, les phénomènes physiques souhaités. L'étude dans son ensemble n'est donc que la superposition de plusieurs scénarios suivant les hypothèses conditionnant un environnement de travail simplifié, et rapprochant aux mieux ce dernier de la réalité.

Dans le domaine du contrôle non-destructif, la simulation numérique a naturellement trouvé son rôle dans les processus de prise de décisions relatives à la production, et en particulier à l'aspect qualité. Elle permet la vérification mais aussi la mise en place de procédures de contrôle, ainsi que l'optimisation de plusieurs paramètres impliquant la contrôlabilité d'une panoplie d'assemblages par les méthodes de contrôles les mieux adaptées. Que l'étude concerne la contrôlabilité d'une pièce ou d'un assemblage ou la mise au point de solutions de contrôles complexes, l'intérêt des simulations numériques réside dans la réduction des coûts liés à l'inspection.

IV.7 Aperçu sur le simulateur – Logiciel CIVA

Il existe de nombreux logiciels commerciaux permettant la réalisation d'étude de la contrôlabilité d'une méthode par voie de simulation. Certains logiciels comme COMSOL Multiphysics reposent sur des codes d'éléments finis possédant des modules de simulations acoustiques, piézoélectriques, et de mécaniques du solide qui peuvent être combinés pour le contrôle non destructif.

D'autres plateformes dites « multi-techniques » comme CIVA reposent sur des codes de simulation semi-analytiques qui possèdent un atout de taille : une rapidité d'acquisition de données bien supérieure à celle accordée par des simulations par éléments finis.

Afin d'optimiser et d'évaluer les performances des procédés de contrôle, la plateforme CIVA offre tout un arsenal de modules de simulation, d'imagerie et d'analyse adapté à plusieurs méthodes de contrôles non destructifs principalement classés selon trois catégories : les Ultrasons (UT), les Courants de Foucault (CF) et la Radiographie (RT).

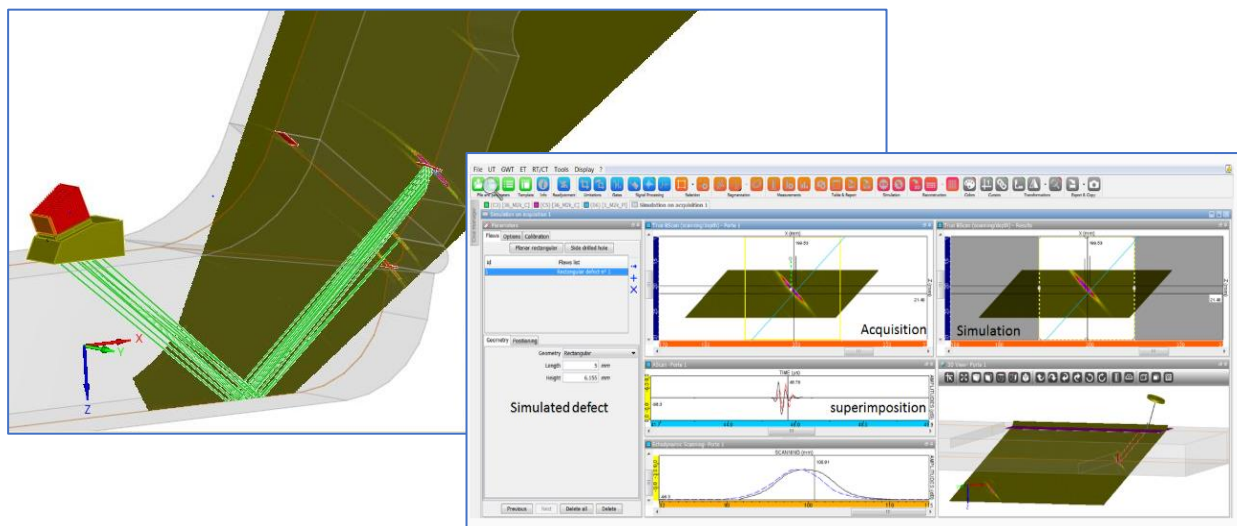


Figure IV. 4. Plateforme logicielle CIVA

Capteur, configuration et géométrie, matériaux et propriétés, types de défauts... En intégrant l'ensemble de ces paramètres/facteurs influents/affectant sur le contrôle dans la simulation, il y a possibilité alors de minimiser le nombre de maquettes à réaliser afin de vérifier expérimentalement la contrôlabilité, mais également de maximiser la fiabilité du contrôle par l'évaluation de ses performances. De plus, CIVA permet le calcul des courbes de probabilités de Détection (POD).

Le logiciel CIVA est sollicité dans divers domaines dont le nucléaire, l'aéronautique, la métallurgie, la pétrochimie, l'énergie, etc.

IV.7.1 Choix et caractérisation des traducteurs

IV.7.1.1 Les sondes multiéléments et leurs caractéristiques dimensionnelles



Figure IV. 5. Sondes multiéléments [43]

Les sondes multiéléments selon leurs applications possèdent plusieurs caractéristiques, dont :

- *Le type* : la plupart des sondes multiéléments utilisées sont des sondes d'angle conçues pour un appui sur sabot en plastique ou un sabot droit. Des sondes de contact direct et d'immersion sont également envisageables si le contrôle en exige.
- *La Fréquence* : Selon les applications, le contrôle ultrasons s'effectue généralement à des fréquences situées entre 2MHz et 10Mhz, raison pour laquelle la plupart des sondes multiéléments sont disponibles dans cette fourchette, bien que des sondes avec des fréquences supérieures et inférieures soient également disponibles.
- *Nombre d'éléments du réseau* : plus il y a d'éléments constituant la sonde multiélément, plus les capacités de focalisation et de déflexion sont importantes et plus la zone de couverture sera grande. Le nombre de ces éléments va de 16 à 256.
- *Taille des éléments* : plus la largeur des éléments est réduite, plus la déflexion du faisceau en est améliorée.

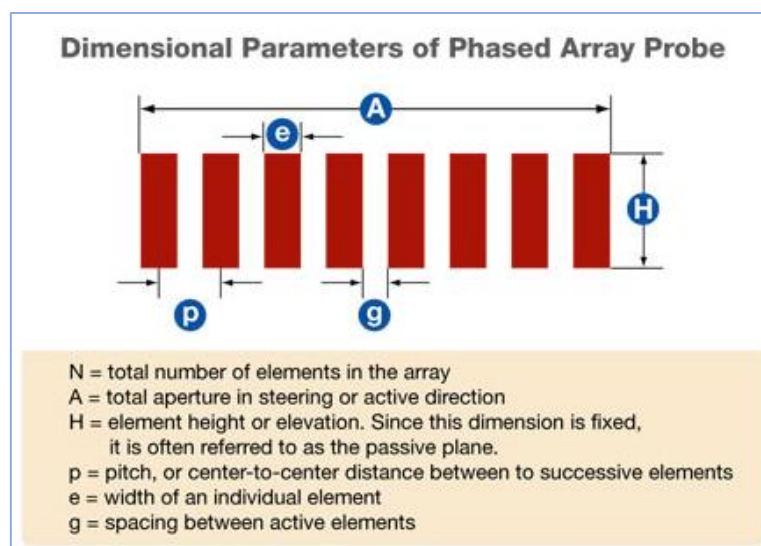


Figure IV. 6. Paramètres dimensionnels d'une sonde multi-éléments [43]

En tenant compte des dimensions des assemblages représentatifs sélectionnées à l'étude, et en se basant sur un retour d'expérience de l'Institut de Soudure, un transducteur conventionnel montable ainsi qu'un transducteur Phased Array (multiéléments) avec sabot ont été choisis.

Les fréquences trop élevées n'étant pas adaptées à l'inspection de l'acier inoxydable, des transducteurs de fréquence 5MHz ont été préférés. De plus, du fait d'assemblages de faibles épaisseurs, et de géométries complexes, des capteurs de petites dimensions ont été favorisés.

Le champ acoustique d'une sonde est divisé en deux zones. On distingue le champ proche et le champ lointain. Le champ proche représente une zone proche de la sonde où la pression acoustique passe par une série de maximums et de minimums.

Le champ lointain est une zone au-delà de la zone du champ proche où la pression sonore diminue progressivement jusqu'à zéro à mesure que le diamètre du faisceau se dilate et que son énergie se dissipe.

La tache focale est définie comme la zone du faisceau ultrasonore d'un transducteur focalisé où la pression acoustique ne chute pas et reste supérieure à un seuil relié à sa valeur maximale.

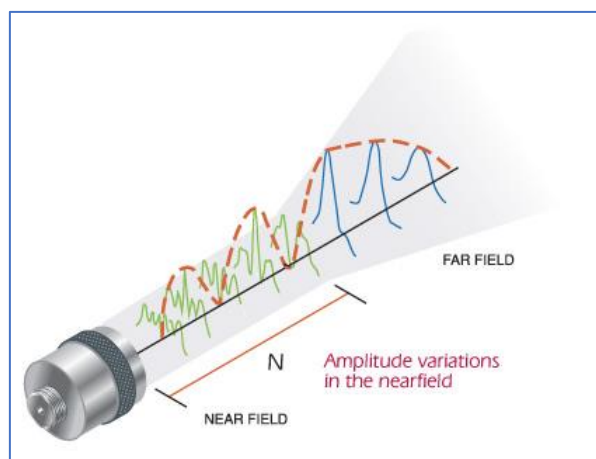


Figure IV. 7. Champ proche (Near Field) et champ lointain (Far Field)

Ces deux transducteurs ont été modélisés dans un premier temps, et les caractéristiques citées précédemment ont été étudiées.

IV.7.1.2 Champ proche

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV. 1 Caractéristiques des faisceaux associés aux transducteurs mono-élément et PA

	Angle de réfraction	Champ proche en mm
Monoélément	60	9.5
Phased Array	60	12.8

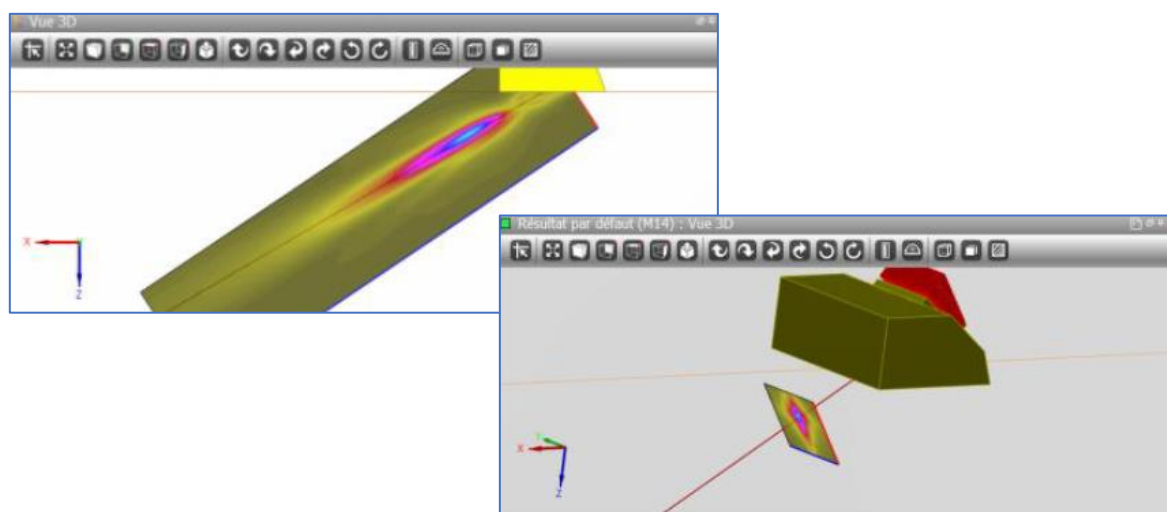


Figure IV. 8. Modélisation du faisceau émis par le traducteur Phased Array

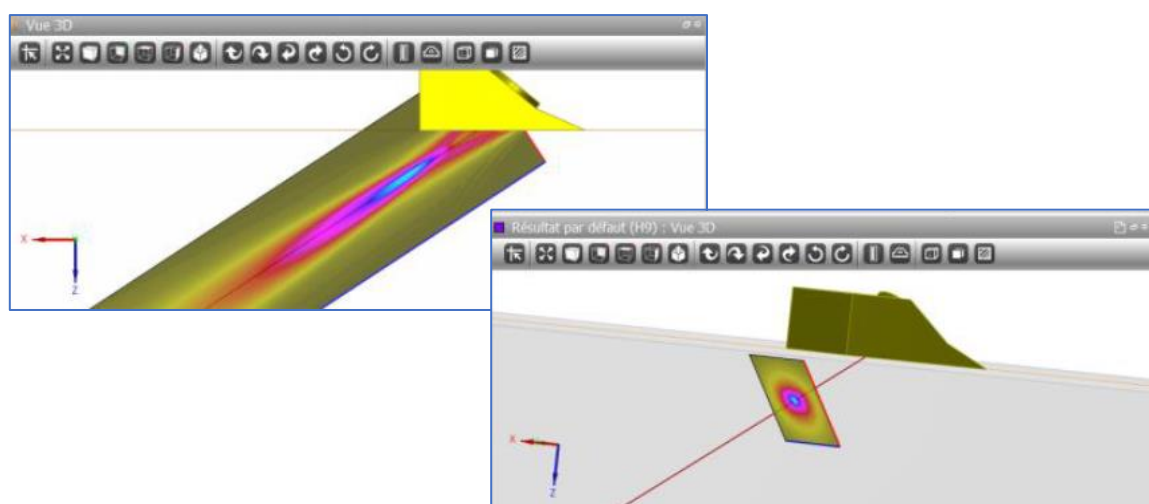


Figure IV. 9. Modélisation du faisceau émis par le traducteur conventionnel

IV.7.1.2.1 Interprétation des résultats

On constate que les valeurs des champs proches pour le Phased Array sont plus importantes que pour le mono-élément. Néanmoins, la technologie multiéléments octroie la possibilité de réduire cette zone de champ proche.

IV.7.1.3 Intérêt du paramètre de focalisation pour la mise en œuvre du Phased Array

La profondeur de focalisation est ajustable en fonction de l'épaisseur de l'assemblage contrôlée par modification des lois de retards.

Une modélisation du faisceau focalisé à différentes profondeurs a été effectuée :

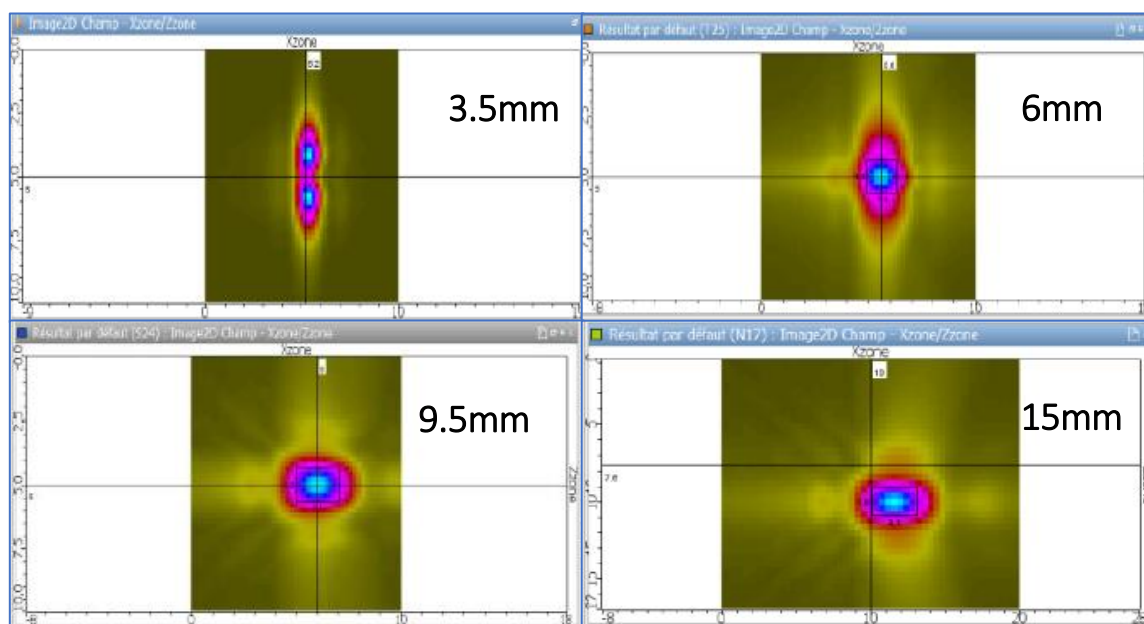


Figure IV. 10. Modélisation du faisceau focalisé émis par le transducteur PA à différentes profondeurs

Une modélisation des tâches focales du faisceau à différentes profondeurs a été effectuée :

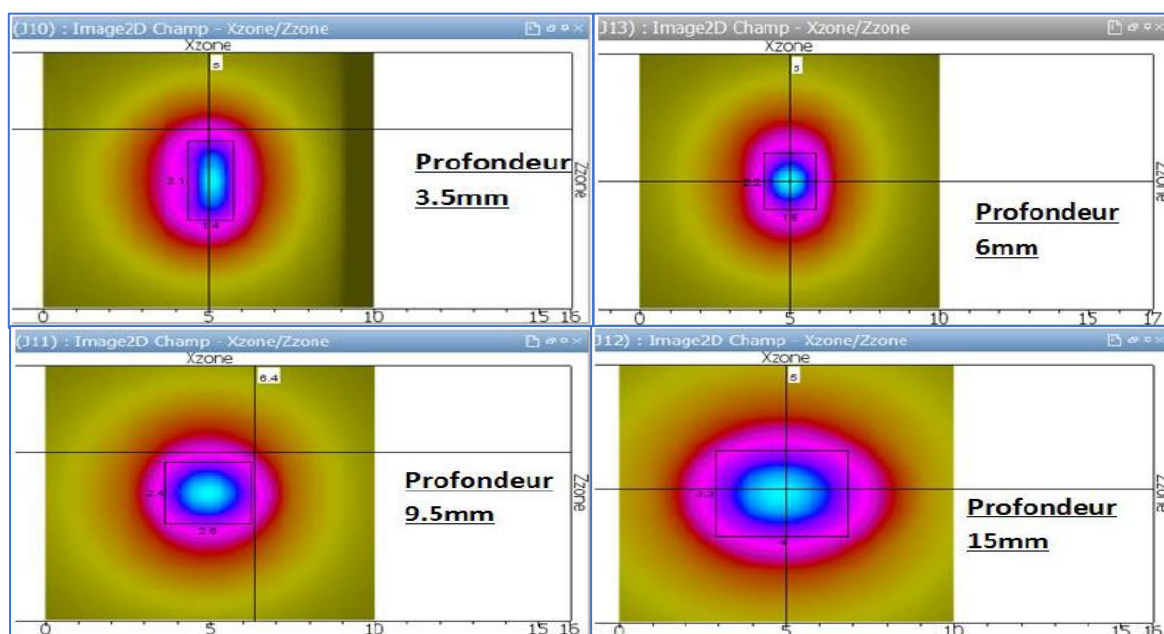


Figure IV. 11. Modélisation du faisceau focalisé émis par le transducteur conventionnel à différentes profondeurs

IV.7.1.3.1 Interprétation des résultats

On constate qu'en termes de dimension, les taches focales associées aux faisceaux focalisés du traducteur PA sont plus affinées que celles associées aux faisceaux mono-élément.

Il est à prendre en considération que plus la tache focale est volumineuse moins de détails seront acquis en ce qui concerne les petits indications. Le mono-élément aura donc tendance à grossir et surestimer les dimensions des petites indications ou même d'indiquer un défaut qui n'en est pas un réellement.

Le PA quant à lui permet grâce à la focalisation une acquisition de données avec plus de précision.

Profondeur (mm)

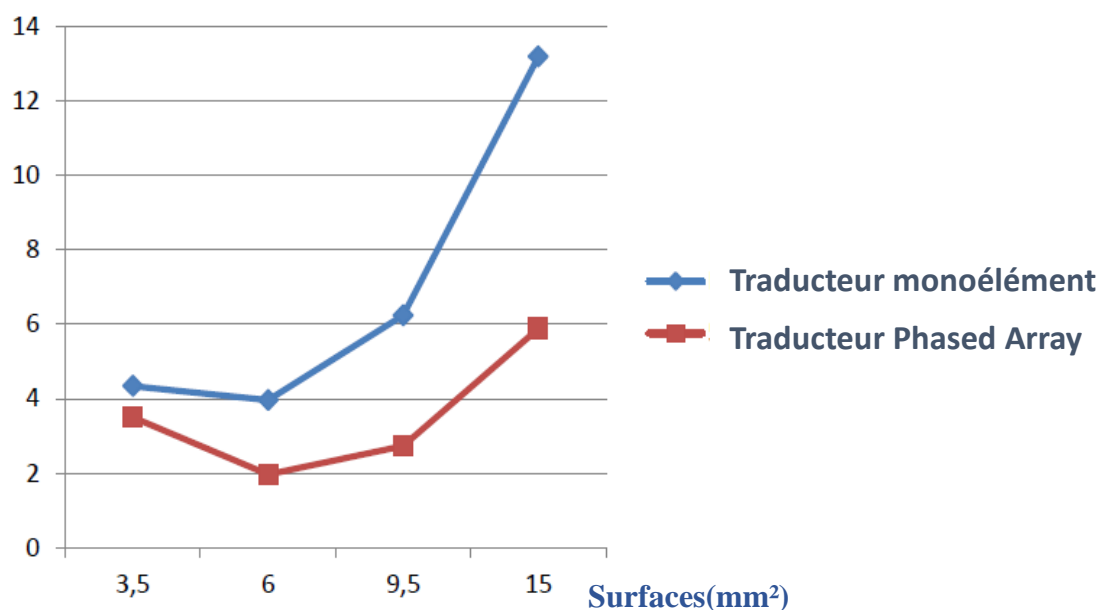


Figure IV. 12. Surfaces (mm²) des tâches focales associées aux faisceaux des traducteurs mono-élément et PA en fonction de la profondeur

IV.7.1.4 Conclusion

D'après la modélisation numérique, la mise en œuvre d'un contrôle PA présente une meilleure résolution, et donc une précision supérieure à celle du contrôle US conventionnel.

IV.7.2 Etude de la couverture de zone par mono-élément et multi-éléments

Six configurations représentatives de l'ensemble des assemblages en bout à bout de type tube sur tube ont été sélectionnées selon les caractéristiques dimensionnelles figurant dans le tableau suivant :

Tableau IV. 2 Caractéristiques dimensionnelles des configurations représentatives

Dext(mm)	Ep(mm)
33,4	3,38
60,3	3,91
88,9	5,49
114,3	6,02
168,3	7,11
273,1	9,27

Dans un premier temps et pour les besoins de cette simulation, aucune limitation géométrique n'a été prise en considération. En revanche, à des fins de comparaison des couvertures de zone d'assemblages à géométries complexes, un exemple d'inspection d'assemblages de type tube sur coude présentant une limitation d'accès que d'un seul côté du cordon de soudure a été étudié en Phased Array.

La nuance du matériau étant austénitique (304L), la simulation peut s'avérer difficile. Cependant, compte tenu des faibles épaisseurs à contrôler ($< 15mm$), les déformations liées à l'anisotropie du matériau (division/déviaton du faisceau ultrasonore) sont moindres. C'est pourquoi, pour les besoins de la simulation les soudures sont considérées isotropes.

Cette simulation a permis d'étudier la couverture de zone en mono-élément et multi-éléments des assemblages listés dans le tableau ci-dessus.

La zone d'inspection représente 100% de la zone fondue et de la zone affectée thermiquement. Les caractéristiques de la zone à inspecter sont telles que sur la figure ci-dessous.

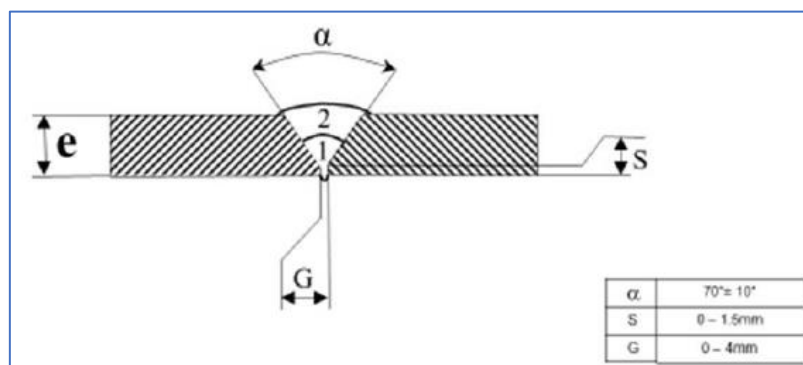


Figure IV. 13. Géométrie de la zone à inspecter

Par le biais de cette simulation a également été permis la détermination des paramètres de contrôles en mono et multi-éléments, tels que :

1. *Balayage sectoriel :*

Le balayage sectoriel ou S-Scan est un mode d'imagerie propre aux appareils multiéléments. Il permet d'effectuer une déflexion électronique qui se base sur la modification des lois de retard calculées afin d'orienter l'incidence du faisceau selon plusieurs angles. Ce mode possède l'avantage de contrôler des pièces ou des assemblages présentant des zones à faible encombrement, car il permet de l'utilisation d'un seul capteur et rend possible une inspection simultanée sous plusieurs angles pour des inspections nécessitant plusieurs capteurs en ultrasons conventionnels.

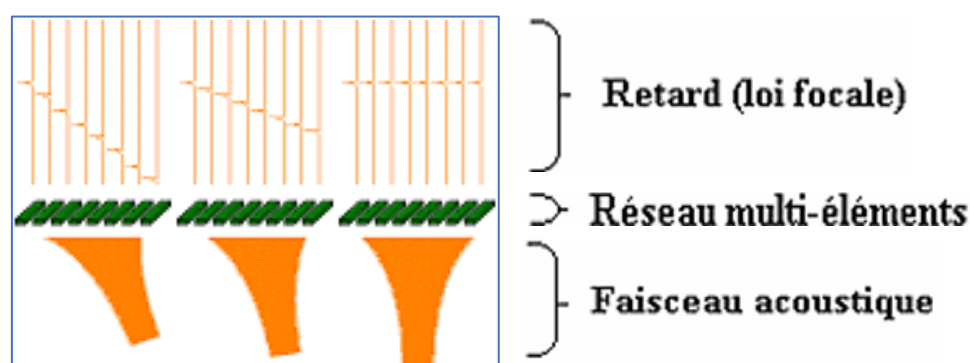


Figure IV. 14. Illustration d'un balayage sectoriel

Cette caractéristique du Phased Array trouve son utilité dans la visualisation de défauts en offrant une imagerie dynamique permettant d'observer au mieux les défauts, en particulier les indications à orientations aléatoires.

2. *Distance face avant sabot/axe soudure :*

Distance optimale entre la face avant du sabot et l'axe du cordon de soudure telle que l'inspection puisse couvrir toute la zone à contrôler. En d'autres termes, l'emplacement auquel doit être déposé le transducteur sur la surface du tube afin de contrôler au mieux le cordon de soudure.

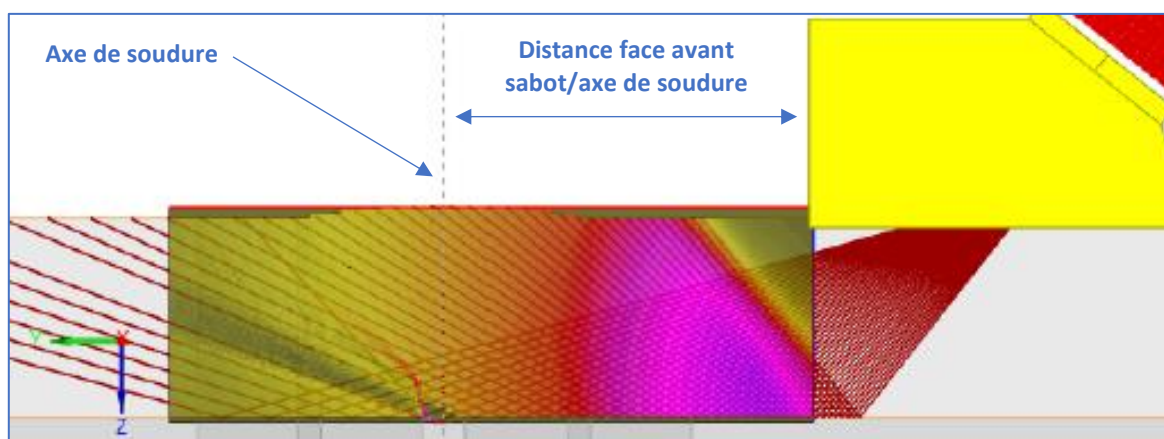


Figure IV. 15. Distance face avant sabot/axe de soudure

3. Profondeur de focalisation :

La focalisation du faisceau peut être effectuée électroniquement de façon à faire converger l'énergie acoustique à une profondeur souhaitée.

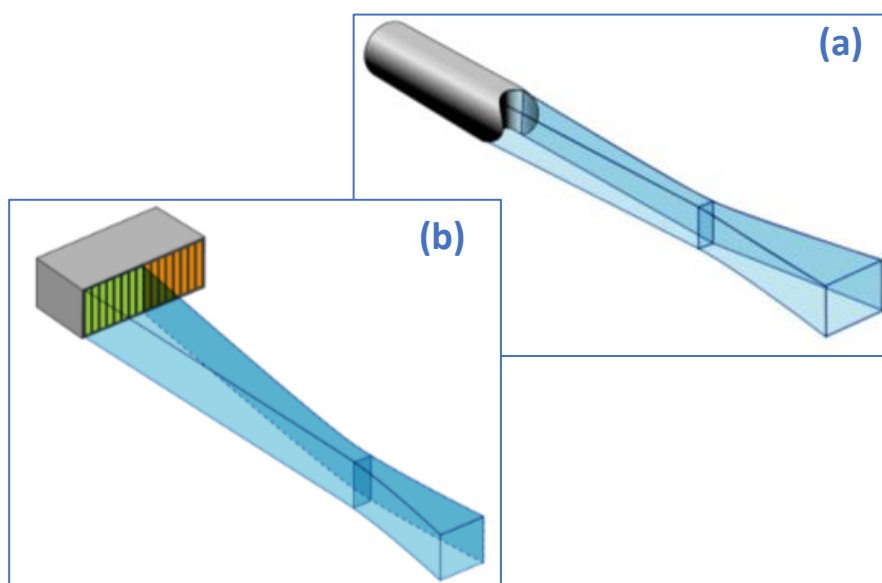


Figure IV. 16. Exemples de Focalisation en mono-élément et PA

(a) Focalisation en monoélément ;

(b) Focalisation en multiéléments.

Ces paramètres ont été déterminés tels que la couverture de toute la zone à inspecter soit possible en un seul passage. Ils restent néanmoins ajustables en fonction des limitations géométriques imposées par les assemblages ainsi que le type de matériau.

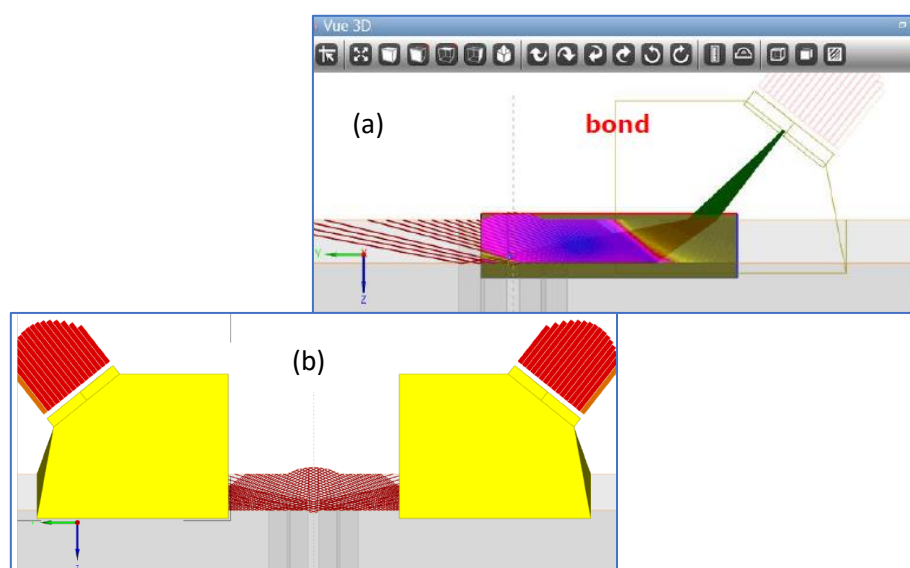


Figure IV. 17. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN33.4mm

- (a) Traducteur Phased Array (multiéléments) ;
- (b) Traducteur conventionnel.

Tableau IV. 3. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN33.4mm

Balayage sectoriel	55°-80° par pas de 1°
Distance face avant sabot/axe soudure	8mm
Focalisation	5mm

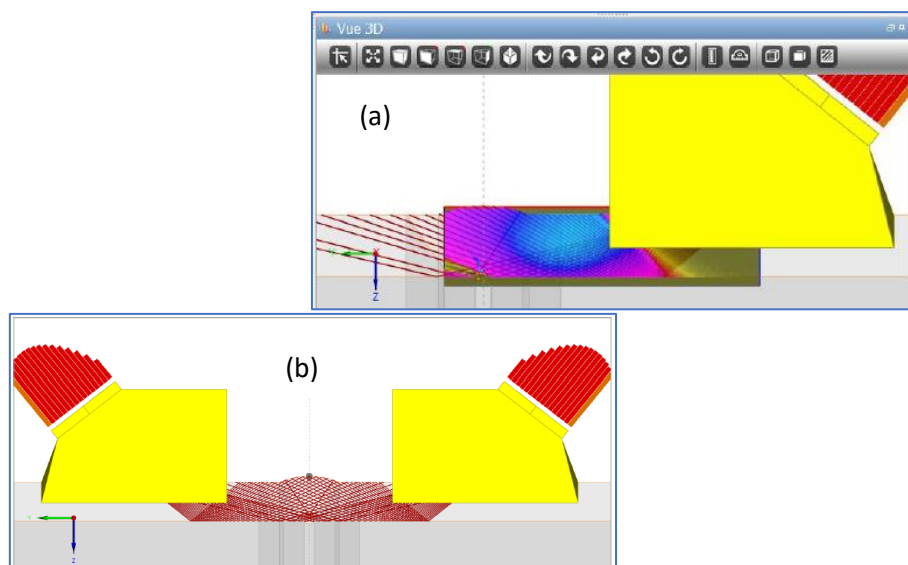


Figure IV. 18. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN60.3mm

(c) Traducteur Phased Array ;

(d) Traducteur conventionnel.

Tableau IV. 4. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN60.3mm

Balayage sectoriel	49°-78° par pas de 1°
Distance face avant sabot/axe soudure	8mm
Focalisation	5mm

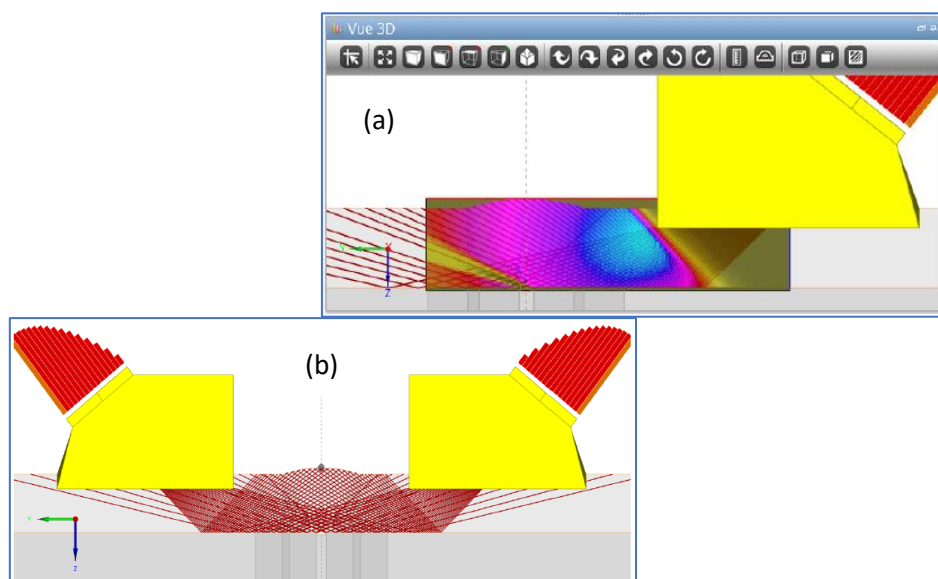


Figure IV. 19. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN88.9mm

(e) Traducteur Phased Array ;

(f) Traducteur conventionnel.

Tableau IV. 5. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN88.9mm

Balayage sectoriel	42°-78° par pas de 1°
Distance face avant sabot/axe soudure	9mm
Focalisation	7.5mm

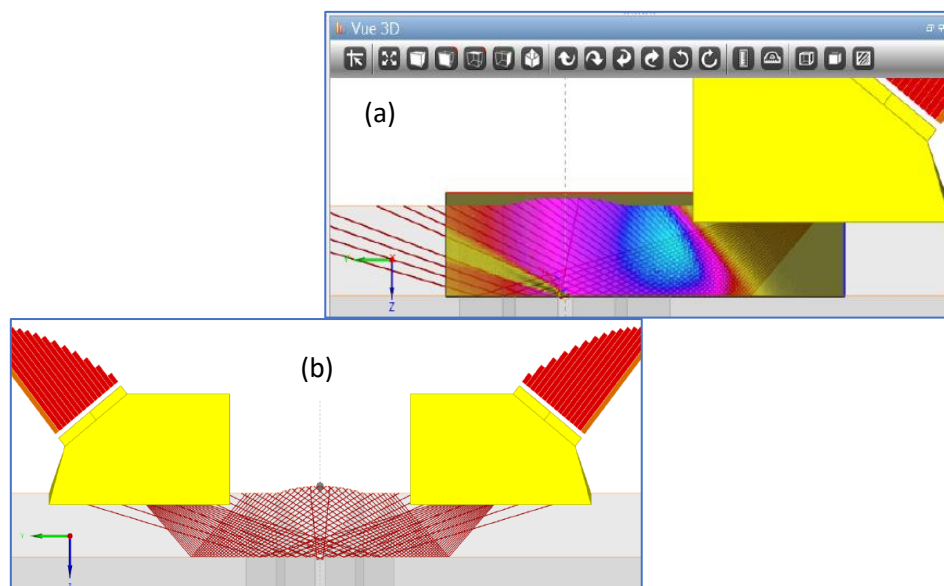


Figure IV. 20. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN114.3mm

(g) Traducteur Phased Array ;

(h) Traducteur conventionnel.

Tableau IV. 6. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN114.3mm

Balayage sectoriel	36°-75° par pas de 1°
Distance face avant sabot/axe soudure	9mm
Focalisation	9mm

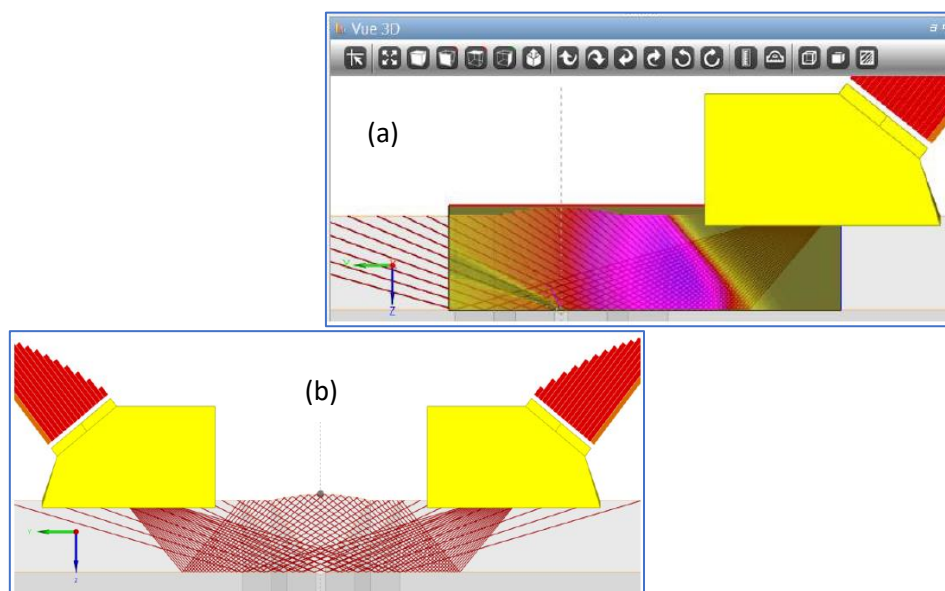


Figure IV. 21. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN168.3mm

- (i) Traducteur Phased Array ;
- (j) Traducteur conventionnel.

Tableau IV. 7. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN168.3mm

Balayage sectoriel	35°-75° par pas de 1°
Distance face avant sabot/axe soudure	11mm
Focalisation	10mm

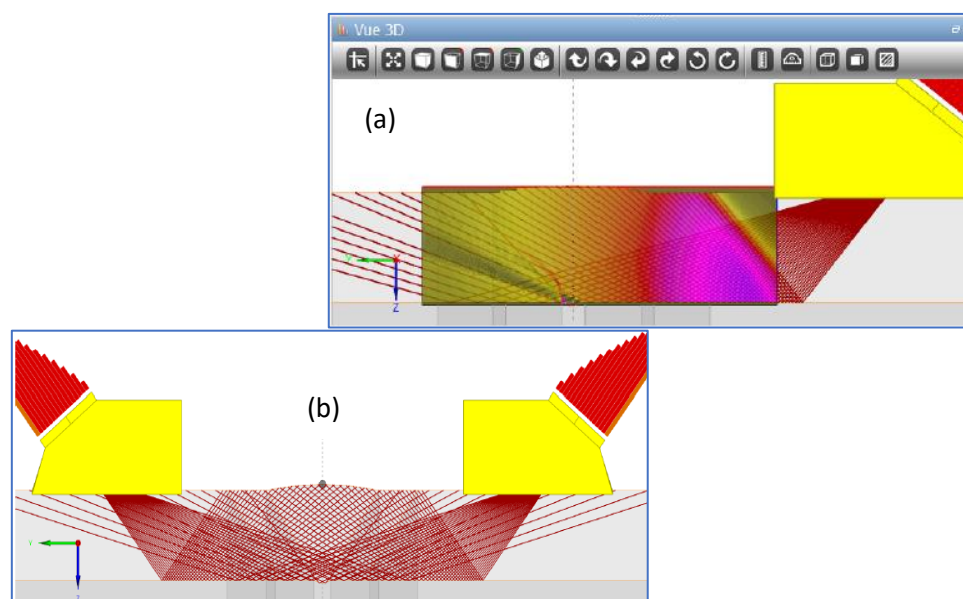


Figure IV. 22. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN273.1mm

(k) Traducteur Phased Array ;

(l) Traducteur conventionnel.

Tableau IV. 8. Paramètres du contrôle pour un assemblage tube/tube DN273.1mm

Balayage sectoriel	34°-75° par pas de 1°
Distance face avant sabot/axe soudure	17mm
Focalisation	15mm

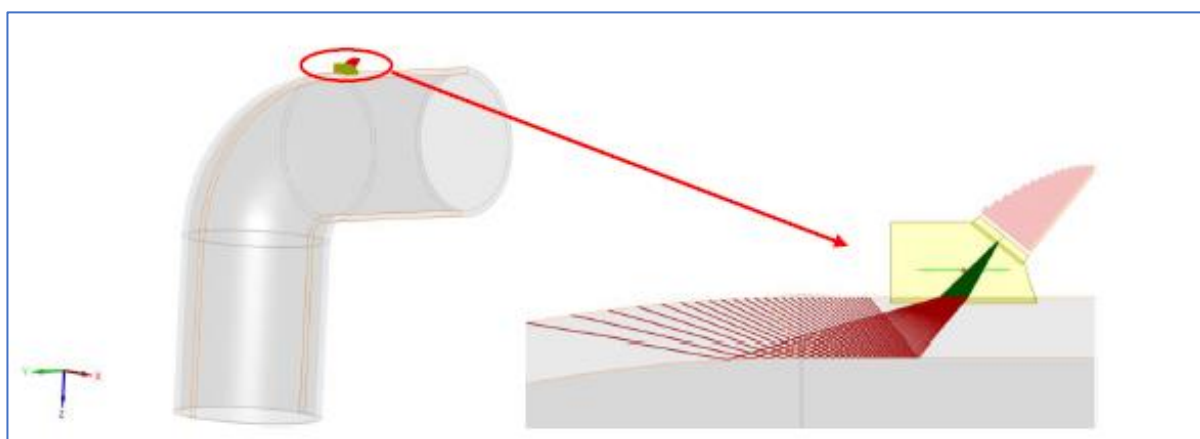


Figure IV. 23. Couverture de zone en mono-élément et PA pour un assemblage tube/tube de DN168.3mm

IV.7.2.1 Interprétation

Pour les six configurations, les deux techniques de contrôle présentent les mêmes couvertures de zone. Cependant, pour le cas de l'assemblage tube sur coude, il a été observé que la mise en œuvre d'un contrôle multiéléments permettait l'accès à des zones d'accès limitées en comparaison avec le mono-élément. Pour les assemblages à géométries complexes, le contrôle en mono-élément n'est pas impossible à mettre en œuvre mais demeure difficilement adaptable.

IV.7.3 Conclusion

Bien que les dispositifs ultrasons soient tous flexibles, portables et possèdent une sensibilité élevée ainsi qu'une très importante profondeur de pénétration, le multiélément apporte son lot d'avantages en comparaison avec la technique conventionnelle. En effet, la technologie multiélément a vu le jour dans le but d'apporter des solutions aux limites imposées par les ultrasons conventionnels. Les besoins spécifiques du secteur de la production de l'énergie ayant évolué, de plus en plus d'industriels se tournent vers le contrôle par ultrasons multiéléments [44].

En effet, en comparaison avec les dispositifs conventionnels, le multiélément permet de réaliser des inspections de structures de formes complexes en partie grâce à la déflexion des faisceaux ou « balayage sectoriel » qui vise à cartographier les composants selon les bons angles. Ceci permet donc de détecter et de dimensionner toute indication potentiellement critique. L'inspection des soudures sous plusieurs angles devient possible avec une sonde multiélément et améliore nettement les probabilités de détection des anomalies.

De plus, à l'aide d'un seul palpeur multiélément, le contrôle de zones difficilement accessibles devient possible pour une large gamme d'applications contrairement aux traducteurs conventionnels et permet aussi, la suppression du mouvement de va et vient traditionnel du traducteur conventionnel.

Le multiélément peut détecter des défauts avec un rapport signal bruit amélioré grâce à la possible mise en œuvre du contrôle avec l'aide de la focalisation du faisceau qui permet l'optimisation de la forme et de la taille du faisceau à l'emplacement où l'on s'attend à trouver une indication. Ce qui permet l'obtention de résultats avec une meilleure sensibilité et une grande précision. Afin d'obtenir une telle fiabilité de résultats, il y a nécessité d'intervention d'un personnel hautement qualifié pour la mise en œuvre d'un contrôlé optimisé.

Contrairement au dispositif conventionnel qui n'est pas en mesure de détecter des défauts planaires parallèles à la direction des ondes ultrasonores émises, le palpeur multiélément fixé à une position donnée possède une sensibilité plus importante à la détection, au dimensionnement ainsi qu'à la localisation de défauts critiques (fissures) aléatoirement orientées à différentes profondeurs.

Le multiélément possède une meilleure rapidité de scan en comparaison avec le mono-élément et offre une toute nouvelle technique d'imagerie nommée l'échographie S-Scan qui permet une interprétation plus facile, un diagnostic rapide et une traçabilité.

En outre, une augmentation nette de la productivité est rendue possible grâce à la diminution de l'installation et du temps d'inspection que permet le multiélément.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce manuscrit s'inscrit dans le cadre de la volonté de GEAT de déterminer une solution alternative à la radiographie industrielle standard pour le contrôle non-destructif de soudures au niveau des tuyauteries et auxiliaires de turbines à gaz.

Basée sur l'expertise de l'Institut de Soudure, une étude théorique préliminaire a démontré les potentialités permises par la substitution d'un contrôle radiographique par un contrôle ultrasonore pour le cas des tuyauteries présentées. En effet, en offrant de nombreux avantages sur le plan pratique, les techniques ultrasonores présentent un levier considérable permettant de s'affranchir des contraintes économiques, réglementaires et sanitaires qui découlent de la mise en œuvre d'un contrôle radiographique à rayons X. Cette étude a également révélé les facteurs pouvant influencer la contrôlabilité par ultrasons de certains assemblages : la géométrie et le type de matériau.

L'étude bibliographique a présenté les caractéristiques des assemblages à contrôler ainsi qu'une explication des phénomènes à l'origine de l'anisotropie et de l'hétérogénéité des soudures multi-passes austénitiques, particularités pouvant affecter le contrôle par ultrasons. Cependant, du fait d'une épaisseur de tuyauteries inférieure à 15mm, de faibles déformations du faisceau ultrasonore ont été considérées. C'est pourquoi, l'hypothèse d'un matériau isotrope a été faite dans le cadre de cette étude.

La première étape de l'étude a permis de recenser les spécifications de plus de 500 assemblages à contrôler, à savoir les dimensions et géométries des pièces, nuances de matériaux, types d'assemblages, etc. Ces données contribuent à l'amorçage de l'étude portant sur la vérification de la contrôlabilité par ultrasons des différents assemblages constituant le réseau de tuyauteries d'une turbine à gaz.

La seconde étape de l'étude a consisté à caractériser les techniques par ultrasons mono-élément et multiéléments par voie de simulation à l'aide du logiciel CIVA. L'étude a principalement permis d'explorer la couverture de zone en mono-élément et Phased Array, et n'a pris en compte que des géométries simples (sans encombrement) de six configurations représentatives de l'ensemble des assemblages recensés dans la première étape.

En définitive, en ayant révélé les avantages et les inconvénients de chacune des techniques employées dans la simulation, les résultats obtenus permettent d'appuyer les hypothèses posées dans l'étude préliminaire et d'orienter la prise de décision vers le choix du dispositif multiéléments. Les résultats de la simulation esquissent donc les orientations futures de la démarche de justification des performances du contrôle par ultrasons entreprise par GEAT.

D'autres études sont prévues afin de compléter les résultats obtenus lors de la simulation, où l'anisotropie du matériau ainsi que les contraintes géométriques réelles n'ont pas été prises en considération. La validation expérimentale du contrôle par ultrasons sur maquettes est nécessaire afin d'évaluer l'impact de l'anisotropie sur le faisceau ultrasonore et d'ajuster les paramètres de contrôle déterminés dans la présente étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] D. CHAUVEAU, « ALTERNATIVES A LA RADIO IRIIDIUM - CAHIER TECHNIQUE,» COURBEVOIE, 2011.
- [2] DECRET, ALGER, 2005.
- [3] INSTITUT DE SOUDURE, « ÉTUDE DE SOLUTIONS ALTERNATIVES A LA RADIOLOGIE INDUSTRIELLE - PROJET GEAT,» CORBAS, 2017.
- [4] AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS), STANDARD WELDING TERMS AND DEFINITIONS, 2009.
- [5] COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE (CEA), « OUTILS DE SIMULATION POUR LE CONTROLE ULTRASONS ROBOTISE,» 2016.
- [6] « DLD LASER,» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.DLD-LASER.COM/NOS-M%C3%A9TIER/SOUDURE-CHAUDRONNERIE/](https://www.dld-laser.com/nos-m%C3%A9tier/soudure-chaudronnerie/).
- [7] GROUPE AFNOR, « GROUPE AFNOR » [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTP://GROUPE.AFNOR.ORG/E-CATALOGUES/AFNOR-EDITIONS/NORMES-ETRANGERES/COMMON/DATA/CATALOGUE.PDF](http://groupe.afnor.org/e-catalogues/afnor-editions/normes-etrangeres/common/data/catalogue.pdf).
- [8] D. W. LOOTEN, EVALUATING THE VARIABLES THAT IMPACT ULTRASONIC TESTING, COLUMBIA, 2014.
- [9] GENERAL ELECTRIC, P8A-AG3, 2016.
- [10] ASME, ASME CODE FOR PROCESS PIPING B31.3, 2008.
- [11] R. J. HUDGELL, « THE ULTRASONIC INSPECTION OF AUSTENITIC MATERIALS - STATE OF THE ART REPORT,» PARIS, 1985.
- [12] INSTITUT DE SOUDURE INDUSTRIE, «ÉTUDE THEORIQUE DE SOLUTIONS ALTERNATIVES A LA RADIOLOGIE INDUSTRIELLE - PROJET G.E.A.T,» CORBAS, 2017.
- [13] J. CHATER, « WHAT'S IN A NAME ? CATEGORIES AND GRADES OF STAINLESS STEEL AND CORROSION-RESISTANT ALLOYS,» STAINLESS STEEL WORLD, PP. 4-6, JUIN 2015.
- [14] M. A. PLOIX, « ETUDE DE L'ATTENUATION DES ONDES ULTRASONORES. APPLICATION AU CONTROLE NON DESTRUCTIF DES SOUDURES EN ACIER INOXYDABLE AUSTENITIQUE,» LYON, 2006.
- [15] GE ENERGY, «P8A-AG1 : GAS TURBINE FUSION ARC WELDING - INTERNAL DOCUMENT».
- [16] AWS, AWS A5.4 - SPECIFICATION FOR STAINLESS STEEL ELECTRODES FOR SHIELDED METAL ARC WELDING, MIAMI, 1992.

- [17] ROCDACIER, « RODACIER - SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES, » [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.ROCDACIER.COM/SOUDAGE-ACIERS-INOXYDABLES-AUSTENITIQUES/](https://www.rocdacier.com/soudage-aciers-inoxydables-austenitiques/).
- [18] B. CHASSIGNOLE, INFLUENCE DE LA STRUCTURE METALLURGIQUE DES SOUDURES EN ACIER INOXYDABLE AUSTENITIQUE SUR LE CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR ULTRASONS, LYON, 2000.
- [19] C. J. LIPPOLD, «AUSTENITIC STAINLESS STEEL,» CHEZ WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS, 2 ED., NEW JERSEY, JOHN WILEY & SONS, 2005, P. 353.
- [20] H. INOUE ET T. KOSEKI, «CLARIFICATION OF SOLIDIFICATION BEHAVIORS IN STAINLESS STEELS BASED ON WELDING PROCESS,» TOKYO, 2007.
- [21] J. A. H. KRAUTKRÄMER, ULTRASONIC TESTING OF MATERIALS, 1990.
- [22] N. H. TYAS ET M. COLLEGE, GRAIN REFINEMENT OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL WELDS TO FACILITATE ULTRASONIC INSPECTION, CAMBRIDGE, 2000.
- [23] LE LIVRE BLANC DE L'ACOUSTIQUE EN FRANCE EN 2010, 2010.
- [24] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, NON-DESTRUCTIVE TESTING : A GUIDEBOOK FOR INDUSTRIAL MANAGEMENT AND QUALITY CONTROL PERSONNEL, VIENNA: IAEA, 1999.
- [25] «LES ONDES SONORES ET L'ELASTOGRAPHIE : UN OUTIL DE VALIDATION DU TOUCHER OSTEOPATHIQUE ?,» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTP://OSTEOETSSCIENCES.OVER-BLOG.COM/2016/02/LES-ONDES-SONORES-ET-L-ELASTOGRAPHIE-UN-OUTIL-DE-VALIDATION-DU-TOUCHER-OSTEOPATHIQUE.HTML](http://osteoeosciences.over-blog.com/2016/02/les-ondes-sonores-et-l-elastographie-un-outil-de-validation-du-toucher-osteopathique.html).
- [26] S. WAGNER, MODIFICATION OF THE GRAIN STRUCTURE OF AUSTENITIC WELDS FOR IMPROVED ULTRASONIC INSPECTABILITY, STUTTGART, 2012.
- [27] T. MAHE, «CONTROLE NON DESTRUCTIF - LES ULTRASONS FONT DES PROUESSES,» SOLUTIONS, PP. 26-29, NOVEMBRE 2009.
- [28] O. GUEDES, GENERATION ET PROPAGATION ULTRASONORE, 2005.
- [29] A. BELKOU, «ETUDE DES PROPRIETES PIEZOELECTRIQUES D'UN NOUVEAU MATERIAU CERAMIQUE,» DJELFA, 2015.
- [30] «GENERALITES SUR LES MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES».
- [31] K. K. A. H. KRAUTKRÄMER, ULTRASONIC TESTING OF MATERIALS, 4TH EDITION ED., 1990.
- [32] S. GHORBEL, «OUPAGE ELECTROMECHANIQUE EFFECTIF DANS LES STRUCTURES PIEZOELECTRIQUES : EXPERIMENTATIONS, SIMULATIONS ET CORRELATIONS.,» 2009.

- [33] S. CHATILLON, ETUDE D'UN SYSTEME DE CONTROLE PAR ULTRASONS DES PIECES DE GEOMETRIE COMPLEXE A L'AIDE DE TRADUCTEURS CONTACTS INTELLIGENTS, PARIS, 2000.
- [34] M. CHERFAOUI, ESSAIS NON DESTRUCTIFS, 2006.
- [35] B. CLAUSSE, MODELISATION DES TRADUCTEURS ELECTROMAGNETIQUES ACOUSTIQUES (EMAT) POUR LE CONTROLE NON-DESTRUCTIF (CND) DE MILIEUX FERROMAGNETIQUES, PARIS, 2018.
- [36] D. R. A. E. DIEULESANT, ONDES ELASTIQUES DANS LES SOLIDES, PARIS: MASSON, 1996.
- [37] OLYMPUS SCIENTIFIC SOLUTIONS AMERICAS GROUP US, «INTRODUCTION A LA TECHNIQUE PAR DIFFRACTION EN TEMPS DE VOL (TOFD),» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.OLYMPUS-IMS.COM/FR/APPLICATIONS/INTRODUCTION-TO-TIME-OF-FLIGHT-DIFFRACTION-FOR-WELD-INSPECTION/](https://www.olympus-ims.com/fr/applications/introduction-to-time-of-flight-diffraction-for-weld-inspection/).
- [38] CETIM, «LES ULTRASONS MULTIELEMENTS,» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [CETIM.FR](http://cetim.fr).
- [39] S. BANNOUF, «DEVELOPPEMENT ET OPTIMISATION DE METHODES D'IMAGERIE SYNTHETIQUE POUR LE CONTROLE NON-DESTRUCTIF PAR ULTRASONS DE COMPOSANTS INDUSTRIELS COMPLEXES,» PARIS.
- [40] INSTITUT DE FORMATION & ASSISTANCE TECHNIQUE - CONTRÔLE NON-DESTRUCTIF & METALLURGIE, «ULTRASONS,» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.IFAT.FR/CATEGORIE-DE-FORMATION/ALIAS/ULTRASONS.HTML](https://www.ifat.fr/categorie-de-formation/alias/ultrasons.html).
- [41] B. AKGUN, INVESTIGATING THE RELIABILITY OF ULTRASOUND PHASED ARRAY METHOD AND CONVENTIONAL ULTRASONIC TESTING FOR DETECTION OF DEFECTS IN AUSTENITIC STAINLESS STEELS, 2015.
- [42] OLYMPUS SCIENTIFIC SOLUTIONS AMERICAS CORP [US], «CARACTERISTIQUES DES SONDES MULTIELEMENTS,» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.OLYMPUS-IMS.COM/FR/NDT-TUTORIALS/TRANSDUCERS/PA-DEFINITIONS/](https://www.olympus-ims.com/fr/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/).
- [43] «ADATUM,» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.CONTROLES-ESSAIS-MESURES.FR/ACTUALITE-4015-LE-REMPLACEMENT-DE-LA-RADIOGRAPHIE-PAR-LES-ULTRASONS-MULTIELEMENTS](https://www.controles-essais-mesures.fr/actualite-4015-le-remplacement-de-la-radiographie-par-les-ultrasons-multielements).
- [44] COFREND, «RADIOGRAPHIE (RT),» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.COFREND.COM/JCMS/MDC_110681/RADIOGRAPHIE-RT](https://www.cofrend.com/jcms/mdc_110681/radiographie-rt).
- [45] OLYMPUS SCIENTIFIC SOLUTIONS AMERICAS CORP [US], «APPAREIL DE RECHERCHE DE DEFAUTS EPOCH 650».
- [46] «SOUDURE - GENERALITES,» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTPS://NOTECH.FRANCESERV.COM/SOUDURE-GENERALITES.HTML](https://notech.franceserv.com/soudure-generalites.html).
- [47] «ENGGCYCLOPEDIA,» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTP://WWW.ENGGCYCLOPEDIA.COM/2011/08/BUTT-WELD/](http://www.enggcyclopedia.com/2011/08/butt-weld/).

[48] ARCANE INDUSTRIES, «CONTRÔLE NON DESTRUCTIF : LE CONTRÔLE PAR ULTRASON,» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.ARCANE-INDUSTRIES.FR/DETAILS-CONTROL+NON+DESTRUCTIF+LE+CONTROL+PAR+ULTRASON-244.HTML](https://www.arcane-industries.fr/details-control+non+destructif+le+control+par+ultrason-244.html).

[49] MONGIN, «CONTROLE CND,» [EN LIGNE]. AVAILABLE: [HTTP://MONGIN.EU/CONTROLE/CND-NON-DESTRUCTIF/](http://mongin.eu/control/cnd-non-destructif/).