

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA-1-**



**Institut d'Aéronautique Et Des Etudes Spatiales**

**MEMOIRE**

**Pour l'obtention du diplôme**

**De Master en Aéronautique**

**Département : Construction Aéronautique**

**Spécialité : Structures Avions**

---

---

**CARACTERISATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES DES STRUCTURES  
AERONAUTIQUES SOUDEES PAR FSW EN UTILISANT LA METHODE  
ELECTROMAGNETIQUE**

---

---

Présenté par :

MEKKAOUI Karima

Dirigé par

Dr SARI El-kahina

Co-encadré par

Dr R. HALIMI

Dr O. MIMOUNI

2020/2021

---

## Résumé

---

Dans ce projet de fin d'études, une étude expérimentale est dédiée à la caractérisation des contraintes résiduelles par le contrôle non destructif en utilisant le contrôle par Courant de Foucault dans des structures aéronautiques soudées par FSW en choisissant les alliages 2017 A -T451, qui sont utilisés dans le cadre de l'allègement des structures d'aéronefs.

Notre recherche consiste à faire premièrement une étude et réalisation d'une soudure par friction malaxage FSW qui est un nouveau procédé permettant la réalisation de la soudure en phase solide et donc de supprimer tous les défauts liés à la solidification et sans aucun apport de matière. Deuxièmement, une modélisation des contraintes résiduelles causées par ce procédé et enfin, une caractérisation de ces contraintes résiduelles par les courants de Foucault en réalisant une sonde et interprétant les diagrammes d'impédance pour chaque zone de la soudure.

---

## Abstract

---

In this project graduation, an experimental study is dedicated to the characterization of residual stresses by the non-destructive testing using eddy current control in aeronautical structures welded by FSW by choosing the AA2017 A T-451 alloys which are used in the lightening of aircraft structures.

Our research consists in first of all carrying out study and realization of a FSW friction stir welding which is a new process allowing the realization of the solid phase welding and therefore to eliminate all the defects related to solidification and without any addition of material. Secondly, a modelling of residual stress caused by this process and finally, a characterization of these residual stresses by eddy currents by realizing a probe and interpreting the impedance diagrams for each zone of the weld.

---

## ملخص

---

في مشروع نهاية الدراسات هذا، تم تخصيص دراسة تجريبية لتوصيف الضغوط المتبقية عن طريق الاختبار غير المدمر باستخدام اختبار التيار الدوامي في هياكل الطيران الملحومة بواسطة FSW عن طريق اختيار السبائك 2017 A -T451، والتي تستخدم كجزء من تصنيع هياكل الطائرات.

يتكون بحثنا أولاً وقبل كل شيء من إجراء دراسة وإنجاز لحام التحريك الاحتكاكي FSW وهي عملية جديدة تسمح بإنجاز اللحام بالمرحلة الصلبة وبالتالي القضاء على جميع العيوب المتعلقة بالتصلب وبدون إضافة أي مواد. ثانياً، نمذجة الضغوط المتبقية الناتجة عن هذه العملية، وأخيراً، توصيف هذه الضغوط المتبقية بواسطة التيارات الدوامية من خلال إنجاز مسبار و تفسير مخططات المعاوقة لكل منطقة من مناطق اللحام.

## **Remerciements :**

*En premier lieu je tiens à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux de la bonne santé, de la volonté et de la patience qui m'a donné pour finir ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier ma promotrice Mme Sari pour avoir dirigée cette étude, pour sa patience, ses encouragements, ses conseils et son aide.*

*Je remercie très vivement Mme Smaili, Mr Halimi, Mr Boucherou au niveau du centre de recherche CRTI ainsi que toute l'équipe de l'unité de recherche ERMA et spécialement Dr O. Mimouni.*

*Mes profonds respects et remerciements sont exprimés aux enseignants de l'Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales et particulièrement à Mme Mahi pour le savoir qui nous a donné, pour ses encouragements et son aide.*

*Enfin mes reconnaissances les plus sincères s'expriment aux personnes qui ont contribué de près ou de loin dans ce travail.*

## *Dédicace :*

*Je remercie infiniment toutes les personnes qui m'ont soutenu jusqu'à cette étape de mon parcours universitaire.*

*Je veux dédier ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents : Djemai et Fatiha*

*Mes chères sœurs : Chahra et Maroua*

*Mes chers frères*

*Mes amours : Iyed, Ranime et Feras*

*Ma belle-sœur : Amira*

*Chaque personne de ma grande famille*

*Mes chères amies : Leulmi Rayane, Lynda Saidani, Zahia Charif, Chaima*

*Abahri, Hadjira Charif, Nada Rahali ...*

*Et une spéciale dédicace à mes meilleures amies, mes moitiés, mes jumelles et mes*

*beaux trésors : Doumandji Soraya, Thamazight Saidani et Ahlem Ouadeh*

*La plus généreuse personne que j'ai connu : Aouatef Medjir*

*Tous mes chers*

*Karima MEKKAOUI*

# TABLE DES MATIERES

## RESUME

## REMERCIEMENTS

## DEDICACE

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	15
<b>CHAPITRE 1 : PROCEDE DE SOUDAGE FSW</b>	18
1.1 Introduction.	18
1.2 Description et historique du procédé.	18
1.2.1 Machine de soudage FSW.	19
1.2.2 L’outil de soudage.	21
1.2.2.1 La géométrie de l’outil.	21
1.2.2.2 Le matériau de l’outil.	22
1.2.2.3 Les étapes de la réalisation du soudage par friction malaxage.	23
1.2.3 Le principe de soudage FSW.	23
1.2.4 Les phases de soudage par friction malaxage.	26
1.2.4.1 Phase d’approche.	26
1.2.4.2 Phase de chauffe.	26
1.2.4.3 Phase de soudage.	26
1.2.4.4 Phase de retrait.	27
1.2.5 Les paramètres du soudage par friction malaxage.	27
1.2.5.1 La vitesse de rotation et vitesse d’avance.	28
1.2.5.2 L’effort de pénétration de l’outil.	28
1.2.5.3 L’angle d’inclinaison.	29
1.2.6 Les caractéristiques des joints soudés.	30
1.2.6.1 Les caractéristiques microstructurales.	30
1.2.6.2 Les caractéristiques mécaniques.	31
1.2.7 Les configurations des joints soudés.	32
1.3 Les avantages du procédé.	33
1.3.1 Les avantages liés au procédé.	33

1.3.2	Les avantages économiques et environnementaux.	33
1.3.3	Les avantages liés à l'équipement.	33
1.4	Les limites du procédé.	34
1.5	Les domaines d'application.	35
1.5.1	L'industrie aéronautique.	36
1.5.2	L'industrie spatiale.	37
1.5.3	L'industrie navale.	38
1.5.4	L'industrie automobile.	38
1.5.5	L'industrie ferroviaire.	39
1.5.6	L'industrie nucléaire.	39
1.6	Conclusion.	39
<b>CHAPITRE 2 : LES METHODES CND.</b>		41
2.1	Introduction.	41
2.2	Les méthodes de contrôle non destructive CND :	41
2.2.1	Les types des défauts.	42
2.2.1.1	Les défauts surfaciques.	42
2.2.1.2	Les défauts internes.	43
2.2.2	L'origine des défauts.	43
2.2.3	Le principe de détection des défauts CND.	43
2.2.4	Les critères du choix de la méthode.	44
2.2.5	Les domaines d'application.	44
2.3	Les techniques de contrôle non destructif.	45
2.3.1	Les courants de foucault.	45
2.3.1.1	Le principe.	45
2.3.1.2	Le diagramme d'impédance normalisée.	46
2.3.1.3	L'effet de peau.	47
2.3.1.4	Les avantages du contrôle CF.	49
2.3.1.5	Les limites du contrôle CF.	49
2.3.1.6	Cycle d'hystérésis.	50
2.3.1.7	Les formes d'enroulements des capteurs inductifs.	51
2.3.1.8	Les capteurs à courant de Foucault.	52
2.3.1.9	La classification des capteurs.	52
1.	La classification des capteurs inductifs selon la fonction.	52

1.1	Le capteur à double fonction.	52
1.2	Le capteur à fonctions séparées.	52
2.	La classification selon la géométrie.	53
2.1	Capteur à bobine encerclant.	53
2.2	Capteur à sonde interne.	53
2.3	Capteur à sonde ponctuelle.	53
2.4	Capteur à bobine plate.	54
2.5	Capteur à sonde interne tournante.	54
3.	La classification selon les modes de contrôle.	54
3.1	Le mode absolu.	54
3.2	Le mode différentiel.	55
3.3	Le mode compensé.	55
2.3.1.10	Les critères du choix d'un capteur.	55
2.3.1.11	Les principaux paramètres influant le contrôle.	56
1.	Paramètres liés au matériau.	56
2.	Paramètres liés au montage.	56
3.	Paramètres électriques.	56
2.3.1.12	Les différents modes d'excitation.	56
1.	L'excitation monofréquence.	56
2.	L'excitation multifréquence.	57
3.	L'excitation pulsée.	57
2.3.2	Le contrôle par les ultrasons US.	57
2.3.2.1	Les différentes techniques de contrôle par ultrasons.	58
1.	Le contrôle par contact.	58
2.	Le contrôle par immersion.	58
2.3.2.2	Les caractéristiques d'onde.	59
2.3.2.3	Les différents types d'ondes.	59
1.	Ondes longitudinales.	59
2.	Ondes transversales.	59
3.	Ondes de surface.	60
2.3.2.4	Les avantages.	60
2.3.2.5	Les inconvénients.	60
2.3.3	Le contrôle par diffraction des rayons X.	60
2.3.3.1	Généralités sur les rayons X.	60

2.3.3.2 Les caractéristiques des rayons X.	61
2.3.3.3 Interactions rayons X / matière.	61
2.3.3.4 Le principe de la technique.	62
2.3.3.5 La loi de Bragg.	62
2.3.3.6 L'intensité diffractée.	63
2.3.4 La méthode par l'effet de bruit de Barkhausen.	64
2.3.4.1 Domaines de Weiss.	64
2.3.4.2 L'expérience de Barkhausen.	65
2.4 Conclusion.	66
<b>CHAPITRE 3 : LA MODELISATION</b>	<b>67</b>
3.1 Introduction.	67
3.2 Les contraintes résiduelles.	67
3.2.1 Définition des contraintes résiduelles.	67
3.2.2 Les différents types des contraintes résiduelles :	68
3.2.2.1 Contraintes résiduelles d'ordre macroscopiques (1er ordre).	68
3.2.2.2 Contraintes résiduelles à l'échelle mésoscopique (2eme ordre).	68
3.2.2.3 Contraintes résiduelles à l'échelle microscopique (3ieme ordre).	68
3.2.3 Les origines des contraintes résiduelles.	69
3.3 La modélisation des contraintes résiduelles pour le soudage FSW.	70
3.3.1 La loi de Norton-Hoff.	72
3.3.2 L'équation de la chaleur.	74
3.4 La résolution numérique des équations de soudage.	75
3.5 Conclusion.	82
<b>CHAPITRE4 : EXPEREMENTATION, RESULTATS ET INTERPRETATION</b>	<b>80</b>
4.1 Introduction.	80
4.2 Généralités sur l'aluminium.	80
4.3 Les alliages d'aluminium.	81
4.3.1 Classification des alliages d'aluminium.	81
4.3.2 Les alliages d'aluminium de la série 2xxx.	82
4.3.2.1 les alliages 2017 A.	83

4.3.2.2 Quelques exemples d'utilisation du 2017A.	85
4.4 Description du soudage FSW et ses paramètres.	86
4.4.1 Le matériau utilisé pour le FSW.	86
4.4.2 Le mode opératoire.	86
4.4.2.1 Préparation des plaques à souder.	86
4.4.2.2 L'outil de soudage.	86
4.4.2.3 La machine de soudage FSW.	86
4.4.2.4 le protocole de soudage.	87
4.5 L'inspection visuelle des échantillons.	89
4.6 Microstructure des joint soudés FSW.	89
4.7 Le contrôle par courant de Foucault.	91
4.7.1 La réalisation des sondes.	91
4.8 Résultats et interprétations.	93
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE.</b>	99
<b>LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS</b>	101
<b>LES REFERENCES</b>	103
<b>LES ANNEXES</b>	106

## LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1 : Machine typique pour le soudage par friction malaxage [3].	20
Figure 1.2 : Robot asservi pour le FSW doté de sa tête de soudage.	20
Figure 1.3: Schématisation de l'outil FSW et de quelques géométries de pions et d'épaulements[5].	22
Figure 1.4 : Illustration du procédé de soudage par friction malaxage.	25
Figure 1.5 : Formation de la soudure [7].	25
Figure 1.6 : Localisation de (advancing side) côté d'avance et de la coté de retrait (retreating side)[8].	25
Figure 1.7 : Phase d'approche.	26
Figure 1.8 : Phase de soudage.	27
Figure 1.9 : Phase de retrait.	27
Figure 1.10 : Visualisation des paramètres de soudage.	28
Figure 1.11 : L'angle d'inclinaison de l'outil.	29
Figure 1.12 : Coupe macrographique d'un cordon de soudure de l'AA7020 montrant quatre zones distinctes : (A) métal de base, (B) zone affectée thermiquement, (C) zone affectée thermo mécaniquement et (D) noyau de soudure (nugget zone).	30
Figure 1.13 : Coupe transversale schématique d'une soudure [9].	30
Figure 1.14 : Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence et (g) angle [9].	32
Figure 1.15 : Défaut de surface « brûlure ».	34
Figure 1.16 : Défaut de surface « flash ».	34
Figure 1.17 : Défaut interne manque de pénétration en racine.	35
Figure 1.18 : Défaut interne de type manque de liaison sur oxyde.	35
Figure 1.19 : Panneau de fuselage soudé par FSW sur Eclipse 500.	37

Figure 1.20 : Utilisation du procédé FSW pour souder les réservoirs de carburant de ses fusées Delta par la compagnie Boeing [6].	37
Figure 1.21 : Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destine au pont du bateau de croisière "The World" [1].	38
Figure 1.22 : Soudage « friction-malaxage » par point utilisé pour l'automobile [6].	38
Figure 1.23 : Soudage de profilé du train Hitachi [1].	39
Figure 2.1 : Quelques besoins importants de CND.	42
Figure 2.2 : Présentation de quelques défauts qui existent dans l'industrie	43
Figure 2.3 : Principe de détection des défauts.	44
Figure 2.4 : Modification du trajet des courants de Foucault.	45
Figure 2.5 : Influence de la conductivité et du lift-off sur le diagramme d'impédances normalisées.	47
Figure 2.6 : Distribution des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur z.	48
Figure 2.7 : Évolution de l'épaisseur de peau en fonction de la fréquence pour certains matériaux	49
Figure 2.8 : Inspection par Courants de Foucault.	50
Figure 2.9 : Le cycle d'hystérésis.	51
Figure 2.10 : Bobine cylindrique.	51
Figure 2.11 : Bobine plate.	51
Figure 2.12 : Capteur à double fonction [16].	52
Figure 2.13 : Capteur à fonctions séparées [16].	52
Figure 2.14 : Capteur à bobine encerclant [16].	53
Figure 2.15 : Bobine interne glissante avec noyau [16].	53
Figure 2.16 : Bobine simple avec noyau [16].	53
Figure 2.17 : Bobine plate [16].	54
Figure 2.18 : Capteur interne tournant [16].	54
Figure 2.19 : Le mode absolu [17].	54

Figure 2.20 : Le mode différentiel [17].	55
Figure 2.21 : Le mode compensé.	55
Figure 2.22 : Critères de choix d'un capteur [16].	55
Figure 2.23 : Principe du contrôle par ultrasons.	58
Figure 2.24 : Le principe de contrôle par immersion [19].	58
Figure 2.25 : Les caractéristiques d'une onde ultrasonore.	59
Figure 2.26 : Onde longitudinale.	59
Figure 2.27 : Onde transversale.	59
Figure 2.28 : Les ondes de surface.	60
Figure 2.29 : Type du rayonnement selon son énergie.	61
Figure 2.30 : L'interaction rayons X/ matière.	61
Figure 2.31 : La diffraction des rayons X (la loi de Bragg).	63
Figure 2.32 : Bruit de Barkhausen.	65
Figure 2.33 : Expérience de Barkhausen.	65
Figure 2.34 : Le principe du bruit de Barkhausen.	66
Figure 3.1 : Origines des contraintes résiduelles [8].	70
Figure 3.2 : Description du domaine de calcul et des frontières [24].	71
Figure 3.3 : Utilisation d'une formulation ALE pour modéliser l'écoulement plastique du matériau et prédire l'apparition de défaut de soudage [25].	73
Figure 3.4 : Couplage thermomécanique [24].	75
Figure 3.5 : Schématisation de l'évolution du maillage avec une approche lagrangienne [24]	76
Figure 3.6: Champs de température à gauche et champs des déformations à droite avec une approche lagrangienne [24].	77
Figure 4.1 : Fraiseuse utilisée pour FSW.	87
Figure 4.2 : La fixation des plaques à souder.	87
Figure 4.3 : La phase de soudage.	88
Figure 4.4 : L'avancement de l'outil.	88

Figure 4.5 : L'inspection visuelle des échantillons.	89
Figure 4.6 : La microstructure de la pièce soudée.	90
Figure 4.7 : Chaîne de mesure par Courant de Foucault.	91
Figure 4.8 : La réalisation d'une sonde.	92
Figure 4.9 : Impédance mètre de type Agilent 4284A.	92
Figure 4.10 : Le test de la sonde.	92
Figure 4.11 : Les points à contrôler.	93
Figure 4.12 : Le contrôle du point 7.	93
Figure 4.13 : Diagramme d'impédance de référence.	94
Figure 4.14 : Diagramme d'impédance du point 1 (Le noyau).	94
Figure 4.15 : Diagramme d'impédance du point 2 (zone ZATM).	94
Figure 4.16 : Diagramme d'impédance du point 3 (zone ZATM).	95
Figure 4.17 : Diagramme d'impédance du point 4 (zone ZAT).	95
Figure 4.18 : Diagramme d'impédance du point 5(zone ZAT).	96
Figure 4.19 : Diagramme d'impédance du point 6 (zone saine).	96
Figure 4.20 : Diagramme d'impédance du point 7 (zone saine).	96
Figure 4.21 : La superposition des résultats.	97
Tableau 1.1 : Année d'apparition des principaux procédés de soudage [1].	19
Tableau 1.2 : Synthèse des différents matériaux d'outil couramment utilisés [6].	23
Tableau 1.3 : Valeurs des paramètres de soudage de l'acier avec l'aluminium par FSW [4].	30
Tableau 1.4 : Applications majeures du FSW.	36
Tableau 3.1 : Les origines des contraintes résiduelles [23].	70
Tableau 4.1 : Principales propriétés mécaniques des alliages d'aluminium [27].	81
Tableau 4.2 : La classification des alliages d'aluminium.	82
Tableau 4.3 : Compositions chimiques de 2017A.	84
Tableau 4.4 : Caractéristiques mécaniques de 2017A.	84

Tableau 4.5 : Les caractéristiques physiques de 2017A.	84
Tableau 4.6 : La composition chimique de l'acier AISI-H11.	86
Tableau 4.7 : Les paramètres de soudage utilisés.	87

## INTRODUCTION GENERALE :

Le soudage est un moyen d'assemblage apparu à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, il est largement utilisé dans les structures métalliques. Il est couramment mis en œuvre dans le milieu industriel à partir de ses différents procédés.

L'étude des techniques de soudage apparaît comme un domaine de recherche à la fois simple et complexe, parce qu'il demande de mettre en commun des connaissances issues de domaines distincts de la physique et de la mécanique. La plupart des techniques met en jeu des phénomènes aussi variés, des modifications microstructurales des matériaux soudés, les transferts de chaleur, l'apparition des contraintes résiduelles, ....

Le soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding) est un procédé de soudage apparu au début des années 90 au sein de l'institut de soudure britannique (The Welding Institute). La soudure est réalisée en phase solide, ce qui permet de supprimer les défauts liés à la solidification et sans aucun apport de matière.

Son principe consiste à brider deux tôles métalliques bord à bord en contact, puis d'animer un outil en rotation ce qui génère un flux de chaleur grâce à la friction de celui-ci avec les matériaux à souder. L'outil est muni d'un épaulement et d'un pion qui permet de malaxer et plastifier la matière.

Depuis son invention, plusieurs études ont été menées pour comprendre ce procédé, l'influence de ses paramètres sur les caractéristiques microstructurales, thermiques et mécaniques des joints pour d'améliorer la qualité des soudures et les phénomènes physiques qui se produisent lors du soudage, ce qui a permis une évolution rapide des connaissances à son égard.

La soudure par friction malaxage est caractérisée par quatre zones différentes : le noyau où le matériau n'atteint pas la température de fusion, la zone affectée thermo-mécaniquement ZATM, une zone affectée thermiquement ZAT et le métal de base.

La vérification de la qualité de soudure se fait par le Contrôle Non Destructif CND, ce contrôle est un ensemble des méthodes qui ont pour but de vérifier l'intégrité d'une pièce sans la dégrader en détectant les défauts, ces derniers qu'ils peuvent être surfaciques ou internes.

Les pièces à assembler sont maintenues rigidement pour éliminer tout mouvement lors du soudage, ce bridage particulièrement important peut générer des problèmes de contraintes résiduelles après le refroidissement du cordon. La connaissance et la caractérisation des contraintes résiduelles jouent un rôle important pour l'amélioration de la tenue des structures en service soumises à des différentes sollicitations.

L'avantage majeur de ce procédé est d'assembler des matériaux sans atteindre leur température de fusion. Il permet ainsi de souder des alliages réputés difficilement soudables par les procédés de soudage traditionnels tels que les alliages d'aluminium, de cuivre et de titane.

L'aluminium et ses alliages sont incontestablement les plus importants en tonnage des métaux non ferreux. Les alliages d'aluminium sont largement utilisés dans une grande variété d'applications et notamment dans l'industrie aéronautique grâce à leurs bonnes propriétés mécaniques et leur faible densité.

Ce mémoire s'articule autour quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique du soudage par friction-malaxage en présentant une description générale du procédé de soudage par friction et malaxage, les paramètres influant la qualité du soudage FSW et les caractéristiques des joints soudés.

Le deuxième chapitre vise à décrire une synthèse théorique aussi sur le CND et certaines de ses méthodes couramment utilisées aujourd'hui, en mettant l'accent sur le principe, les avantages et les inconvénients de chaque technique.

Le troisième chapitre présente une étude théorique sur les contraintes résiduelles, en abordant ensuite la modélisation des contraintes résiduelles causées par le soudage FSW, et la résolution numérique des équations de soudage par la méthode des éléments finis.

Le quatrième chapitre décrit les propriétés chimiques et physiques des alliages d'aluminium (la série 2xxx), puis il présente toutes les étapes nécessaires pour caractériser les contraintes résiduelles causées par le soudage FSW en utilisant le contrôle par courant de Foucault avec l'utilisation d'une nouvelle sonde, enfin il présente les résultats expérimentaux ainsi que leurs interprétations.

# CHAPITRE 1

## PROCEDE DE SOUDAGE FSW

### 1.1. Introduction :

Depuis sa création au début des années 1990, le procédé de soudage par frottement-malaxage est devenu attrayant pour plusieurs entreprises, ce procédé a fait l'objet d'un nombre d'études pour mieux comprendre les phénomènes physiques qui se produisent lors du soudage, ce qui a permis une évolution rapide des connaissances à son égard.

Dans ce premier chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur le soudage par friction et malaxage FSW, qui est présentée à travers trois grandes lignes ce sont :

1. Une description générale du procédé de soudage par friction et malaxage.
2. Les paramètres influant la qualité du soudage FSW.
3. Caractéristiques d'un joint de soudure FSW.

### 1.2. Description et historique du procédé :

Le soudage est utilisé à travers le monde depuis des siècles, il est un mode d'assemblage non démontable, l'ensemble de pièces est accouplé par un cordon de soudure, qui permet de lier ces pièces d'une façon rigide.

Ce procédé consiste à réunir deux ou plusieurs parties constituant un assemblage, de manière à assurer la continuité métallique (chimique, mécanique ...etc.), soit par chauffage, soit par pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans le métal d'apport dont la température de fusion étant de même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Le début du soudage remonte à l'âge des métaux : à l'âge du bronze les pièces sont soudées à la poche, puis à l'âge du fer elles sont soudées à la forge, la mise en œuvre des nouveaux procédés a été à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle comme : oxyacétylénique, aluminothermique, à l'arc électrique et par résistance.

Tout au long du 20<sup>ème</sup> siècle, de nouvelles technologies de soudage sont apparues répondant aux besoins industriels. Le tableau (1.1) montre une grande variété de procédés de soudage qui a été développée jusqu'à ce jour. Ainsi, selon l'application, il est nécessaire de sélectionner le plus performant en termes de coût et de respect du cahier des charges fonctionnel [1].

**Tableau 1.1** : Année d'apparition des principaux procédés de soudage [1].

	Date d'apparition	Apparition des procédés	Type de procédé
1880	1886	Soudage par résistance	électrique
	1895	Aluminothermie	chimique
1900	1902	Soudage au chalumeau oxyacétylénique	flamme
	1907	Soudage à l'électrode enrobée	électrique
	1924	Soudage TIG	électrique
	1930	Soudage à arc sous flux submergé	électrique
1950	1943	Soudage MIG	électrique
	1955	Soudage MAG	électrique
	1956	Soudage par faisceaux d'électrons	faisceau à haute énergie
	1956	Soudage par friction rotative	mécanique
1960	1957	Soudage par explosion	chimique
	1965	Soudage Laser	faisceau à haute énergie
1990	1991	Soudage par friction malaxage	mécanique

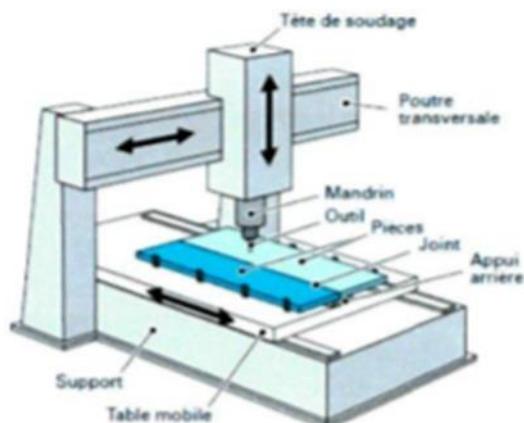
Un des procédés les plus récents est le soudage par friction malaxage FSW « Friction Stir Welding », qui a été développé par TWI « The Welding Institute » en 1991.

Le soudage par friction malaxage « Friction Stir Welding » est un procédé d'assemblage de pièces en phase solide. Les premières applications ont concerné principalement les alliages à base d'aluminium ou de cuivre réputés par leur température de fusion modérée. Ce procédé exige des propriétés thermomécaniques de l'outil de soudage largement supérieures à celles des pièces à assembler [2].

Le succès de ce procédé est basé sur le principe que le soudage se fait à froid dans le sens où le matériau n'atteint pas le point de fusion. La microstructure se retrouve moins affectée par le procédé de soudage ce qui se répercute par des propriétés mécaniques s'approchant du matériau de base [3].

### 1.2.1. Machine du soudage FSW :

Tous les appareils dotés d'un mandrin rotatif pourraient servir à faire du soudage par friction malaxage. Il requiert toutefois que celui-ci puisse fournir une force axiale assez importante pour réussir les soudures. Même si ce paramètre est rarement contrôlé, l'appareil doit être en mesure d'insérer l'outil dans le métal et de maintenir sa position. Ainsi, les machines d'usinage à commande numérique et les robots industriels sont aussi efficaces que les véritables machines conçues strictement pour ce procédé tel que le : « ESAB SuperStir machine » utilisée par « The Welding Institute (TWI) » illustré à la figure 1.1 [3]



**Figure 1.1** : Machine typique pour le soudage par friction malaxage [3].

Cette machine est très rassemblant d'une fraiseuse .elle est composée par deux parties mobiles, la première partie est la partie où on fixe le moteur de rotation et qui est lié aussi au mandrin de fixation de l'outil de soudage .Cette partie se déplace d'une façon vertical, c'est-à-dire de haut vers le bas pour permettre à l'outil de pénétrer dans les deux tôles à souder. La deuxième partie mobile dispose d'une enclume et d'un système de bridage intégrés, elle est la partie de fixation des tôles à assembler. Le mouvement de cette partie est horizontal pour former un joint de soudure le long des deux pièces.



**Figure 1.2** : Robot asservi pour le FSW doté de sa tête de soudage.

La figure 1.2 montre un robot doté d'un système d'asservissement en position développé par le CNRC pour compenser le manque de rigidité d'un robot pour le soudage en friction malaxage, ce qui augmente la précision de positionnement et de trajectoire de l'outil. L'entreprise Soudure J.M. Tremblay de Saint-Anicet offre un service de soudage par friction malaxage avec ce type d'équipement.

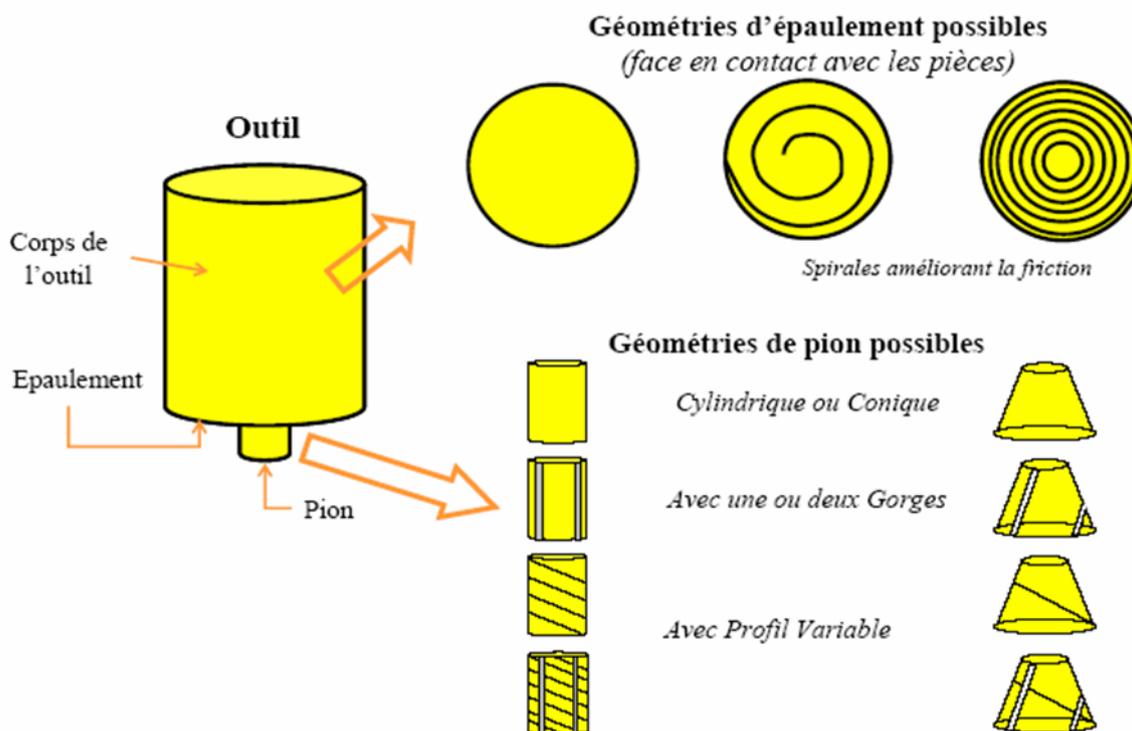
## **1.2.2. L'outil de soudage FSW :**

### **1.2.2.1. La géométrie de l'outil :**

La géométrie de l'outil est très importante dans le développement du procédé. Elle joue un rôle essentiel dans le ramollissement de la matière et la génération de la chaleur. La géométrie ainsi que le matériau de l'outil utilisé pour effectuer le soudage dépend du type de la soudure à exécuter. L'outil de soudage est généralement cylindrique, il est muni d'un épaulement et d'un pion dont chacun a une fonction différente de l'autre. L'épaulement participe à la génération de chaleur pour faciliter le malaxage et empêche la matière de s'échapper du fait du mouvement de translation de l'outil. Le pion génère la majorité de la chaleur lors du soudage de joints épais.

La forme du pion est généralement tronconique et/ou prismatique ou hélicoïdale et peut contenir des reliefs variés dans le but d'augmenter l'effet du malaxage du métal et par suite, de rendre plus facile la formation de la soudure. Dans certaines applications, le pion est excentré par rapport à son axe de rotation dans le but d'amplifier le malaxage. Plusieurs recherches sont orientées vers l'optimisation de la géométrie du pion [4]. Le choix des dimensions et du profil du pion dépend de la nature des matériaux constituant les tôles à souder et de leur épaisseur.

L'épaulement est souvent de forme concave pour éviter les débordements de matériau de part et d'autre de l'outil.



**Figure 1.3 :** Schématisation de l'outil FSW et de quelques géométries de pions et d'épaulements [5].

### 1.2.2.2. Matériau de l'outil :

Pour choisir le matériau de l'outil, il faut prendre en considération les caractéristiques de base suivantes :

1. Résistance à la température de soudage.
2. Résistance contre l'usure.
3. Bonne durée de vie en fatigue à la température de soudage.
4. Stabilité thermique à long terme.
5. Stabilité chimique (pas de réaction avec le matériau à souder).

Le choix du matériau de l'outil dépendra aussi de la nature de l'alliage à souder, il est généralement constitué d'un acier très résistant de façon à supporter les efforts lors du soudage.

Les matériaux utilisés pour l'outil ont été développés pour répondre aux besoins de soudage de différents types d'alliages. Ainsi, le matériau de l'outil sera choisi d'après la nature et l'épaisseur à souder (Tableau 1.2).

**Tableau 1.2** : Synthèse des différents matériaux d'outil couramment utilisés [6].

Alliage	Epaisseur : e [mm]	Matériau Outil
Alliages d'aluminium	$12 < e < 26$	Acier à outil, WC-CO MP159
Alliage de Magnésium	$e < 6$	Acier à outil, WC
Cuivre et ses alliages	$11 < e < 50$	Alliage de nickel, PCBN Acier à outil
Alliage de titane	$e < 6$	Alliage de tungstène
Acier Inoxydable	$e < 6$	PCBN <sup>1</sup> , alliage de tungstène
Acier faiblement allié	$e < 10$	WC, PCBN <sup>3</sup>
Alliage de Nickel	$e < 6$	PCBN <sup>3</sup> , alliage de tungstène

### 1.2.2.3 les étapes de la réalisation du soudage par friction malaxage :

1. Fixation des deux tôles à souder dans la deuxième partie mobile.
2. Fixation de l'outil de soudage dans le mandrin.
3. Mise en rotation du moteur électrique.
4. Déplacement de l'outil du haut en bas pour qu'il soit en contact avec les deux tôles.
5. Déplacement horizontal des tôles pour créer la soudure.
6. Déplacement vers le haut de l'outil après avoir terminé l'opération de soudage des deux pièces.

### 1.2.3. Le principe :

Le soudage par friction malaxage est une technologie permettant d'assembler différentes pièces en malaxant localement la matière des pièces à souder en utilisant le principe de la conversion de l'énergie mécanique, produite par la pression et la rotation de l'outil rotatif, en énergie thermique par frottement de ce dernier avec les pièces à assembler ainsi qu'aux déformations plastiques engendrées par le malaxage et il est bien adopté aux alliages difficilement soudables comme celles d'Aluminium.

Pour réaliser ce procédé, les deux pièces à assembler sont mises en contact et fortement bridées pour éviter tout mouvement relatif de celles-ci pendant le soudage. Ceci permet d'offrir un large choix de configurations de joints soudables.

Cet outil en rotation (ordre de grandeur 800 à 2000 tr/min) est généralement cylindrique et constitué principalement d'un épaulement (shoulder) qui se termine d'une tige coaxiale appelée pion « pin » d'une longueur inférieure à l'épaisseur des plaques, comme la figure (1.4) montre, pénètre dans la matière.

Le frottement entre le pion de l'outil rotatif et les pièces génère une chaleur qui entraîne un ramollissement. Cela permet d'insérer le pion à l'interface entre les pièces à réunir jusqu'au moment où l'épaulement est en contact avec la surface supérieure de ces dernières.

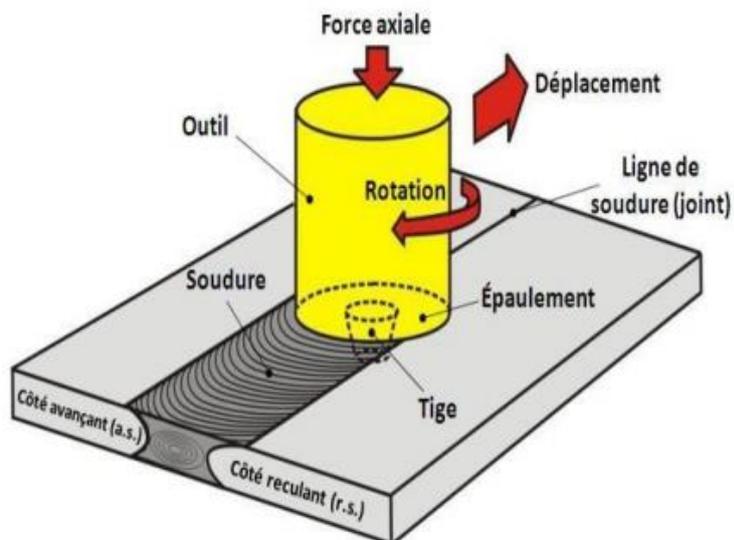
Une fois que l'épaulement est en contact avec les pièces, un effort est maintenu sur l'outil, pour empêcher la matière de fluer vers le haut et permettre le forgeage de celle-ci. Le rôle de l'épaulement est de générer la chaleur par frottement sur les pièces à assembler. Le pion malaxe la matière pour réaliser un joint compact après son passage et chauffe également la matière par dissipation viscoplastique.

La température des matériaux augmente à cause de ce flux de chaleur, tout en restant en dessous de leur température de fusion, cette chaleur est générée par le frottement entre l'outil (l'épaulement et le pion) et les parties à assembler. La matière se ramollit et transforme à l'état pâteux au voisinage de l'outil, facilitant le déplacement de l'outil le long de la ligne à souder.

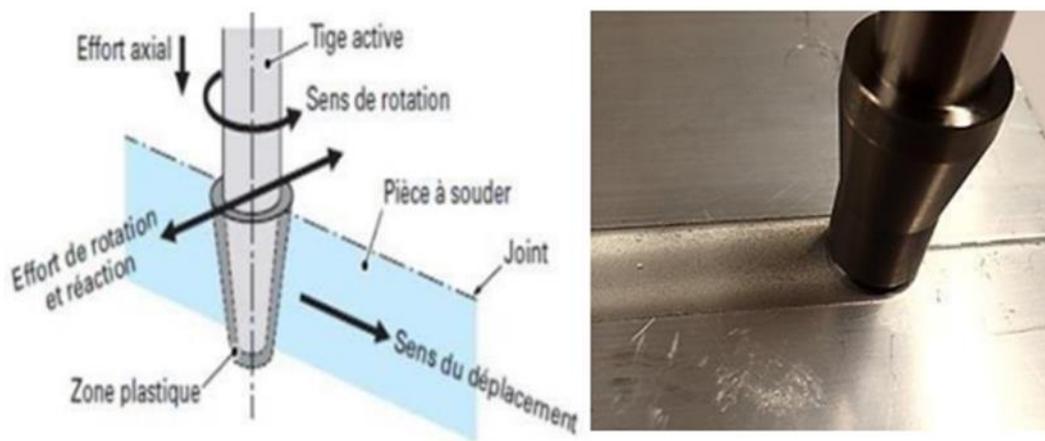
Le mouvement de rotation du pion permet de malaxer la matière des deux pièces à assembler dans le joint. La combinaison des mouvements de translations et de rotation de l'outil sert à fluer la matière de l'avant vers l'arrière du pion en déformant plastiquement la matière se situant devant le pion. L'outil rotatif se déplace avec une vitesse bien déterminée, la matière se retrouve derrière lui est une matière ramollie, composée des différents matériaux soudés et forme le cordon de soudure. Ainsi, le joint de soudure formé est constitué uniquement des métaux de base des pièces soudées sans aucun métal d'apport (Figure 1.5).

On nomme le côté avançant « Advancing Side AS » le moment où les deux vecteurs vitesses (translation et rotation) ont le même sens on parle donc de travail avalant, et le côté reculant où ces vecteurs s'opposent « Retreating Side RS », on parle donc de travail en opposition, peuvent être observés le long de la soudure.

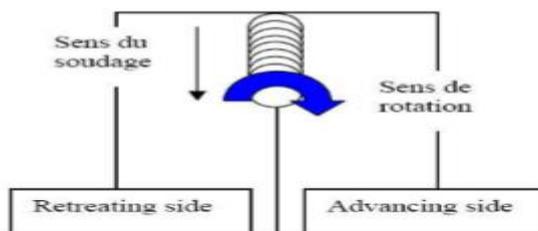
Le cycle de soudage commence avec la pénétration du pion jusqu'à extraction de ce dernier.



**Figure 1.4 :** illustration du procédé de soudage par friction malaxage.



**Figure 1.5 :** formation de la soudure [7].



**Figure 1.6:** Localisation de (advancing side) côté d'avance et de la coté de retrait (retreating side) [8].

### 1.2.4. Les phases de soudage par friction malaxage :

La réalisation d'une soudure par FSW peut être décomposée en 4 différentes phases :

**1.2.4.1. Phase d'approche :** l'outil est animé d'un mouvement de rotation et pénètre progressivement dans la zone de départ de la soudure avec une vitesse de descente. L'élévation progressive de la température, due au frottement du pion entraîne un malaxage de la matière, ce qui facilite son insertion dans l'interface, jusqu'au contact de l'épaulement et la partie supérieure des pièces à souder.

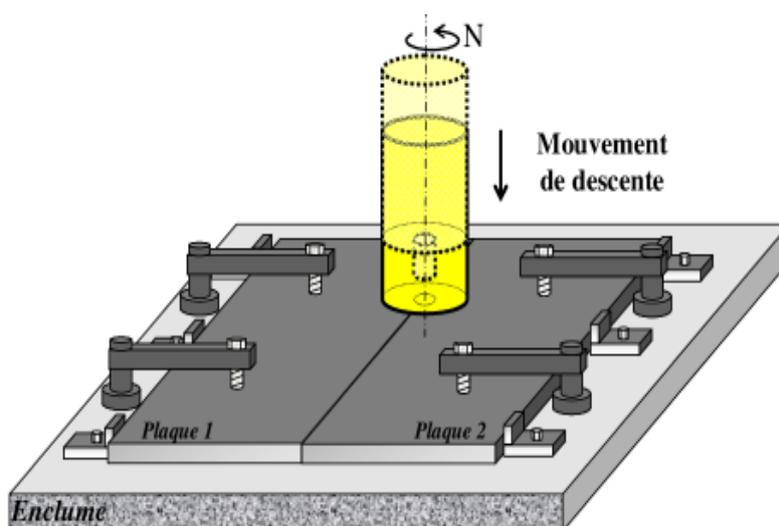
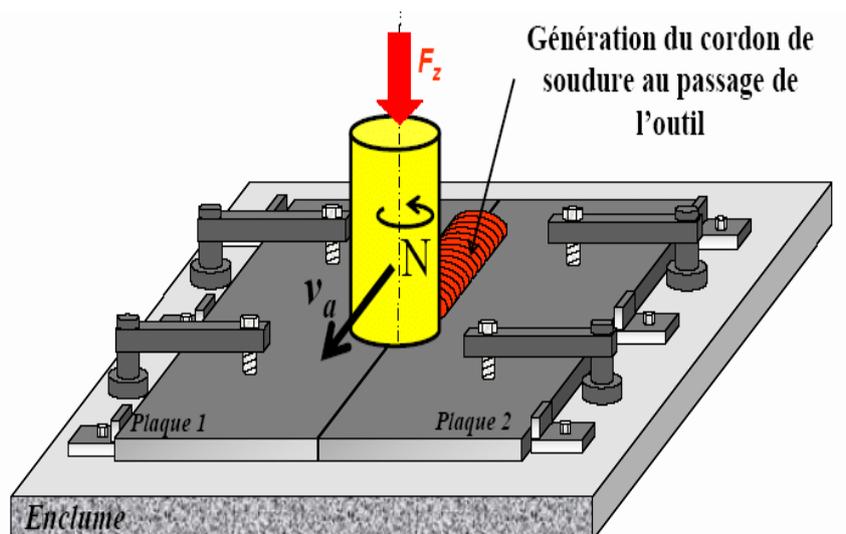


Figure 1.7 : phase d'approche.

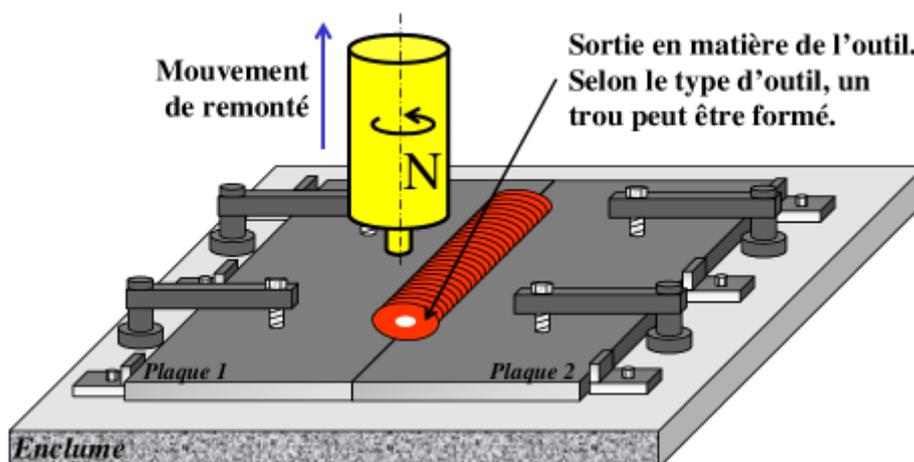
**1.2.4.2. La phase de chauffe :** l'outil est toujours animé d'un mouvement de rotation et ne subit plus de mouvement vertical, cette période dure une à deux secondes et le frottement à l'interface entre la tôle et l'épaulement entraîne une génération de chaleur qui permet de malaxer le matériau à souder.

**1.2.4.3. La phase de soudage :** Après préchauffage, l'outil se déplace et s'avance le long de la ligne de contact entre les deux plaques ; lors de ce mouvement la matière est ramollie par le pion après ce passage permet d'avoir qu'une seule pièce soudée donc la soudure est alors réalisée progressivement à mesure que l'outil s'avance.



**Figure 1.8 :** Phase de soudage.

**1.2.4.4. La phase de retrait :** une fois le cordon est réalisé, l'outil est alors sorti de la matière. Selon le type d'outil utilisé, l'empreinte du pion à l'intérieur de la matière peut être présente au niveau de l'extraction du pion.



**Figure 1.9:** phase de retrait.

### 1.2.5. Les paramètres du soudage par friction malaxage :

La qualité de soudage par friction est liée à deux critères très importants sont : les vitesses de rotation et d'avance de l'outil le long du joint à souder et l'effort de pénétration de l'outil dans la matière à assembler, d'autres paramètres influencent également sur la qualité comme l'angle d'inclinaison de l'outil ou même la profondeur de plonge de l'outil dans la matière à souder. En contrôlant ces paramètres, on contrôle la microstructure et la dureté d'un joint FSW.

Le choix de ces paramètres, pour un outil donné, dépend de la nature des matériaux et de l'épaisseur à souder ainsi que de la configuration de soudage (bout à bout, par recouvrement, etc.).

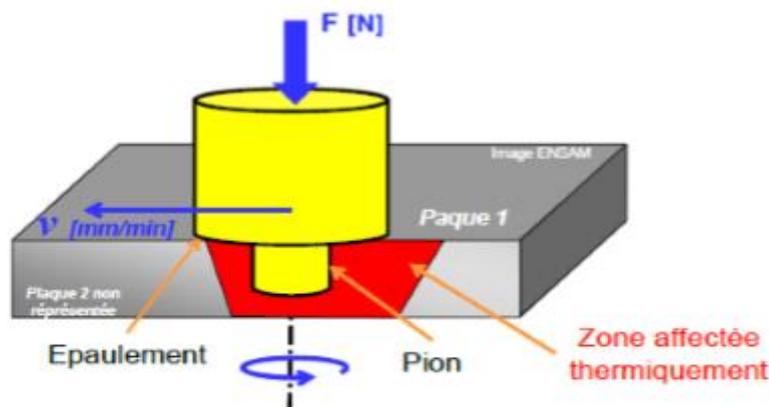


Figure 1.10 : Visualisation des paramètres de soudage.

#### 1.2.5.1. La vitesse de rotation et vitesse d'avance :

Les deux vitesses de translation (vitesse de soudage) et de rotation de l'outil sont très importantes pour déterminer la qualité de la soudure. Ces paramètres dépendent de la nature de l'alliage à assembler et les dimensions des plaques et la combinaison de ces deux paramètres assure le mélange et le malaxage du matériau.

Les deux vitesses sont liées par le rapport (**vitesse d'avance / (rayon du pion × vitesse de rotation)**). Pour qualifier le soudage si ce rapport est faible, on dit que le soudage est chaud car le malaxage et la chaleur dissipée par frottement seront élevés et engendreront de fortes températures. Par contre, si ce rapport est grand, on dit que le soudage est froid car la chaleur dissipée par frottement entre l'outil et les plaques ainsi que le malaxage de la matière n'induisant pas des températures très élevées dans les pièces [9].

#### 1.2.5.2. L'effort de pénétration de l'outil :

Lors du soudage FSW, la rotation de l'outil force le déplacement du métal plastifié vers la surface du joint. Le métal ainsi poussé sous l'épaulement de l'outil exerce une pression qui cherche à éloigner l'outil du joint. Il est par conséquent nécessaire d'appliquer une force verticale sur l'outil pour maintenir le contact entre l'outil et les pièces à souder.

Le frottement entre l'outil en rotation et la pièce génère de la chaleur. La quantité de cette dernière dépend de la force appliquée, du coefficient de frottement à l'interface outil-pièce, de la géométrie de l'outil, de la vitesse de rotation et de la vitesse d'avance. Ainsi, le contrôle de cette force est nécessaire pour réunir toutes les conditions essentielles au soudage pour obtenir un joint sans défaut. Cette force doit être considérée conjointement aux paramètres du procédé pour assurer une bonne liaison entre les deux parties du joint.

Il peut être noté que l'application d'un effort axial suivant l'axe de l'outil a pour but :

1. De maintenir l'épaulement en contact avec la surface des pièces.
2. D'assurer la profondeur de pénétration de l'outil.

### 1.2.5.3. L'angle d'inclinaison :

L'angle d'inclinaison de l'outil par rapport à la surface des plaques à souder est un paramètre important à prendre en considération dans l'optimisation du procédé car son choix approprié permet à la matière de passer efficacement de l'avant vers l'arrière du pion. (Figure 1.11) [4].



**Figure 1.11:** l'angle d'inclinaison d l'outil [4].

L'angle d'inclinaison de l'outil le plus couramment utilisé est compris entre  $1^\circ$  et  $5^\circ$ , elle est nécessaire pour maintenir une quantité de métal suffisante dans la cavité de l'épaulement et pour permettre à l'arrière de l'outil de maintenir la compression nécessaire pour assurer la consolidation du joint [6].

Ce tableau ci-dessous est un exemple de valeur des paramètres de soudage de l'acier avec l'aluminium par FSW.

**Tableau 1.3 :** Valeurs des paramètres de soudage de l'acier avec l'aluminium par FSW [4].

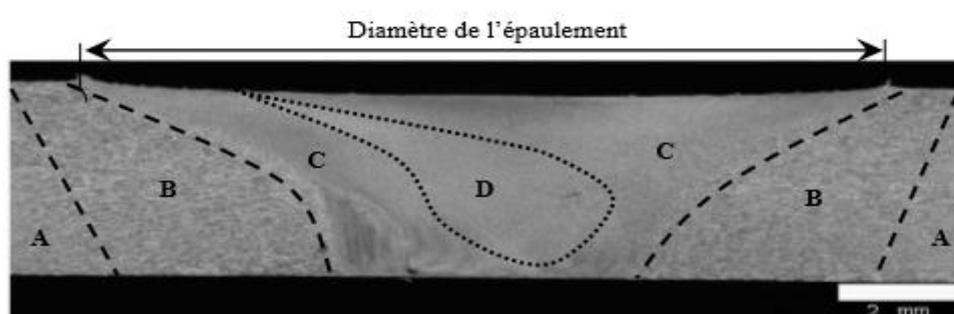
Vitesse de rotation	Vitesse d'avance	Angle d'inclinaison de l'outil	Diamètre de l'outil
1200tr/min	200 tr/min	0.5°	20mm.

## 1.2.6. Caractéristiques d'un joint soudé :

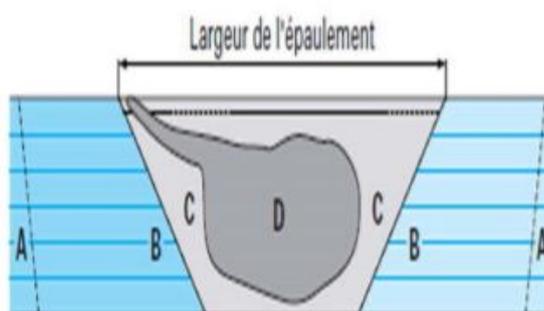
### 1.2.6.1. Les caractéristiques microstructurales :

La température au cours du soudage FSW augmente mais sans atteindre la température de fusion des matériaux de base, mais néanmoins suffisante pour provoquer des changements dans la structure au voisinage du cordon.

Les joints soudés réalisés par le procédé de soudage par friction malaxage se caractérisent par la présence de quatre zones différentes comme la figure (1.12) montre :



**Figure 1.12 :** Coupe macrographique d'un cordon de soudure de l'AA7020 montrant quatre zones distinctes : (A) métal de base, (B) zone affectée thermiquement, (C) zone affectée thermo mécaniquement et (D) noyau de soudure (nugget zone).



**Figure 1.13:** Coupe transversale schématique d'une soudure [9].

**La zone A :** au niveau de cette zone qui se trouve loin de la zone soudée, le métal de base est non affecté par le soudage et pour cela les propriétés mécaniques et la microstructure du métal restent les mêmes au cours du soudage.

**La zone B :** la zone affectée thermiquement ZAT, le matériau dans cette zone est affecté par l'élévation de la température ce qui provoque des modifications des propriétés mécaniques et même de la microstructure mais sans déformation remarquable.

**La zone C :** la zone affectée thermo-mécaniquement ZATM cette fois, le métal subit des déformations plastiques plus grandes par rapport à la zone affectée thermiquement dues au mouvement de l'outil, les propriétés mécaniques et la microstructure sont modifiées non seulement par l'effet thermique de la chaleur mais même de l'effet mécanique qui est sous forme des déformations plastiques subissés par le métal.

**La zone D :** la zone du noyau soudé dans cette zone les propriétés mécaniques et la microstructure sont modifiées par les deux effets thermique et mécanique encore plus importants que celles de la zone affectée thermo-mécaniquement.

#### **1.2.6.2. Les caractéristiques mécaniques :**

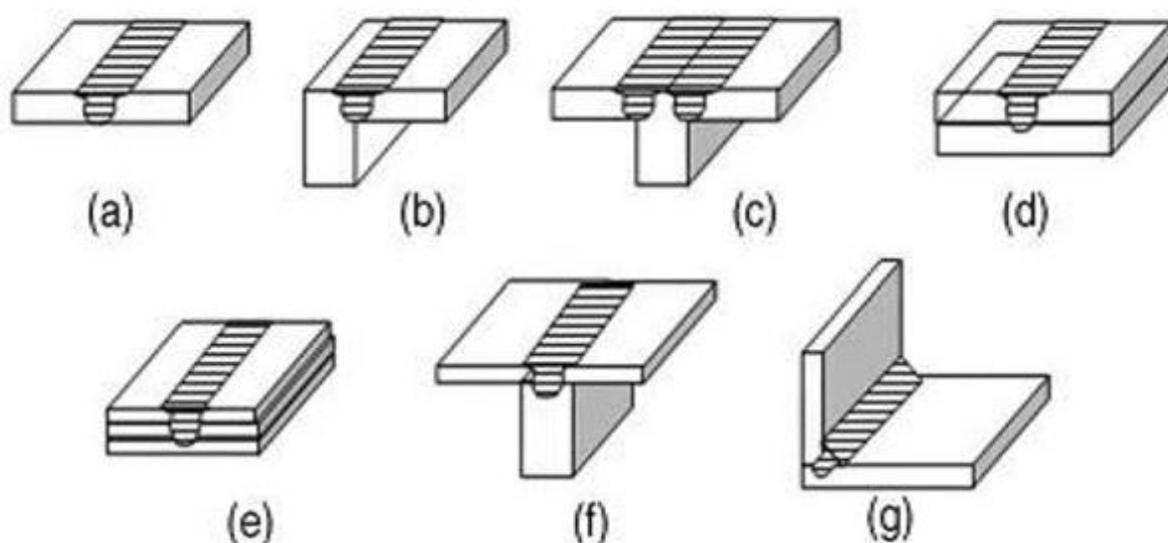
Les propriétés mécaniques globales des joints soudés par FSW sont dictées par les propriétés des zones constituantes, par contre celles de la zone soudée par fusion sont relativement mauvaises que celles des soudures par FSW, en soudage par FSW les propriétés sont relativement peu diminuées par rapport au métal de base. L'augmentation des vitesses de soudage permet d'augmenter la dureté du noyau et d'améliorer les propriétés mécaniques. Les propriétés du joint soudé dépendent d'une manière générale de l'état initial du matériau, du cycle thermomécanique subit et de son comportement face au traitement thermomécanique. La pratique la plus couramment utilisée est la caractérisation de la microstructure dans les différentes zones du joint afin d'obtenir un profil dans l'ensemble de ce dernier et d'établir où se trouvent les zones les plus faibles. Des essais de traction sont aussi effectués, la résistance du joint soudé soumis à une contrainte cyclique doit être déterminée à l'aide d'essais de fatigue, permettant d'établir la courbe d'endurance du joint. De tels essais sont accompagnés d'une analyse fractographique, qui vise à évaluer quelques caractéristiques critiques pour la durée de vie du joint soudé [6].

### 1.2.7. Configurations des joints soudés par FSW :

La réalisation des différentes configurations des joints soudés par FSW nécessite les points suivants [1] :

1. Le bridage des pièces pour éviter tout mouvement relatif de celles-ci sous l'action des efforts générés.
2. L'accessibilité au plan de joint par l'outil et d'accueillir l'épaulement afin d'assurer le contact de ce dernier avec la surface des pièces.
3. Placer, si nécessaire, une enclume à l'envers des pièces pour récupérer l'effort appliqué par l'outil et contenir la matière. Ces contraintes limitent les configurations de joint possibles et permettent de réaliser de nombreuses applications.

Le soudage se réalise essentiellement sur des pièces minces bout à bout, mais accepte d'autres configurations de joints tels que le soudage d'angle ou en "T" ou le soudage par superposition. Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW sont présentées sur la figure (1.14).



**Figure 1.14 :** Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence et (g) angle [9].

### **1.3. Les avantages du procédé FSW :**

Le soudage par friction malaxage est une technique très intéressante à l'industrie, il offrira des multiples avantages qui peuvent être classés comme suit :

#### **1.3.1. Les avantages liés au procédé :**

1. Soudage à l'état solide.
2. Pas de métal d'apport.
3. Pas de défauts de solidification.
4. Soudure en une seule passe sur toute l'épaisseur, ou en deux passes opposées sur épaisseurs fortes.
5. L'amélioration des propriétés mécaniques (la microstructure optimisée).
6. La rapidité de réalisation (temps de soudage réduit).
7. Possibilité de souder des matériaux de nature différente.
8. Possibilité de souder des alliages qui sont difficiles à souder par les procédés classiques.
9. La faible consommation d'énergie.
10. Effets limités des contraintes résiduelles.

#### **1.3.2. Les avantages économiques et environnementaux :**

1. Procédé économique en énergie.
2. Procédé non polluant ; pas de projections de gaz nuisibles ni d'émanation de fumées.
3. Pas de circulation d'eau de refroidissement.
4. Pas de finition après soudage (sauf pour les soudures circulaires).
5. Bon rendement énergétique.

#### **1.3.3. Avantages liés à l'équipement :**

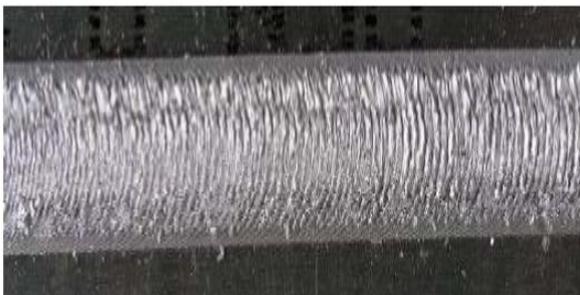
1. L'automatisation facile : contrôle par commande numérique.
2. Pas de protection thermique.
3. La simple conception : machine-outil.
4. La faible consommation de l'énergie.

#### 1.4. Les limites du procédé FSW :

Le procédé de soudage FSW, comme tous les autres procédés de soudage, il a des limites. Celles dernières sont liés aux paramètres opératoires non adaptés aux matériaux soudés tel que : Mauvaises vitesses d'avance et de rotation ; Mauvais choix d'outil ; Force axiale mal ajustée ou contrôlée ; Pièces mal retenues.

Les limites les plus couramment rencontrées sont :

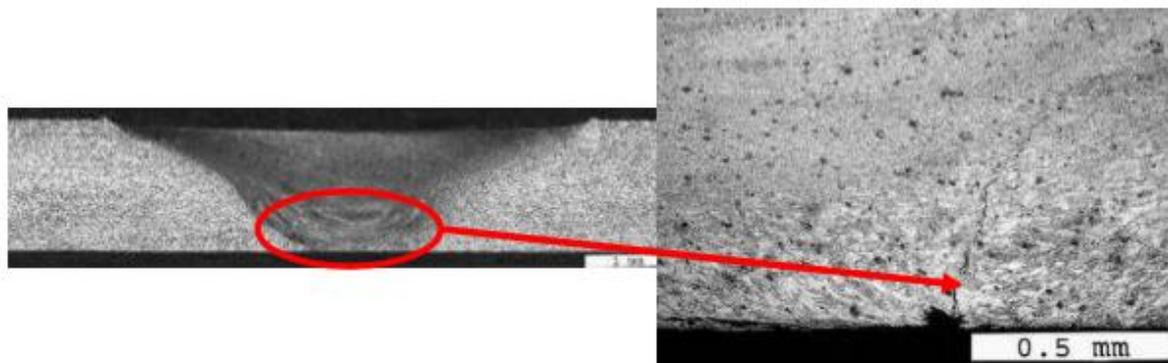
1. Défauts surfaciques : flash et brûlure [10].
2. Défaut internes [10] :
  - Manque de liaison en racine (kissing bond).
  - Manque de pénétration.
  - Manque de liaison sur oxyde.
  - Tunnel ou cavité.
3. Le cout d'installation de l'appareil est très onéreux.
4. Bridage très important des pièces.
5. L'empreinte du pion en fin de la soudure.



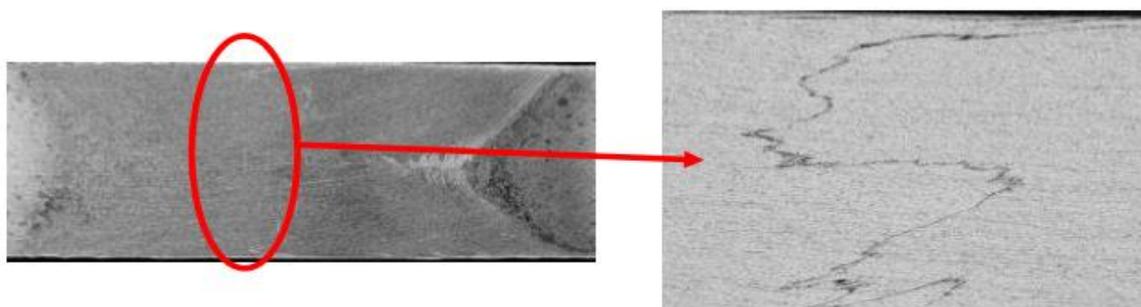
**Figure 1.15** : Défaut de surface « brûlure ».



**Figure 1.16** : Défaut de surface « flash ».



**Figure 1.17 :** Défaut interne manque de pénétration en racine.



**Figure 1.18 :** Défaut interne de type manque de liaison sur oxyde.

### 1.5. Les domaines d'application :

Le procédé FSW est largement utilisé dans des différents secteurs tels que l'industrie aéronautique, spatiale, automobile, maritime, ferroviaire ...

Il a été identifié rapidement comme une technique avantageuse pour le soudage de l'aluminium. Le tableau 4 présente par ordre chronologique les premières percées importantes dans l'assemblage par friction malaxage de l'aluminium.

**Tableau 1.4 : Applications majeures du FSW.**

Année	Application	Entreprise, pays
1995	Échangeur de chaleur à paroi creuse*	Marine Aluminium, Norvège
1996	Construction navale commerciale*	Marine Aluminium, Norvège
1998	Fusée Delta II	Boeing, États-Unis
1999	Construction navale commerciale*	SAPA, Suède
2000	Composantes automobiles*	SAPA, Suède
2000	Boîtier de système laser	General Tool, États-Unis
2001	Boîtier de moteur*	Hydro Aluminium (auparavant Marine Aluminium), Norvège
2001	Composantes automobiles*	Showa, Japon
2001	Structure de train*	Hitachi, Japon
2002	Composantes automobiles*	Tower Automotive, États-Unis
2003	Structure d'avion	Eclipse, États-Unis
2003	Construction navale commerciale*	Advanced Joining Technologies, États-Unis
2004	Réservoir externe pour navette spatiale	Lockheed Martin, États-Unis
2004	Panneau alimentaire	RIFTEC, Allemagne

### 1.5.1. L'industrie aéronautique :

Le soudage par friction malaxage est souvent utilisé en aéronautique parce qu'il est réalisé sans aucun métal d'apport ce qui permet de gagner du poids c'est-à-dire moins de consommation de carburant (soudage de tige de piston, soudage de voilure d'avion ...).

Dans l'industrie aéronautique, la société Eclipse Aviation a ouvert les 10.000 m<sup>2</sup> de centre de soudage par friction-malaxage en Mars 2004. 70% de rivetage et de processus traditionnels de liaison ont été remplacés par le procédé FSW. Ce qui a permis de fabriquer plus rapidement les deux turboréacteurs du jet Eclipse N500. La Figure 1.18 montre le fuselage du modèle Eclipse N500 aussi soudé par FSW. Pendant ce temps, la société Airbus est le premier fabricant d'avion à adopter la technologie FSW dans la fabrication de ses grands avions civils. La technologie de

soudage par friction malaxage est la solution idéale d'assemblage en remplacement du rivetage traditionnel pour ses potentialités d'application élevées [11].



**Figure 1.19 :** Panneau de fuselage soudé par FSW sur Eclipse 500.

### 1.5.2. L'industrie spatiale :

Dans l'industrie aérospatiale, les technologies de soudage par friction-malaxage ont été largement adoptées par de nombreuses entreprises, telles que Boeing, Lockheed Martin, Marshall Space Flight Center. Depuis 1999, la compagnie Boeing Space lance les fusées Delta dont les réservoirs de carburant ont été soudés par le procédé FSW en remplacement du procédé TIG jugé très coûteux. Le cycle de fabrication des réservoirs a donc été réduit de 71%, et les économies en ressources humaines de 80% pour l'adoption de la technologie de soudage par friction-malaxage.



**Figure 1.20:** Utilisation du procédé FSW pour souder les réservoirs de carburant de ses fusées Delta par la compagnie Boeing [6].

### 1.5.3. L'industrie navale :

Actuellement, les structures légères fabriquées par soudage par friction malaxage ont révolutionné la construction des bateaux de croisières et des divers bateaux de combat littoral de petites dimensions.



**Figure 1.21 :** Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destinés au pont du bateau de croisière "The World" [1].

### 1.5.4. L'industrie automobile :

Le but principal de l'utilisation FSW dans l'industrie automobile est de remplacer le rivetage. Les portes arrière de la Mazda RX-5, composées des panneaux d'aluminium, sont soudées par point par le procédé FSW comme montre la figure (1.21). D'autres constructeurs automobiles comme « Ford » utilisent ce procédé pour l'assemblage d'éléments au niveau de la suspension.



**Figure 1.22 :** Soudage « friction-malaxage » par point utilisé pour l'automobile [6].

### 1.5.5. Le domaine ferroviaire :

Les fabricants européens (ALSTOM, SAPS, ...) et japonais (Hitachi) de tramways et de trams utilisent le soudage FSW pour le soudage des profilés d'aluminium extrudés. Grâce à ce procédé FSW, de longs profilés en aluminium peuvent être soudés tout en limitant les déformations.



Figure 1.23 : soudage de profilé du train Hitachi [1].

### 1.5.6. Industrie nucléaire :

Des études ont été réalisées en Suède pour le soudage par FSW d'un couvercle de containers en cuivre, destinés à l'enfouissement des déchets hautement radioactifs [1].

### 1.6. Conclusion :

Le FSW, breveté par le TWI en 1991, est une technique de soudage à l'état solide. Cette méthode est jugée très efficace et utile, pour joindre les matériaux non ferreux tels que les alliages d'aluminium et de cuivre. Le développement de ce procédé a permis le soudage des métaux difficilement soudables avec les procédés conventionnels, ce qui le rend très utilisé et dans des différents secteurs.

Théoriquement, l'outil utilisé dans ce procédé est non consommable. Il assure le malaxage de la matière avec l'assistance de la chaleur créée par le frottement outil/matière. Il est composé

d'un épaulement qui frotte sur la surface des pièces à assembler, et d'un pion assurant la fonction de malaxage.

Son principe consiste à malaxer et plastifier la matière. Les pièces à souder sont maintenues rigidement pour éliminer tout mouvement lors du soudage.

La vérification de l'intégrité de la pièce après le soudage se fait en appliquant un contrôle non destructif qui a pour but de contrôler la pièce sans aucune modification et d'assurer la qualité de la soudure.

## **CHAPITRE 2**

### **LES METHODES CND**

#### **2.1 Introduction :**

Le procédé FSW est un procédé de soudage très utilisé dans le monde entier et dans des domaines assez sensibles où la sécurité est le critère principal. Pour cela il faut vérifier la qualité de soudage évidemment pour assurer la sécurité, la vérification se fait par des moyens de contrôle parmi ces moyens : le Contrôle Non Destructif CND.

Ce contrôle est un moyen de vérification de la qualité du produit, il a pour but de vérifier l'intégrité d'une pièce sans la dégrader en détectant les défauts (surfaciques ou internes). Le CND est un ensemble des méthodes de mesure qui s'étendent du simple à compliqué.

Dans ce chapitre, on présente certaines techniques de CND utilisées, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

#### **2.2 Les méthodes de contrôle non destructif CND :**

Les enjeux de sûreté, les contrôles qualité et de santé des pièces deviennent un impératif incontournable [12]. Le contrôle Non Destructif est un ensemble des méthodes de mesure et d'essais qui permettent de vérifier l'intégrité des structures, des pièces et des matériaux sans les détruire.

Le Contrôle Non Destructif (CND) permet, par ces méthodes non dommageables (non destructives) de détecter, mesurer, positionner, dimensionner, caractériser des défauts internes et externes d'éléments sensibles et de constater leurs évolutions, il permet aussi de mesurer d'une façon indirecte les caractéristiques des matériaux sans les modifier ou altérer, ce sont des méthodes invasives. Alors, son but principal est de pouvoir contrôler une pièce sans la détruire.

Historiquement, CND commence à la fin du XIX siècle, avec la physique moderne, mais c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie. Vers les années 1960-1970, le développement des centrales nucléaires et de l'aéronautique a engendré une forte accélération du progrès du CND, et différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe,...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (au cours de

fabrication, en service). Les défauts recherchés peuvent être classés en deux grandes familles : les défauts surfaciques et les défauts internes.



**Figure 2.1 :** Quelques besoins importants de CND.

Les méthodes de CND qui ont pour but principal de contrôler une pièce sans la modifier. On peut les classer selon les phénomènes physiques mis en jeu : acoustiques (ultrasons, émission acoustique), rayonnements (visuel, radiographie X,  $\gamma$ , tomographie, neutronographie, thermographie infrarouge), flux de matière (ressuage, étanchéité), champs électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault).

Les différentes méthodes de contrôle non destructif ont classiquement deux objectifs différents mais souvent complémentaires : la recherche des défauts macroscopiques à l'échelle de la mesure et la caractérisation globale de matériaux ou de pièces. Dans le premier cas, on assure la qualité de la pièce par la preuve de l'absence de défauts. Dans le second cas, on recherche certaines caractéristiques globales du matériau, tels que l'homogénéité, ou des paramètres géométriques tels que l'épaisseur de la pièce, ou d'une couche superficielle. Ces contrôles peuvent s'effectuer en suivant l'évolution relative d'un paramètre physique.

### **2.2.1 Les types des défauts :**

Les défauts recherchés peuvent être classés en deux grandes catégories :

#### **2.2.1.1 Les défauts surfaciques :**

Les défauts surfaciques sont les défauts à deux dimensions. Ils incluent les criques, les fissures, les piqures, les craquelures pouvant provoquer à terme la rupture de la pièce, ou d'aspect, c'est à-dire la variation de paramètres géométriques et/ou physiques de la pièce tels que sa rugosité, son épaisseur, l'homogénéité de la surface, qui rendent la pièce inutilisable.

### 2.2.1.2 Les défauts internes :

Les défauts internes sont les défauts à trois dimensions, localisés dans le volume du corps à contrôler. Ils sont susceptibles d'affecter la santé de la pièce et peuvent se présenter sous la forme d'une crique interne, des porosités, des soufflures, d'inclusions diverses.

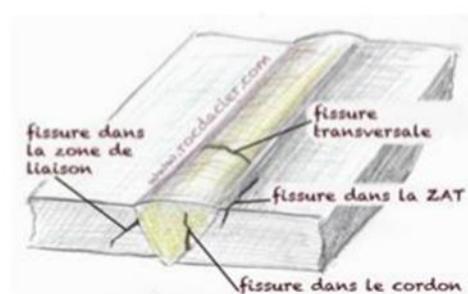
### 2.2.2 Les origines des défauts :

Les origines des défauts sont multiples, on peut citer les exemples suivants :

1. Hétérogénéité dans les matériaux.
2. Défauts de moulage.
3. Défauts de collage.
4. Délaminage des composites.



a) Défaut de corrosion



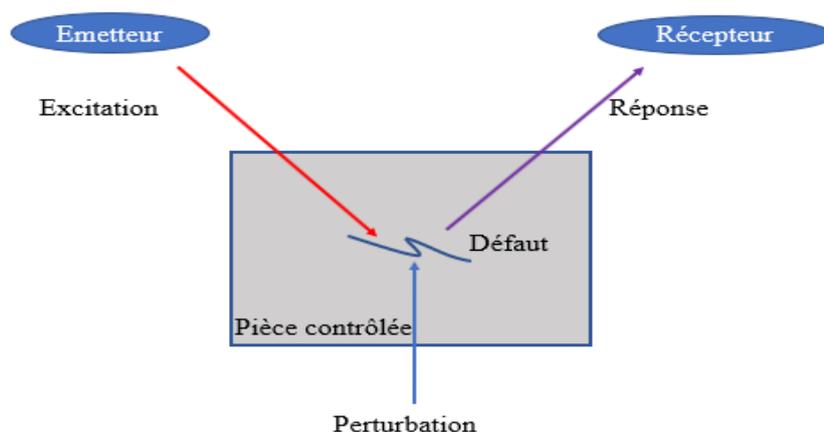
b) Détection de fissuration

**Figure 2.2 :** Présentation de quelques défauts qui existent dans l'industrie.

### 2.2.3 Le principe de détection des défauts :

Les méthodes du CND sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. En exploitant un phénomène physique pour détecter la présence d'un défaut. Les principes physiques comme l'atténuation, réflexion ou diffraction des ultrasons, atténuation ou diffraction des rayons X ou  $\gamma$ , perturbation des courants de Foucault... peuvent servir à caractériser les matériaux (dureté, état de contraintes, fissures surfacique ou internes...).

En apportant une excitation à la pièce qui va rencontrer s'il y'a un défaut, une perturbation et grâce à ça on va ressortir une réponse qui permet de détecter ce défaut. Y'a différents types de réponses possible, en effet la détection des défauts se fait soit visuellement (ressuage, magnétoscopie...) soit par d'autres méthodes (la diffraction des rayons x, les ultrasons...) si les défauts sont plus petits.



**Figure 2.3 :** Principe de détection des défauts.

### 2.2.4 Les critères du choix de la méthode :

Le choix d'une méthode optimale de CND, est très important avant le contrôle. Dans le cas de la recherche des défauts, le choix doit se faire en prenant en considération les caractéristiques générales du couple « pièce-défaut », ainsi que celles de l'environnement.

On a plusieurs critères pour choisir la méthode adaptée :

1. La nature de défaut recherché (forme, dimensions, origine).
2. La nature de la pièce (ferromagnétique ou non).
3. La localisation du défaut.

### 2.2.5 Les domaines d'application :

Le contrôle non destructif est utilisé dans des différents secteurs comme :

1. L'aéronautique (ailes d'avion, pièces moteurs, trains d'atterrissage,... etc.).
2. L'automobile (contrôle des blocs moteurs).
3. L'industrie énergétique (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.).
4. L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs).
5. L'industrie navale (contrôle des coques).
6. L'aérospatiale.

## 2.3 Les techniques de contrôle non destructif :

### 2.3.1 Les courants de Foucault :

Le contrôle par les courants de Foucault est utilisé dans des différents domaines comme l'aéronautique et l'industrie nucléaire pour inspecter des corps conducteurs électriques.

#### 2.3.1.1 Le principe :

Cette méthode consiste à créer dans des matériaux conducteurs électriques, des courants induits en circuit fermé par un champ magnétique variable dans le temps au moyen d'un capteur. Ces courants induits sont les courants de Foucault, ils circulent localement dans le matériau dont leurs distributions dépendent du champ magnétique d'excitation, de la géométrie et les caractéristiques électriques de la pièce.

Une bobine parcourue par un courant alternatif, génère des courants induits qui créent eux-mêmes un flux magnétique. Ce flux magnétique, en s'opposant au flux générateur, modifie l'impédance de la bobine. La présence d'un défaut perturbe la circulation et la répartition des courants de Foucault. La variation de l'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation est utilisée pour détecter des défauts superficiels. En général, On utilise une méthode comparative qui consiste à mesurer la différence entre l'impédance  $Z$  de la bobine sur la pièce à étudier et l'impédance  $Z_0$  d'une pièce de référence ne comportant pas de défaut. Cette procédure a donc recours à un étalonnage préalable. C'est ainsi que les courants de Foucault sont couramment utilisés pour la recherche de fissures de fatigue au cours de la maintenance en aéronautique des trous à l'emplacement des rivets [13].

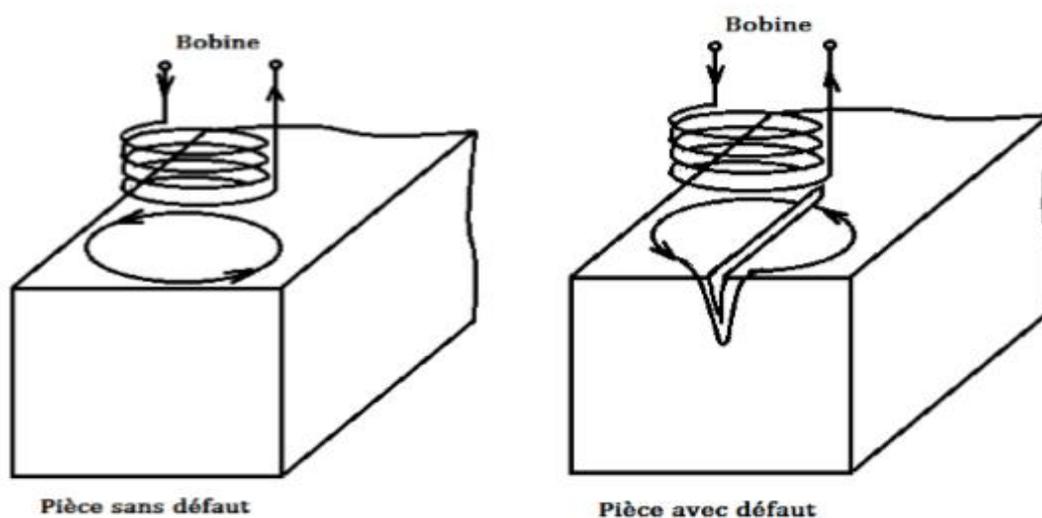


Figure 2.4 : Modification du trajet des courants de Foucault.

### 2.3.1.2 Le diagramme d'impédance normalisée :

Un capteur est toujours muni d'une bobine de  $N$  spires, il est caractérisé par deux grandeurs : la composante résistive ( $\mathbf{R}$ ) qui englobe les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans la cible et les pertes internes du bobinage d'excitation, et le terme inductif ( $\mathbf{X}$ ) qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes du champ magnétique émises par le capteur [14].

$$\bar{Z} = R + jX \quad (2.1)$$

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{i}_{\text{exc}}} \quad (2.2)$$

Où  $\bar{V}$  et  $\bar{i}_{\text{exc}}$  sont les grandeurs complexes associées à la tension et au courant d'excitation.

Sachant que la tension  $\bar{V}$  et le courant  $\bar{i}_{\text{exc}}$  s'expriment en fonction de la réluctance complexe du circuit magnétique  $\varphi$  à l'aide des relations :

$$N \cdot \bar{i}_{\text{exc}} = \bar{R} \cdot \bar{\varphi} \quad \text{et} \quad \bar{V} = jN\omega\bar{\varphi} \quad (2.3)$$

L'impédance s'écrit donc :

$$\bar{Z} = j \frac{\omega N^2}{\bar{R}} = R + jX \quad (2.4)$$

Pour ne conserver dans l'expression de l'impédance que les variations dues à la présence de la cible, on introduit traditionnellement la notion d'impédance normalisée. Cette impédance normalisée  $Z_n$  se déduit de  $Z$  à l'aide de l'expression [14]:

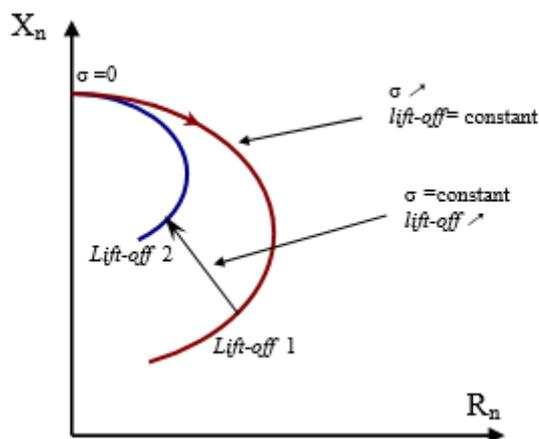
$$\bar{Z}_n = R_n + jX_n = \frac{\bar{Z} - R_0}{X_0} \quad (2.5)$$

$$R_n = \frac{R - R_0}{X_0} \quad \text{et} \quad X_n = \frac{X}{X_0} \quad (2.6)$$

Avec  $Z_0 = R_0 + jX_0$  est l'impédance du capteur à vide (sans cible).

En procédant à cette normalisation, la mesure devient indépendante de certaines caractéristiques propres de la bobine excitatrice (nombre de spires, pertes à vide) et de la croissance de la réactance en fonction de la fréquence. Elle dépend uniquement des paramètres de structure que sont la fréquence d'excitation et la géométrie de la sonde, et des paramètres de la cible à savoir sa géométrie, sa conductivité électrique  $\sigma$ , sa perméabilité magnétique  $\mu$  et la distance capteur-cible (lift-off). L'étude des variations de  $Z_n$  s'effectue dans le plan d'impédances normalisées

en traçant  $X_n$  en fonction de  $R_n$ . Pour un capteur donné, toute variation de l'un des paramètres de la pièce induit un déplacement du point représentatif de  $Z_n$  dans le plan d'impédances normalisées. La figure 2.5, illustre l'allure des trajectoires que décrit le point de l'impédance de la sonde pour des variations de la conductivité électrique  $\sigma$  et de la distance capteur-cible [14].



**Figure 2.5 :** Influence de la conductivité et du lift-off sur le diagramme d'impédances normalisées.

### 2.3.1.2 L'effet de peau :

L'intensité des courants de Foucault dans un matériau conducteur électrique caractérisée par une conductivité électrique  $\sigma$  (en  $\text{Sm}^{-1}$ ) et une perméabilité magnétique  $\mu$  (en  $\text{Hm}^{-1}$ ), diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle  $\delta$  (en m), souvent nommée épaisseur de peau [12].

En pratique, on peut détecter des anomalies jusqu'à une profondeur de quelques  $\delta$ . L'épaisseur de peau est définie :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (2.7)$$

Si on considère une pièce plane infini en épaisseur et en  $(x, y)$ , excitée par un courant extérieur, de fréquence  $f$  (en Hz), 63% des courants circulent dans l'épaisseur de peau. Le module de la densité de courants dans la pièce est donné par la relation :

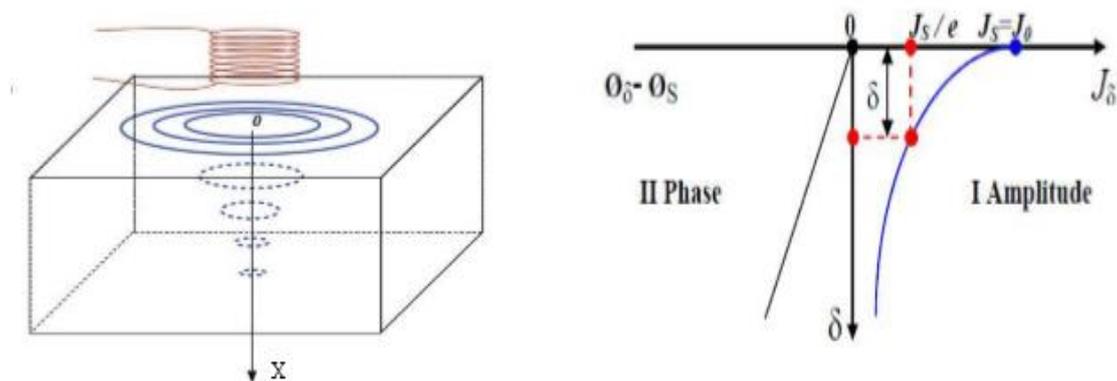
$$J(z) = J_s e^{-z/\delta} \quad (2.8)$$

Avec :

$Z$  : la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce.

$J(z)$  : le module de la densité de courant à la profondeur  $z$ .

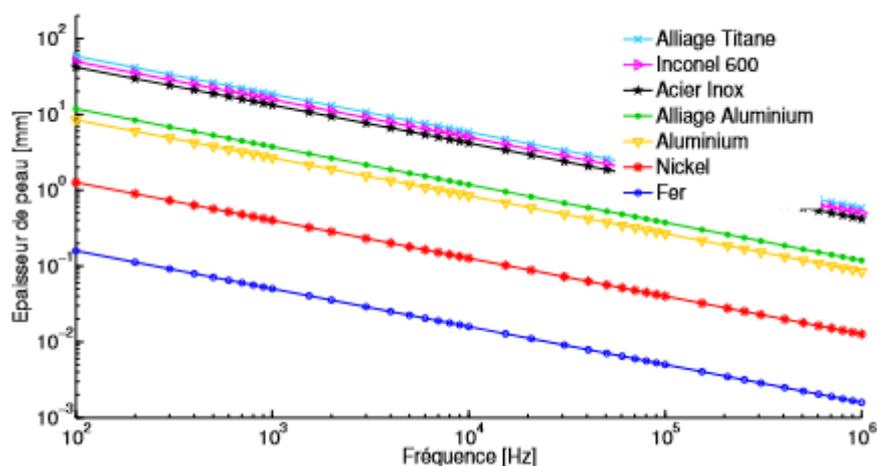
$J_s$  : le module de la densité de courant à la surface de la pièce ( $Z=0$ ).



**Figure 2.6 :** distribution des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur  $z$ .

La figure 2.7, montre l'évolution de la profondeur de peau en fonction de la fréquence pour certains matériaux. On remarque qu'aux basses fréquences l'épaisseur de peau est plus élevée, et dans le cas ferromagnétique (le nickel et le fer), elle est beaucoup plus faible que dans les cas non magnétiques à cause des valeurs élevées de  $\mu$ .

On peut donc conclure que pour pouvoir détecter des défauts enfouis dans un matériau ferromagnétique, les fréquences à utiliser doivent être de l'ordre de quelques centaines de Hz.



**Figure 2.7 :** Évolution de l'épaisseur de peau en fonction de la fréquence pour certains matériaux.

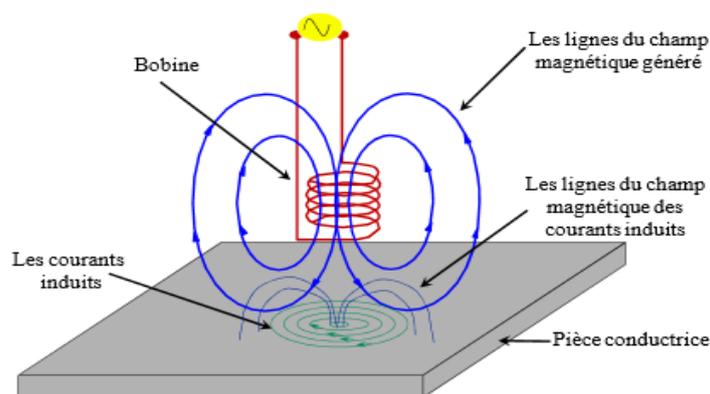
La plage générale d'utilisation des CF se situe entre 10Hz et 10MHz. En effet, pour une fréquence trop basse, l'amplitude des CF sera faible. Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites engendrés par les capacités inter-spires de la sonde. Celles-ci provoquent des résonances et tendent à court-circuiter le circuit inductif.

### 2.3.1.3 Les avantages du contrôle CF :

1. La grande sensibilité de détection des défauts.
2. Mise en œuvre simple et pas couteux.
3. Mesure possible à très hautes température (900°).
4. Technique non polluante.
5. La rapidité de détection des défauts.
6. La transportabilité.
7. La détection des défauts surfaciques et ceux près de la surface.

### 2.3.1.4 Les limites du contrôle CF :

1. La profondeur d'inspection limitée.
2. La détection des défauts se fait d'une manière locale.
3. Il ne s'utilise que pour les matériaux conducteurs électriquement.
4. La compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection.



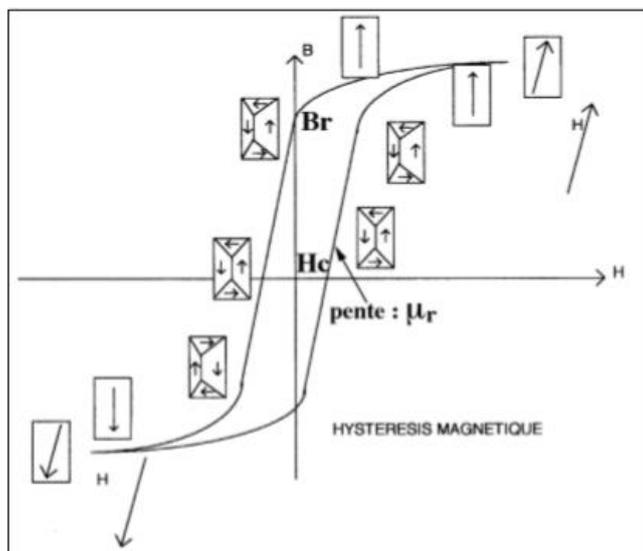
**Figure 2.8 :** Inspection par Courants de Foucault.

### 2.3.1.5 Cycle d'hystérésis :

Le cycle d'hystérésis est le cycle qui régit l'aimantation et la désaimantation d'un matériau. Dans le cas du cycle d'hystérésis, le matériau est porté alternativement de saturation à saturation dans deux directions opposées, à l'aide d'une excitation magnétique externe alternative. Partant de l'état saturé, nous retrouvons alors les phénomènes inverses de ceux décrits lors de la première aimantation et ayant abouti à la saturation [15] :

1. Partant de l'état saturé, alors que  $H$  (le champ magnétique) diminue, les moments magnétiques vont retourner dans la direction de facile aimantation la plus proche.
2. De nouveaux domaines de fermeture vont apparaître : phénomène de germination.
3. Décroissance des domaines orientés favorablement par rapport à  $H$ .
4. Puis croissance de ceux orientés dans la direction opposée.
5. Disparition des domaines défavorablement orientés.

Lorsque l'excitation magnétique redevient nulle, on constate que le matériau n'est pas forcément parfaitement démagnétisé : il garde une image des domaines favorablement orientés (rémanence). Il peut subsister une induction rémanente  $B_r$ . Pour retrouver un matériau démagnétisé, il est nécessaire de continuer à inverser le Champ  $H$  jusqu'à une valeur  $H_c$ , le champ coercitif, qui correspond au champ nécessaire pour réobtenir une équipartition des domaines. Cette grandeur est souvent utilisée pour caractériser les matériaux ferromagnétiques. Il est aussi courant d'observer le paramètre  $\mu_r$ , la perméabilité magnétique relative du matériau, qui correspond à la pente de la courbe mesurée au voisinage du champ coercitif.

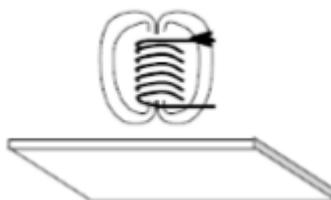


**Figure 2.9:** Le cycle d'hystérésis.

### 2.3.1.6 Les formes d'enroulements des capteurs inductifs [14] :

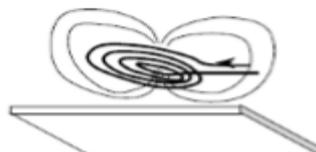
Selon la nature du produit à contrôler, il existe deux façons de mettre en œuvre le bobinage des capteurs inductifs :

1. Bobine cylindrique (peut être utilisée, avec ou sans noyau) :



**Figure 2.10 :** Bobine cylindrique.

2. Bobine plate (spirale) :



**Figure 2.11:** Bobine plate.

### 2.3.1.7 Les capteurs à courant de Foucault :

Le capteur est une bobine ou un ensemble de bobines qui sert à générer les courants induits « courants de Foucault », La grandeur mesurée est l'impédance ou une différence de potentiel représentant l'image du courant de Foucault.

### 2.3.1.8 La classification des capteurs :

La classification dépend de la fonction, la géométrie et le mode de contrôle du capteur.

#### 1. Classification des capteurs inductifs selon la fonction :

L'alimentation et la mesure sont deux fonctions qui doivent être assurées par les capteurs. Si le capteur assure les deux fonctions par un seul enroulement, on parle donc d'un capteur à double fonction. Si non c'est un capteur à fonction séparée.

#### 1.1. Le capteur à double fonction :

C'est un capteur dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées et l'inspection se fait par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine dans son environnement. Les capteurs de ce type favorisent la détection de grandeurs à évolution lente comme l'épaisseur de revêtement et de conductivité.

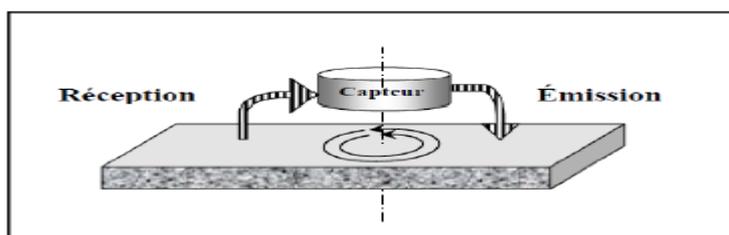


Figure 2.12 : Capteur à double fonction [16].

#### 1.2. Le capteur à fonction séparée :

Ce capteur est muni de deux enroulements, le primaire pour créer les courants induits et le secondaire qui servira uniquement pour la mesure.

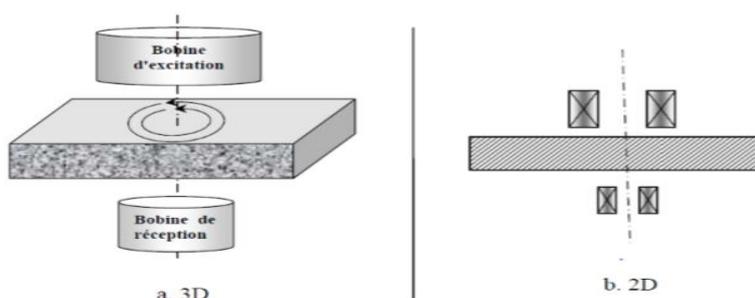


Figure 2.13: capteur à fonction séparée [16].

## 2. Classification selon la géométrie :

### 2.1. Capteur à bobine encerclant :

C'est un capteur dont la bobine entoure la pièce à contrôler. Il est utilisé pour inspecter par l'extérieur des objets de faibles sections tels que les tubes et les barres.

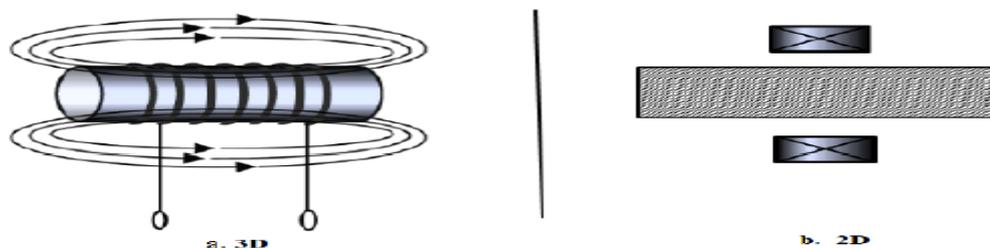


Figure 2.14 : capteur à bobine encerclant [16].

### 2.2. Capteur à sonde interne :

Ce capteur est consacré pour le contrôle un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements entourent l'axe de translation de la pièce. Ils peuvent être sans ou avec noyau.

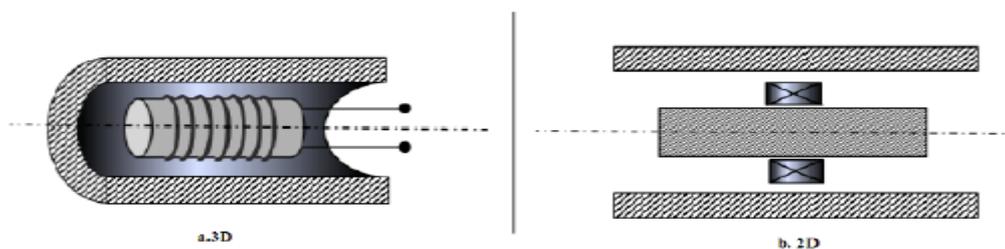


Figure 2.15 : Bobine interne glissante avec noyau [16].

### 2.3. Capteur à sonde ponctuelle :

C'est un capteur utilisé pour le contrôle des objets à des endroits très précis. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce à inspecter. Ce capteur sert à faire un contrôle local des pièces, même celles des géométries complexes.

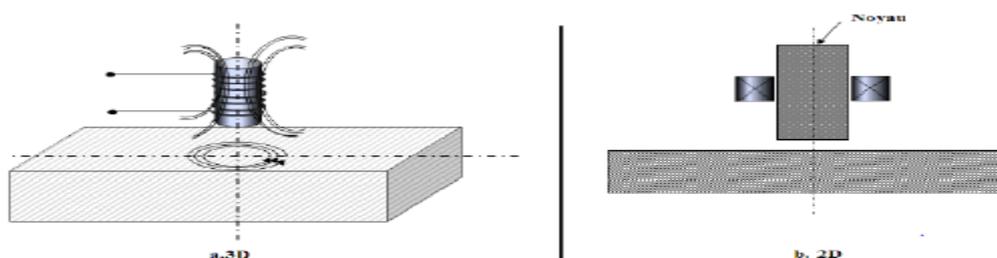


Figure 2.16 : Bobine simple avec noyau [16].

## 2.4. Capteur à bobine plate :

Comme la bobine ponctuelle, ce capteur est utilisé pour contrôler localement les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large.

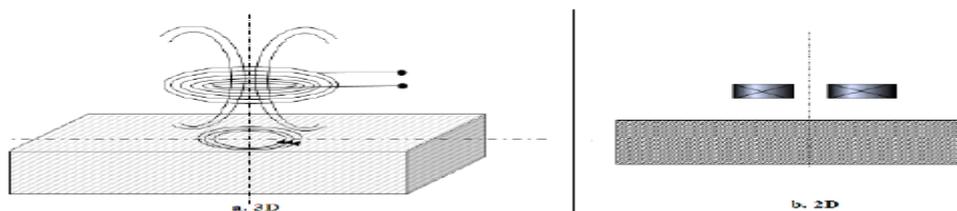


Figure 2.17 : Bobine plate [16].

## 2.5. Capteur à sonde interne tournante :

Ce capteur tourne autour de l'axe de translation, en résultant un champ magnétique perpendiculaire à l'axe de la pièce et permet de localiser les défauts sur les surfaces internes des pièces creuses.

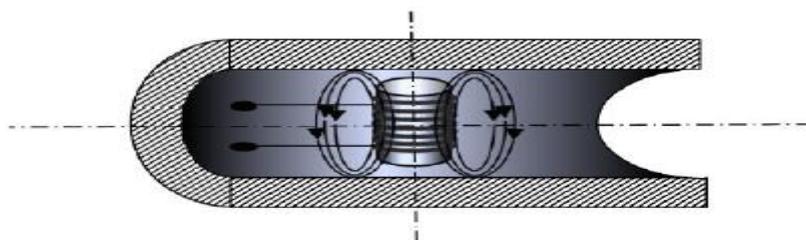


Figure 2.18 : capteur interne tournant [16].

## 3. Selon les modes de contrôle :

### 3.1. Le mode absolu :

Cette méthode utilise un capteur à double fonction, pour ce mode la mesure se fait par comparaison du signal reçu à une référence artificielle électronique. La sensibilité à la variation de température est l'inconvénient de ce mode.

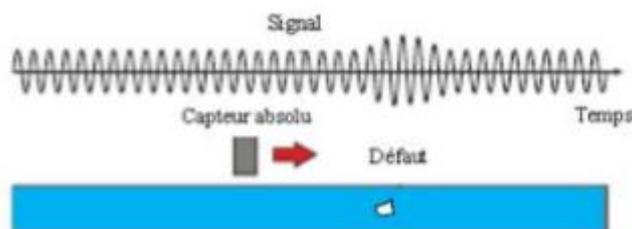


Figure 2.19 : le mode absolu [17].

### 3.2. Le mode différentiel :

Pour ce mode, le capteur est constitué minimum de deux éléments bien liés entre eux dont les flux sont opposés, la mesure se fait par la comparaison de deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins. Dans le cas d'une pièce saine, l'impédance du capteur différentiel est nulle et en présence d'un défaut elle se modifie.

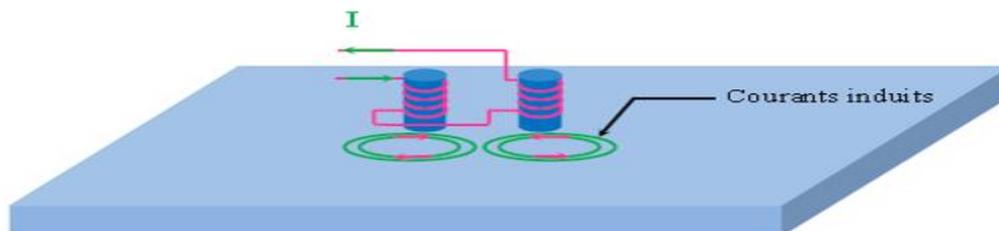


Figure 2.20: le mode différentiel [17].

### 3.3. Le mode compensé :

Deux bobines sont utilisées, l'une à proximité d'une surface de la pièce à contrôler, l'autre à proximité de la surface saine. la première capte les grandeurs utiles et perturbatrices tandis que l'autre capte les signaux perturbateurs [16].

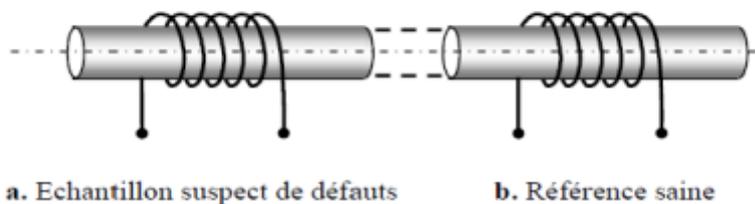


Figure 2.21 : le mode compensé [16].

#### 2.3.1.9 Les critères de choix d'un capteur :

Le choix d'un capteur dépend des critères suivants :

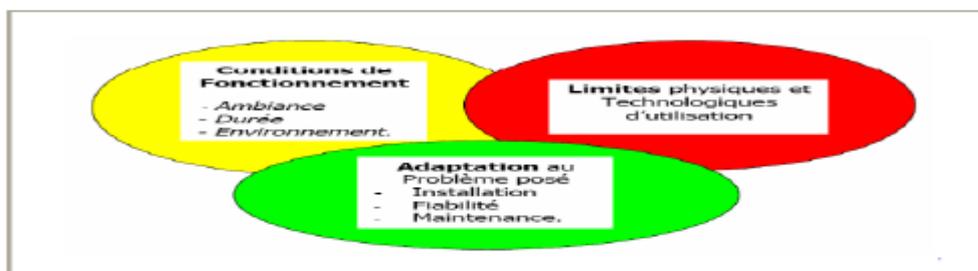


Figure 2.22 : Critères de choix d'un capteur [16].

### **2.3.1.10 Les principaux paramètres influant le contrôle :**

Les principaux paramètres influant le contrôle peuvent se répartir en trois catégories :

#### **1. Paramètres liés au matériau :**

La conductivité électrique  $\sigma$  et la perméabilité  $\mu$ , ce sont les paramètres liés au matériau. Les variations de ces paramètres ont des causes très diverses comme la présence des contraintes résiduelles importantes dues à la fabrication.

#### **2. Paramètres liés au montage :**

Ils gouvernent le couplage entre le capteur et le matériau : il s'agit soit du coefficient de remplissage pour les bobines encerclant, soit de la position du capteur par rapport à la surface de la pièce (lift-off). Les variations du lift-off provoquent des fluctuations de l'impédance qui peuvent prendre une amplitude telle qu'elles masqueront les indications caractéristiques du défaut [14].

#### **3. Paramètres électriques :**

C'est essentiellement la fréquence d'excitation du capteur qui sera choisi en fonction des considérations précédentes, à savoir l'obtention d'un effet de peau adéquat par rapport à la profondeur des défauts. L'intensité de magnétisation alternative, liée à l'intensité du courant d'excitation, n'est pas un facteur déterminant du contrôle, dans la mesure où elle est choisie suffisamment faible pour éviter une saturation magnétique qui introduirait des non linéarités rendant l'exploitation des signaux très compliquée. Cette intensité doit être suffisamment forte pour que le rapport signal/bruit soit convenable au niveau des amplifications et autres traitements électroniques [14].

### **2.3.1.11. Les différents modes d'excitation :**

Quel que soit le type de capteur utilisé pour contrôler une pièce, il existe pratiquement 3 différents modes on peut les classer comme suit :

#### **1. L'excitation mono fréquence :**

Le courant de Foucault est obtenu par une excitation sinusoïdale de fréquence fixe qui peut être fournie par un générateur ayant une ou quelques fréquences fixes commutables. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés. La fréquence intervient sur la profondeur de pénétration et sur la séparation en phase des réponses de divers défauts. Pour une fréquence très basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits. Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés par les capacités inter

spires du capteur. Il n'y a cependant pas de critères simples et uniques du choix de la fréquence. Nous pouvons donc dire que ce mode d'excitation est limité en utilisation car il ne délivre pas une caractérisation fine des contrôles et n'élimine pas l'influence de l'ensemble des paramètres perturbateurs [16].

## **2. L'excitation multifréquence :**

Cette méthode est la plus utilisée dans le domaine de CND à courant de Foucault, Il faut faire des mesures à plusieurs fréquences d'excitation pour avoir beaucoup d'information. Cette technique de mesure peut être réalisée en fréquences séquentielles ou en fréquences simultanées. La première excite le capteur par mono fréquence successive, c'est une technique qui met un temps d'exécution et d'acquisition de données important. La deuxième consiste à injecter au capteur simultanément plusieurs signaux de fréquences différentes [16].

## **3. L'excitation pulsée :**

Cette technique consiste à émettre un champ magnétique de large bande de fréquence, en excitant le capteur avec un signal impulsionnel. La forme des signaux utilisés peut être rectangulaire, triangulaire, ou semi sinusoïdale, cette dernière étant la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

### **2.3.2 Le contrôle par les ultrasons US :**

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques se propageant dans tout support matériel présentant une certaine élasticité. Les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires allant de 15kHz à plus de 100MHz.

Ce contrôle est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage dans la pièce à inspecter (figure 2.23).

Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur qui joue souvent le rôle d'un émetteur/récepteur. L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut [14].

Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure, le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises.

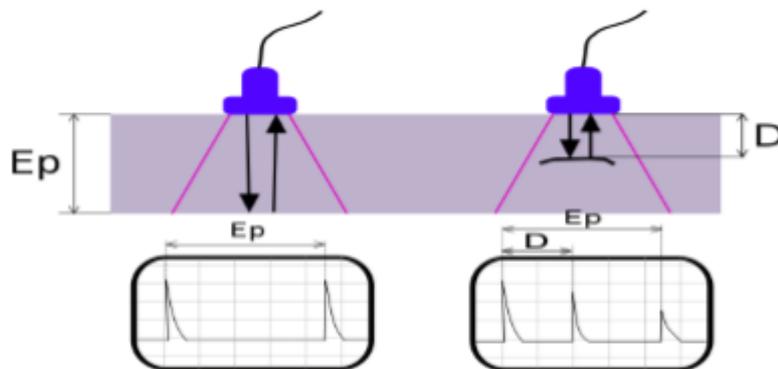


Figure 2.23 : principe du contrôle par ultrasons.

### 2.3.2.1 Les différentes techniques de contrôle par les Ultrasons :

#### 1. Le contrôle par contact :

Pour ce type de contrôle le transducteur est placé directement sur la pièce à inspecter, dont le couplant est huile ou des gels spéciaux. Cette technique est utilisée pour faire un contrôle manuel qui nécessite qu'un seul transducteur.

#### 2. Le contrôle par immersion :

Pour ce type de contrôle, la pièce à contrôler est totalement immergée dans l'eau pour analyser une grande partie de celle-ci, les transducteurs ne sont pas en contact avec la pièce à contrôler mais sont fixés à l'extrémité d'un bras manipulateur permettant la translation verticale et des rotations suivant plusieurs axes et ainsi on peut le positionner comme on le désire [18].

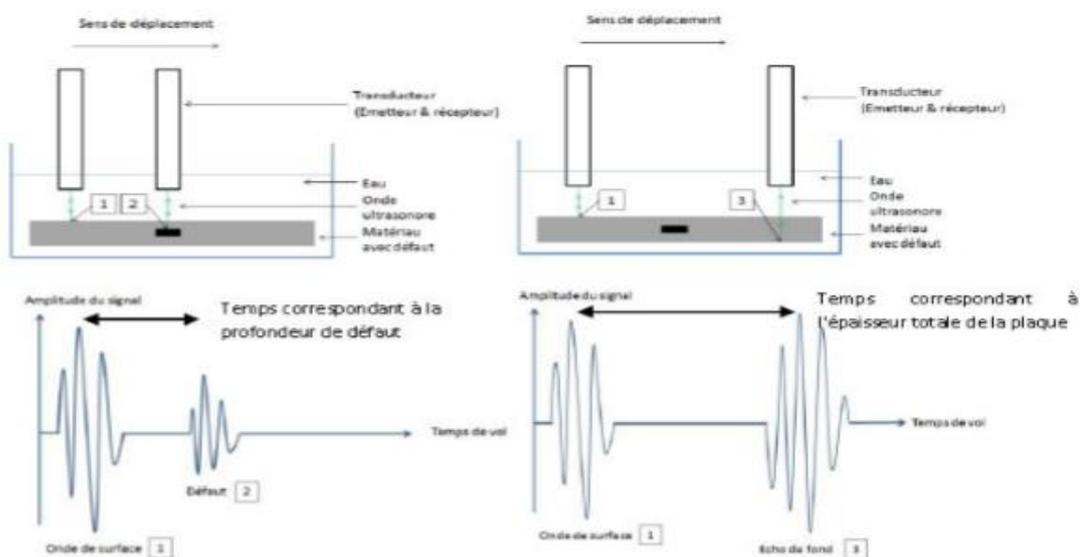


Figure 2.24 : le principe de contrôle par immersion [19].

### 2.3.2.2 Les caractéristiques d'ondes :

Une onde ultrasonore est une onde acoustique qui se propage dans un milieu élastique, ces ondes sont produites à une fréquence supérieure à 20 KHz. Elles sont caractérisées par une longueur, une fréquence et une vitesse de propagation.

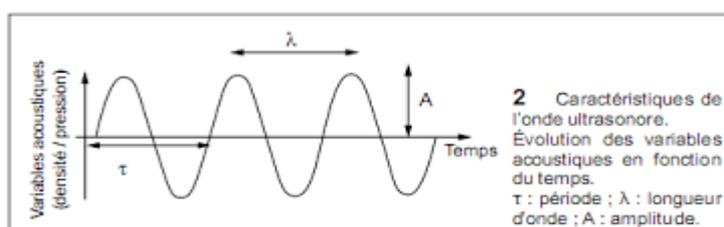


Figure 2.25 : les caractéristiques d'une onde ultrasonore.

### 2.3.2.4 Les différents types d'onde :

#### 1. Ondes longitudinales :

Ce sont des ondes caractérisées par le mouvement des particules parallèle à la direction de propagation ce qui permet de provoquer des contraintes de compression et de traction.

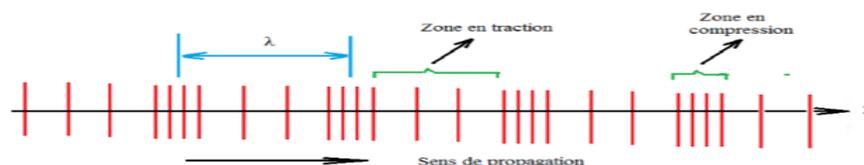


Figure 2.26 : onde longitudinale.

Ce type des ondes existent pour tous états physiques (solide, liquide et gazeux).

#### 2. Les ondes transversales :

Ce sont des ondes caractérisées par le mouvement des particules perpendiculaires à la direction de propagation ce qui provoque des contraintes de cisaillement qui ne se propagent que dans les solides et liquides visqueux.

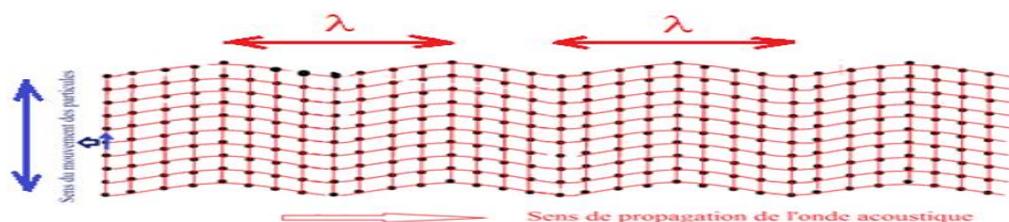
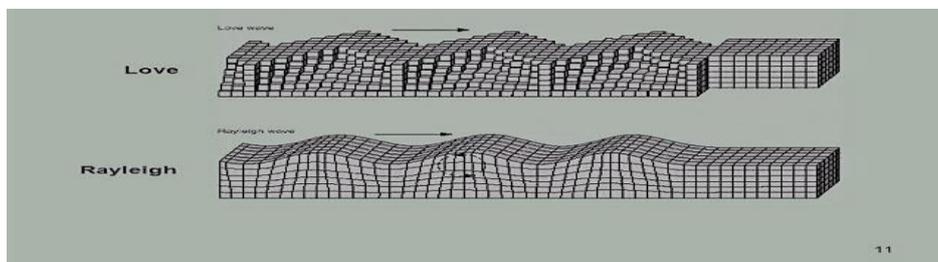


Figure 2.27 : onde transversale.

### 3. Les ondes de surface :

L'interaction des deux ondes longitudinale et transversale résulte les ondes de surface sur une profondeur d'environ d'une longueur d'onde, les ondes de Rayleigh et de Love sont les principaux types d'ondes de surface.



**Figure 2.28:** les ondes de surface.

#### 2.3.2.5 Les avantages :

1. La grande sensibilité de détection de défauts.
2. Il est utilisable sur la plupart des matériaux.
3. Profondeurs contrôlables trop importantes.
4. Les résultats sont immédiats.
5. L'appareil est portatif.

#### 2.3.2.6 Les inconvénients :

1. La formation de l'opérateur est exigée, pour interpréter l'affichage de manière précise.
2. Un produit de couplage est exigé.
3. Le contrôle limité par la complexité de la forme de la pièce inspectée.
4. Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle).
5. La sensibilité à l'orientation des défauts.

### 2.3.3 Le contrôle par diffraction des rayons X (DRX) :

#### 2.3.3.1 Généralités sur les rayons X :

Le rayonnement X est un rayonnement électromagnétique tout comme la lumière ou le rayonnement  $\gamma$  (il peut être réfléchi, réfracté et polarisé), sa longueur d'onde se trouve entre celle des ultraviolets et celle du rayonnement  $\gamma$ . il est caractérisé par un champ électromagnétique sinusoïdal qui se propage à la vitesse de la lumière.

### 2.3.3.2 Les caractéristiques des rayons X :

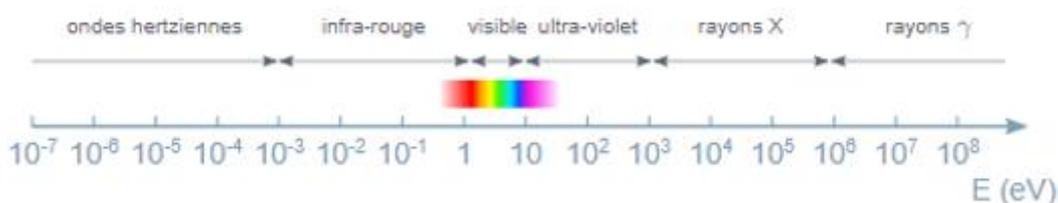
Les caractéristiques principales de ce rayonnement sont :

1. Sa fréquence  $\nu$  exprimée en Hertz (Hz).
2. Sa longueur d'onde  $\lambda$  exprimée en mètres (m) ou de manière plus commode en angströms ( $1\text{\AA}=10^{-10}$  m).
3. Son énergie  $E$  exprimée en Joules (J) ou le plus souvent en électronvolts ( $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}$  J).
4. Son intensité  $I$  exprimée en Watts par stéradian (énergie traversant l'unité d'angle solide par unité de temps).

Le transport de l'énergie du rayonnement se fait sous forme de photons et peut s'écrire :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.9)$$

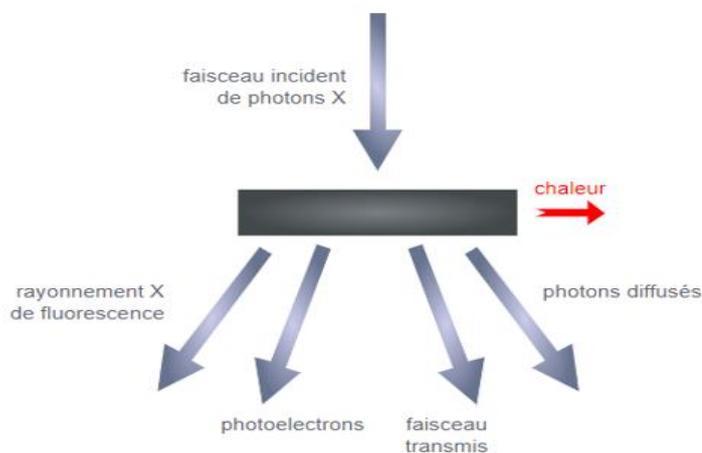
Avec  $h$  : la constante de Planck ( $6.626\times 10^{-34}$ J.s) et  $c$  : la célérité ( $3.1\times 10^8$  m.s $^{-1}$ ).



**Figure 2.29 :** Type du rayonnement selon son énergie.

### 2.3.3.3 Interactions rayons X / matière :

L'interaction rayons X-matière peut se faire en différents types comme la figure 2.30 montre :



**Figure 2.30:** l'interaction rayons X/ matière.

Les rayons X peuvent être :

1. Transmis sans aucun changement de direction : comme la radiographie.
2. Transmis avec changement de direction, ce changement peut se faire :
  - Avec une perte d'énergie (une partie de l'énergie est cédée par un électron), on parle donc de la diffusion inélastique qui est à l'origine de l'effet de Compton.
  - Sans aucune perte d'énergie : on parle donc de la diffusion élastique qui est à l'origine de la diffraction de rayons X (la DRX) par les cristaux.
3. Absorbés par les atomes : comme le rayonnement X par fluorescence.

#### **2.3.3.4 Le principe de la technique :**

La diffraction des rayons X (la DRX) est une technique d'analyse structurale non destructive. Elle permet d'identifier les structures des matériaux cristallins par fournir des données sur la structure cristalline des matériaux et leurs orientations préférentielles.

Son principe de base est fondé sur la diffusion élastique du rayonnement X par un matériau cristallin. Dans la technique  $\theta$ - $2\theta$ , un faisceau de rayons X monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  arrive sur l'échantillon en faisant un angle  $\theta$  avec une famille de plans réticulaires d'indices hkl. On a diffraction lorsque la relation de Bragg est vérifiée [20].

#### **2.3.3.5 La loi de Bragg :**

Cette loi fut découverte par Sir William Henry Bragg et William Lawrence Bragg vers 1915. Elle permet d'établir une relation entre la distance séparant les atomes d'un cristal et les angles sous lesquels sont principalement diffractés des ondes électromagnétiques envoyés sur le cristal.

Un faisceau de rayons x de longueur d'onde  $\lambda$ , avec une incidence  $\theta$  tombe sur un cristal, les plans réticulaires (hkl) définis par leur distance inter-réticulaire  $d_{hkl}$ , vont réfléchir les rayons avec formation d'interférences liés à la différence de marche des rayons X diffractés par deux plans voisins. Ces interférences sont constructives uniquement si la différence de marche est égale à un multiple entier de la longueur d'onde.

La loi de Bragg s'écrit donc :

$$2d \cdot \sin \theta = n\lambda \quad (2.10)$$

Avec :

- $n$  : est un nombre entier positif appelé ordre de la diffraction.
- $d$  : distance inter-réticulaire (c'est-à-dire distance entre les plans cristallographiques).
- $\theta$  : l'angle de Bragg (c'est le demi angle de déviation).
- $\lambda$  : la longueur d'onde.

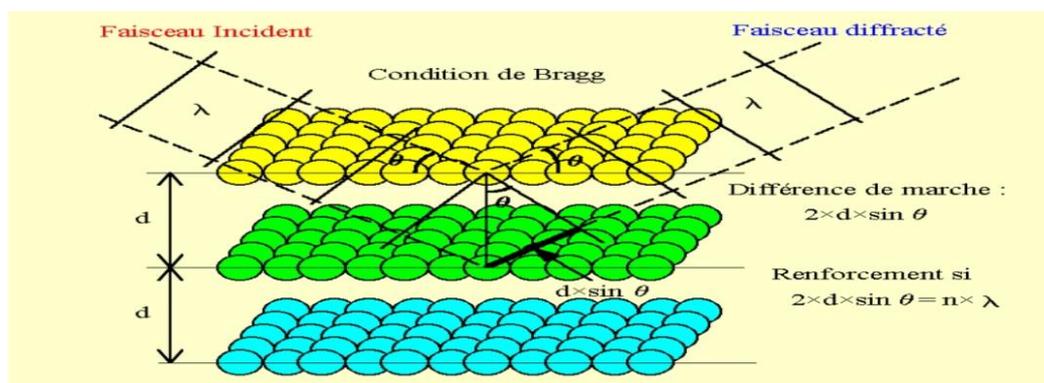


Figure 2.31: la diffraction des rayons X (la loi de Bragg).

### 2.3.3.6 L'intensité diffractée :

La condition exprimée par la loi de Bragg, c'est une condition nécessaire pour avoir la diffraction mais elle n'est pas la seule. Il faut également que l'intensité du faisceau diffracté soit non nulle, cette intensité s'exprime par :

$$I_{hkl} = |F_{hkl}|^2 \quad (2.11)$$

Où  $F_{hkl}$  : est le facteur de structure,  $h$ ,  $k$  et  $l$  : sont les indices de Miller de la famille des plans diffractants.

$F_{hkl}$  s'exprime de la façon suivante :

$$F_{hkl} = \sum f_K e^{[2\pi i(hx_K + ky_K + lz_K)]} \quad (2.12)$$

Avec  $f_K$  : le facteur de diffusion atomique qui dépend essentiellement du numéro atomique des atomes considérés.  $x_K, y_K, z_K$  sont les coordonnées réduites.

Le facteur de structure est un terme qui prend en considération la disposition des atomes à l'intérieur de la maille cristalline. On aura une diffraction si  $F_{hkl}$  est non nul.

### **2.3.4 Méthode par l'effet de bruit de Barkhausen :**

Heinrich George Barkhausen a mis en évidence la discontinuité du processus d'aimantation sous la forme d'un bruit audible, son expérience a permis de montrer indirectement l'existence des domaines de Weiss [21].

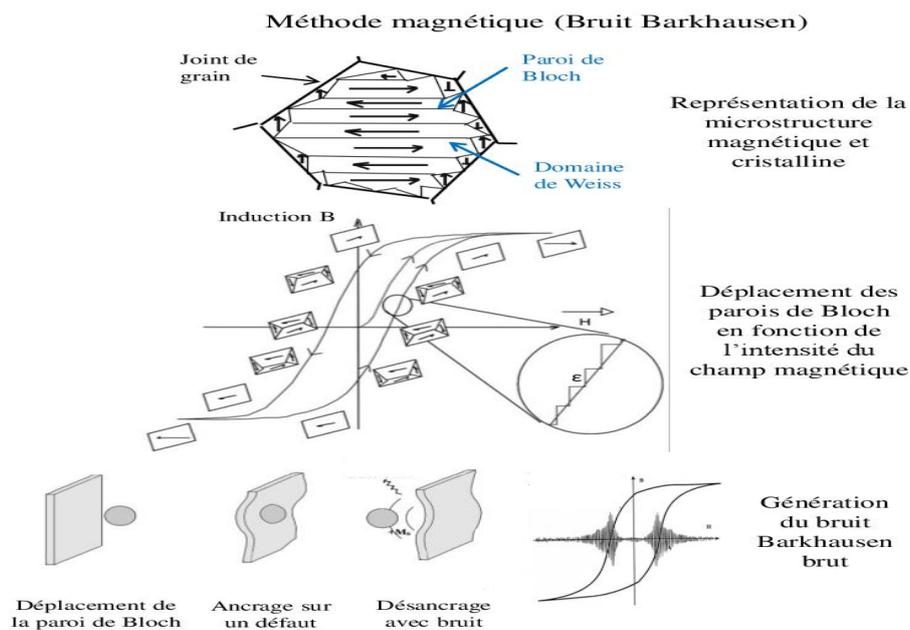
#### **2.3.4.1 Domaines de Weiss :**

Tous les matériaux présentant un magnétisme important, sont des matériaux hétérogènes magnétiquement, Ils sont saturés localement, à l'échelle macroscopique ; en l'absence de champ magnétique extérieur ils présentent pratiquement une aimantation macroscopique nulle.

Un matériau ferromagnétique n'est pas toujours spontanément aimanté ; il peut présenter un moment magnétique nul. Le matériau est divisé en domaines magnétiques appelés domaines de Weiss chacun regroupant  $10^{17}$  à  $10^{21}$  atomes qui sont aimantés à la saturation. Historiquement, cette idée d'une structure en domaine a été introduite pour la première fois par P. Weiss en 1907 pour lever l'incompatibilité entre l'existence d'un arrangement ordonné des moments atomiques et la possibilité d'un état désaimanté. Les interfaces entre les domaines sont appelées « parois de Bloch » à travers lesquelles l'orientation des moments magnétiques passe progressivement d'un domaine à l'autre [21].

L'arrangement de ces domaines permet de minimiser les énergies magnétiques.

La figure 2.32 présente le principe du bruit de Barkhausen pour un matériau cristallin.

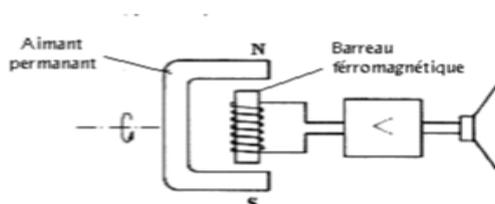


**Figure 2.32 :** Le bruit de Barkhausen.

#### 2.3.4.2 L'expérience de Barkhausen :

Un barreau ferromagnétique est placé à l'intérieur d'une bobine, cette bobine est reliée à un amplificateur, relié à un haut-parleur. En approchant l'aimant du barreau, les domaines de Weiss et sous l'action du champ magnétique de l'aimant, se redressent et s'alignent avec les lignes de champ magnétique de l'aimant. Ces redressements permettent de provoquer une augmentation soudaine de l'intensité du champ magnétique régnant à l'intérieur de la bobine.

En électromagnétisme, lorsqu'un champ magnétique varie au cours du temps dans une bobine, un courant induit est créé. Dans notre cas, la mise en évidence de ces courants induits se fait grâce au haut-parleur. Ce bruit est généralement appelé le bruit de Barkhausen ou bruit ferromagnétique.



**Figure 2.33 :** Expérience de Barkhausen.

En arrivant sur un défaut, la paroi va se bloquer et rester encrée, si le champ appliqué augmente, la paroi va se détacher brusquement pour aller jusqu'à un nouveau défaut. La capacité qu'ont

les défauts à bloquer une paroi dépend de leur nature et de l'énergie d'interaction qui existe entre eux et la paroi. Le mouvement brusque de la paroi se traduit par une impulsion Barkhausen, le bruit qu'engendre ce mouvement est de haute fréquence, il entraîne le mouvement des parois de Bloch [21].

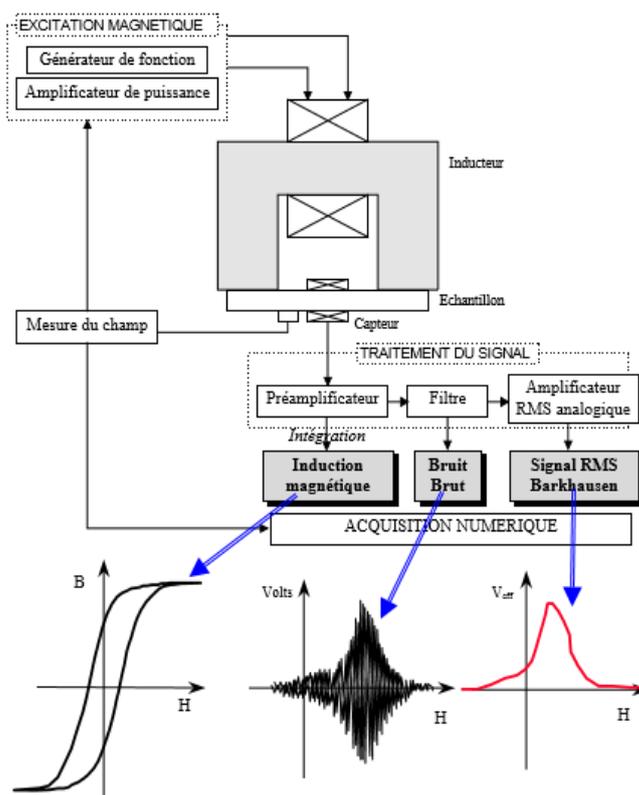


Figure 2.34 : le principe du bruit de Barkhausen.

#### 2.4. Conclusion :

Le Contrôle Non Destructif est un ensemble des méthodes non dommageables, ces méthodes permettent de détecter, mesurer, positionner, dimensionner, caractériser des défauts internes et externes, elles permettent aussi d'une façon indirecte de mesurer les caractéristiques des matériaux sans les modifier ou altérer, ce sont des méthodes invasives, parmi ces méthodes : les courants de Foucault, les ultrasons, la diffraction des rayons X et le bruit de Barkhausen. Leur principe consiste à apporter une excitation et avoir une réponse. Dans le soudage FSW ce contrôle est utilisé pour contrôler les pièces assemblées. Ces dernières sont maintenues d'une façon rigide pour éliminer tout mouvement lors du soudage, ce bridage particulièrement important peut générer des problèmes de contraintes résiduelles après le refroidissement du cordon.

## **CHAPITRE 3**

### **LA MODELISATION**

#### **3.1. Introduction :**

La connaissance et la caractérisation des contraintes résiduelles jouent un rôle important pour l'amélioration de la tenue des structures en service soumises à des différentes sollicitations.

Pour cela, dans ce chapitre nous allons présenter une étude théorique sur les contraintes résiduelles, qui est présentée à travers trois grandes lignes ce sont :

- L'origine des contraintes résiduelles.
- Les différents types des contraintes résiduelles.
- L'influence des contraintes résiduelles.

Puis on aborde brièvement la modélisation des contraintes résiduelles, ainsi la résolution numérique des équations de soudage par la méthode des éléments finis.

#### **3.2. Les contraintes résiduelles :**

##### **3.2.1. Définition des contraintes résiduelles :**

Les contraintes résiduelles présentent une des caractéristiques des procédés de soudage. Elles sont causées principalement par le cycle thermique de soudage (chauffage local et refroidissement rapide).

Le niveau des contraintes résiduelles est influencé par les paramètres du soudage. Peel, Steuwer et al. (2003) constatent qu'elles augmentent avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Lombard, Hattingh et al. (2009) démontrent que le changement du rapport d'avance change la forme de la distribution et la valeur maximale des contraintes résiduelles dans les directions longitudinale et transversale [22].

Les contraintes résiduelles sont définies comme étant les contraintes qui subsistent dans les structures en absence des efforts extérieurs.

Les contraintes résiduelles peuvent prendre des modifications à la structure et même aux propriétés mécaniques initiales du matériau dans lequel elles sont introduites. Leur présence permet d'influencer sur la durée de vie des pièces mécaniques soit par l'accélération ou par le retard d'apparition des fissures ou des déformations, donc elles peuvent avoir un effet bénéfique que néfaste sur le comportement mécanique. En effet, il est généralement observé que les

contraintes résiduelles de compression en surface ont un effet bénéfique sur la durée de vie de la pièce car elles limitent l'apparition des fissures, alors que des contraintes résiduelles de traction favorisent la génération des fissures. Il est donc capital de pouvoir déterminer les contraintes résiduelles au mieux. Elles peuvent être classées en trois types par rapport à l'échelle d'observation (macroscopiques, mésoscopiques ou microscopiques) et ont des origines thermiques, mécaniques ou métallurgiques.

Donc il faut prendre en compte les contraintes résiduelles pour concevoir une pièce mécanique.

### **3.2.2. Les différents types des contraintes résiduelles :**

Pratiquement, les contraintes résiduelles existent dans toutes les structures rigides, métalliques ou non (bois, polymère, verre, céramique, etc.). Selon l'échelle d'observation, on distingue trois types de contraintes :

#### **3.2.2.1 Contraintes résiduelles macroscopiques (1er ordre) :**

Les contraintes de ce type se situent à une échelle plus grande que la taille de grain du matériau. Elles peuvent être mesurées par exemple à l'aide de la diffraction des rayons X.

#### **3.2.2.2 Contraintes résiduelles à l'échelle mésoscopique (2eme ordre) :**

Les contraintes de ce type se situent à l'échelle d'un grain individuel. Lors d'une sollicitation mécanique, certains grains vont désorienter, ces désorientations permettent de provoquer une hétérogénéité du comportement lorsque la charge sera supprimée, la déformation plastique sera différente de grain à grain, ce qui conduira aux contraintes internes.

Les contraintes résiduelles à l'échelle mésoscopique seront considérées donc comme homogènes sur des petits domaines du matériau (un grain ou une phase). Elles peuvent être mesurées par la diffraction des rayons X.

#### **3.2.2.3 Contraintes résiduelles à l'échelle microscopique (3ieme ordre) :**

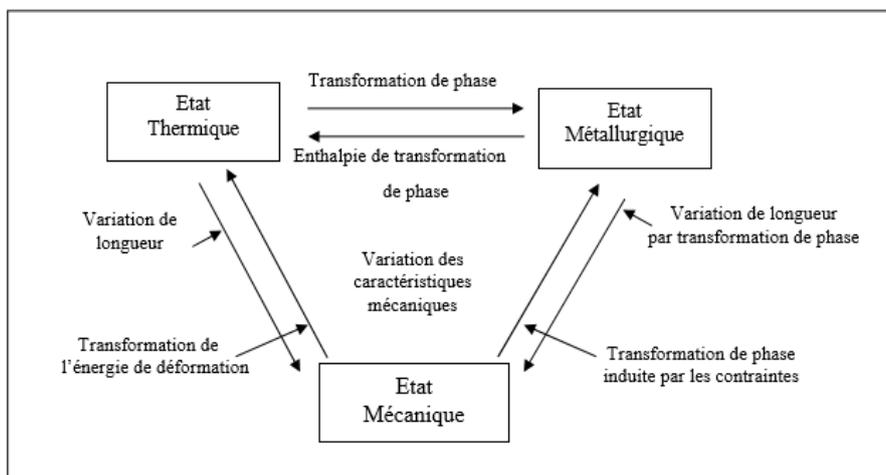
Ces contraintes résiduelles se situent sur les plus petits domaines du matériau (dans un grain). Elles sont créées par tous les types des défauts cristallins : macles, atomes interstitiels, dislocations, atomes en substitution, défauts d'empilement, lacunes, jusqu'aux joints de grains.

### 3.2.3 Les origines des contraintes résiduelles :

Les contraintes résiduelles ont des origines très diverses, généralement selon les procédés de fabrication (pendant le soudage), elles peuvent être séparées en trois catégories : mécanique, thermique ou métallurgique :

1. Pendant la solidification.
2. Pendant le démoulage.
3. Pendant le traitement thermique, en particulier la trempe.

En pratique, la combinaison de ces trois différentes origines est la cause de la création des contraintes résiduelles.



**Figure 3.1** : Les origines des contraintes résiduelles [8].

Les sources de ces contraintes résiduelles, elles sont toujours positionnées dans les couches superficielles du matériau.

**Tableau 3.1** : les origines des contraintes résiduelles [23].

Procédés	Origine mécanique	Origine thermique	Origine structurale
<i>Fonderie</i> <i>Moulage</i>		Gradient de température pendant le refroidissement	Transformation de phase
<i>Grenailage</i> <i>Martelage</i> <i>Galetage</i> <i>Choc laser</i> <i>Pliage</i> <i>Roulage</i> <i>Repoussage</i> <i>Forgeage</i> <i>Redressage</i> <i>Filage</i>	Déformation plastique hétérogène entre le cœur et la surface de la pièce		
<i>Rectification</i> <i>Tournage</i> <i>Fraisage</i> <i>Perçage</i> <i>Alésage</i>	Déformation plastique due à l'enlèvement de copeaux	Gradient de température dû à l'échauffement pendant l'usinage	Transformation de phase pendant l'usinage si la température est suffisamment élevée
<i>Trempe sans transformation de phase</i>		Gradient de température	
<i>Trempe superficielle avec transformation de phase (induction, FE, laser, plasma, méthodes classiques)</i>		Gradient de température	Transformation de phase
<i>Cémentation</i> <i>Nituration</i>		Incompatibilité thermique	Nouveau composant chimique avec $\Delta V$
<i>Soudage</i>	Bridage	Gradient thermique	Modification structurale (ZAT)
<i>Brasage</i>	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Nouvelle phase à l'interface
<i>Dépôt électrolytique</i>	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Composition de dépôt selon les bains
<i>Projection à chaud (plasma, LASER, Jet Kote)</i>	Incompatibilité mécanique, microfissuration	Incompatibilité thermique, gradient de température	Changement de phase de dépôt
<i>Revêtements : PVD, CVD</i>	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Changement de phase
<i>Composite</i>	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	

### 3.3 La modélisation des contraintes résiduelles pour le soudage FSW :

La modélisation est un moyen de plus en plus utilisé pour étudier le soudage par frottement malaxage qui est un procédé de soudage à l'état solide, les résultats de travaux de modélisation permettent de compléter des résultats expérimentaux. En effet, le modèle est développé pour obtenir des informations qui sont difficiles à obtenir expérimentalement.

La stratégie employée pour modéliser le procédé de soudage FSW dépend des résultats attendus. Pour cela on distingue deux approches :

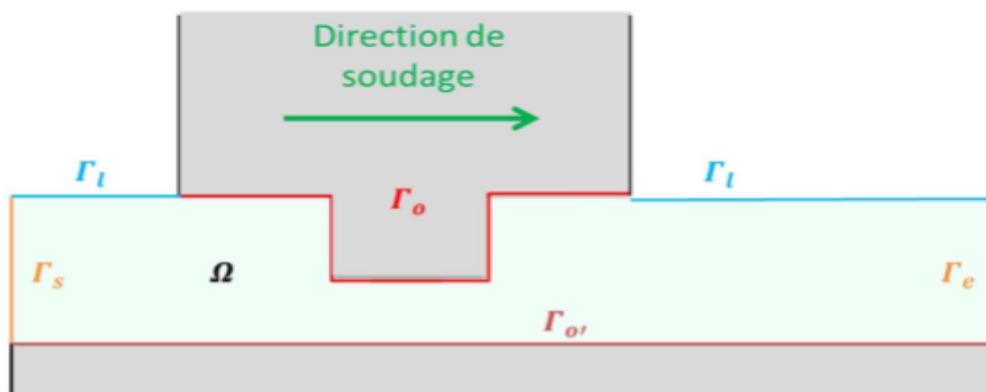
La première approche consiste à ne prendre en considération que des aspects thermiques du problème, ces modèles thermiques sont utilisés pour calculer la distribution de température dans le joint soudé et son évolution au cours du soudage. Ces cycles de température sont utiles pour prédire les contraintes résiduelles induites par le soudage. Ce modèle permet également de prédire l'évolution de l'état de précipitation dans un alliage soumis au soudage et d'estimer les propriétés mécaniques résultantes.

La deuxième approche permet à modéliser l'écoulement du matériau induit par le mouvement de l'outil. Ces modèles thermomécaniques permettent de calculer la vitesse et la puissance de déformation plastique générée par le soudage et en tenant compte du couplage thermomécanique entre les propriétés mécaniques du matériau déformé et la création de chaleur induite par la déformation plastique.

Dans le soudage FSW, la température joue un rôle important dans la réussite de la soudure. Pendant le soudage, la quantité de chaleur apportée à la matière est due aux plusieurs phénomènes physiques. Ces phénomènes sont réduits principalement au frottement à l'interface entre l'outil et les tôles à assembler, et à la quantité de chaleur de déformation.

Le procédé FSW repose sur le couplage des trois domaines que sont la mécanique, la thermique et la métallurgie. Dans ce travail on s'intéresse juste à la résolution du problème thermomécanique sur le domaine représentant les tôles à souder (voir Figure 3.2).

La frontière  $\Gamma$  du domaine est décomposée en 5 zones, les plans d'entrée et de sortie  $\Gamma_e$  et  $\Gamma_s$ ; la surface libre  $\Gamma_l$ ; la surface  $\Gamma_o$  en contact avec l'outil FSW et celle en contact avec la plaque support,  $\Gamma_{o'}$ . La plaque support et l'outil FSW sont considérés rigides.



**Figure 3.2:** Description du domaine de calcul et des frontières [24].

Lors du soudage FSW, le matériau est soumis à de grands changements de température et de vitesse de déformation. C'est pourquoi, la loi de comportement doit tenir en compte la dépendance du comportement du matériau à la vitesse de déformation et à la température sur de grandes plages de températures et de vitesses de déformation. De plus, le comportement du matériau est modifié à cause des déformations qui régissent l'écroissage ainsi que les changements microstructuraux.

### 3.3.1 Loi de comportement Norton-Hoff :

La loi de comportement permet de relier le tenseur des contraintes au taux de déformation. En FSW, le matériau est chaud et à l'état pâteux dans la zone de grandes déformations proche de l'outil. Nous modélisons donc le matériau à l'aide d'une loi rigide viscoplastique de type Norton-Hoff dans laquelle nous négligeons l'écroissage (c'est-à-dire la dépendance à la déformation généralisée) [24] :

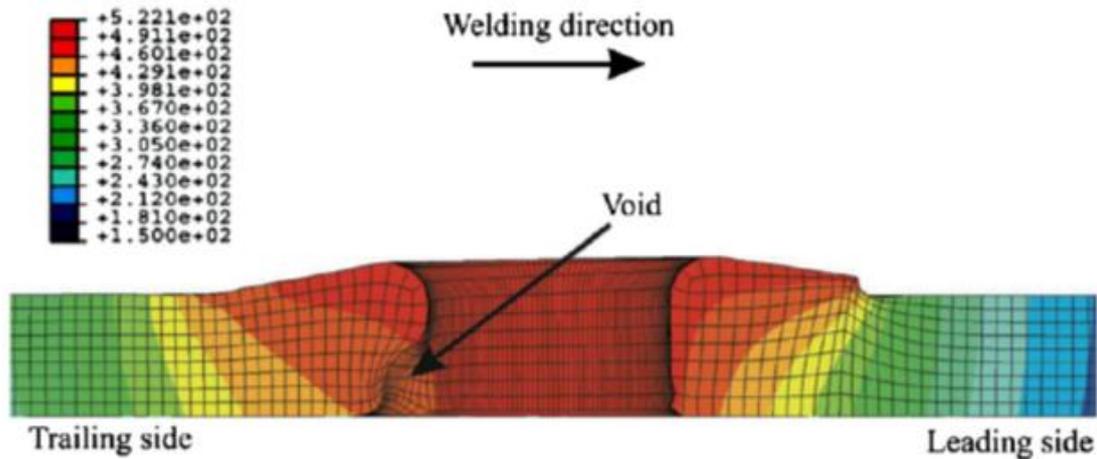
La loi de Norton-Hoff, bien connue en modélisation des procédés de mise en forme comme le forgeage à chaud, a été utilisée par quelques auteurs pour modéliser le FSW. Cette loi de comportement se traduit par la relation suivante [25] :

$$\sigma_0 = K\sqrt{3}(\sqrt{3}\dot{\bar{\epsilon}})^m \quad (3.1)$$

Où  $\sigma_0$  la contrainte d'écoulement,  $K$  est une fonction de la température et de la déformation généralisée,  $\dot{\bar{\epsilon}}$  : le taux de déformation généralisé,  $m$  : indice de sensibilité à la vitesse de déformation. Cette fonction prend souvent la forme suivante :

$$K = K_0(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \exp\left(\frac{\beta}{T}\right) \quad (3.2)$$

Où  $K_0$ ,  $\epsilon_0$ , et  $\beta$  sont des constantes du matériau,  $n$  : indice de sensibilité à la déformation  $T$  la température,  $\bar{\epsilon}$  : la déformation équivalente



**Figure 3.3 :** Utilisation d'une formulation ALE pour modéliser l'écoulement plastique du matériau et prédire l'apparition de défaut de soudage [25].

Les conditions aux limites mécaniques de surface libre sont imposées sur la surface de la pièce  $\Gamma$  qui n'est pas en contact avec l'outil[24] :

$$\sigma \cdot \vec{n} = 0 \text{ sur } \Gamma_l \quad (3.3)$$

Où  $\vec{n}$  est la normale à la surface.

Par ailleurs, la condition de contact aux interfaces entre l'outil et la pièce doit être décrite par une loi de frottement. Par exemple, la loi de frottement de Coulomb peut être introduite pour relier le cisaillement à l'interface à la pression normale exercée par l'outil. D'autres lois de frottement peuvent être utilisées. Une loi de frottement viscoplastique permet de tenir compte de la loi de comportement du matériau en décrivant le cisaillement à l'interface  $\tau$  en fonction de la consistance viscoplastique  $K$  [25].

$$\tau = -\alpha K v_s^p \quad (3.4)$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de frottement et  $p$  : est l'indice de sensibilité à la vitesse de glissement. Lorsque  $m = p = 0$ , l'équation (3.4) devient équivalente à la loi de frottement de Tresca :

$$\tau = -\alpha \sigma_0 / \sqrt{3} \quad (3.5)$$

Dans ce cas, la valeur de  $\alpha$  varie entre 0 pour un contact parfaitement glissant et 1 pour un contact parfaitement collant.

### 3.3.2 L'équation de la chaleur :

Les sources de chaleurs en FSW peuvent être classées en deux types [26] :

➤ Sources volumiques :

Les sources de chaleurs volumiques sont le résultat des déformations plastiques donc liés aux lois de comportement des matériaux à souder.

➤ Sources surfaciques :

Des sources de chaleurs surfaciques causées par le frottement outil/matière. Ces sources peuvent être identifiées par différentes manières. Il existe trois sources de chaleur générées par le procédé FSW : la zone de contact entre l'épaulement et la matière, la zone de contact entre le pion et la matière.

Le problème thermique est régi par l'équation de la chaleur [24]:

$$\rho C(\partial_t T + \vec{v}\vec{\nabla}T) - \overrightarrow{div}(\lambda\vec{\nabla}T) = f\bar{\sigma} : \dot{\epsilon} \quad (3.6)$$

Où C: est la capacité thermique massique,  $\lambda$  est la conductivité,  $f\bar{\sigma} : \dot{\epsilon}$  est la source volumique de chaleur générée par la déformation plastique (en grande partie due au malaxage du pion en FSW) où f représentant la fraction d'énergie convertie en chaleur et variant entre 0.9 et 1. La seconde source de chaleur, surfacique, est celle générée par frottement (celui de l'outil et principalement de son épaulement en FSW) .

➤ **Les conditions aux limites :**

Des échanges par conduction ont également lieu. Ils sont modélisés par des conditions aux limites de type Fourier à l'aide d'un coefficient d'échange [24] :

$$-\vec{\nabla}T \cdot \vec{n} = h_{cond}(T - T_{outil}) \text{ sur } \Gamma_O \cup \Gamma_O'. \quad (3.7)$$

Les échanges entre les corps et l'air se font par convection forcée et rayonnement selon le modèle suivant :

$$\begin{cases} -\vec{\nabla}T \cdot \vec{n} = h_{conv}(T - T_{air}) \\ -\vec{\nabla}T \cdot \vec{n} = \varepsilon_r \sigma_r (T^4 - T_{air}^4) \end{cases} \text{ Sur } \Gamma_l \cup \Gamma_s. \quad (3.8)$$

Où  $\sigma_r$  est la constante de Stefan-Boltzmann et  $\varepsilon_r$  est l'émissivité du matériau. Une condition aux limites de Dirichlet impose une température sur  $\Gamma_e$  :

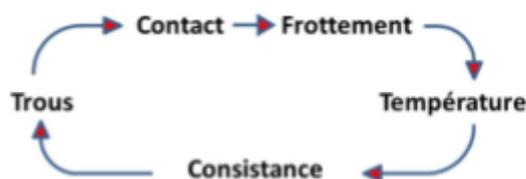
$$\forall t, T=T_{imp} \text{ sur } \Gamma_e. \quad (3.9)$$

Enfin une condition de Dirichlet est imposée sur  $\Omega$  pour définir les températures initiales des corps :

$$\text{Pour } t=t_0, T=T_{init} \text{ sur } \Omega. \quad (3.10)$$

### 3.4 La résolution numérique des équations de soudage :

La simulation numérique du procédé FSW présente plusieurs difficultés. En effet de grandes déformations sont mises en jeu dans la zone affectée thermo-mécaniquement ainsi que dans le noyau et de forts gradients thermiques ont lieu à proximité de l'outil. L'écoulement de matière à simuler résulte de flux rotatifs et rectilignes dus au mouvement de l'outil, et de flux perpendiculaires à ceux-ci dus à la présence de filets sur le pion ou à l'inclinaison de l'outil. Un point clé pour calculer un bon écoulement est le traitement du contact, celui-ci étant un des acteurs principaux de ce fort couplage thermomécanique (voir Figure 3.4). Le contact est directement lié au frottement de l'épaulement sur la pièce qui génère une élévation de température dans les deux corps. De cette température dépend le comportement du matériau qui est pâteux dans la zone proche de l'outil et solide loin de l'outil. Un contact imparfait, c'est-à-dire mal établi peut alors entraîner un échauffement insuffisant de la pièce, un mauvais malaxage et ainsi résulter en la formation de trous. De plus le contact est fortement lié à l'évolution de la surface libre et impacte donc la modélisation des bavures. Il est donc crucial de modéliser correctement le contact dont vont découler toutes les conditions d'écoulement de la matière, tout particulièrement dans l'optique d'être capable de prédire la formation des défauts de soudage [24].



**Figure 3.4 :** Couplage thermomécanique [24].

Outre le calcul de la surface de contact, il faut aussi modéliser les échanges thermiques entre la pièce à souder, les outils et l'air. L'évolution de la température gouverne l'évolution microstructurale et modifie le comportement du matériau. La connaissance de l'histoire thermique est alors indispensable, en particulier, pour prédire les caractéristiques

métallurgiques et donc les performances du matériau assemblé. Il faut modéliser les 2 sources de chaleur à l'origine du procédé : la puissance dissipée par frottement et la puissance dissipée par déformation plastique. Pour la première ceci nécessite de disposer d'un modèle de frottement bien calibré et de modéliser le plus précisément possible la géométrie du pion, c'est-à-dire l'action mécanique des filets quand ils sont présents sur l'outil. Pour la seconde, il faut modéliser précisément le comportement du matériau.

Nous classons l'ensemble des méthodes numériques permettant de résoudre ce problème physique en 2 catégories : l'approche fluide où nous considérons l'écoulement d'un fluide visqueux autour de l'outil de soudage, et l'approche solide où nous prenons en compte l'établissement des contraintes résiduelles dans la plaque soudée. De cette vision découlent 3 grandes catégories de méthodes numériques : les approches lagrangiennes où le maillage suit les points matériels, les approches eulériennes où le maillage voit passer les points matériels dans la zone soudée et les approches combinant les deux [24].

#### ➤ Formulation Lagrangienne :

Dans l'approche lagrangienne, le maillage est attaché aux points matériels (ou particules). De ce fait, dans une formulation lagrangienne, le maillage change et suit l'écoulement de matière. Des modèles aux différences finies ont été développés pour le procédé FSW, mais nous nous focalisons, dans ce document, sur la description des modèles éléments finis (EF) plus récents.

#### ➤ Méthode EF

Dans la description lagrangienne d'un mouvement, chaque particule est complètement définie par sa configuration initiale. Dans le cas de la méthode du lagrangien réactualisé, la configuration initiale est réactualisée à chaque pas de temps.

Nous distinguons deux domaines, le domaine matériel représentant l'ensemble des particules du matériau et le maillage contenant l'ensemble des nœuds, qui est un sous ensemble du premier. Le maillage se déplace avec le domaine matériel au cours du temps (voir Figure 3.5), c'est-à-dire que, entre deux remaillages, chacun de ses nœuds est associé à une unique particule tout au long de la simulation [24].



**Figure 3.5 :** Schématisation de l'évolution du maillage avec une approche lagrangienne [24].

Plusieurs logiciels ont été utilisés afin de modéliser le procédé de soudage par friction malaxage. Parmi ces logiciels, Les logiciels commerciaux lagrangiens et ce sont les suivants :

- Ansys.
- Abaqus.
- Deform.
- Forge.

Les approches sont parfois explicites, comme avec Abaqus, ce qui accélère les calculs, mais rend la convergence conditionnellement stable. Afin d'éviter ce problème, Deform et Forge utilisent une approche implicite. La description lagrangienne présente l'avantage de calculer directement l'histoire thermomécanique de chaque particule par simple intégration temporelle [24] :

$$d_t f = \partial_t f \quad (3.11)$$

Où  $d_t$  est la dérivée temporelle totale et  $\partial_t$  est la dérivée temporelle partielle. Nous visualisons sur la (Figure 3.6) les champs thermomécaniques, tels que la température et les déformations.

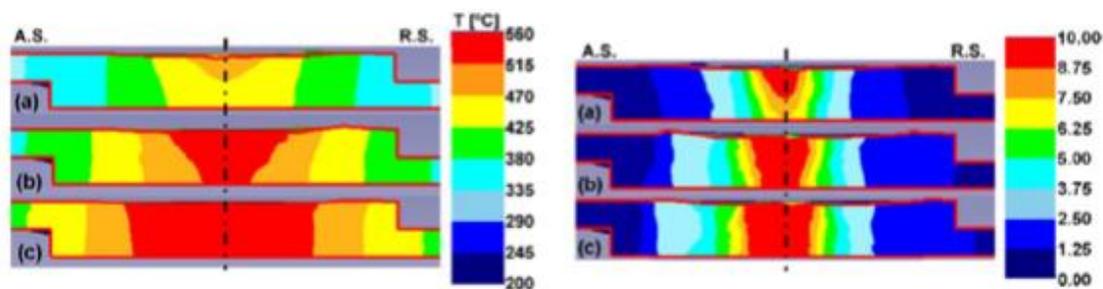


Fig. 13. Temperature distribution in a transverse section for (a)  $R=500$  rpm, (b)  $R=700$  rpm and (c)  $R=1000$  rpm case studies (T3).

Fig. 14. Strain distribution in a transverse section for (a)  $R=500$  rpm, (b)  $R=700$  rpm and (c)  $R=1000$  rpm case studies (T3).

**Figure 3.6:** Champs de température à gauche et champs des déformations à droite avec une approche lagrangienne.

Avec l'évolution de l'écoulement et conséquemment du maillage, l'aire de contact entre l'outil et la matière peut évoluer tant que l'état stationnaire n'est pas atteint. Ainsi la formulation lagrangienne permet de calculer précisément l'état de contact au cours du temps sous l'épaulement et autour du pion. Le contact permet de gérer la non pénétration des nœuds dans les outils ; il peut être de différentes natures, unilatéral ou bilatéral. Le frottement, lui, peut être considéré collant ou glissant. Un contact unilatéral défini à l'interface entre l'outil et la matière

signifie que la matière peut se déplacer dans les directions normales et tangentes à l'outil ; c'est-à-dire que celle-ci peut se décoller de l'outil sans toutefois pénétrer à travers. Par opposition, un contact bilatéral n'autorise la matière à bouger que dans la direction tangentielle ; aucun décollement n'est possible. Seul le contact unilatéral permet donc de modéliser les pertes de contact entre l'outil et la pièce afin d'étudier la mise en place de défauts et plus particulièrement des trous tunnels présents en FSW. La formulation lagrangienne permet donc de modéliser complètement le procédé au travers des phases transitoires de plongée et de début d'avance. Cependant les grandes déformations, dues à l'écoulement fortement rotationnel proche de l'outil, engendrent des distorsions importantes du maillage et ainsi une dégénérescence des éléments le constituant. Ainsi, pour considérer précisément le flux de matière proche de l'outil, il est nécessaire de recourir à de fréquents remaillages. Plusieurs techniques sont utilisées telles que le remaillage automatique, global ou local. Pour contrôler la qualité des calculs, nous pouvons recourir à un remaillage adaptatif, c'est-à-dire qu'un critère de taille de maille local est appliqué. Il est basé sur une estimation de l'erreur de discrétisation. Le coût temporel de la simulation croît avec les procédures de remaillages. D'autre part, il y a une diffusion numérique plus importante lors des transports de champs. Ceci est une conséquence de l'interpolation des champs de vitesse, de déformations et des contraintes après remaillage, entre des maillages incompatibles [24].

La description EF lagrangienne permet donc de disposer de l'histoire thermomécanique des particules tout en permettant une gestion du contact et des interfaces assez précises mais le remaillage à chaque pas de temps entraîne des coûts élevés de calcul et engendre une perte de précision des résultats. Ce type de formulation s'adapte difficilement au malaxage du matériau. C'est pourquoi certains chercheurs ont développé des méthodes particulières ou sans maillage décrites dans le paragraphe suivant, dans le but de réduire ces coûts de calculs et de suivre l'évolution de chaque particule des matériaux à souder [24].

### **3.5 Conclusion :**

Plusieurs activités de recherche sont élaborées depuis quelques années afin de profiter de la qualité de soudure FSW, mais le fort couplage entre les phénomènes physiques en FSW reste un obstacle majeur pour maîtriser ce procédé. Pour cela plusieurs études théoriques et expérimentales ont été développées pour comprendre les phénomènes physiques présents en FSW.

L'analyse des phénomènes physiques se produisant lors du soudage par frottement-malaxage repose autant sur l'observation expérimentale que sur la modélisation du procédé. En fait, certaines variables physiques, comme la distribution de la température et de la déformation plastique dans le joint soudé, sont difficiles à mesurer expérimentalement, mais par contre ces phénomènes peuvent être calculées à l'aide de modèles numériques.

La validation de n'importe quel modèle nécessite une comparaison entre des résultats numériques et des données expérimentales de référence. Ces deux démarches sont donc complémentaires et doivent ainsi être réalisées en parallèle pour être optimales. Ce qui permet de comprendre plus juste les effets des paramètres de soudage sur les différentes caractéristiques du joint soudés comme la variation de la microstructure et la présence de faiblesses autant mécaniques (cavités, bavures) que métallurgiques (adoucissement de la ZAT).

## CHAPITRE 4

### EXPERIMENTATION, RESULTATS ET INTERPRETATIONS

#### 4.1 Introduction :

Pour mieux comprendre le soudage FSW, une étude expérimentale a été mise en place. D'abord, on a commencé par une étude théorique sur les alliages d'aluminium, puis on a présenté les équipements et les étapes nécessaires pour la réalisation du joint soudé par FSW, ensuite, une méthode de contrôle non destructif tel que les courants de Foucault a été réalisée pour caractériser les contraintes résiduelles engendrées par une tôle soudée par FSW en alliage d'aluminium.

#### 4.2 Généralités sur l'aluminium :

A l'état naturel, l'aluminium n'existe pas. Très abondant dans la nature, ce métal se présente surtout sous formes d'hydroxydes. Après sa découverte en 1808 par le physicien anglais Humphrey Davy (1778-1829), l'aluminium fut isolé pour la première fois en 1825 par le chimiste Danois Hans Oersted lors d'une réaction chimique impliquant un amalgame du potassium [27].

L'aluminium est placé en première position des métaux non ferreux grâce à sa production annuelle mondiale qui est de l'ordre 25 millions de tonnes. La caractéristique principale de l'aluminium est sa légèreté (masse volumique de 2,7 g/cm<sup>3</sup>), ce qui le rend très utilisé dans le domaine de l'aéronautique.

Par ailleurs, sa conductivité, électrique et thermique, est très intéressante puisqu'elle est environ égale à 60% de celle du cuivre. De plus, à l'heure où les critères écologiques deviennent de plus en plus importants, il s'avère que l'aluminium est facilement recyclable, à près de 85% actuellement.

**Tableau 4.1** : Principales propriétés mécaniques des alliages d'aluminium [27].

Propriété	Valeur
Module d'élasticité	70000 MPa
Module de cisaillement (Coulomb)	27000 MPa
Coefficient de Poisson $\nu$	0,35
Masse volumique $\rho$	2700 Kg. m <sup>-3</sup>
Coefficient de dilatation linéique $\alpha$	2700 Kg. m <sup>-3</sup>

### 4.3 Les alliages d'aluminium :

Un alliage d'aluminium est une composition chimique où d'autres éléments sont ajoutés à l'aluminium pur pour améliorer ses propriétés, ces éléments comportent le fer, le silicium, le cuivre, le magnésium, le manganèse et le zinc à des concentrations combinées pouvant représenter jusqu'au 15% de l'alliage en poids. Les alliages d'aluminium se répartissent dans leurs études en deux familles : les alliages à durcissement par écrouissage (dislocations) et les alliages à durcissement structural (précipités). L'utilisation d'aluminium en alliage est principalement pour améliorer les caractéristiques mécaniques [28].

#### 4.3.1 Classification des alliages d'aluminium :

Les alliages d'aluminium sont largement utilisés dans une grande variété d'applications et notamment dans l'industrie aéronautique grâce à leurs bonnes propriétés mécaniques et leur faible densité. Il existe plusieurs familles qui diffèrent chacune de l'autre par la nature des principaux éléments d'alliages. Pour sélectionner et spécifier un alliage avec des propriétés spécifiques pour une application donnée, il est essentiel de définir sa composition et la nature du traitement thermique. Ceci est donc réalisé par un système de désignation normalisée. Cette désignation normalisée est régie par un institut américain, the American National Standards Institute (ANSI). Les alliages d'aluminium sont identifiés selon un nombre composé de 4 chiffres et en 8 séries en fonction des éléments d'alliages principaux. Le premier chiffre indique le ou les principaux constituants d'alliage :

**Tableau 4.2:** la classification des alliages d'aluminium.

Série	Alliage correspondant
1xxx	Aluminium pur (>99at%)
2xxx	Aluminium / Cuivre
3xxx	Aluminium / Manganèse
4xxx	Aluminium / Silicium
5xxx	Aluminium / Silicium
6xxx	Aluminium / Magnésium / Silicium
7xxx	Aluminium / Zinc
8xxx	Autres alliages d'aluminium

Dans les désignations du type 1xxx, le deuxième et troisième chiffre indiquent une teneur minimale en aluminium (99.00% ou plus), par exemple, l'alliage 1700 contient au moins 99.70% Al.

Dans les autres désignations (de 2xxx à 8xxx), le deuxième chiffre est réservé aux modifications de la composition de l'alliage et les deux derniers chiffres servent à repérer les alliages individuels dans le groupe. La lettre A peut suivre les 4 chiffres de la désignation numérique, par exemple 2618A. Il s'agit alors d'une composition légèrement différente et spécifique à un pays ou à un producteur, et parfois AA qui veut dire Aluminum Association. Ces familles d'alliages sont regroupées de la façon suivante : les alliages non susceptibles de durcissement structural par traitement thermique et ceux qui le sont. Les alliages de la série 2xxx auxquels nous allons nous intéresser à présent font partie de ces derniers [29].

Dans cette classification, les séries 1XXX, 3XXX et 5XXX correspondent à des alliages non trempants, c'est-à-dire sans durcissement structural et les séries 2XXX, 6XXX et 7XXX à des alliages trempants à durcissement structural.

#### **4.3.2 Les alliages d'aluminium de la série 2xxx :**

Les alliages d'aluminium sont largement utilisés et surtout dans le domaine d'aéronautique grâce à leurs caractéristiques mécaniques et leur faible densité. Parmi ces alliages, les alliages de la série 2xxx.

Dans la série 2xxx, le cuivre est utilisé comme l'élément d'addition principal, les alliages de cette série nécessitent un traitement thermiquement en solution pour obtenir des propriétés

optimales ; après un traitement thermiquement en solution, les propriétés mécaniques sont similaires à, et quelquefois dépassent, ceux d'acier à basse teneur en carbone. Dans quelques cas, un traitement thermique de précipitation (vieillessement) est employé pour augmenter davantage les propriétés mécaniques. Ce traitement augmente la limite d'élasticité, avec une perte associée dans l'élongation ; son effet sur la résistance à la traction n'est pas si grand.

Ces alliages n'ont pas le même niveau de résistance à la corrosion atmosphérique comme beaucoup d'autres alliages d'aluminium. Par conséquent, ces alliages sont généralement protégés par anodisation. Ils sont généralement revêtus d'un alliage de haute pureté ou d'un alliage de la série 6000 pour résister à la corrosion. Puisque les alliages de la série 2000 sont difficiles à souder, ils sont utilisés dans les structures boulonnées ou rivetées.

#### **4.3.2.1 Les alliages 2017A :**

L'alliage 2017A, très également connu sous la dénomination « Duralumin », peut être considéré comme étant à l'origine du développement de l'aluminium dans l'aviation et également du développement de l'aviation elle-même. Découverte par hasard par l'Allemand Willm en 1908, comprend 4% de cuivre, 0,5 % de magnésium et 0,5 % de manganèse. Parfois le Duralumin contient aussi du zinc, sans intérêt, ou du nickel, qui agit comme un durcissant. L'extraordinaire de ses propriétés tient au fait que l'alliage, après usinage et trempe, laissé au repos (opération qu'on appelle le vieillissement), voit ses propriétés mécaniques complètement transformées, avec une charge de rupture qui a doublé alors que les allongements ont très peu diminué. Il a été prouvé en laboratoire que le vieillissement (environ 48heures) correspond à un réarrangement des molécules. La durée nécessaire au durcissement est divisée par deux si on élève un peu la température (disons 100°C). La trempe du duralumin se fait entre 480°C et 510°C [30].

L'alliage 2017A est un alliage présentant de faibles niveaux de contraintes résiduelles internes, ce qui sert à réaliser des pièces de précision. Il a subi un traitement thermique de T6 (mise en solution puis revenu) ou T3(mise en solution écroui et muri) il possède donc des bonnes caractéristiques mécaniques (tableau). Les propriétés mécaniques classiques des alliages d'aluminium 2017A (la limite d'élasticité à 0.2%  $R_{p0.2}$ , la limite à la rupture  $R_m$ , l'allongement à rupture A).

**Tableau 4.3 :** Compositions chimiques de 2017A.

Les éléments	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn
Poids %	3,5-4,5	0,4-1,0	0,4-1,0	0,2-0,8	0,7	0.1	0.25

**Tableau 4.4 :** Caractéristiques mécaniques de 2017A.

Alliage	Module de Young (Mpa)	Coefficient de Poisson (Mpa)	Limite de rupture (Mpa)	Limite d'élasticité (Mpa)	Allongement %
2017A	74000	0.33	390	260	9

**Tableau 4.5:** Les caractéristiques physiques de 2017A.

Alliage	La masse volumique (kg /m3)	La température de fusion(C°)	Conductivité thermique (W/mk)	Module d'élasticité (Gpa)	Etat
2017A	2790	560°-640°	125-140	69-72	T451

Nous donnons ci-dessous quelques propriétés essentielles de cet alliage d'après plusieurs références [28] :

**Propriétés électriques :** L'aluminium pur conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs avec une résistivité électrique de  $2.92 \cdot 10^{-8} \Omega.m$ . Les éléments d'addition ont une influence importante sur sa conductivité électrique. Pour le 2017A, la résistivité électrique est multipliée quasiment par deux ( $5.1 \cdot 10^{-8} \Omega.m$ ) ce qui diminue considérablement sa conductivité électrique.

**Ténacité :** La ténacité ou résistance statique résiduelle à la propagation d'une fissure est une notion très importante pour les alliages travaillant en chargement cyclique car elle conditionne la fiabilité et la sécurité de toute la structure. Cette propriété est caractérisée par le critère  $KIc$  lequel se situe entre 21 et 23  $Mpa\sqrt{m}$  pour le 2017A.

**Résistance à la fatigue :** On détermine la limite d'endurance comme étant le rapport entre la limite à la fatigue à  $10^8$  en contraintes alternées (traction-compression) et la charge de rupture

en traction monotone. Ce rapport varie entre 0,25 et 0,35 dans le cas des alliages de la série 2000. Ce rapport sert à caractériser l'endurance en fatigue.

#### 4.3.2.2 Quelques exemples d'utilisation du 2017A [28] :

- **Aéronautique** : La raison essentielle de son utilisation dans le domaine aéronautique est la réduction du poids des appareils afin de minimiser la consommation ou augmenter la charge utile et le rayon d'action. L'aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux utilisé en tonnage dans plusieurs secteurs économiques tels que l'aéronautique où la plupart des alliages utilisés sont issus de la série 2000. Dans cette famille d'alliages, la nuance 2024 reste la plus utilisée. Ce sont ses qualités de résistance à l'endommagement (qui se traduit par une longue durée de vie avant l'initiation des premières phases d'endommagement) qui font que les constructeurs l'utilisent sur toutes les structures d'avions. La technologie aéronautique a permis, par ses besoins de plus en plus pointus, de développer de nouveaux alliages et de nouvelles techniques de caractérisation des alliages d'aluminium. Cependant il présente des caractéristiques mécaniques pouvant être améliorées.
- **Transports ferroviaires** : Le gain de poids est d'autant plus intéressant que dans ces matériels où la fréquence des arrêts est relativement élevée afin de réduire la consommation lors du démarrage et l'usure lors du freinage (métros récents, remorques d'autorail, etc.).
- **Automobile** : Les applications sont plutôt ciblées dans ce domaine. Telles que la réalisation des culasses, jantes, échangeurs thermiques, pistons et carters, étriers de freins, carrosserie, etc.

Nous pouvons indiquer aussi d'autres domaines d'utilisations des alliages d'aluminium à l'image de l'architecture et le bâtiment, l'industrie électrique et électronique et le domaine du conditionnement alimentaire.

En conclusion, nous pouvons confirmer que l'aluminium et les alliages d'aluminium couvrent un domaine étendu d'utilisation puisqu'on trouve à chaque extrémité de ce domaine, d'une part, l'aluminium raffiné à l'état recuit avec une résistance à la rupture de l'ordre de 50 MPa et, d'autre part, les alliages à haute résistance du type Al-Zn-Mg-Cu (série 7000) fortement chargés en éléments d'addition et donne, à l'état trempé revenu, une résistance pouvant atteindre 750 MPa.

#### 4.4 Description du soudage FSW et ses paramètres :

##### 4.4.1 Le matériau utilisé pour le FSW :

L'alliage d'aluminium utilisé dans cette thèse est l'alliage 2017A qui est un alliage de la série 2000, ces alliages sont largement utilisés pour les applications mécaniques. L'état initial de l'alliage est T451.

Cet alliage est utilisé dans les structures aéronautiques pour le fuselage et les intrados de voilures notamment grâce à ses propriétés.

##### 4.4.2 Le mode opératoire :

###### 4.4.2.1 Préparation des plaques à souder :

On a préparé deux plaques d'aluminium de type 2017A-T451 de 100 mm de largeur et de 200 mm de longueur de 6 mm d'épaisseur, on obtient après l'assemblage une seule plaque soudée de 200x200 mm.

###### 4.4.2.2 L'outil de soudage :

L'outil est en acier AISI-H11 (acier à outil AFNOR-Z38CDV5.1), cet acier qui possède une température de fusion et une dureté plus élevées que l'alliage 2017A-T451 des plaques à souder.

**Tableau 4.6 :** La composition chimique de l'acier AISI-H11 :

Les éléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Mo
Poids%	0,35- 0,45	0,8- 1,25	0,2-0,6	0,03	0,03	4,75- 5,5	0,3-0,6	1,1-1,6

La géométrie de l'outil a été réalisée d'une manière à permettre une bonne circulation de l'air autour de l'outil et pour assurer un bon refroidissement de ce dernier.

###### 4.4.2.3 La machine de soudage FSW :

Sur une fraiseuse conventionnelle PMER VST300, le soudage des deux plaques a été réalisé dont les vitesses de rotation et d'avance maximale sont respectivement 1500tr/min et 900mm/min :



**Figure 4.1** : Fraiseuse utilisée pour FSW.

Les paramètres de soudage utilisés pour réaliser le joint soudé sont présentés dans le tableau (4.7) suivant :

**Tableau 4.7** : Les paramètres de soudage utilisés.

Alliage	L'épaisseur	Longueur x largeur(mm)	La vitesse de rotation(tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)	L'angle d'inclinaison (°)
2017A-T451	6 mm	200x100	1250	36	2

#### 4.4.2.4 le protocole de soudage :

Pour réaliser ce procédé, la première plaque est positionnée de telle manière que le bord à souder soit parallèle à l'avance du pion pendant le soudage, les deux pièces à assembler sont mises en contact et fortement bridées pour éviter tout mouvement relatif de celles-ci lors du soudage, une fine plaque de titane (Ti6V4A d'épaisseur de 2mm) est placée en dessous des plaques à assembler pour l'isolation thermique du support.

##### ➤ Les étapes principales :

- 1- Les deux pièces à souder sont bien bridées pour éviter tout mouvement lors du soudage.



**Figure 4.2** : la fixation des plaques à souder.

- 2- Déplacement de l'outil du haut en bas pour qu'il soit en contact avec les deux tôles.
- 3- Positionnement de l'outil au-dessus des plaques à souder avec une inclinaison de  $2^\circ$ .
- 4- La pénétration de l'outil à l'interface des plaques à souder.



**Figure 4.3 :** la phase de soudage.

- 5- L'avancement de l'outil le long de la ligne de soudage.



**Figure 4.4 :** l'avancement de l'outil.

- 6- Le retrait de l'outil après avoir terminé l'opération de soudage des deux métaux soudés :

#### 4.5 L'inspection visuelle des échantillons :

L'inspection visuelle, permet ainsi de valider la qualité de la soudure. Dans certains cas l'état extérieur de la pièce soudée donne une indication sur la présence éventuelle des défauts internes (présence de reliefs sur la surface de la soudure). Néanmoins une soudure qui présente un état extérieur satisfaisant ne garantit pas l'absence des défauts internes.



Figure 4. 5 : l'inspection visuelle des échantillons.

#### 4.6 Microstructure des joint soudés FSW :

Le procédé FSW a particulièrement été développé pour l'assemblage des métaux tendres et alliages légers : alliages d'aluminium, magnésium et cuivre. Cependant, de nombreuses études sont aussi en cours pour optimiser les opérations de soudage des matériaux durs et à hautes caractéristiques mécaniques comme l'acier, l'inox et le titane.

Un joint soudé est constitué de différentes zones dans lesquelles une forte évolution métallurgique permet de discerner plusieurs frontières et comportements locaux. L'évolution de la taille des grains, leur orientation, la texture cristalline et la précipitation sont autant de paramètres qui ont une importance majeure pour ces zones, et par extension, le comportement global du joint. On définit généralement 4 zones dans un joint soudé par friction malaxage, listée successivement depuis la partie extérieure jusqu'au centre du joint.

- **Matériau de Base (MB)** : c'est la zone qui n'est pas affectée par le procédé. L'apport de chaleur fourni par le frottement de l'outil et la déformation plastique n'engendre pas de modifications structurales de la matière donc, les caractéristiques mécaniques et métallurgiques d'origine sont conservées.

• **Zone Affectée Thermiquement (ZAT)** : c'est la zone uniquement affectée par l'élévation de température dans la périphérie du joint (de 150 à 350°C) et ne subit aucune déformation. Selon les nuances soudées, elle peut être le lieu d'évolutions structurales telles que le grossissement de grains (alliages de la série 5xxx essentiellement). Sa largeur va dépendre de l'histoire thermique directement liée aux paramètres de soudage et aux pertes de chaleur à l'extérieur du système (diffusion dans l'outillage, échange avec l'air ambiant etc....).

• **Zone Affectée Thermo-mécaniquement (ZATM)** : c'est la zone affectée, à la fois, par l'élévation de température dans la matière, et par la déformation plastique due au malaxage de la matière par la rotation de l'outil, et plus particulièrement du pion. D'un point de vue métallurgique, la microstructure est la plus perturbée du cordon : les grains sont déformés suivant le mouvement de l'outil. Les pics de température dans cette zone peuvent atteindre 350 à plus de 500°C. La distinction des côtés AS et RS est aussi particulièrement marquée dans la ZATM. Le côté AS montre généralement une évolution de microstructure très brutale tandis qu'elle est moins marquée et plus étendue du côté RS.

• **Novau** : cette zone représente le centre du cordon de soudure et elle est localisée autour du pion de l'outil. C'est ici que la température est la plus élevée (autour de 500°C) et les déformations plastiques les plus importantes. L'apport de chaleur important lié aux déformations plastiques, associé à d'importantes vitesses de déformation, permet de déclencher, dans la plupart des cas, des phénomènes de restauration-recristallisation des grains. Ces mécanismes permettent ainsi d'obtenir localement des grains équiaxes de très petite taille ayant un diamètre pouvant aller de 20 µm à quelques microns.

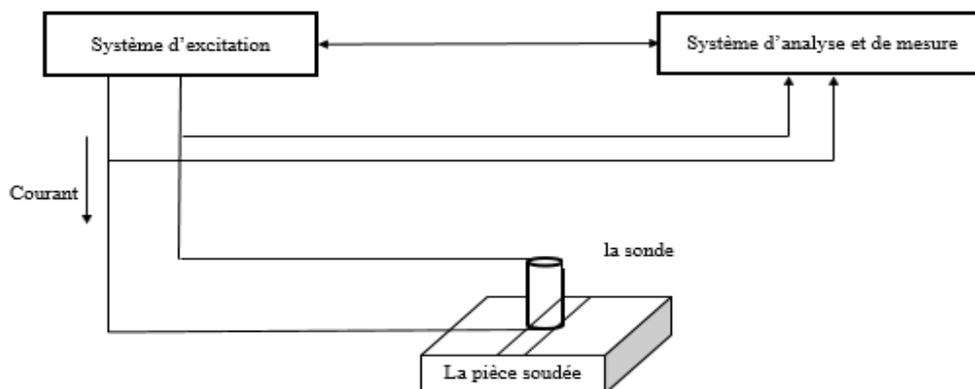


**Figure 4.6** : la microstructure de la pièce soudée.

## 4.7 Le contrôle par courant de Foucault :

Pour pouvoir inspecter la pièce soudée par courant de Foucault, on a utilisé un impédance mètre de type Agilent 4284A-LCR Mètre. Sous une gamme de fréquence de 20 Hz à 1MHz.

Le principe de cette méthode est montré dans la figure suivante :



**Figure 4.7 :** Chaîne de mesure par courant de Foucault.

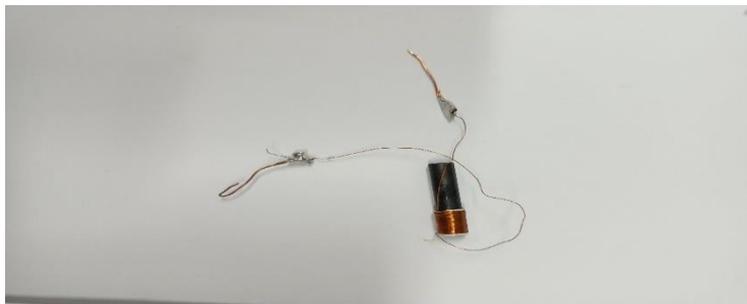
### 4.7.1 La réalisation des sondes :

La forme de la sonde, sa section transversale, sa taille, sa configuration et sa source d'excitation sont tous des paramètres qui interviennent dans la réalisation des sondes à Courants de Foucault. Les sondes peuvent être aussi longues ou courtes, à section transversale rectangulaire, circulaire ou elliptique, avec noyaux magnétiques, non magnétique ou à air, avec ou sans blindage. La construction de capteurs est gouvernée par les paramètres, inductance de la sonde, sa résistance, distribution du champ à son voisinage, sa réponse en présence d'un matériau vis à vis d'un défaut et de la distance du matériau.

La caractérisation des sondes par courants de Foucault est effectuée par le tracé du diagramme d'impédance normalisée, il est obtenu par un balayage de fréquences, il permet de déterminer la meilleure gamme de fréquences où l'interaction sonde matériau est optimale ainsi que la sensibilité du capteur.

Pour notre expérience, On a réalisé une sonde en ferrite pointue à l'extrémité de diamètre 6.5 mm et nombre de spires  $n = 100$  et un diamètre de fil égal à 0.2mm comme la figure (4.8) montre (voir l'annexe 2).

La manipulation du contrôle par les courants de Foucault est accomplie avec un logiciel qui est basé sur le langage de programmation LabVIEW.



**Figure 4.8:** La réalisation d'une sonde.



**Figure 4.9:** Impédance metre de type Agilent 4284A.

Premierement, on a testé la sonde sur des piécés d'étalonnage pour savoir si elle est sensible au type de matériau :



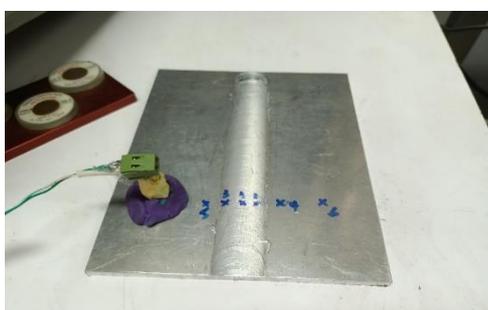
**Figure 4.10 :** Le test de la sonde.

Puis, on a fait le contrôle sur des points choisés (7points) , comme la figure(4.11) représente :



**Figure 4.11 :** Les points à contrôler.

Enfin, en chaque point de contrôle l'impédance mètre nous a donné un diagramme d'impédance.



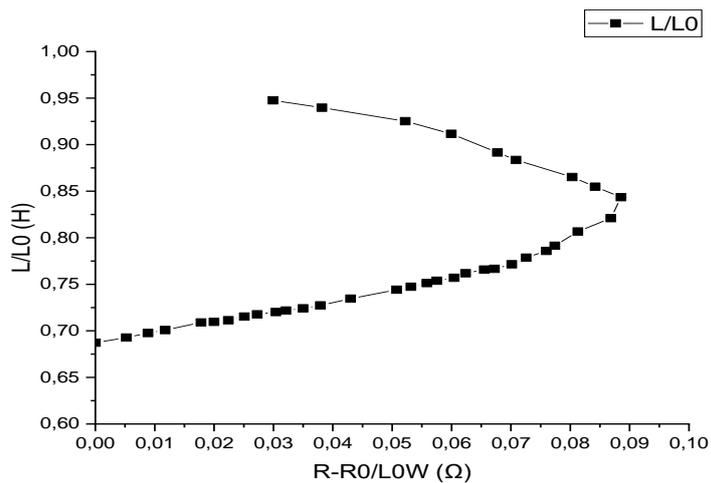
**Figure 4.12 :** Le contrôle du point 7.

#### **4.8 Résultats et interprétations :**

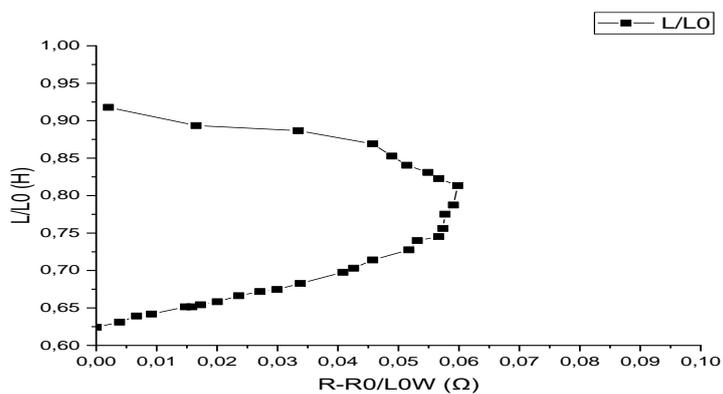
Pour caractériser les contraintes résiduelles engendrée par le soudage FSW, On a fait un balayage de la sonde réalisée sur la plaque soudée en 7 points (Figure 4.11), où le point 1 représente le noyau, les points 2 et 3 représentent la zone affectée thermo-mécaniquement ZATM, les points 4 et 5 représentent la zone affectée thermiquement ZAT et les points 6 et 7 représentent la zone non affectée (métal de base) avec une gamme de fréquence de 20Hz-1MHz.

Cette partie est consacrée à la comparaison des diagrammes d'impédance des points de contrôle avec le diagramme d'impédance de l'aluminium étalonné.

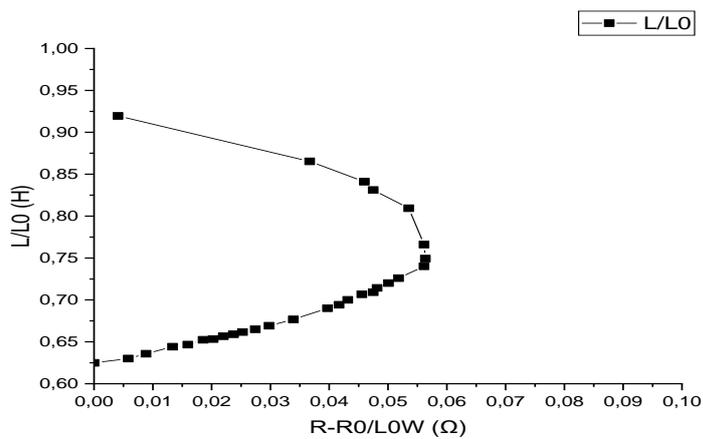
En commençant par le diagramme de référence (de l'aluminium étalonné) comme la figure 4.13 montre, puis par les diagrammes des points de contrôle présentés par les figures 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20.



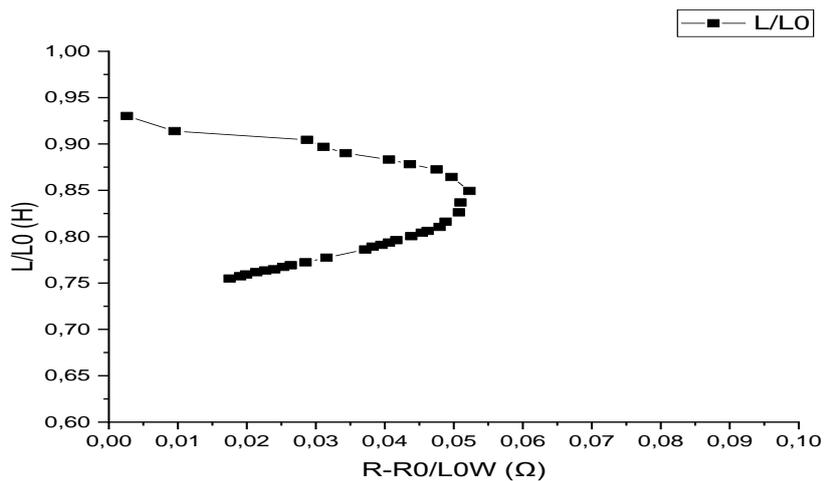
**Figure 4.13 :** Diagramme d'impédance de référence.



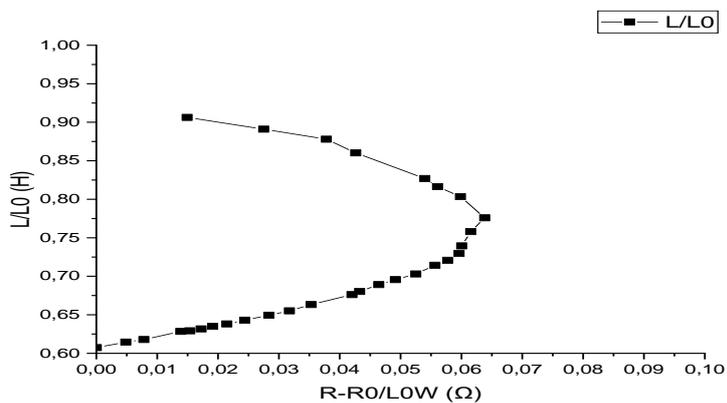
**Figure 4.14 :** Diagramme d'impédance du point 1 (Le noyau).



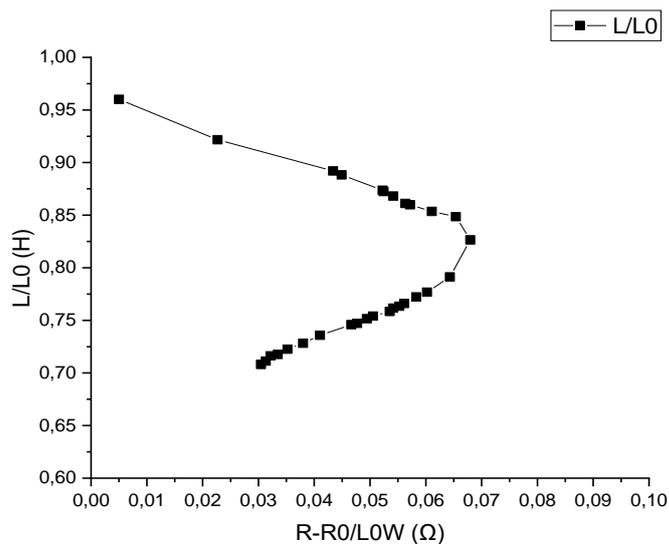
**Figure 4.15 :** Diagramme d'impédance du point 2 (zone ZATM).



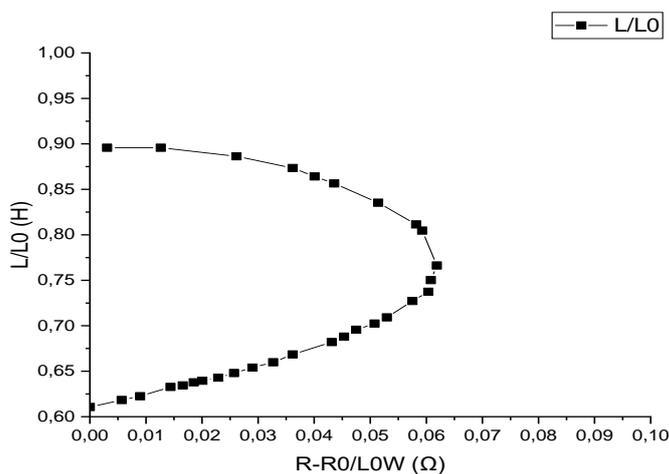
**Figure 4.16 :** Diagramme d'impédance du point 3(zone ZATM).



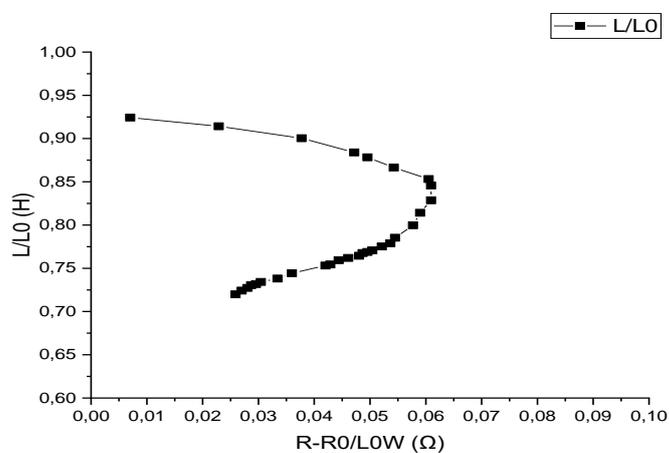
**Figure 4.17 :** Diagramme d'impédance du point 4 (zone ZAT).



**Figure 4.18 :** Diagramme d'impédance du point 5 (zone ZAT).

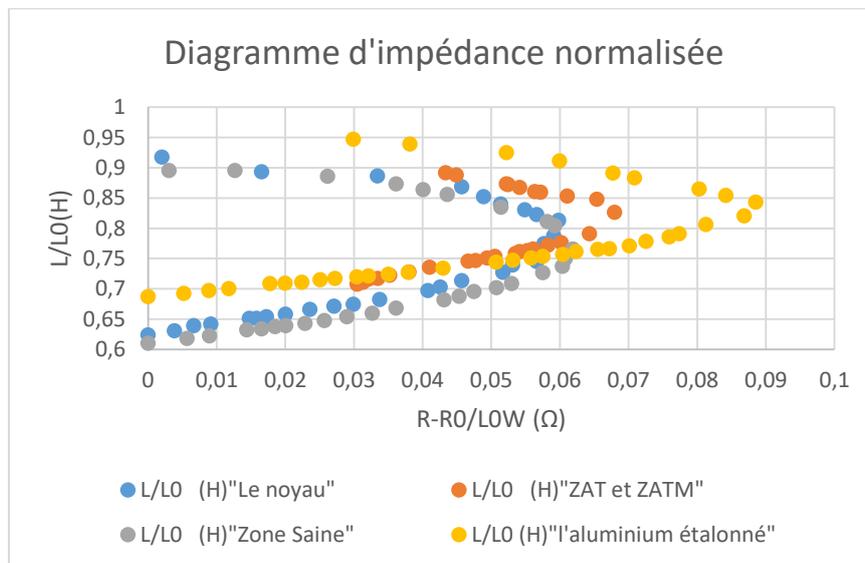


**Figure 4.19 :** Diagramme d'impédance du point 6 (zone saine).



**Figure 4.20 :** Diagramme d'impédance du point 7 (zone saine).

Afin de comparer les résultats de la pièce soudée par FSW avec celui de l'aluminium étalonné, on a fait la superposition des diagrammes d'impédance normalisée.



**Figure 4.21** : la superposition des résultats.

Analysant les diagrammes d'impédance des différents points sur la pièce soudée, on constate que :

- Toutes les figures possèdent la même forme de la courbe caractéristique d'impédance.
- En augmentant la fréquence  $f$ , la résistance  $R$  augmente contrairement à l'inductance  $L$  ce qui s'explique par l'augmentation de l'énergie dissipée par effet joule et la diminution de l'énergie emmagasinée.
- IL y'a une symétrie par rapport au noyau.
- Une diminution de l'impédance par rapport à l'état de référence suite à la présence des contraintes résiduelles.
- Diminution de l'impédance au niveau de la zone N à cause de la présence d'une faible contrainte résiduelle car dans cette zone la température est assez élevée et sévère, et suite à l'effort combiné de l'écoulement du métal et le cycle thermique, cette zone subit une recristallisation dynamique d'où l'affinement des grains et l'adoucissement des contraintes.
- L'impédance maximale se trouve au niveau de la zone affectée thermo-mécaniquement ZATM (aux extrémités de l'épaulement de l'outil) à cause de la présence du maximum de contraintes résiduelles qui sont générées par la chaleur de frottement entre l'épaulement et la matière et qui ne sont pas assez élevée pour déclencher le mécanisme de recristallisation dynamique, ensuite elles diminuent et convergent vers zéro à chaque

fois qu'on s'éloigne du cordon de soudure vers le métal de base qui n'a pas subi des modifications thermiques, mécaniques ou chimiques.

- Les résultats obtenus sont en accord avec des profils de contraintes résiduelles déterminées par d'autres méthodes publiées dans la littérature.
- Les CF sont très sensibles à des micro variations.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE :

Ce travail est une contribution à l'étude et à la compréhension de procédé FSW utilisé dans l'industrie aéronautique. Ce type de soudage nous a permis de réaliser une soudure sur l'alliage 2017 A-T451 qui connaît un fort adoucissement à travers la soudure.

Le FSW est un procédé de soudage à l'état solide qui présente des avantages considérables et économiques. Ce procédé ne nécessite aucun métal d'apport, consomme moins d'énergie que les procédés de soudage par fusion et ne nécessite pas de gaz de protection. Il est considéré comme écologique comparativement aux procédés de soudage par fusion. Ses principaux paramètres opératoires sont la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance, et l'effort axial. Le potentiel de ce procédé tient principalement du fait qu'il permet d'éviter les défauts liés à la solidification. Suite à des cycles thermiques assez élevés causés par l'épaulement, des contraintes résiduelles se forment au niveau du cordon de soudure qui peuvent modifier la structure et les propriétés mécaniques initiales du matériau. Leurs présences dans ce dernier peuvent aussi bien avoir des effets bénéfiques que néfastes. En effet, il est généralement observé que les contraintes résiduelles de compression ont un effet bénéfique sur la durée de vie de la pièce car elles limitent l'apparition des fissures. Par contre, les contraintes résiduelles de traction favorisent la génération des fissures. Par conséquent, il est nécessaire de modéliser et caractériser ces contraintes résiduelles.

Dans ce travail, la caractérisation des contraintes résiduelles engendrées par le cordon de soudure dans une structure en alliage d'aluminium a été réalisé expérimentalement grâce au contrôle non destructif par courant de Foucault en réalisant un nouveau type des sondes bien spécifique à ce type de contrôle. Les résultats montrent :

- Toutes les figures possèdent la même forme de la courbe caractéristique d'impédance.
- En augmentant la fréquence  $f$ , la résistance  $R$  augmente contrairement à l'inductance  $L$  ce qui s'explique par l'augmentation de l'énergie dissipée par effet joule et la diminution de l'énergie emmagasinée.
- IL y'a une symétrie par rapport au noyau.

- Diminution de l'impédance au niveau de la zone N à cause de la présence d'une faible contrainte résiduelle car dans cette zone la température est assez élevée et sévère, et suite à l'effort combiné de l'écoulement du métal et le cycle thermique, cette zone subit une recristallisation dynamique d'où l'affinement des grains et l'adoucissement des contraintes.
- L'impédance maximale se trouve au niveau de la zone affectée thermo-mécaniquement ZATM (aux extrémités de l'épaulement de l'outil) à cause de la présence du maximum des contraintes résiduelles qui sont générées par la chaleur de frottement entre l'épaulement et la matière et qui ne sont pas assez élevées pour déclencher le mécanisme de recristallisation dynamique, ensuite elles diminuent et convergent vers zéro à chaque fois qu'on s'éloigne du cordon de soudure vers le métal de base qui n'a pas subi des modifications thermiques, mécaniques ou chimiques.
- Les résultats obtenus sont en accord avec des profils de contraintes résiduelles déterminées par d'autres méthodes publiées dans la littérature.
- Les CF sont très sensibles à des micro variations.

### **Perspective et recommandation :**

Comme perspective à cette étude, les travaux suivants peuvent être proposés :

- Simulation des contraintes résiduelles.
- Caractérisation des contraintes résiduelle par la méthode de DRX.
- Estimation des contraintes résiduelles par les méthodes de processus stochastique.
- Etudes numérique et expérimentale de fatigue des tôles soudée par FSW.
- Etude de soudage hétérogène.
- Etude de l'influence des paramètres de soudage sur les contraintes résiduelles.
- Caractérisation mécanique et métallographique de tôles soudées.

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

### Liste des abréviations:

FSW	Friction Stir Welding
TWI	The Welding Institute
AS	Advancing Side
RS	Retreating Side
MB	Métal de base
ZAT	Zone affectée thermiquement
ZATM	Zone affectée thermo-mécaniquement
CND	Contrôle non destructif
CF	Courant de foucault
US	Ultrasons
DRX	Diffraction des rayons X

### Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
A	L'allongement	
$B_r$	L'induction magnétique rémanente	T
E	L'énergie	J
$f$	La fréquence	Hz
h,k,l	Les indices de Miller	
$J(z)$	Le module de la densité de courant à la profondeur z	A/m <sup>2</sup>
$J_s$	Le module de la densité de courant à la surface de la pièce (Z=0)	A/m <sup>2</sup>
L	La réactance	H
$L_0$	La réactance à vide	H
n	L'ordre de diffraction	
R	La résistance	$\Omega$
$R_0$	La résistance à vide	$\Omega$

$R_m$	La limite à la rupture	MPa
$R_{p0.2}$	La limite d'élasticité	MPa
$X$	L'inductance	H
$X_0$	L'inductance à vide du capteur	H
$X_n$	L'inductance normalisée du capteur	H
$Z$	La profondeur	m
$\bar{Z}$	L'impédance	$\Omega$
$\bar{Z}_0$	L'impédance à vide du capteur	$\Omega$
$Z_n$	L'impédance normalisée	$\Omega$
$\sigma$	Conductivité électrique	$S m^{-1}$
$\mu$	Perméabilité magnétique	$H m^{-1}$
$\delta$	La profondeur de pénétration conventionnelle	m
$\mu_r$	La perméabilité magnétique relative du matériau	H/m
$\nu$	Fréquence	Hz
$\lambda$	La longueur d'onde	$\text{Å}$
$\theta$	l'angle de Bragg	$^\circ$
$\omega$	La pulsation	
$\Gamma$	La frontière du domaine	
$\Gamma_e$	Le plan d'entrée	
$\Gamma_s$	Le plan de sortie	
$\Gamma_l$	La surface libre	
$\Gamma_0$	La surface en contact avec l'outil FSW	
$\Gamma_{o'}$	La surface en contact avec la plaque support	

## LES REFERENCES

- [1] : H. MEKRI, « Soudage Hétérogène par point par friction malaxage Cas de : Aluminium/Acier », Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi Bel Abbès, 2018.
- [2] : A. GUEDOIRI, « Contribution à la modélisation et à la simulation numérique du soudage par friction et malaxage », Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Décembre 2012.
- [3] : F. THIBEAULT, « étude numérique et expérimentale du soudage par friction malaxage », Thèse de Doctorat, université du Québec à Chicoutimi, 2012.
- [4] : M. LABED, « Réalisation d'un montage de soudage des métaux dissimilaires », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Juin 2019.
- [5] : S.A. AMEUR, « Etude et simulation du comportement des matériaux polymères soudé par le FSW », Mémoire de Master, Université De MASCARA.
- [6] : Y. HELAL, « L'effet de soudage par friction sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2016-2017.
- [7] : M.C. SOUILAH, « Contribution à l'étude des déplacements résiduels générés par le soudage par friction malaxage de 2 plaques en alliages d'aluminium 2024 T3 », Mémoire De Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019.
- [8] : A. BOUCHERIT, « Contribution au développement du soudage par friction malaxage et mesures des contraintes résiduelles », Mémoire De Master, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, 2007.
- [9] : A. Timesli, « Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage », Thèse De Doctorat, Université De Lorraine, 2013.
- [10] : H. BEZZA, B. YOUBI, « Etude de comportement dynamique d'une plaque en aluminium aéronautique (2017A) soudée en FSW », Mémoire De Master, Université Saad Dahleb Blida, 2015/2016.
- [11] : A. Tongne, « Étude expérimentale et numérique du procédé de soudage FSW (Friction Stir Welding). Analyse microstructurale et modélisation thermomécanique des conditions de contact outil/matière transitoires », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2014.
- [12] : C. Zorni, « Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction », Thèse De Doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2012.
- [13] : A. RAID, « Contrôle non destructif : ressuage, magnétoscopie, radiographie, courants de Foucault et ultrasons », Université Mohammed Boudiaf à Oran, 2017/2018.

- [14] : A. LAKHDARI, « Etude et modélisation de capteurs en CND par Courants de Foucault : application à la détection des fissure », Mémoire De Master, Université Mohamed Khider à Biskra, 2011.
- [15] : Malloum Soultan, « Approche du bruit magnéto-mécanique, application au suivi de la fatigue en flexion rotative », Thèse De Doctorat, INSA de Lyon, 2002.
- [16] : N. ZEMOURI, « Etude et Réalisation d'un Système Multicapteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs », Mémoire De Master, Université Mouloud Mammeri à Tizi Ouzou, 2016.
- [17] : T. BOUCHALA, « Développement des méthodes rapides pour la résolution des problèmes directs dans les systèmes des CND par courant de foucault », Thèse De Doctorat, Université De Batna, 2014.
- [18]: Hecht, « Time of Diffraction Technique (TOFD) An Ultrasonic Testing Method For All Application », NDTnet, 1997.
- [19]: Gheorghe, V. SIMONA, A. VERONICA, O. Elena Amza, M. DOBRE, « Research on ultrasonic non-destructive examination in water immersion of composite material », Proceedings of the 3<sup>rd</sup> WSEAS international conference on finite differences-Finite Elements-Finite Volumes-Boundary Elements-Boucares, Romaine, 2010.
- [20] : H. MEDJANI, « Influence de certains additifs organiques sur les caractéristiques d'un revêtement à base de zinc élaboré par voie électrochimique, application : Evaluation de la résistance à la corrosion dans un milieu NaCl à 3 % en poids », Mémoire De Master, Université Mouloud Mammeri à Tizi Ouzou, 2018.
- [21] :S. MEBREK, « Etude des défauts dans les aciers ferromagnétiques par les méthodes électromagnétiques », Mémoire De Master, Université De Saad Dahleb Blida, 2013.
- [22] : F. ASSAF, « Comportement en fatigue de joints d'aluminium 7075-T6 soudés par friction malaxage et parachevés », Thèse De Doctorat, École Polytechnique De Montréal, Octobre 2013.
- [23] : L. MAGNIER-MONIN, « Tenue en service d'assemblages soudés en Acier 304L : Influence des contraintes résiduelles et du parachèvement mécanique », Thèse De Doctorat, Université De Lille I, 2007.
- [24] : Sabrina Gastebois, « Simulation numérique du soudage FSW à l'aide d'une formulation ALE », Thèse De Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2015.
- [25] : F. GEMME, « Modélisation numérique des phénomènes physiques du soudage par friction malaxage et comportement en fatigue de joints soudés en aluminium 7075-T6 », Thèse De Doctorat, Ecole Polytechnique De Montréal, 2011.
- [26] : Nejah Jemal, « Contribution à la caractérisation thermique et mécanique de la zone soudée en FSW », Thèse De Doctorat, L'Ecole nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ParisTech, 2011.
- [27] : H. LAZIZI, « Influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et structurales de l'alliage Al-4%Cu trempé dans un fluide à 70 H<sub>2</sub>O et 30 d'huile soluble », Mémoire De Master, Université De Mouloud Mammeri à Tizi-Ouzou, 2012/2013.

[28] : A. MAY, « Etude du comportement cyclique et de l'endommagement par fatigue d'un alliage d'aluminium anisotrope de type 2017A », Thèse De Doctorat, École militaire polytechnique et institut national des sciences appliquées de Rouen, 2013.

[29] : Benaïssa Malek, « Etude et modélisation du comportement en fatigue de l'alliage d'Aluminium 2618 anodisé soumis à des chargements multiaxiaux », Thèse De Doctorat. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2020.

[30] : G. HARTMANN, « L'histoire de l'aluminium », 1995.

## LES ANNEXES

### ANNEXE 1 : PIÈCES DE REFERENCES

Bloc de référence de type HOCKING 47A025 :



Les pièces de référence fournies par HOCHKING pour ce bloc :

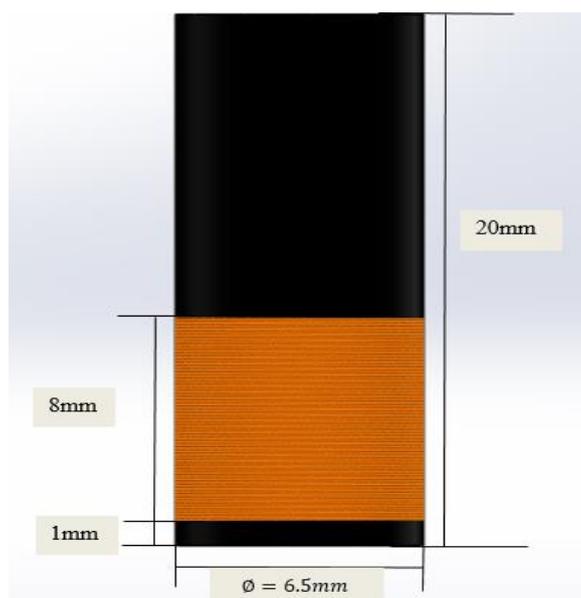
Br : pièce de Bronze : conductivité électrique : 14.6 MS/m

Cu 100 : pièce de Cuivre : conductivité électrique : 58.4 MS/m

AL043 : pièce d'aluminium : conductivité électrique : 24.5MS/m

### ANNEXE 2 : LA SONDE

La caractérisation des sondes par courant de Foucault est effectuée par le tracé du diagramme d'impédance normalisée de celle-ci obtenu par un balayage de fréquences.



**Figure A-1** : Schématisation de la sonde.