

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



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA I
INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES
SPATIALES

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de master en aéronautique
Option : Structures des Avions

THEME

**SIMULATION DU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR
COURANT DE FOUCAULT POUR DES STRUCTURES
AERONAUTIQUES SOUDÉES PAR FSW**

Présenté par :

Mr HADJALI Yacine

Encadré par :

Dr. E. SARI

Blida, juillet 2022

ملخص :

في مشروع نهاية الدراسة هذا، تم تخصيص دراسة لمحاكاة الاختبار غير المدمر باستخدام التيار الدوامي في هياكل الطيران الملحومة بواسطة FSW وذلك عن طريق برنامج المحاكاة ANSYS Maxwell من أجل مقارنة ودراسة السلوك الكهرومغناطيسي لسبيكة ملحومة من الألمنيوم. الهدف من هذا العمل هو حساب كثافة التيار الكهربائي الناجم، الحقل المغناطيسي، الحقل الكهربائي والطاقة حول الأذرع عن طريق تعديل الإعدادات التالية: تردد التيار، عرض وعمق أثر التلحيم وموضع المسبار، مع مقارنة النتائج المستخلصة.

الكلمات المفتاحية: التيار الدوامي، التلحيم، الظواهر الكهرومغناطيسية، الاختبار غير المدمر، FSW، ANSYS، Maxwell، المحاكاة.

Résumé :

Ce projet de fin d'étude, consiste à faire la simulation du CND par courant de Foucault avec le logiciel ANSYS Maxwell pour des structures aéronautiques soudées par FSW afin de comparer et étudier le comportement électromagnétique d'un cordon de soudure avec différents paramètres. La simulation sera effectuée pour une plaque d'aluminium.

Le but de ce travail est de calculer la densité du courant induit, le champ magnétique, le champ électrique et l'énergie autour du défaut, et ceci en étudiant les paramètres suivants : La variation de fréquence, la largeur et la profondeur du défaut et position du capteur. Ainsi comparer les résultats obtenus.

Mots clés : ANSYS, CND, Courant de Foucault, FSW, Maxwell, électromagnétisme, défaut, soudure.

Abstract :

This graduation project involves performing eddy current NDT simulation with ANSYS Maxwell software for FSW welded aeronautical structures to compare and study the electromagnetic behavior of a weld bead with different parameters. The simulation will be carried out for an aluminum plate.

The aim of this work is to calculate the induced current density, the magnetic field, the electric field and the energy around the fault by varying the following parameters: The current's frequency, the width and depth of the weld bead and the position of the sensor. And compare the results obtained.

Key words: ANSYS, NDT, Eddy current, FSW, Maxwell, electromagnetism, defect, welding.

Remerciements

Nous Tenons, en premier lieu, à remercier Allah, le tout puissant, de nous avoir donné autant de patience, courage et force pour réaliser ce travail.

Nos sincères remerciements vont en premier lieu :

Aux membres de jury :

- **Mr BENNOUD Salim**
- **Mr AZZAZEN Mohamed**

*À ma promotrice : **Dr SARI El-Kahina***

Pour toutes leurs orientations pertinentes et pour leur disponibilité.

Pour avoir accepté de faire partie du jury et d'examiner ce travail avec attention ;

*À nos **parents** pour le soutien et les encouragements qu'ils nous ont fournis pendant cette période.*

À nos familles, nos amis et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance :

A mes parents, mon père **BELKACEM** et ma mère **TASSADIT** qui ne cessent de m'encourager et me soutenir tous les jours. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

A tous les membres de ma famille, mes frères et sœurs **LYNDA, KENZA, AMINE** ; A mes oncles et tantes qui se trouvent à l'étranger ;

A tous les membres de notre club scientifique **LE JEUNE AVIATEUR**, à tous mes collègues et mes chers amis : **BELAID, SAHBI, NAWAL, MONICA, AMAYES** qui étaient toujours avec moi

Et à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu pendant ma formation, par leur assistance.

HADJALI Yacine

Sommaire :

Remerciements	III
Dédicaces	IV
Sommaire :.....	V
Liste des figures :	VIII
Liste des tableaux :.....	XI
Liste des symboles et des abréviations.....	XII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le CND.....	5
1 Introduction :	5
2 Généralités :.....	5
2.1 Principe :.....	5
2.2 Champ d'application :	6
2.3 Les défauts détectés	7
2.3.1 Défauts de surfaces :.....	7
2.3.1.a Les défauts ponctuels :.....	7
2.3.1.b Les défauts d'aspect :.....	8
2.3.2 Défauts internes :.....	8
3 Les techniques de contrôle non destructif :	8
3.1 Examen visuel.....	8
3.2 Ressuage :.....	9
3.3 Essais ultrasonores :	11
3.4 Contrôle par Laser :.....	12
3.5 Radiographie :	13
3.6 Magnétoscopie :.....	15
3.7 Thermographie :.....	16
3.8 Thermo-inductive :.....	17
3.9 Courants de Foucault :	19
4 L'impédance normalisée :	21
5 L'effet de peau :	22
6 Cycle d'hystérésis :	23
6.1 Définition.....	23
6.2 Courbe de première aimantation :	24

Sommaire

6.3	Cycle d'hystérésis :	24
6.4	Types du cycle d'hystérésis :	26
6.4.1	Cycle majeur :	26
6.4.2	Cycle mineur :	26
7	Différent types de capteurs pour le contrôle par CF :	26
7.1	Classification fonctionnelle :	26
7.2	Classification suivant le montage par rapport à la pièce contrôlé :	27
8	Conclusions :	28
Chapitre II : Procédé de soudage FSW		30
1	Introduction :	30
2	Principaux avantages du soudage par friction malaxage :	32
3	Historique du procédé FSW :	32
4	Domaine d'application du procédé :	33
5	Les différentes phases de soudage FSW :	34
6	Phase de pénétration de l'outil.....	35
7	Phase de préchauffage.....	35
8	Phase de soudage.....	36
9	Phase de retrait de l'outil.....	36
10	Paramètres du soudage FSW :	37
11	Géométrie de l'outil	37
12	Géométrie des joints réalisables par friction-malaxage	39
13	Caractérisation microstructurales des joints soudés (les différentes zones d'une pièce soudée par FSW) :	40
14	Caractéristiques mécaniques d'un joint soudé.....	41
14.1	La dureté :	41
14.2	La résistance mécanique :	44
15	Conclusion.....	46
Chapitre III : Modélisation mathématique et résolution numérique.....		47
1	Introduction :	47
2	Mise en équation (les équations de Maxwell) :	47
3	Conditions aux limites :	49
4	Conditions de continuité :	49
5	Hypothèses de simplification :	50
6	Formulation électromagnétique :	51

Sommaire

6.1	Formulations basées sur le champ électrique E :.....	51
6.2	Formulation en A-V :	52
6.3	Formulation en H :	52
6.4	Comparaison entre les formulations :.....	53
7	Technique de calcul d'impédance :.....	54
8	Modélisation et résolution numérique :.....	55
8.1	Intérêt de la modélisation :.....	55
8.2	Résolution des EDP :.....	56
8.3	Résolution analytique :	56
8.3.1	Méthode par intégrales de volume :.....	57
8.3.2	Méthode par intégrales de surface :.....	57
8.3.3	Méthode par intégrales de frontière :	57
8.3.4	Méthode des différences finies :.....	58
8.3.5	Méthode des volumes finis :.....	58
8.3.6	Méthode des éléments finis :.....	59
8.4	Principe de la méthode des éléments finis :.....	59
8.4.1	Formulation variationnelle :.....	60
8.4.2	Méthode de Galerkin :	61
9	Conclusion :.....	61
Chapitre IV : Résultats et interprétations.....		63
1	Introduction :	63
2	Présentation de logiciel ANSYS-Maxwell :	63
3	Présentation de l'application :	65
3.1	Géométrie du système :.....	65
3.2	Maillage du domaine :.....	67
3.3	Position du capteur :	67
4	Résultats et interprétations :	69
4.1	Densité de courant induit :.....	69
4.2	Influence de la profondeur :	76
4.3	Influence de la fréquence :	78
5	Conclusion :.....	78
Conclusion générale :.....		79
Références :.....		82

Liste des figures :

Chapitre 1 :

Figure I.1. Principe du contrôle non destructif	6
Figure I.2. Inspection par ressuage	10
Figure I.3. Théorie de l'opération Impact-Echo	12
Figure I.4. Inspection par radiographie	14
Figure I.5. Inspection par magnétoscopie.....	15
Figure I.6. Inspection par thermographie.....	16
Fig. I.7. Distributions du champ magnétique et température	18
Figure I.8. Inspection par thermo-inductive.....	19
Figure I.9. Inspection par Courants de Foucault	21
Figure I.10. Variation de l'amplitude des CF à l'intérieur d'un conducteur [25]	23
Figure I.11. Courbe de 1 ^{ère} aimantation (OA) d'un matériau ferromagnétique [27].....	24
Figure I.12. Gonflement du cycle d'hystérésis	25
Figure I.13. Classification des sondes	28

Chapitre 2 :

Figure II.1. Schéma du soudage par friction-malaxage [15].....	31
Figure II.2. Soudure FSW longitudinale d'un fuselage d'avion [17].....	34
Figure II. 3. Chronologie d'une opération de soudage FSW : (a)phase de plongée, (b) Phase de préchauffage, (c) phase de soudage et (d) phase de retrait.....	35
Figure II. 4. a) phase de chauffage. b) Phase de soudage d'un joint [18].....	36
Figure II. 5. Trou à la fin de soudure [18]	37
Figure II. 6. Schéma simplifié de l'outil (tige et épaulement) dans le soudage par friction-malaxage [15]	37
Figure II. 7. Les différentes formes de la tige [20]	38
Figure II. 8. Les différentes formes d'épaulement [15].....	38
Figure II. 9: Technologies d'outils de FSW [19].....	39
Figure II. 10. Configurations des joints pour le soudage par friction [18].....	40
Figure II. 11. Microstructure des différentes zones dans un joint pendant le FSW [15].....	41
Figure II. 12. Profil de micro-dureté en "W" [23].....	42

Liste des figures

Figure II. 13 Profil de micro-dureté d'un alliage d'aluminium 5083 (en haut) et d'un alliage 6082 (en bas) [22].....	42
Figure II. 14 Augmentation de la dureté avec l'augmentation de la vitesse de rotation dans une soudure FSW de l'alliage 6061- T6 [24]	43
Figure II. 15 Résistance à la traction, limite d'écoulement et l'efficacité du joint correspondante pour l'alliage 7075-T6 en variant en (A) la vitesse de rotation et en (B) la	45
Figure II. 16 Résistance à la traction (A) et efficacité du joint (B) pour des soudures réalisées en alliage 6061-T6 avec des outils de différentes géométries en variant la vitesse de rotation [20]	46

Chapitre 4 :

Figure II. 3. Interface entre deux milieux différents [3]	49
Figure IV.1. La fenêtre principale du logiciel Maxwell	64
Figure IV.2. Organigramme de simulation sous Ansys-Maxwell	65
Figure IV.3. Géométrie du domaine d'étude	65
Figure IV.4. Maillage du domaine pour une position de 20mm du capteur....	67
Figure IV.5. Maillage du domaine pour une position de 15mm du capteur....	68
Figure IV.6. Maillage du domaine pour une position de 10mm du capteur....	68
Figure IV.8. Maillage du domaine pour une position de 0mm du capteur.....	69
Figure IV.9. Densité de courant induit de la pièce en fonction de la position du capteur par rapport au cordon de soudure	69
Figure IV.10. Cartographie du champ magnétique de la pièce en fonction de la position du capteur par rapport au cordon de soudure	70
Figure IV.11. Cartographie du champ électrique de la pièce en fonction de la position du capteur par rapport au cordon de soudure	70
Figure IV.12. Cartographie de l'énergie en fonction de la position du capteur par rapport au cordon de soudure	71

Chapitre 5 :

Figure V.13. Variation de la densité du courant en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 2mm..	72
Figure V.14. Variation de la densité du courant en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 3mm..	73
Figure V.15. Variation de l'énergie en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 2mm.....	73
Figure V.16. Variation de l'énergie en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 3mm.....	74

Liste des figures

- Figure V.17. Variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 2mm ..74**
- Figure V.18. Variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 3mm ..75**
- Figure V.19. Variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une largeur de 10mm 76**
- Figure V.20. Variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une largeur de 14mm 77**
- Figure V.21. Variation du Champs magnétique en profondeur.....77**
- Figure V.22. Variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences d'excitations pour une largeur de 14mm et une profondeur de 3mm.....78**

Liste des tableaux :

Chapitre 3 :

Tableau III.1. Comparaison entre les formulations les plus utilisées dans le CND-CF53

Chapitre 4:

Tableau VI.1. Les caractéristiques géométriques du système.....66

Tableau IV.2. Les caractéristiques électromagnétiques de la plaque soudée.....66

Liste des symboles et des abréviations

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
HAZ	Heat Affected Zone
ZATM	Zone Affectée Thermo-Mécaniquement
TMAZ	thermo-mecanicly Affected Zone
CND	Contrôle Non Destructif
NDT	Non Destructive Testing
CF	Courant de Foucault
US	Ultrasons
DRX	Diffraction des rayons X

Liste des symboles

Symboles	Signification	Unité
A	Potentiel Vecteur magnétique	(T.m)
B	Induction magnétique	(T)
D	Induction électrique	(C/m ²)
E	Champ électrique	(V/m)
f	Fréquence	(Hz)
H	Champ magnétique	(A/m)
I	Intensité du courant électrique	(A)
J	Densité de courant	(A/m ²)
J _s	Densité des courants surfaciques	(A/m ²)
L	Inductance propre	(H)
M	Inductance mutuelle	(H)
R	Résistance électrique	(Ω)
S	Surface	m ²
t	Temps	(s)
U	Tension aux bornes du capteur	(V)
V	Potentiel scalaire électrique	(V)
X	Réactance	(Ω)
X _n	Réactance normalisée	
Z	Impédance	(Ω)
Γ	Frontière du milieu	
δ	Épaisseur de peau	(m)
ε ₀	Permittivité électrique absolue du vide	36π10 ⁻⁹ (F/m)
ε _r	Permittivité électrique relative	
μ ₀	Perméabilité magnétique absolue du vide	4π10 ⁻⁷ (H/m)
μ _r	Perméabilité magnétique relative	

Notations et Symboles

ρ	Résistivité électrique	($\Omega \cdot m$)
Φ	Potentiel scalaire magnétique	(T.m)
ω	Pulsation électrique	(rad/s)
Ω	Domaine d'étude	
σ_p	Conductivité électrique de la pièce	(S/m)
σ	Conductivité électrique	(S/m)
ΔR	Variation de la résistance	(Ω)
ΔX	Laplacien	
ΔX	Variation de la réactance	(Ω)
∇X	Divergence d'un vecteur X	
∇X	Gradient d'un scalaire X	
$\nabla \times X$	Rotationnel d'un vecteur X	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Le soudage par friction-malaxage est un procédé de soudage à l'état solide sans ajout de métaux d'apport. Il présente de nombreux avantages pour les applications utilisant des matériaux connus pour être difficiles à souder. La chaleur du frottement de l'épaulement de l'outil provoque un ramollissement localisé, ce qui permet d'usiner la matière. A la fin de la phase de préchauffage, l'outil rotatif se déplace le long du joint à une vitesse définie pour le soudage. Le procédé FSW permet une variété de configurations de soudage : bout à bout, à recouvrement, en T, d'angle, etc.

Relativement aux dangers provenant par la fissuration des structures métalliques: tôles, tubes,...etc. dans le secteur industriel (aéronautique, automobile, nucléaire), un contrôle mécanique est souvent requis. Au niveau de la production, les dimensions des pièces doivent être aussi précises que possible tout en maintenant la disponibilité et les performances. Maintenir un produit industriel dans de bonnes conditions de sécurité lors de son exploitation nécessite une bonne compréhension de l'évolution des composants qui le composent. Cette connaissance implique en particulier de réaliser des contrôles ne portant pas atteinte à l'intégrité des pièces et en entravant le moins possible la disponibilité du produit. Ceci démontre l'importance croissante des essais non destructifs (CND).

Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité, ...etc.), soit pour repérer la présence de défauts et les caractériser. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault). Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui), les conditions de mise en œuvre,etc.

Introduction Générale

Les méthodes électromagnétiques sont fréquemment utilisées pour le contrôle des pièces électriquement conductrices et/ou magnétiques. Par exemple, le contrôle de pièces de fonderie (industrie automobile, industrie pétrolière) peut se faire par magnétoscopie. Les tubes et les revêtements (nucléaire, industrie pétrolière, aéronautique et spatiale) peuvent être testés par les courants de Foucault (CF).

Le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre, il est facile de créer des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde, et complexe. En effet, pour un contrôle donné, comment peut-on créer une bonne répartition des courants de Foucault permettant d'avoir un 'signal de défaut' aussi important que possible? Il est nécessaire avant toute chose d'avoir une connaissance suffisamment complète du phénomène physique. Les courants de Foucault n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent.

Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier les interactions sonde-pièce jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances. La modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction sonde-pièce et de définir une structure adaptée de la sonde. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix des matériaux) tout en limitant le nombre de prototype à réaliser. Dans le domaine du CND-CF, la modélisation est ainsi devenue, grâce aux performances du matériel informatique, une actrice importante dans la conception de sondes.

La modélisation d'une configuration réelle de CND-CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement et elle fait appel à des méthodes numériques telle que la méthode des éléments finis (MEF). Cette méthode s'est imposée ces dernières années, comme un outil numérique efficace pour le traitement des problèmes électrotechniques.

La simulation numérique par les éléments finis d'un problème de CND-CF nécessite souvent un maillage adéquat. Un tel maillage doit d'une part bien décrire la géométrie du domaine d'étude et d'autre part être bien adapté aux phénomènes

Introduction Générale

physiques qu'il doit décrire (variation du champ au voisinage du défaut, épaisseur de peau,etc.).

Ce travail de mémoire de Master est organisé en quatre chapitres initiés par une introduction générale et clôturés par une conclusion générale selon le plan suivant :

- Le premier chapitre débute par un rappel sur les Méthodes de Contrôle Non Destructif puis on détaille dans la méthode de courant de Foucault ;
- Le second chapitre décrit le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW) et ces différentes configurations ;
- Le troisième chapitre présente la modélisation mathématique du phénomène électromagnétique et la méthode de résolution « Méthode des éléments finis » ;
- Le dernier chapitre présente le logiciel utilisé en présentant toutes les étapes utilisées pour la simulation et interprète les résultats.

Chapitre 1

Chapitre I : Généralités sur le CND

1 Introduction :

Le contrôle non destructif (CND) est l'ensemble des techniques aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure industrielle sans les endommager, celui-ci correspond à la détection et la caractérisation des différents défauts et imperfections qui menacent la sécurité de fonctionnement des systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques, ou chimiques. Les phénomènes physiques et les techniques sont multiples : procédés optiques, ressuage, flux de fuites magnétiques, radiographie, contrôle par ultrasons, procédés électromagnétiques et les applications sont variées. En ce sens, le CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité et de la santé des produits [1].

L'histoire des essais non destructifs (END) commence avec celle de la physique moderne à la fin du XIX siècle : découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la Piézo-électricité, etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du Contrôle Non Destructif ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers et radiographie des soudures. Une importante accélération du progrès et du développement des techniques du Contrôle Non Destructif s'est manifestée ensuite vers les années 1960-1970 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que les centrales électriques nucléaires ou encore l'aéronautique [2].

2 Généralités :

2.1 Principe :

Les méthodes du CND sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. On exploite donc un phénomène physique pour détecter la présence d'une hétérogénéité dans un matériau (à l'exception des procédés visuels directs qui échappent à cette règle). Les principes physiques comme l'atténuation, réflexion ou diffraction des ultrasons,

Chapitre 1 : Généralités Sur Le CND

atténuation ou diffraction des rayons X ou γ , perturbation des courants de Foucault....sont à la base des END, ils peuvent servir à caractériser les matériaux (gros grain, anisotropie, dureté, état de contraintes, fissures surfacique ou en profondeur...).

Les techniques de CND se diffèrent par l'énergie employée, énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...)... [3].

Dans tout CND, on peut détecter les cinq étapes suivantes :

- La mise en œuvre d'un processus physique.
- L'altération de ce processus par le défaut.
- La révélation de cette variation par un détecteur approprié.
- Un émetteur de flux.
- Un récepteur ou détecteur.

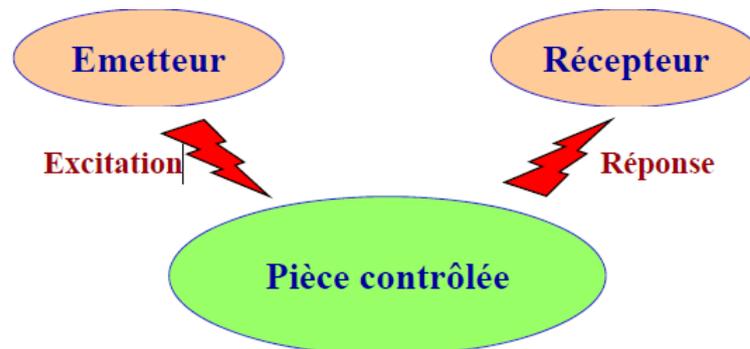


Figure I.1. Principe du contrôle non destructif

2.2 Champ d'application :

Ces méthodes sont très utilisées dans :

- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs).
- L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs).
- L'industrie navale (contrôle des coques).
- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, pièces moteurs, trains d'atterrissage,... etc.).

Chapitre 1 : Généralités Sur Le CND

- L'aérospatiale et l'armée.
- L'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.),
- Le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux roues, bogies).
- L'inspection alimentaire.
- L'archéologie.
- Et en règle générale dans tous les secteurs produisant :
- Des pièces à cout de production élevé en quantité faible (nucléaire, pétrochimique...).
- Des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (BTP, nucléaire, canalisation de gaz...) [4].

2.3 Les types de défauts :

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement: les défauts de surface et les défauts internes [5, 6, 7].

2.3.1 Défauts de surfaces :

Accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes :

2.3.1.a Les défauts ponctuels :

Correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, fissures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons.

2.3.1.b Les défauts d'aspect :

C'est une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) qui est visible et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

2.3.2 Défauts internes :

Ce sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie ou l'imagerie infrarouge.

3 Les techniques de contrôle non destructif :

Il existe plusieurs techniques de CND, peuvent être classées comme suit :

3.1 Examen visuel :

L'inspection visuelle est la plus ancienne procédure de contrôle, continu à développer dans une société américaine d'évaluation des méthodes de contrôle non destructif (ASNT). Cette procédure d'évaluation est la plus simple et générale. L'examen visuel nécessite un bon éclairage localisé sur les régions suspectes. Les résultats prospères ont dépendu de la compétence de l'opérateur, le bon nettoyage, illumination adéquate de la zone inspecté et la qualité de l'instrument optique. Ces facteurs sont encore importants aujourd'hui, mais le matériel est devenu beaucoup plus sophistiqué. Habituellement, l'inspection visuelle ne peut pas être utilisée pour vérifier des résultats de test, ni ce peut être utilisé pour remplacer d'autres méthodes de CND. Cependant, quand l'examen visuel direct

Chapitre 1 : Généralités Sur Le CND

ne peut pas être fait, les instruments optiques sophistiqués peuvent être utilisés pour fournir une inspection éloignée de régions critiques [5, 8, 9, 10].

- **Avantages**

- Examen simple, rapide et pas coûteux;
- Souplesse d'inspection.

- **Inconvénients**

- Détection limitée aux défauts superficiels;
- La surface doit être propre;
- Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.

3.2 Ressuage :

La méthode « huile et poussière de craie », autrefois utilisée par les industries ferroviaires dans les années 1920. Le contrôle par liquide de pénétration (ressuage) a été ranimé en 1941 par Robert et Joseph Switzer. Le ressuage est un moyen de recherche des défauts superficiels qui consiste l'amélioration de l'inspection visuelle de déféctuosité. Il consiste à l'aspiration du pénétrant par la couche poudreuse du révélateur, le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux quatre phases illustrées sur la figure I.2 : application du pénétrant suivie d'un temps d'imprégnation, élimination de l'excès du pénétrant sur la surface de la pièce, ressuage du pénétrant par disposition d'une couche de « révélateur » sur la surface. L'image des défauts apparaîtra à l'observateur dans la mesure où l'étalement du pénétrant sur le révélateur conduit à une nette variation de couleur ou de luminance [5, 8, 9, 10, 11].

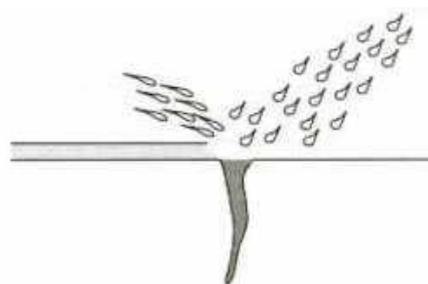
Chapitre 1 : Généralités Sur Le CND



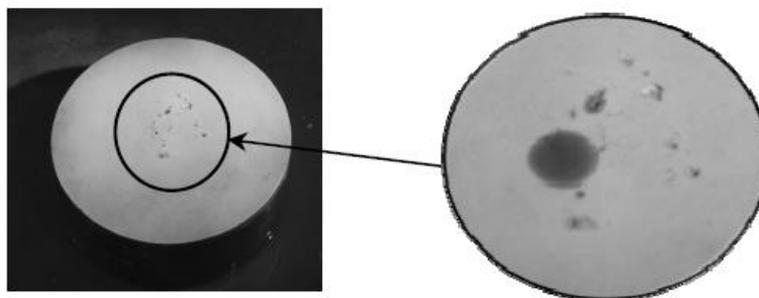
a- Application du liquide pénétrant



b- Nettoyage de l'excédent de pénétrant par lavage



c- Le révélateur extrait le pénétrant retenu par les fissures



d- Observation et interprétation finale

Figure I.2. Inspection par ressuage

- **Avantages**
 - Facilité de mise en œuvre et relativement sensible aux fissures débouchant ;
 - Appliqué sur les matériaux diélectriques et non ferromagnétique.
- **Inconvénients**
 - Limite de l'application sur les matériaux non poreux ;
 - L'interprétation des résultats est subjective: Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts ;
 - Danger des solvants toxiques, corrosifs et inflammable.

3.3 Essais ultrasonores :

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel présentant une certaine élasticité. Les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15kHz à plus de 100MHz. L'ultrason est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage dans la pièce à contrôler (figure I.3). 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 [5, 8, 9, 10, 12, 13].

- **Avantages**
 - Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge).
 - Haute sensibilité de détection de défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore);
 - Détection, localisation et dimensionnement des défauts;
 - Inspection et détection en temps réel.
- **Inconvénients**
 - Sensible à la nature et à l'orientation des défauts;
 - Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle) ;
 - Inspection limitée par la complexité de la forme de la pièce contrôlée.

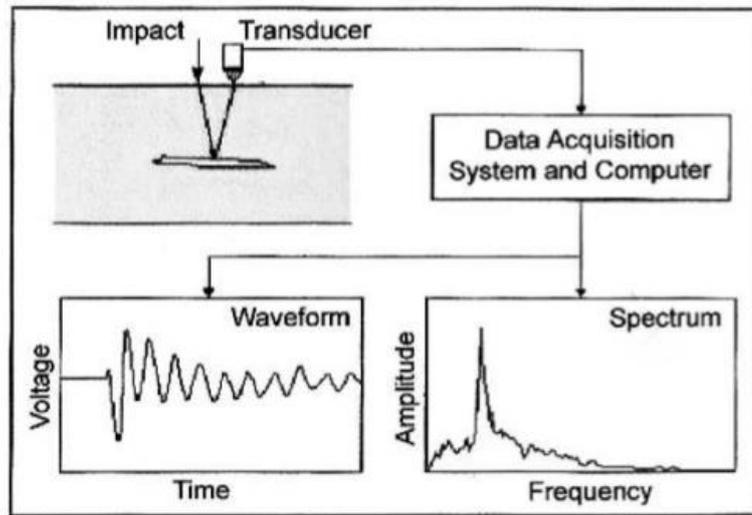


Figure I.3. Théorie de l'opération Impact-Echo

3.4 Contrôle par Laser :

La méthode de contrôle par laser est parmi les méthodes optiques les plus répandues en contrôle non destructif. Comme elle est aussi sans contact, les objets irréguliers et les surfaces non planes peuvent être inspectés sans problèmes d'usure. Le mot laser est un acronyme pour amplification légère de la radiation de l'émission stimulée. Cette lumière est très intense, essentiellement monochromatique (longueur d'onde unique), plan polarisé (unidirectionnel) et très stable. Les méthodes de contrôle non destructif par laser sont populaires dans les industries aéronautique et automobile [8, 12].

- **Avantages**

- Inspection sans contact, ne nécessite pas la préparation de surface de la pièce à contrôler ;
- Pas de consommables : liquide de pénétration, matériaux de marquage,...etc. ;
- Avec les capteurs électro-optiques comme les caméras CCD, des mesures en temps réel sont possibles.

- **Inconvénients**

- Considérations de sécurité particulières doivent être prises en compte ;
- Une composante de chargement est nécessaire pour voir les résultats ;
- Les résultats dépendent de la composante de cisaillement ;

- L'interprétation des résultats est subjective.

3.5 Radiographie :

L'examen d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique (rayons X ou γ) de très courte longueur d'onde comprises entre environ 0,1pm et 1000pm, et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la figure I.4. On caractérise couramment ces rayonnements par l'énergie unitaire, cette dernière requise en contrôle non destructif se situe dans une gamme allant de 50keV à 20MeV. L'interaction entre les rayons X ou γ et la matière implique les phénomènes suivants :

- Un effet photoélectrique, correspondant à un transfert complet d'énergie entre le photon incident et un électron, conduisant à son absorption totale et éventuellement à une réémission de fluorescence X. Cet effet est d'autant plus grand que l'énergie des photons est basse.
- L'effet Compton, correspondant à un transfert partiel d'énergie du photon vers un électron ; les photons sont déviés, alors que les électrons activés provoquent une émission secondaire ; cette diffusion Compton devient prépondérante, vers 1meV, vis-à-vis de l'effet photoélectrique et constitue le phénomène prédominant en radiographie industrielle ;
- La formation de paires électron-positron par annihilation des photons, avec émission de rayonnement secondaire hétérogène ; ce phénomène a fondamentalement un seuil énergétique à 1,02MeV et n'intéresse donc que les hautes énergies.

Ces trois phénomènes d'interaction expliquent d'une part l'absorption des rayons X et γ par la matière, mais aussi un phénomène de diffusion dû aux réémissions d'ondes de plus basse énergie que l'onde incidente. Ce dernier phénomène est très gênant en radiographie, alors que l'on met en œuvre le premier pour détecter et visualiser les défauts.

Dans la pratique, le choix entre radiographie X ou gammagraphie résulte de multiples considérations liées aux avantages et inconvénients de chacune de ces techniques, comme par exemple : taille et coût modeste des sources γ , forte

Chapitre 1 : Généralités Sur Le CND

pénétration de ces rayonnements mais durée d'exposition beaucoup plus longue qu'en radiographie X qui elle, par contre, nécessite la présence d'une source électrique mais offre l'avantage de pouvoir choisir plus aisément les paramètres de contrôle [3, 5, 8, 12].

- **Avantages**

- Contrôle des objets de forme compliquée ;
- Facile à Transporté (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de radioactive portatifs);
- Apprécier la nature et la taille des défauts.

- **Inconvénients**

- L'interprétation des images demande un niveau d'expertise de l'opérateur;
- Mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel;
- Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité ;
- Le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau.

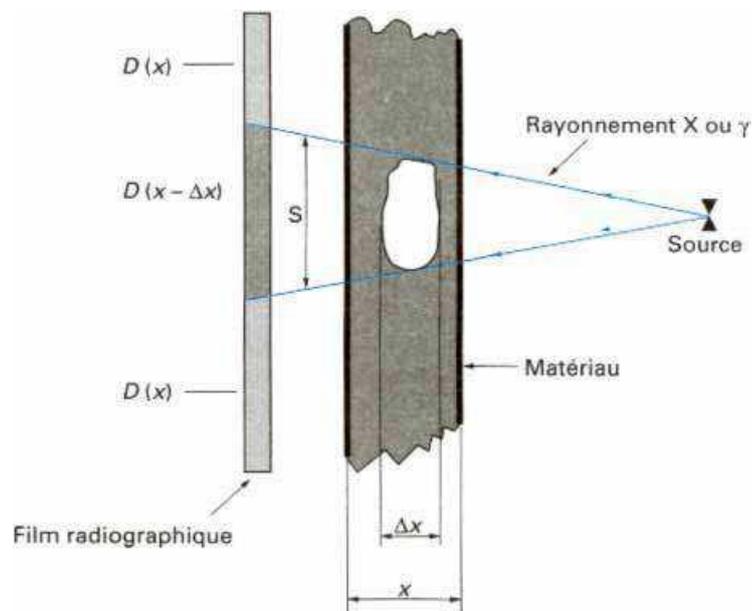


Figure I.4. Inspection par radiographie

3.6 Magnétoscopie :

Le contrôle par magnétoscopie [5, 8, 9, 10, 14] fait appel aux propriétés magnétiques du matériau inspecté. L'effet de dispersion du flux de fuite peut être mis en évidence en aspergeant la surface contrôlée d'une liqueur magnétique constituée de très fines particules ferromagnétiques et d'un liquide porteur (poudre de fer ou de magnétite colorée). Les particules noires ou fluorescentes viennent s'agglomérer sur le champ de fuite, à l'endroit du défaut, le rendant ainsi parfaitement visible, comme l'illustre la figure I.5.

- **Avantages**

- Simple, peu coûteux et rapide ;
- Détection des défauts débouchant et sous-jacents.

- **Inconvénients**

- Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques ;
- Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée ;
- La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce.

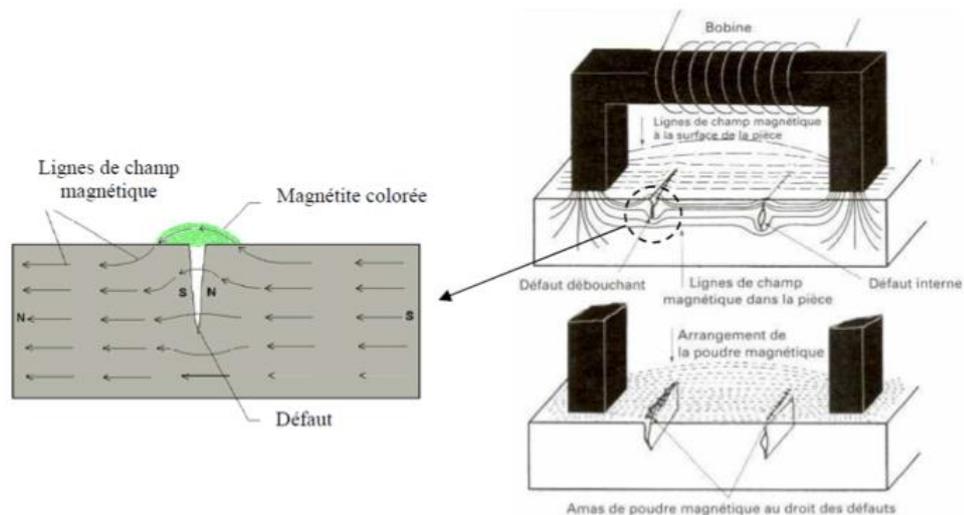


Figure I.5. Inspection par magnétoscopie

3.7 Thermographie :

Cette technique consiste à chauffer la surface du matériau inspecté par apport d'énergie (mécanique, air chaud, lampes flash) et à mesurer l'élévation de température résultante avec une caméra infrarouge. L'inspection en thermographie infrarouge peut se faire selon deux approches : la thermographie active et passive. Dans les deux cas, l'investigation consiste à détecter la présence d'un gradient de température qui révèle la présence d'un défaut, gradient qui peut-être provoqué soit par une hausse ou une baisse de température. En thermographie active, le processus de détection nécessite l'apport d'une stimulation thermique extérieure afin de provoquer l'apparition d'un gradient. Par opposition, la thermographie passive n'utilise pas de stimulation extérieure, l'objet ou le défaut à détecter générant un gradient thermique naturellement. L'approche active comporte principalement trois volets : la stimulation thermique du spécimen, l'acquisition temporelle de la réponse thermique et l'analyse numérique de la réponse (figure I.6). Les techniques d'inspection par thermographie infrarouge ont été développées et continuent d'être améliorées dans le domaine de la thermographie active. Les trois principales techniques sont la thermographie pulsée (TP), elle consiste à générer une impulsion thermique de courte durée. La thermographie modulée (TM) en régime permanent thermique, la température de la surface varie périodiquement avec un module et un déphasage distinct entre les zones saines et les zones défectueuses et la thermographie de phase pulsée (TPP), combinaison entre les deux précédentes technique [3, 8, 9].

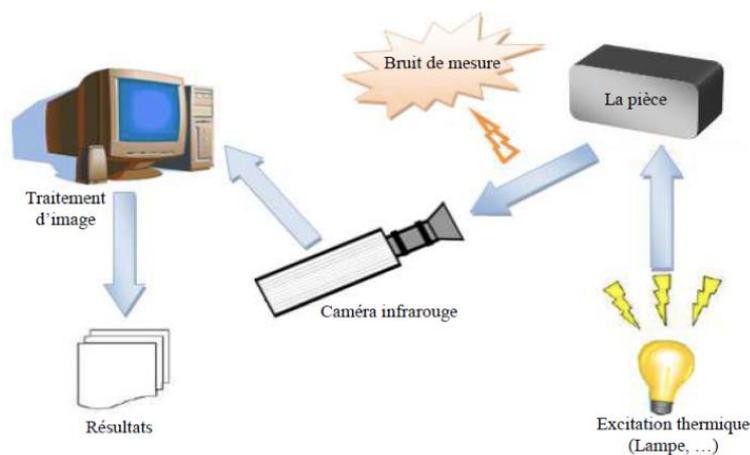


Figure I.6. Inspection par thermographie

- **Avantages**

- Méthode relativement rapide et sans contact ;
- Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée ;
- Les cavités (champs de bulles d'air, fissures, délaminages, ...) sont bien détectées ;
- La sensibilité à la détection des défauts de faibles dimensions ;
- L'archivage des résultats est garanti à l'aide de la caméra infrarouge.

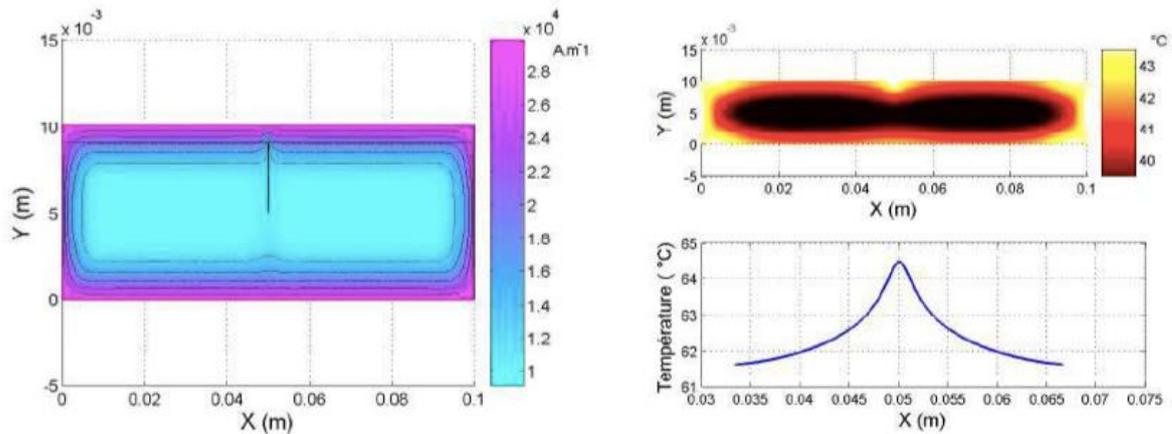
- **Inconvénients**

- Des difficultés de mesure liées aux effets perturbateurs ;
- Des difficultés de localisation de la profondeur des défauts, du fait que l'image obtenue donne une projection de ces derniers sur le plan de la pièce testée ;
- L'interprétation des mesures pas toujours facile, surtout pour identifier la nature des défauts ;
- La phase d'interprétation des résultats présente des restrictions pour une automatisation totale de la technique.

3.8 Thermo-inductive :

Ce mode d'examen consiste, à chauffer la zone d'une pièce électriquement conductrice inspectée par induction magnétique. En cas de présence d'un défaut, l'anomalie dans la distribution de la densité de courants induits, crée une concentration de la densité de puissance autour du défaut qui se traduit par des surchauffes locales. L'inhomogénéité de la distribution de la température se propage à la surface du matériau, et peut être détectée par une caméra infrarouge (figure I.7).

Donc un défaut sera révélé par la combinaison des phénomènes électromagnétique et thermique d'une façon complémentaire.



a) Distribution du champ magnétique

b) Distribution du champ de température et la température de la surface de la plaque

Fig. I.7. Distributions du champ magnétique et température

L'intérêt de cette méthode est d'augmenter la probabilité de détection des défauts de surface et d'améliorer l'interprétation des données par une corrélation des résultats obtenus avec les deux méthodes du CND : par courant de Foucault et par thermographie infrarouge. Elle présente l'avantage de créer une perturbation supplémentaire due à la concentration des courants induits autour du défaut, où une pièce de forme d'une plaque a été inspectée (figure I.8). La présence du défaut perturbe les lignes de courants induits et crée des surchauffes supplémentaires qui s'ajoutent au retour de l'onde thermique à la surface après la stimulation thermique. Cela engendre une élévation de température à la surface au-dessus du défaut. La technique thermoinductive permet également de contrôler facilement la puissance induite, de chauffer à la surface ou au cœur et de s'adapter aux différentes géométries des pièces inspectées et des défauts rencontrés [8, 9].

• **Avantages**

- Méthode relativement rapide et sans contact ;
- La technique est globale et elle permet l'inspection de l'ensemble de la pièce à la fois ;
- Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée ;
- Grande sensibilité de détection des défauts ;

- L'automatisation est possible pour des pièces de géométries constantes.

- **Inconvénients**

- La technique s'applique seulement pour les matériaux électriquement conducteurs ;
- Sensible au chauffage non uniforme ;
- L'interprétation des mesures n'est pas toujours facile, surtout pour identifier la nature des défauts.

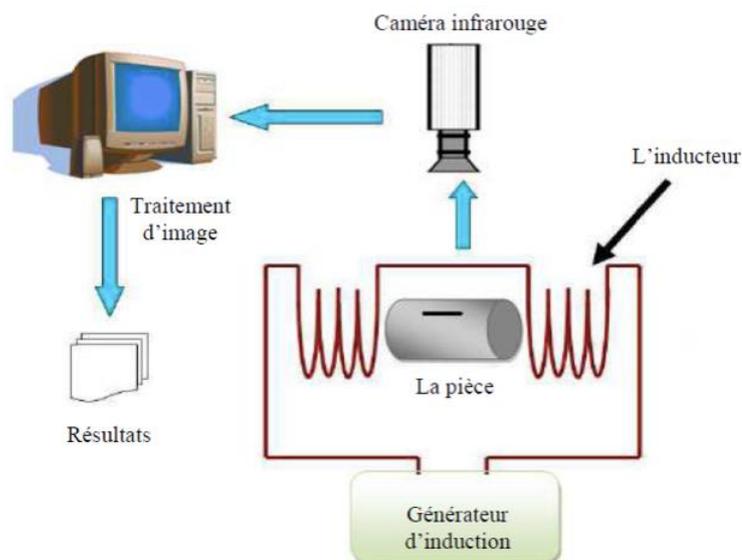


Figure I.8. Inspection par thermo-inductive

3.9 Courants de Foucault :

Les courants de Foucault se sont des courants induits développés en circuit fermé à l'intérieur d'un objet conducteur placé dans un champ magnétique variable dans le temps. L'examen par les courants de Foucault est basé sur le fait que si une bobine est alimentée par un courant variable et apportée à proximité d'une cible conductrice, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifie ainsi l'impédance de cette bobine. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle ; en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et

Chapitre 1 : Généralités Sur Le CND

géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation [3, 5, 8, 9, 10, 12]. La figure I.9 représente le procédé de l'inspection par courants de Foucault.

- **Avantages**

- Simple, peu coûteux et rapide;
- Grande sensibilité de détection des défauts (dimensionnelles, structurales...);
- Evaluer le dimensionnement et la profondeur d'un défaut ;
- Pas des conditions de sécurité ni pour l'opérateur ni pour l'environnement ;
- Inspection sans contact ;
- Efficacité de la technique malgré la complexité des phénomènes électromagnétiques mis en œuvre ;
- Automatisation possible pour des pièces de géométrie constante (tubes, barres, rubans et câbles).

- **Inconvénients**

- La profondeur d'inspection dépend de la fréquence d'excitation ;
- La détection du défaut se fait d'une manière locale ;
- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs ;
- La position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts ;
- La compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection ;

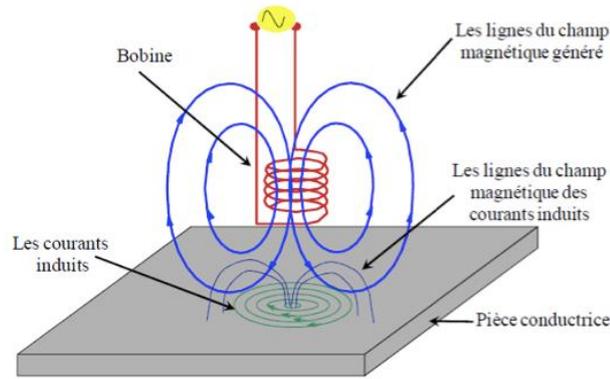


Figure I.9. Inspection par Courants de Foucault

4 L'impédance normalisée :

Un capteur inductif est caractérisé par deux grandeurs :

- La composante résistive de l'impédance 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.
- La composante réactive qui représente le phénomène inductif. Elle est liée à la topologie des lignes de champ magnétique global.

Pour ne conserver dans l'expression de l'impédance que les variations inductives, on introduit traditionnellement la notion d'impédance normalisée [26]. Cette impédance Z_n se déduit de

Z par :

$$\begin{cases} Z_n = R_n + jX_n \\ Z_n = \frac{Z - R_0}{X_0} \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\begin{cases} R_n = \frac{R - R_0}{X_0} \\ Z_n = \frac{X}{X_0} \end{cases} \quad (1.3)$$

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

Et $Z = R + jX$ est l'impédance du capteur en charge (impédance avec cible).

En procédant à cette normalisation, la mesure devient indépendante des caractéristiques propres de la bobine. Mais, elle est fonction des paramètres de la cible à savoir sa géométrie, sa conductivité électrique, sa perméabilité magnétique et la distance capteur/cible (lit-off).

L'étude des variations de Z_n s'effectue dans le plan d'impédance normalisé en traçant X_n en fonction de R_n . La variation de l'un de ces paramètres (lit-off, σ , μ)

engendrera le déplacement du point représentative sur le diagramme d'impédance normalisé.

Il est à noter que, la présence d'une anomalie (défaut) dans la cible induit une modification de l'un ou de plusieurs des trois paramètres physiques et géométriques [26].

5 L'effet de peau :

Ce phénomène existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant quand on s'enfonce dans un conducteur [25].

Le module de la densité de courant, dans une pièce d'épaisseur infinie excitée par une nappe de courants extérieure et parallèle à son plan, est représenté dans la figure I.10 et est exprimé par la relation suivante :

$$J_z = J_s e^{(-z\sqrt{\pi f \sigma \mu})} = J_s e^{(-\frac{z}{\delta})} \quad (I.1)$$

avec

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \text{ l'épaisseur de peau [m],}$$

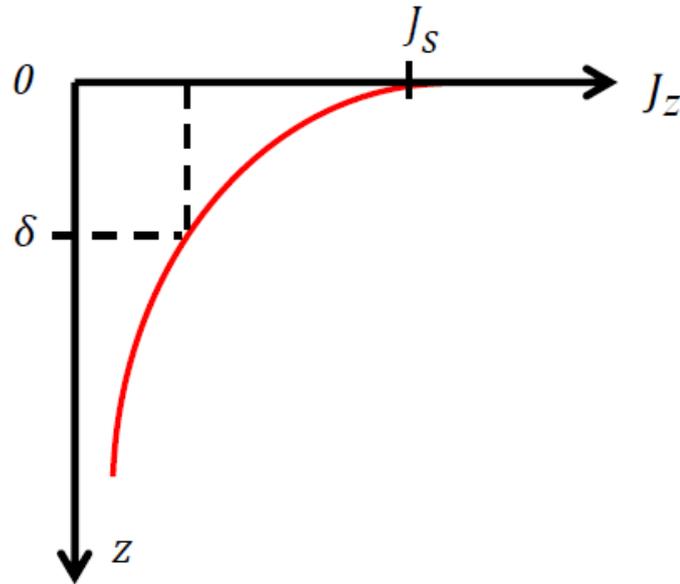
f la fréquence du courant [Hz],

μ la perméabilité [H/m],

σ la conductivité électrique [S/m],

z la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce [m],

J_s le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z=0$) [A/m²].



6 Cycle d'hystérésis :

6.1 Définition

Le cycle d'hystérésis est la courbe de réponse des matériaux magnétiques, à travers laquelle, ils gardent la mémoire de tous leurs états d'aimantation antérieurs par l'intermédiaire des domaines élémentaires. C'est J.A.Ewing qui a montré ce comportement spécifique dans le cas du Fer, et qu'il l'a appelé hystérésis qui signifie retard de l'effet sur la cause (ici, l'aimantation sur le champ appliqué). Le cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique dépend de la mobilité des parois de Bloch, elle-même est fonction des énergies magnétiques et du champ appliqué. Donc il peut être considéré comme une caractéristique du matériau et dans tous les cas un modèle mathématique bien détaillé et nécessaire. L'hystérésis c'est le retard à la désaimantation et le dédoublement de la caractéristique $B(H)$ du matériau magnétique. Donc le cycle d'hystérésis est le tracé de l'induction en fonction du champ H extérieur appliqué [27].

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0 (1 + \chi)H = \mu H \quad (1.6)$$

La courbe de la première aimantation et le cycle d'hystérésis (figure I.11) sont deux propriétés importantes des substances ferromagnétiques. En effet, la plupart des applications technologiques sont basées sur l'existence de ce cycle.

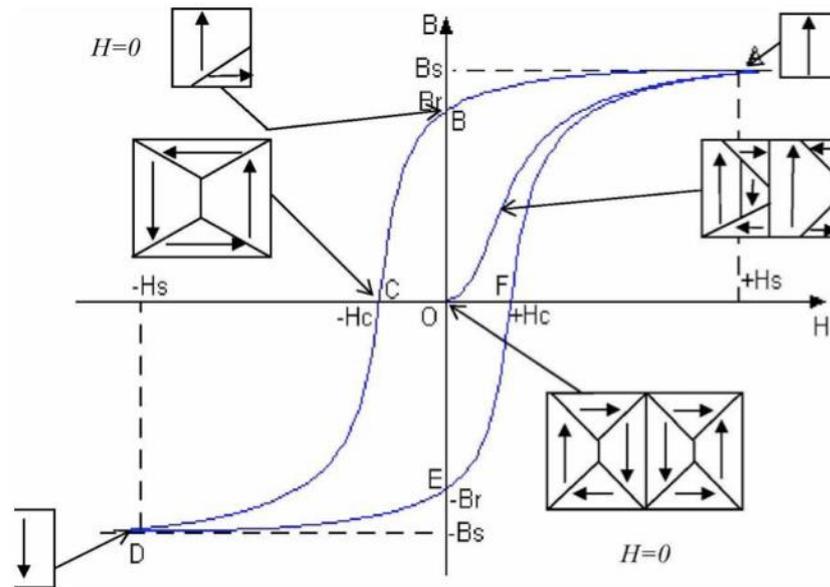


Figure I.11. Courbe de 1^{ère} aimantation (OA) d'un matériau ferromagnétique [27]

6.2 Courbe de première aimantation :

Lorsqu'on applique un champ magnétique extérieur à ce matériau, les domaines magnétiques dont l'orientation est voisine de celle de H croissent aux dépens de ceux dont l'orientation est opposée à celle de H. Les parois de Bloch se déplacent donc dans le matériau. A la limite, lorsque le champ magnétique extérieur atteint une valeur critique H_s , le monocristal n'est plus constitué que d'un seul domaine ferromagnétique dont l'orientation est la même que celle de H; L'induction atteint alors une valeur maximale, B_s , appelée induction à saturation. Ce phénomène est représenté par la courbe OA de la (figure I.11), courbe appelée courbe de première aimantation ou courbe de magnétisation,.

6.3 Cycle d'hystérésis :

Lorsque l'intensité du champ H diminue pour atteindre une valeur nulle, les domaines magnétiques ont tendance à réapparaître (courbe AB, figure I.11) toutefois, puisque le déplacement des parois de Bloch n'est pas instantané à cause de l'anisotropie magnétique; une induction non nulle B_r se manifeste dans le matériau (point B, figure I.11). Cette valeur B_r est appelée induction rémanente. Il faut en fait appliquer un champ magnétique de sens opposé à celui du champ de la première aimantation pour que l'induction soit nulle (courbe BC, figure I.11). La

Chapitre 1 : Généralités Sur Le CND

valeur H_c du champ qui engendre cette induction nulle correspond au champ coercitif (point C, figure I.11). Lorsque l'intensité du champ H croit, l'induction atteint de nouveau la valeur maximale B_s (courbe CD, figure I.11). Enfin, lorsqu'on change le sens du champ et qu'on fait varier son intensité ; on obtient la courbe DEFA (figure I.11). La courbe d'aimantation ainsi obtenue est une boucle d'hystérésis ou cycle d'hystérésis (ABCDEFA) dont les paramètres caractéristiques sont les grandeurs B_s , B_r et H_c .

La forme de ce cycle dépend de la nature du matériau, des processus d'aimantation et d'induction et de la géométrie de l'échantillon. Enfin, ce cycle se déforme en fonction des conditions de flux et de fréquence (figure I.12). L'hystérésis observée en régime quasi-statique (i.e. fréquence très faible tendant vers 0) est appelée hystérésis statique; elle dépend de la géométrie (en particulier de la pente caractéristique de la courbe an hystérétique), mais surtout de la qualité et de l'histoire du matériau. Les déformations caractéristiques des cycles, observées en régime dynamique, sont regroupées dans un terme générique l'hystérésis dynamique. Cette dernière est essentiellement due aux processus d'aimantation et de diffusion et dépend donc fortement de la géométrie et des variations de champ. La première hystérésis est à rapprocher des pertes dites quasi-statiques, quant à l'hystérésis dynamique, elle donné lieu aux autres pertes induites dynamiquement.

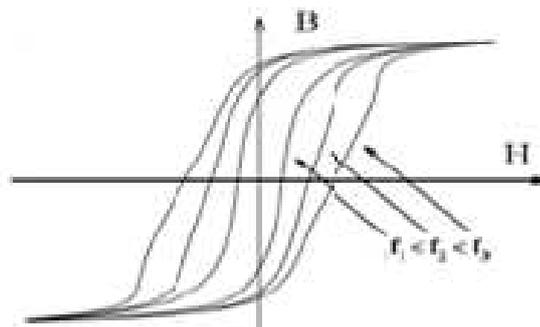


Figure I.12. Gonflement du cycle d'hystérésis

L'aire du cycle d'hystérésis représente l'énergie dépensée, par unité de volume du matériau, pour réorienter les moments magnétiques des domaines et déplacer les

parois de Bloch, au cours d'un cycle complet de variation de champ magnétique extérieur. Cette énergie se dissipe sous forme de chaleur.

6.4 Types du cycle d'hystérésis :

Les principaux types du cycle d'hystérésis sont cycle majeur et cycle mineur.

6.4.1 Cycle majeur :

Ce cycle est obtenu en faisant varier le champ magnétique d'une valeur suffisamment élevée pour que le matériau soit saturé jusqu'à la saturation opposée du matériau. Tout point (H, M) à l'intérieur du cycle majeur est un état possible du matériau. Le comportement d'un matériau dépend ainsi non seulement de la valeur courante de H mais aussi de l'histoire du matériau.

6.4.2 Cycle mineur :

Un cycle d'hystérésis mineur est un cycle d'hystérésis avec un champ appliqué maximal qui est inférieur au champ de saturation. Un cycle d'hystérésis mineur avec un seul saut d'aimantation est dû soit au changement d'une configuration des parois à une autre configuration, soit au déplacement d'une paroi entre deux centres de piégeage. A l'aide de cycles mineurs, on peut étudier le retournement d'une petite partie de la particule sans faire intervenir la complexité de la particule entière.

7 Différent types de capteurs pour le contrôle par CF :

7.1 Classification fonctionnelle :

- Capteurs à double fonction

Les courants de Foucault sont créés par un bobinage alimenté sous tension variable. Pour des raisons pratiques de réalisation, les bobinages sont de formes circulaires. La bobine d'excitation sert aussi d'élément de mesure d'où le nom capteur ou sonde pour cette bobine.

On distingue :

- Capteur absolu

Ce mode utilise une seule bobine (capteur) pour la fonction émettrice et réceptrice et permet de visualiser l'impédance du système (capteur/pièce), soit dans le plan des phases ou en représentation temporelle. L'impédance mesurée est celle du capteur plus l'impédance de la pièce à contrôler ramenée au capteur par analogie avec les transformateurs. Le dispositif est assimilé à un transformateur électrique tel que le primaire est le capteur et le secondaire est la pièce [6].

- Capteur différentiel

Ce mode utilise deux capteurs absolus écartés, montés en tête-bêche, parcourus par le même courant mais de signe opposé, la réponse est sensible juste aux variations de l'impédance au niveau de la pièce à contrôler, car l'impédance des deux capteurs est la même. Donc l'impédance mesurée par un capteur différentiel est nulle dans le cas des pièces saines.

- Capteurs à fonctions séparées:

La bobine d'excitation et l'élément de mesure sont dissociés. Ce type est constitué de deux bobines, une pour créer le flux, l'autre pour recueillir les variations des couplages liées aux modifications dues aux matériaux. Ce montage est très utilisé pour le contrôle à basses fréquences ($f < 1000\text{Hz}$).

7.2 Classification suivant le montage par rapport à la pièce contrôlée :

Du point de vue fonctionnel, le classement des capteurs est basé sur la géométrie du capteur et le type de produit à contrôler, on peut citer :

- Les bobines encerclantes

Ce sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent la pièce à examiner et sont destinés au contrôle des produits longs (tubes, barres, ..), les plus répandus dans le domaine industriel [7].

- Les bobines internes

Destinées à inspecter des objets creux par l'intérieur.

- Les bobines simples :

Chapitre 1 : Généralités Sur Le CND

Elles servent à créer un champ magnétique alternatif, à détecter simultanément les défauts par la mesure de leur impédance.

- Les bobines plates :

Pour le contrôle de surfaces planes ou dont la courbure est faible devant le rayon de la bobine.

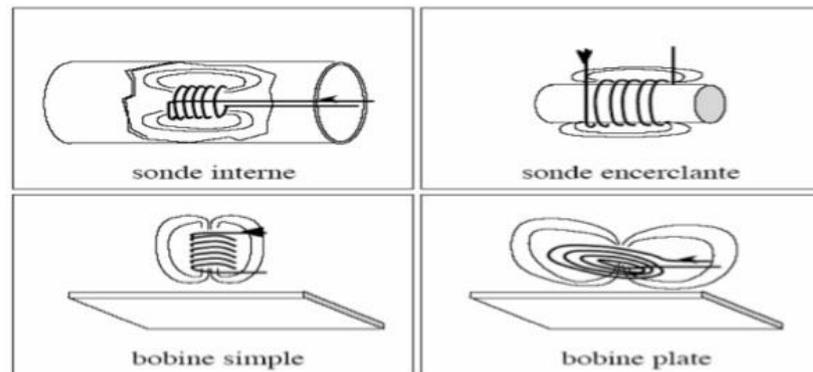


Figure I.13. Classification des sondes

8 Conclusions :

Dans ce chapitre nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif (CND), son champ d'application, les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un éventuel défaut et les bases physiques qui gouvernent les procédés de contrôle. Nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, le contrôle par laser, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie, le procédé thermo-inductive et enfin la technique des courants de Foucault. Pour chaque technique d'inspection nous avons cité les avantages et les inconvénients. C'est l'examen par les courants de Foucault qui constitue le sujet de ce travail. Le choix d'un tel contrôle est justifié par sa simplicité, réalisation pratique non coûteuse.

Chapitre 2

Chapitre II : Procédé de soudage FSW

1 Introduction :

La difficulté de réaliser des soudures à haute résistance, résistantes à la fatigue et à la rupture dans des alliages d'aluminium aérospatial, tels que les séries 2XXX et 7XXX hautement alliées, a longtemps empêché l'utilisation étendue du soudage pour joindre des structures aérospatiales. Ces alliages d'aluminium sont généralement classés comme non soudables en raison de la mauvaise microstructure de solidification et de la porosité dans la zone de fusion. Par ailleurs, la perte de propriétés mécaniques par rapport au matériau de base est très importante. Ces facteurs rendent peu attrayant l'assemblage de ces alliages par des procédés de soudage classiques. Certains alliages d'aluminium peuvent être soudés par résistance, mais la préparation de surface est coûteuse, l'oxyde de surface étant un problème majeur.

Le soudage par friction malaxage (FSW) a été inventé en 1991 par le Welding Institute (TWI) du Royaume-Uni en tant que technique d'assemblage à l'état solide et a été initialement appliqué aux alliages d'aluminium. Le concept de base de FSW est remarquablement simple. Un outil rotatif non consommable avec une broche et un épaulement spécialement conçus est inséré dans les bords de butée des feuilles ou des plaques à assembler et à traverser le long de la ligne de joint (figure II.1). L'outil a deux fonctions principales : (a) chauffage de la pièce et (b) déplacement de la matière pour produire le joint. Le chauffage est réalisé par friction entre l'outil et la pièce et déformation plastique de la pièce. Le chauffage localisé ramollit le matériau autour de la broche et la combinaison de la rotation et de la translation de l'outil entraîne le mouvement du matériau de l'avant de la broche vers l'arrière de la broche. Ce procédé permet de produire un joint à l'état solide. En raison de diverses caractéristiques géométriques de l'outil, le mouvement du matériau autour de la broche peut être assez complexe. Pendant le procédé FSW, le matériau subit une déformation plastique intense à température élevée, ce qui entraîne la génération de grains recristallisés fins et

Chapitre 2 : Procédé De Soudage FSW

équiaxiés. La microstructure fine des soudures par friction-malaxage produit de bonnes propriétés mécaniques.

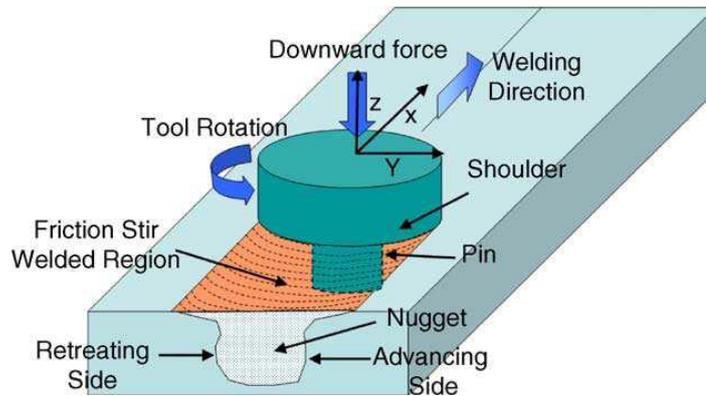


Figure II.1. Schéma du soudage par friction-malaxage [15].

FSW est considéré comme le développement le plus important dans l'assemblage de métaux en une décennie et est une technologie « verte » en raison de son efficacité énergétique, de son respect de l'environnement et de sa polyvalence. Par rapport aux méthodes de soudage classiques, FSW consomme beaucoup moins d'énergie. Aucun gaz ou flux de couverture n'est utilisé, ce qui rend le procédé écologique. L'assemblage n'implique aucune utilisation de métal d'apport et par conséquent tout alliage d'aluminium peut être assemblé sans souci de compatibilité de composition, ce qui est un problème dans le soudage par fusion. Lorsque cela est souhaitable, des alliages d'aluminium et des composites différents peuvent être assemblés avec la même facilité. Contrairement au soudage par friction traditionnel, qui est habituellement effectué sur de petites pièces axisymétriques qui peuvent être tournées et poussées les unes contre les autres pour former un joint, le soudage par friction malaxage peut être appliqué à divers types de joints tels que les joints bout à bout, les joints à recouvrement, les joints bout à bout en T et les joints d'angle.

Récemment, Mishra et al ont mis au point le traitement par agitation par friction (FSP) en tant qu'outil générique pour la modification microstructurale basé sur les principes de base du FSW. Dans ce cas, un outil rotatif est inséré dans une pièce monolithique pour une modification microstructurale localisée en vue d'une amélioration de propriété spécifique. Par exemple, la superplasticité à haute

Chapitre 2 : Procédé De Soudage FSW

vitesse de déformation a été obtenue dans un alliage commercial de 7075Al par FSP. En outre, la technique FSP a été utilisée pour produire un composite de surface sur un substrat d'aluminium, l'homogénéisation d'alliage d'aluminium de métallurgie des poudres, la modification microstructurale de composites de matrice métallique et l'amélioration des propriétés dans des alliages d'aluminium coulés.

Le FSW/FSP apparaît comme une technique de jonction/traitement à l'état solide très efficace. Dans un laps de temps relativement court après l'invention, un certain nombre d'applications réussies de FSW ont été démontrées. [15]

2 Principaux avantages du soudage par friction malaxage :

Avantages métallurgiques	Avantages environnementaux	Avantages énergétiques
Procédé en phase solide	Aucun gaz de protection requis	Utilisation de matériaux à améliorer (par exemple, l'assemblage de différentes épaisseurs) permet de réduire le poids
Faible distorsion de la pièce	Aucun nettoyage de surface requis	Seulement 2,5 % de l'énergie nécessaire pour une soudure laser
Bonne stabilité dimensionnelle et répétabilité	Éliminer les déchets de broyage	Diminution de la consommation de carburant dans les applications légères pour avions, automobiles et navires
Aucune perte d'éléments d'alliage	Éliminer les solvants nécessaires au dégraissage	
Excellentes propriétés métallurgiques dans la zone articulaire	Économie de matières consommables, comme les tapis, le fil ou tout autre gaz	
Microstructure fine		
Absence de fissuration		
Remplacer plusieurs pièces jointes par des attaches		

3 Historique du procédé FSW :

Le procédé FSW a été inventé, développé et breveté en 1991 par W. Thomas au Royaume-Uni. Cette nouvelle technologie de soudage est en pleine phase

Chapitre 2 : Procédé De Soudage FSW

développement, bien qu'elle soit déjà utilisée industriellement dans certaines industries manufacturières, notamment dans les secteurs de l'aviation, de la construction navale et ferroviaire. Il s'agit d'un procédé innovant qui permet d'assembler des alliages d'aluminium à haute résistance (série 2xxx et 7xxx) et d'autres matériaux considérés comme difficiles à souder par les techniques de soudage traditionnelles. Dans l'industrie aéronautique, il commence à remplacer le procédé de rivetage traditionnel utilisé dans les composants structuraux.

Plus récemment, ce procédé a même été appliqué au plomb, au cuivre, au magnésium et à l'acier doux.

En Algérie, le procédé n'est pas encore exploité, d'où l'idée de concevoir et de produire des outils de soudage FSW. En 2007, un outil conçu et réalisé a été breveté à l'Institut National de la Propriété Industrielle d'Algérie (INAPI) [16].

4 Domaine d'application du procédé :

Les divers domaines d'utilisation sont :

- Industrie aéronautique et spatiale : soudage des différents types de tôles (figure II.2).
- Construction navale : coques de bateaux.
- Transport ferroviaire.
- Industrie automobile: raboutage de tout type de tôles.

L'utilisation de cette technique dans ces différents domaines industriels a permis d'alléger les structures de manière significative et donc de réduire les coûts de fabrication (on peut citer comme exemple la construction d'un avion de moyenne envergure avec une réduction de plus de 50% des rivets utilisés par le biais de ce procédé). [16]

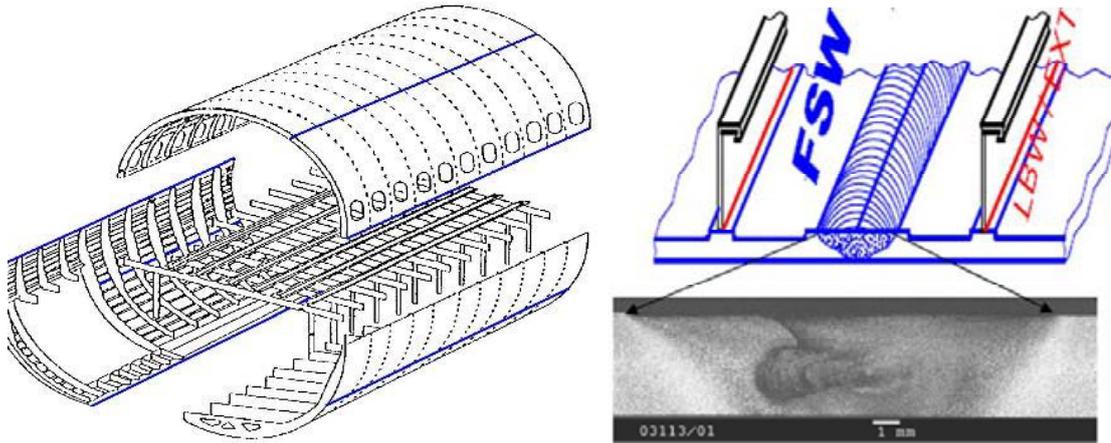


Figure II.2. Soudure FSW longitudinale d'un fuselage d'avion [17]

5 Les différentes phases de soudage FSW :

La figure II.3. Présente de façon schématique les quatre phases opératoires du procédé de soudage par FSW [18]. L'opération de soudage peut-être décomposée en 4 phases successives :

1. phase de pénétration,
2. Phase de préchauffage,
3. Une phase de réalisation du cordon de soudure
4. Une phase de retrait de l'outil.

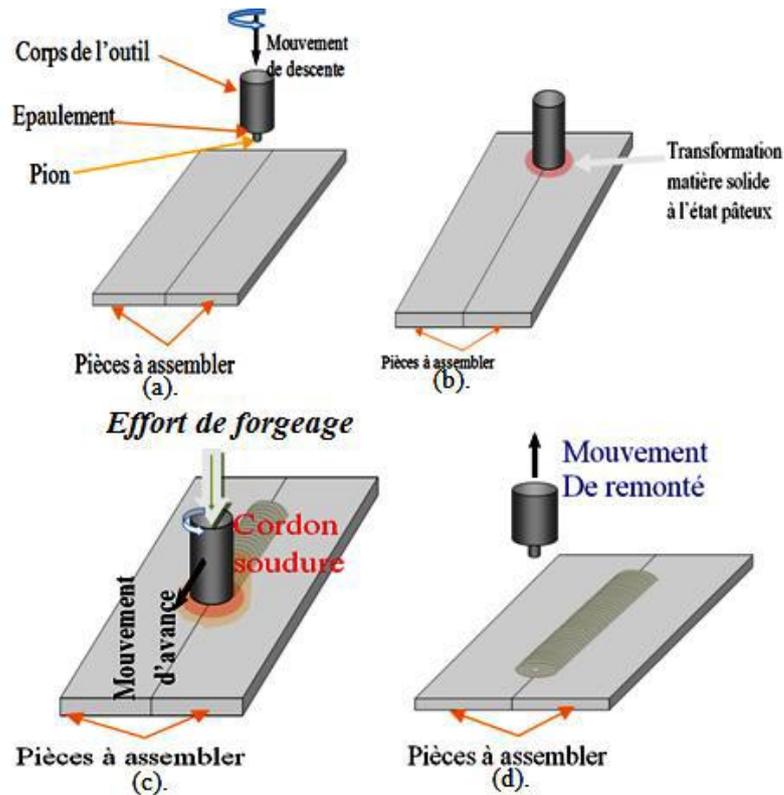


Figure II. 3. Chronologie d'une opération de soudage FSW : (a) phase de plongée, (b) Phase de préchauffage, (c) phase de soudage et (d) phase de retrait

6 Phase de pénétration de l'outil

Dans cette étape illustrée par la figure II.3. a. on réalise la pénétration du pion sous l'effet d'un effort vertical, il pénètre progressivement à l'intérieur du joint, grâce à la vitesse de rotation jusqu'à ce que l'épaulement soit au contact avec des plaques à souder.

7 Phase de préchauffage

Durant cette phase, l'outil toujours en rotation, reste sur place afin de préchauffer la matière à l'aide de l'épaulement jusqu'à la transformation de matière solide à l'état pâteux (figure II.3.b). Cette phase est dite « la phase de pré-soudage ». La figure II.4-a-, montre un exemple de soudage FSW en acier inoxydable, réalisée par Hitachi du Japon. On fait remarquer que la chaleur fait monter l'échantillon au rouge pendant le soudage, les deux phases de soudage d'un joint recouvrement d'après.

8 Phase de soudage

Dans cette étape la figure II.3.c, l'outil est animé d'un mouvement longitudinal dans la direction du joint représentant l'interface des deux plaques à souder, avec une vitesse V_f , appelée vitesse d'avance. La matière malaxée est déformée plastiquement et constitue le cordon de soudure. Le cordon obtenu n'est pas symétrique. En effet, le mouvement combiné de rotation et d'avance donne naissance à deux zones :

La zone où la vitesse d'avance de l'outil a le même sens que la vitesse de rotation est appelée la zone d'attaque (**advancing zone**), dans le cas contraire, on l'appelle zone retraitée (**retreating zone**). La figure II.4-b- illustre les deux côtes lors du soudage FSW.

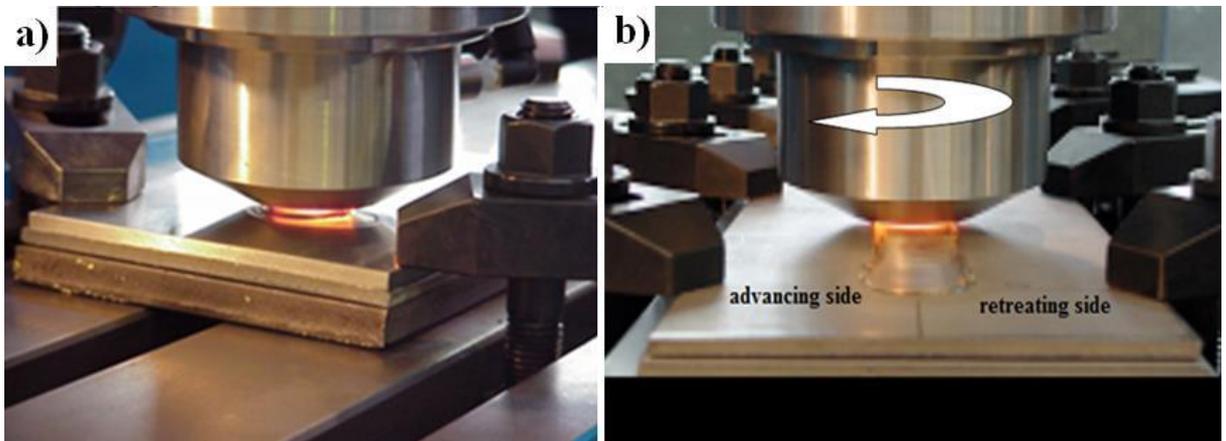


Figure II. 4. a) phase de chauffage. b) Phase de soudage d'un joint [18]

9 Phase de retrait de l'outil

Cette phase (illustrée sur la Figure II.3.d) consiste à un retrait de l'outil suivant un mouvement perpendiculaire aux tôles. Selon le type de d'outil utilisé, l'empreinte du pion à l'intérieur de la matière peut être présente au niveau d'extraction du pion (figure II.5.).

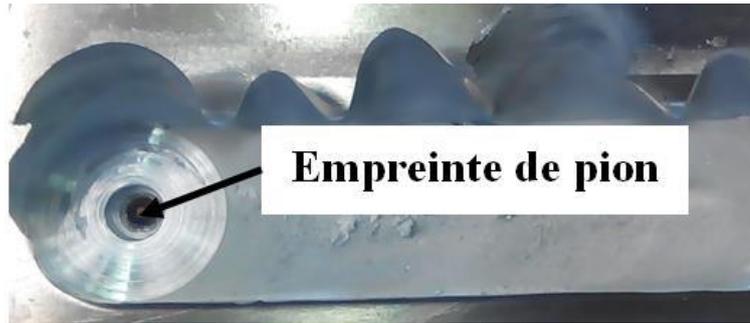


Figure II. 5. Trou à la fin de soudure [18]

10 Paramètres du soudage FSW :

Plusieurs paramètres influencent le mouvement du matériau ainsi que la microstructure et les propriétés mécaniques de la soudure. Les paramètres les plus décisifs sont la vitesse de rotation et l'avance de l'outil de soudage. Aussi l'outil lui-même, sa géométrie, sa matière et sa dureté. Il existe aussi d'autres paramètres, tels que la force exercée sur l'outil, l'angle d'inclinaison de l'outil, et même la profondeur de pénétration de l'outil dans le matériau à souder.

11 Géométrie de l'outil

L'outil assure deux fonctions principales. Tout d'abord, il produit un frottement contre la pièce provoquant ainsi une concentration de la chaleur qui va ramollir le matériau, et il permet le mouvement de la matière du côté avançant de la soudure vers le côté reculant. [15]

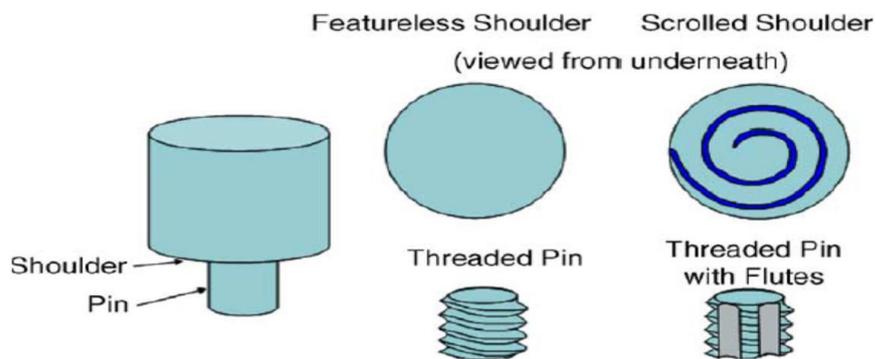


Figure II. 6. Schéma simplifié de l'outil (tige et épaulement) dans le soudage par friction-malaxage [15]

La tige (également appelée pion) plonge dans le matériau jusqu'à ce que l'épaulement touche la pièce. La longueur de la tige détermine la profondeur de

Chapitre 2 : Procédé De Soudage FSW

plongée. Le frottement de l'épaulement sur la pièce provoque le taux de chaleur le plus élevé. Le design de l'outil joue un rôle important dans l'uniformité de la microstructure et ainsi les propriétés mécaniques du joint. Les tiges filetées et les épaulements concaves sont les plus utilisés car ils permettent de mieux malaxer la matière et d'éviter le débordement et les bavures. [15]

L'angle d'inclinaison de la tige est également un paramètre important qui permet à l'épaulement de bien répartir la matière malaxée du côté avançant au côté reculant de l'outil.

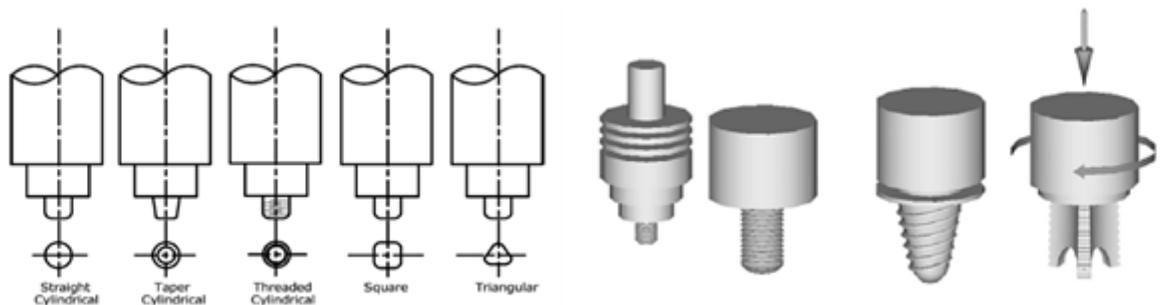


Figure II. 7. Les différentes formes de la tige [20]

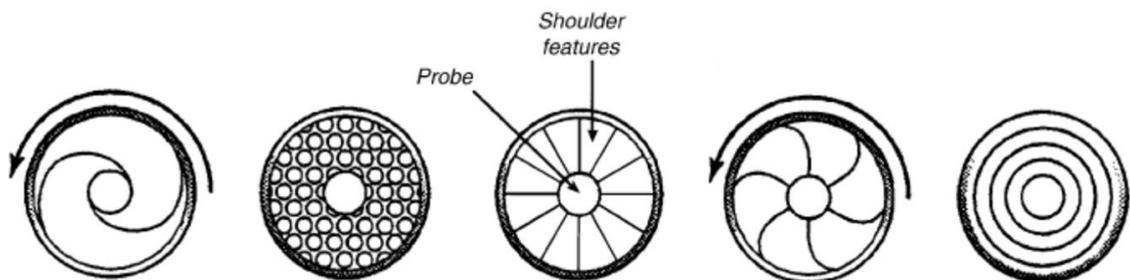


Figure II. 8. Les différentes formes d'épaulement [15]

Il existe trois technologies d'outils (voir figure II. 9) [19].

- l'outil « conventionnel » comportant un épaulement et un pion fixe
- l'outil à pion rétractable. Le retrait du pion se fait progressivement dans l'épaulement et permet d'obtenir des soudures sans trou en fin de cordon mais également de souder des pièces avec une profondeur de pénétration variable.
- l'outil avec double épaulement comportant deux épaulements et un pion. L'enclume est supprimée et la matière est pincée entre les deux

épaulements. Ce type d'outil permet de souder les pièces pour lesquelles il n'est pas possible de placer une enclume à l'envers de la soudure.

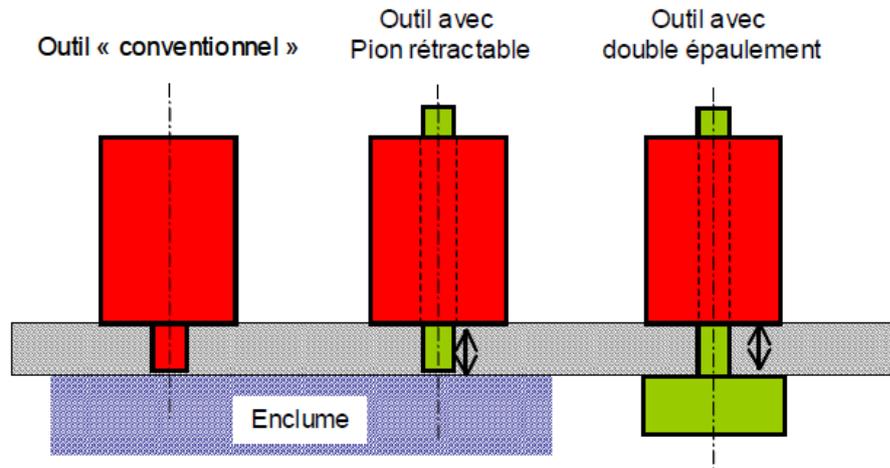


Figure II. 9: Technologies d'outils de FSW [19]

Les vitesses de rotation et d'avance

Les vitesses de rotation et d'avance sont deux paramètres très importants dans le soudage par friction-malaxage car ils déterminent la qualité de la soudure. La rotation de l'outil ω est exprimée en rotation par minute (rpm) et la vitesse d'avance de l'outil γ , en millimètre par min (mm/min).

12 Géométrie des joints réalisables par friction-malaxage

Le soudage par friction malaxage peut être appliqué à la plupart des formes structurelles géométriques et à divers types d'articulations (Figure II.10) tels que les [21]:

- ✚ Soudage bout à bout (1)
- ✚ Soudage bout à bout avec deux plaques l'une sur l'autre (2)
- ✚ Soudage par recouvrement (3)
- ✚ Soudage par recouvrement multicouches (4)
- ✚ Soudure en T (5) et (6)
- ✚ Soudure en L (7) et (8)
- ✚ Soudage à clin (9)

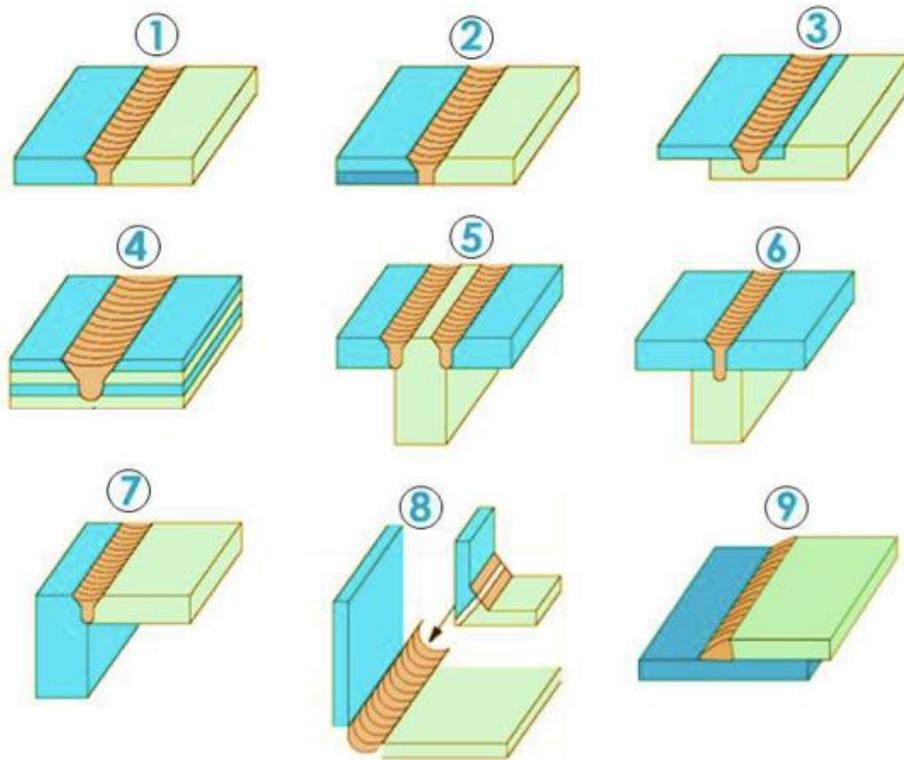


Figure II. 10. Configurations des joints pour le soudage par friction [18].

13 Caractérisation microstructurales des joints soudés (les différentes zones d'une pièce soudée par FSW) :

La soudure obtenue comporte plusieurs zones caractéristiques (voir la macrographie de la figure II. 11) qui sont [15]:

- Un noyau (appelé "Nugget" en anglais) où le matériau est malaxé. C'est le cœur de la soudure où les taux de déformation et les températures sont les plus élevés.
- Une zone affectée thermomécaniquement (TMAZ : Thermo-Mechanically Affected Zone) encadrant le noyau. La matière y subit une élévation de température combinée à une déformation plastique (d'amplitude plus faible que dans le noyau).
- une zone affectée thermiquement (HAZ : Heat Affected Zone) où la matière ne subit qu'une montée en température par conduction de la chaleur depuis les deux premières zones.
- le matériau de base (MB) dont les propriétés restent inchangées.

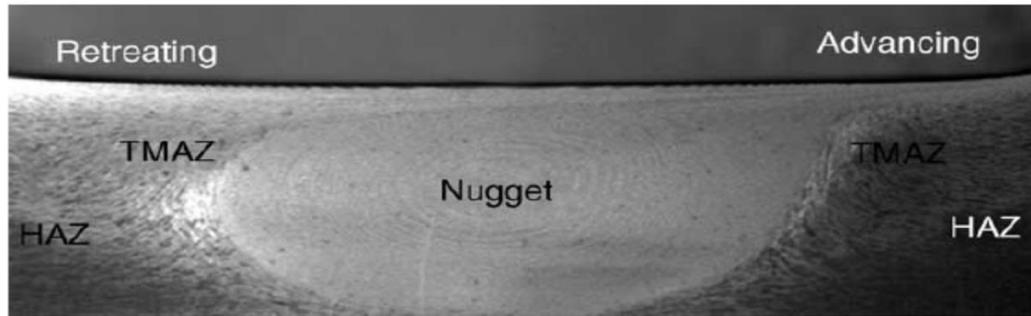


Figure II. 11. Microstructure des différentes zones dans un joint pendant le FSW
[15]

14 Caractéristiques mécaniques d'un joint soudé.

14.1 La dureté :

Le profil de la micro-dureté varie selon les paramètres de soudage. Ces derniers influent aussi sur le taux de déformation, la variation de la température et le temps d'exposition du matériau aux hautes températures. La courbe de micro-dureté des alliages d'aluminium à durcissement structural a un profil typique en W dont un exemple est illustré dans la Figure II. 12. La partie la plus dure de la soudure est le noyau car cette zone subit une déformation plastique sévère qui lui confère des grains très fins. En plus, cette zone atteint une température proche de la température de mise en forme 529°C , ce qui conduit à un vieillissement naturel qui va augmenter sa dureté. La partie la moins dure est la zone affectée thermiquement car la chaleur fait augmenter la taille des grains. Cette tendance est différente pour les alliages d'aluminium à durcissement par écrouissage. En effet, Severson et al. ont trouvé que, contrairement à l'alliage 6082, l'alliage 5083 garde un profil de dureté constant tout au long de la soudure comme le montre la Figure II. 13 [22].

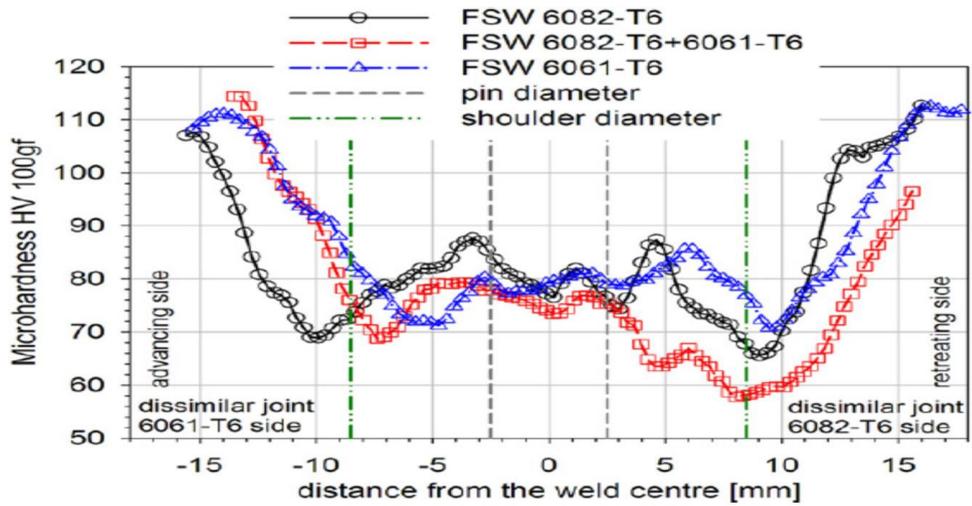


Figure II. 12. Profil de micro-dureté en "W" [23]

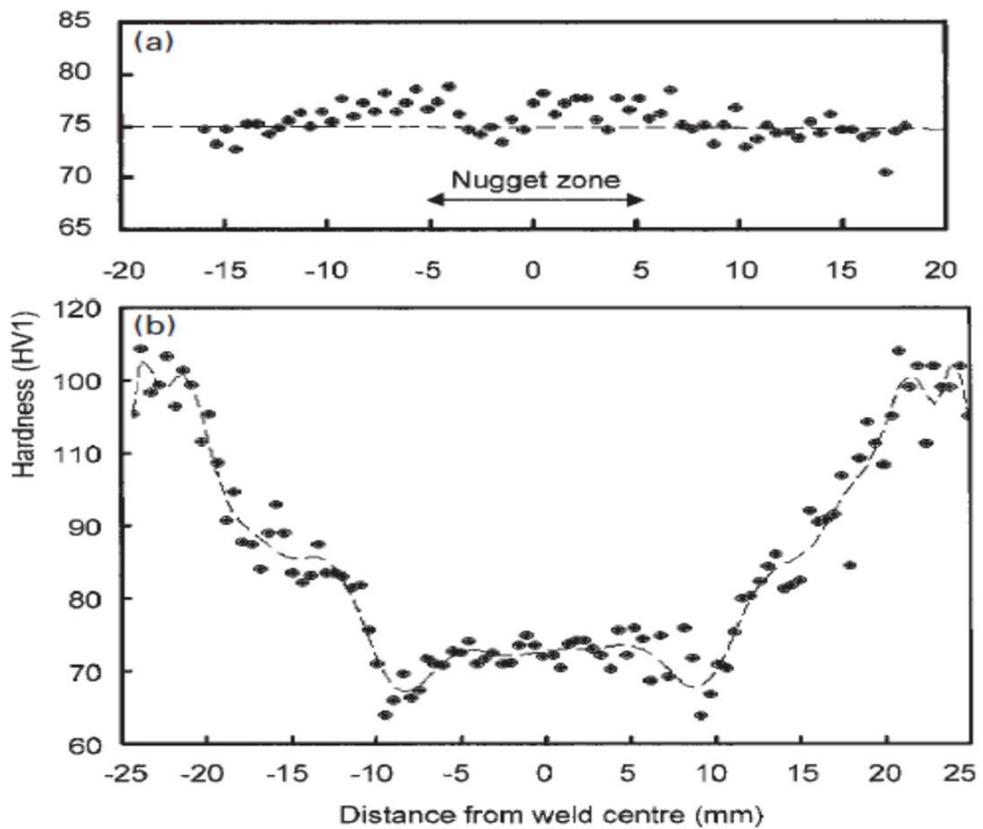


Figure II. 13 Profil de micro-dureté d'un alliage d'aluminium 5083 (en haut) et d'un alliage 6082 (en bas) [22]

L'augmentation de la vitesse de rotation ou la diminution de la vitesse d'avance augmente la température et permet un bon malaxage des matériaux. Ceci a pour effet d'augmenter les propriétés mécaniques dont la dureté et de réduire les défauts de tunnel et de vide. Le tunnel est une cavité qui persiste et se prolonge le long de la soudure. La Figure II. 14 représente un profil de dureté montrant l'augmentation de la dureté en passant d'une vitesse de rotation de 500 rpm à 2000 rpm. Cependant, quand la vitesse de rotation est trop élevée ou la vitesse d'avance est trop lente, ces conditions provoquent des fusions locales du matériau, des bavures et le grossissement des grains dans le noyau qui détériorent la qualité de la soudure (Rajakumar, Muralidharan, and Balasubramanian 2011).

Dans les soudures par friction-malaxage des alliages d'aluminium à durcissement structural, la dureté dépend faiblement de la taille des grains et est plutôt fortement liée à la distribution des précipités (Sato et al. 1999; Lee, Yeon, and Jung 2003). La dureté dans le noyau va diminuer car les précipités durcissant très fins vont se dissoudre et les précipités restants vont se regrouper grossissant ainsi leur taille et vont migrer dans les zones affectées thermo-mécaniquement TMAZ et affectées thermiquement HAZ à cause des écoulements plastiques sévères que subit la zone de recristallisation dynamique.

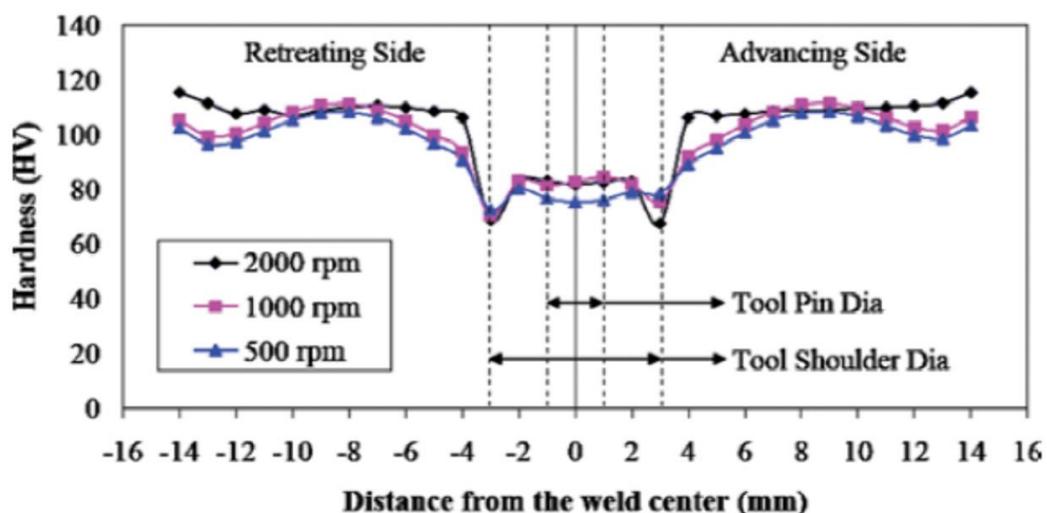


Figure II. 14 Augmentation de la dureté avec l'augmentation de la vitesse de rotation dans une soudure FSW de l'alliage 6061- T6 [24]

14.2 La résistance mécanique :

Plusieurs recherches ont été menées sur des soudures par friction-malaxage afin de déterminer les paramètres optimaux pour un matériau donné conduisant à un joint dont les propriétés mécaniques se rapprochent le plus possible au matériau de base. Dans cette optique, Rajakumar et al. se sont penchés sur l'étude d'une longue série de soudures faites en alliage d'aluminium 7075-T6 en variant les paramètres du procédé (vitesse d'avance et de rotation, force appliquée) ainsi que les paramètres de l'outil (diamètre de l'épaulement et du pion, dureté de l'outil). Ils ont constaté que tous ces paramètres influencent sur la résistance mécanique de la soudure. Ils ont conclu que, pour cet alliage, l'efficacité du joint (joint efficiency), qui est le rapport entre les propriétés mécaniques du matériau de base et celles de la soudure, est de 77% pour une vitesse de rotation de 1400 rpm, une vitesse d'avance de 60 mm/min, une force axiale de 8 KN et avec des paramètres d'outil qui sont les suivants: un diamètre d'épaulement de 15 mm, un diamètre de tige de 5 mm avec une dureté de 45 HRC. Pour les autres paramètres utilisés, les propriétés mécaniques étaient moins intéressantes en plus de la présence des défauts de cavité. La Figure II. 15 montre les résultats des tests de traction (résistance à la traction et limite d'écoulement) ainsi que l'efficacité du joint correspondante de soudures réalisées en variant, dans un premier temps, la vitesse de rotation puis la vitesse d'avance (Rajakumar, Muralidharan, and Balasubramanian 2011).

Elangovan et al. ont étudié des soudures réalisées avec un alliage d'aluminium 6061-T6. Ils ont obtenu une efficacité de joint d'environ 65% comme le montre la Figure II. 16 après avoir essayé des outils de géométries différentes et varié la vitesse de rotation tout en gardant la même vitesse d'avance de 70 mm/min. Une vitesse de 1200 rpm et un outil en de forme de carré ont donné la meilleure valeur de résistance mécanique de 17 MPa (Elangovan, Balasubramanian, and Valliappan 2008) [20].

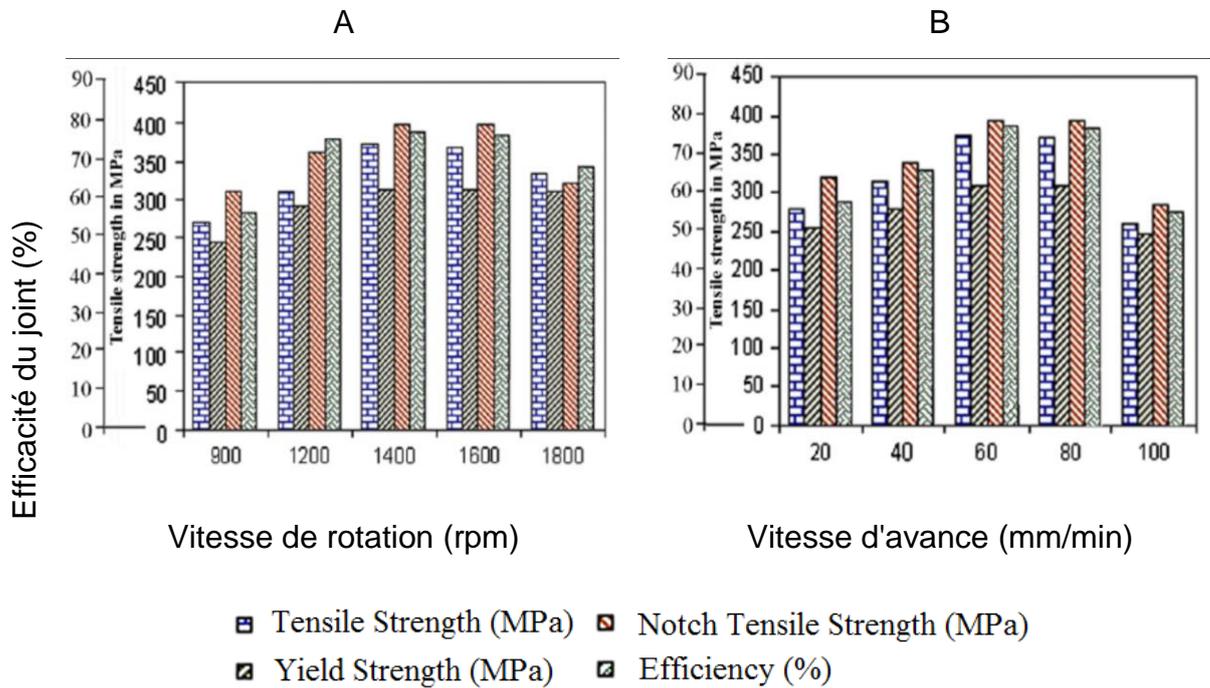


Figure II. 15 Résistance à la traction, limite d'écoulement et l'efficacité du joint correspondante pour l'alliage 7075-T6 en variant en (A) la vitesse de rotation et en (B) la vitesse d'avance [20]

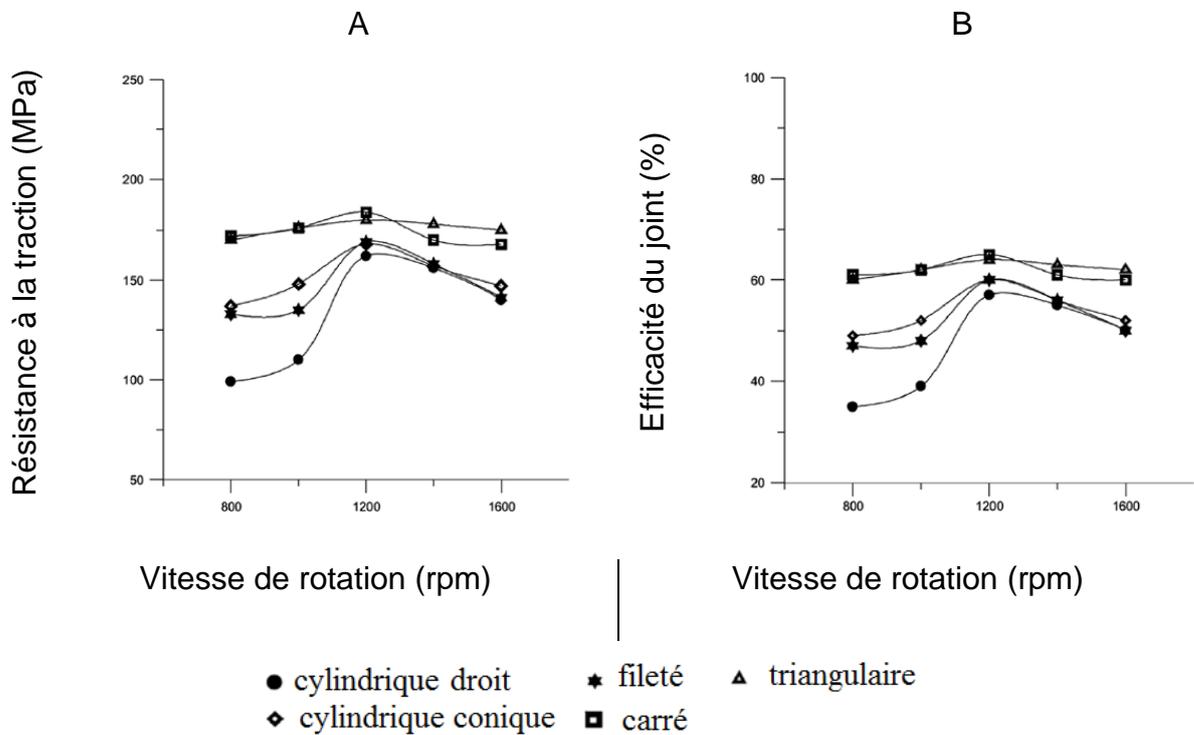


Figure II. 16 Résistance à la traction (A) et efficacité du joint (B) pour des soudures réalisées en alliage 6061-T6 avec des outils de différentes géométries en variant la vitesse de rotation [20]

15 Conclusion

Le soudage par friction-malaxage (en abrégé FSW) est un procédé de soudage à l'état solide qui consiste à assembler deux pièces dans un état pâteux à l'aide d'une broche rotative. Le soudage par friction-malaxage est principalement utilisé pour assembler des alliages d'aluminium. Le FSW peut maintenant être appliqué sur le titane, le cuivre, le nickel, les alliages de magnésium, les thermoplastiques, les MMC (composites à matrice métallique). Malgré que cette méthode de soudage ait plusieurs avantages, ça n'empêche pas d'avoir des défauts internes et surfaciques, le défi du jour c'est de réduire ces dernières.

Chapitre 3

Chapitre III : Modélisation mathématique et résolution numérique

1 Introduction :

Le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault est une méthode électromagnétique puisque son principe repose sur le phénomène de l'induction électromagnétique. La compréhension de ce phénomène est l'étape principale pour l'élaboration des modèles mathématiques destinés pour la conception des capteurs efficaces, et répondre aux problèmes rencontrés lors du contrôle des systèmes, Les équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électriques et magnétiques seront rappelées. Les conditions aux limites du domaine, les conditions de continuité ainsi que les hypothèses simplificatrices seront ensuite introduites.

2 Mise en équation (les équations de Maxwell) :

Michel Faraday (1791-1867) est le premier à décrire en 1831 le phénomène d'induction électromagnétique sur une spire conductrice placée à proximité d'une bobine parcourue par un courant variable dans le temps [3]. Léon Foucault (1819-1868) découvre ensuite les courants induits par un champ électromagnétique dans une masse métallique conductrice; ces derniers créent à leur tour un champ induit qui s'oppose au champ inducteur selon la loi de Lenz (1804-1865) énoncée en 1834, (Choua, 2010). En effectuant une synthèse des travaux réalisés dans le XIX^e siècle, James Clerk Maxwell (1831--1879) a formulé une description complète des phénomènes électromagnétiques vers 1875.

Pour les applications de CND par CF, les fréquences d'excitation utilisées pour la détection de défauts profonds, ne dépassent généralement pas le MHz. Dans ces conditions, nous pouvons négliger les courants de déplacement.

Les équations de Maxwell lient entre eux les champs électrique et magnétique. Ce sont des équations locales qui s'écrivent comme suit:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_S + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{III.1}) \quad \text{Théorème d'Ampère-Maxwell}$$

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.2}) \quad \text{Loi de Faraday}$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{III.3}) \quad \text{Théorème de Gauss}$$

$$\text{div } \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.4}) \quad \text{Loi de conservation de flux}$$

Où ∂t symbolise la dérivée partielle par rapport au temps, ρ qui représente la densité volumique de charges électriques (C/m³) et deux types de champs de vecteurs:

- Les champs d'intensité:
 - \vec{E} Champ électrique (V/m),
 - \vec{H} Champ magnétique (A/m).
- Les densités de flux:
 - \vec{D} Induction électrique (C/m²),
 - \vec{B} Induction magnétique (Wb/m² ou T),
 - \vec{J} Densité de courant de conduction (A/m²).

L'équation (III.1) est une généralisation de la loi d'Ampère, $\vec{\nabla} \times \vec{H} = J_S$. Elle constitue avec (III.2) les équations dites de couplage électromagnétique, alors que les équations (III.3) et (III.4) constituent les équations dites de conservation. L'utilisation directe des équations de Maxwell pour la résolution des problèmes en électromagnétisme est parfois déconseillée, puisque nous devrions prendre en compte ces quatre équations différentielles simultanément. Les deux types de champs de vecteurs sont liés par les relations constitutives, dites lois de comportement, décrivant les caractéristiques des matériaux. Sans elles, le système (III.1 à III.4) serait indéterminé. Elles sont données généralement sous les formes suivantes:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.5})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{III.6})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{III.7})$$

Où, μ et σ peuvent être soit des scalaires, modélisant le comportement de matériaux isotrope, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie, (Thomas, 2010). La relation entre l'induction magnétique \vec{B} et le champ magnétique \vec{H} peut être non linéaire. Pour assurer l'unicité de la solution du système d'équations (III.1) à (III.7), il est nécessaire d'ajouter trois types de conditions: les conditions aux limites, les conditions de continuité ainsi que les jauges, (Zaoui, 2008).

3 Conditions aux limites :

Pour un domaine Ω de frontière Γ , avec \vec{n} un vecteur unitaire normal pour une variable u , il existe deux conditions:

- Condition de Dirichlet homogène $u \cdot \vec{n} = 0$
- Condition de Neumann homogène $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$

4 Conditions de continuité :

Lors du passage d'un milieu à un autre, les champs électromagnétiques subissent des discontinuités. Cependant, il est possible de définir des conditions de passage des champs entre deux milieux. Considérons deux milieux Ω_1 et Ω_2 ayant des propriétés physiques différentes et séparés par une interface Σ comme le montre la Figure (III. 3). Les conditions traduisant la continuité des champs à l'interface Σ sont alors définies par les relations suivantes: (Benhadda, 2015) [3].

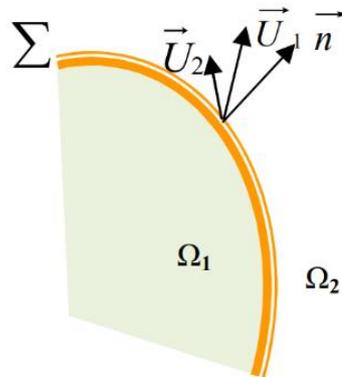


Figure II. 3. Interface entre deux milieux différents [3]

Continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique. \vec{E}

$$\vec{E}_1 \wedge \vec{n} = \vec{E}_2 \wedge \vec{n} \quad (\text{III.8})$$

Continuité de la composante normale du vecteur d'induction magnétique. \vec{B}

$$\vec{B}_1 \wedge \vec{n} = \vec{B}_2 \wedge \vec{n} \quad (\text{III.9})$$

Discontinuité de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique \vec{H}

$$\vec{H}_1 \wedge \vec{n} - \vec{H}_2 \wedge \vec{n} = \vec{J}_S \quad (\text{III.10})$$

Discontinuité de la composante normale du vecteur induction électrique \vec{D} en présence de charges superficielles $\vec{\rho}_s$:

$$\vec{n}(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \vec{\rho}_s \quad (\text{III.11})$$

Où:

\vec{n} : Vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux Ω_1 et Ω_2 ,

\vec{J}_s : Densité surfacique d'une nappe de courant entre les deux milieux.

L'ensemble des équations, précédemment présentées, décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais dans la plupart des cas, nous ne pouvons pas les résoudre directement.

Suivant la forme des dispositifs, certains phénomènes deviennent négligeables. Par conséquent, les équations se simplifient pour donner lieu à des modèles plus simples. [3]

5 Hypothèses de simplification :

La plupart des travaux accomplis jusqu'à présent dans le domaine de calcul des champs et des courants de Foucault pour les systèmes électromagnétiques, sont fondés sur les hypothèses suivantes:

- Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$
- Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité $\sigma \vec{E}$ peut-être décomposée en une partie imposée (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit, pour laquelle on gardera la notion de $\sigma \vec{E}$ qui exprime uniquement la densité des courants de Foucault, [25]
- La densité surfacique de courant entre les deux milieux est nulle $\vec{J}_s = \vec{0}$
- La densité volumique de charge est considérée nulle ($\rho_s = 0$).

Avec les hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell à résoudre deviennent:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_S \quad (\text{III.12})$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.13})$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \vec{0} \quad (\text{III.14})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.15})$$

Avec les relations constitutives suivantes:

$$\vec{J} = \vec{J}_S + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.16})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.17})$$

L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ($\vec{B}_r = 0$) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanent ou de matériau ferromagnétique.

6 Formulation électromagnétique :

Une association des relations constitutives, les relations de passage, les conditions aux limites et les conditions de jauge sont à la base de formulation qui permet la mise en œuvre d'une solution outil éléments finis 3D. Il faut donc, avoir une formulation aux dérivées partielles qui régit notre système. En générale, il est plus fréquent, dans les travaux CND-CF, d'avoir recours à l'utilisation des champs électrique et magnétique en fonction de potentiels car la solution converge mieux que si les inconnues étaient les champs (E, H), (Helifa, 2012).

Deux familles de formulations peuvent être mises en évidence.

- Formulations basées sur le champ électrique ($E, A-V$), formulation en potentiel vecteur magnétique A .
- Formulation basées sur le champ magnétique ($H-\Phi, T-\Omega$), comprend des formulations en H ou la formulation en J [14].

6.1 Formulations basées sur le champ électrique E :

La formulation en champ électrique s'obtient en faisant la dérivée de l'équation Maxwell-Ampère (III.1) par rapport au temps, tout en supposant que la perméabilité est invariante par rapport au temps (cas des matériaux linéaires), la formulation s'écrit:

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu} (\text{rot} \vec{E}) \right] + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{III.18})$$

6.2 Formulation en A-V :

D'après l'équation de la conservation de flux (II.4), l'induction magnétique \vec{B} dérive d'un potentiel magnétique \vec{A} , tel que, (Bensaid, 2006):

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \quad (III.19)$$

Lorsque cette équation est remplacée dans (III.13), on obtient:

Où \vec{A} est le potentiel vecteur magnétique.

$$\overrightarrow{rot} \left[\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] = 0 \quad (III.20)$$

Un potentiel électrique v peut être déterminé à partir de l'équation (III.20), qui est donné par la relation ci-après:

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{grad}(V) \leftrightarrow \vec{E} = -\overrightarrow{grad}(V) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (III.21)$$

La combinaison des équations (III.16) et (III.20) nous permet d'écrire:

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} = \vec{J}_s - \sigma \left(\overrightarrow{grad}(V) + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (III.22)$$

Finalement la formulation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire électrique s'écrit:

$$\overrightarrow{rot} \left[\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} (\vec{A}) \right] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \overrightarrow{grad}(V) = \vec{J}_s \quad (III.23)$$

L'unicité du potentiel doit être assurée par l'utilisation d'une jauge. En A-V la jauge de Coulomb semble être la plus efficace. [28]

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (III.24)$$

6.3 Formulation en H :

La combinaison des équations (III.12)) et (III.16) conduit directement à l'équation à résoudre:

$$\overrightarrow{rot} \left[\frac{1}{\sigma} \overrightarrow{rot} (\vec{H}) \right] + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \vec{0} \quad (III.25)$$

Aucune condition de jauge n'est nécessaire pour assurer l'unicité de champ magnétique lorsque les conditions aux limites sont adéquates [29].

1.1. Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique T-Φ :

Comme la densité de courant induite est à divergence nulle ($div\vec{j} = 0$), un potentiel vecteur électrique, noté \vec{T} , peut être introduit, tel que: [30]

$$\vec{j} = rot\vec{T} \tag{III.26}$$

Comme pour la formulation A-V, l'unicité de la solution nécessite l'introduction d'une jauge (Jauge de Coulomb par exemple); ce qui donne l'expression ci-dessous:

$$rot \left[\frac{1}{\sigma} rot (\vec{H}) \right] + \mu \frac{\partial [\vec{T} - grad \Phi]}{\partial t} = 0 \tag{III.27}$$

En fonction de la dimension et de la complexité du problème à traiter, le choix d'une formulation dépend principalement des ressources informatiques, de moyens mis en œuvre et de la précision. Les formulations vérifiant au sens fort les équations de Maxwell sont les formulations duales (E, H) qui admettent une solution unique pour des conditions aux limites adéquates et ne nécessitent pas de jauge. [31]

6.4 Comparaison entre les formulations :

Le Tableau (III.1) récapitule une comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF. [28, 32]

Tableau III.1. Comparaison entre les formulations les plus utilisées dans le CND-CF

Formulation	Potentiels régions non conductrices	Potentiels régions conductrices	Avantages	Inconvénients
$\vec{AV} - \vec{A}$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, V$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, V$	Pas de problèmes régions multiples identiques	Nombres d'inconnues importants
$\vec{T} - \Phi$	Φ	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, \Phi$	Faible temps de calcul – Réduction	Problèmes de Régions multiples

7 Technique de calcul d'impédance :

Après avoir déterminé le potentiel vecteur pour chaque point du maillage on peut déterminés les autres paramètres, l'induction magnétique (B), champ magnétique (H), les courants induits et l'impédance du capteur (Z) [14]. Le contrôle par les courants de Foucault basé sur la variation d'impédance du capteur dans la présence d'un défaut, deux méthodes sont employées pour la détermination de cette dernière; soit à travers le calcul du potentiel vecteur magnétique (A), où la source est de type courant comme dans notre cas; soit à partir du calcul de la tension. Ensuite l'impédance sera calculée par la loi d'Ohm. La deuxième méthode est la plus utilisée à cause de sa fiabilité.

Au niveau du capteur nous imposerons un courant alternatif de fréquence f, qui induit des courants de Foucault dans le matériau qui seront perturbés par un défaut. Cette perturbation se traduira par:

- Une variation des pertes joules, ce qui implique donc une variation de la résistance du capteur soit :

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (3.28)$$

- Une variation de l'énergie électromagnétique stockée, ce qui implique donc une variation de la réactance apparente du capteur, et par conséquent une variation de phase, soit :

$$X = \omega \frac{W_m}{I^2} \quad (3.29)$$

Les pertes joules sont données par :

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} \int_V \frac{J^2}{\sigma} dV = \frac{1}{2} \int_V \frac{J J^*}{\sigma} dV \quad (3.30)$$

Comme $J = \sigma E \Rightarrow J = -\sigma j \omega A$ (3.31)

$$P = \frac{\omega^2}{2} \int_V \sigma \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^* dV \quad (3.32)$$

La substitution des équations (3.29) et (3.32) donne :

$$\mathbf{R} = \frac{\omega^2}{2} \int_V \frac{\sigma \cdot \mathbf{A}^* \cdot \mathbf{A}}{I^2} dV \quad (3.33)$$

La réactance peut être déterminé à partir de l'énergie électromagnétique stockée sur un volume, telle que :

$$\mathbf{X} = 2 \cdot \omega \frac{W_m}{I^2} \quad (3.34)$$

L'énergie électromagnétique stockée est donnée par l'expression :

$$\mathbf{W}_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV \quad (3.35)$$

$$\mathbf{W}_m = \frac{1}{2\mu} \int_V \mathbf{B}^* \mathbf{B}^* dV \quad (3.36)$$

$$\mathbf{W}_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} dV \quad (3.37)$$

L'équation (3.37) est obtenue par la résolution de l'équation (3.26) et l'exploitation de l'équation $\text{rot}(\mathbf{B}) = \mathbf{J}$, [29].

Par substitution des deux équations (3.34) et (3.37) en obtient :

$$\mathbf{X} = \omega \int_V \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{J}^*}{I^2} dV = \omega \cdot L \quad (3.38)$$

Où L est l'inductance de la bobine.

L'impédance du capteur est composé de deux parties, partie réel qui est la résistance et une partie imaginaire qui la réactance, l'impédance est définie par:

$$\mathbf{Z} = R + jX \quad (3.39)$$

8 Modélisation et résolution numérique :

8.1 Intérêt de la modélisation :

Une question se pose souvent pour les chercheurs, les ingénieurs et bien d'autres professionnels : quel est le résultat obtenu si telle action s'exerce sur tel composant [25]. Le moyen le plus simple serait de tenter l'expérience, c'est-à-dire d'exercer l'action souhaitée sur ce composant pour observer ou évaluer le résultat. Toutefois, dans de nombreux cas l'expérience est irréalisable, coûteuse, dangereuse... Dans ces cas, il est donc intéressant d'avoir recours à la modélisation c.à.d. rechercher un modèle qui réagit d'une manière semblable au composant que l'on étudie. Ce modèle permettra de déduire les résultats souhaités. La modélisation consiste à créer une représentation mathématique d'un problème réel moyennant

certaines hypothèses. Cette représentation permet aux utilisateurs de prévoir le comportement des systèmes étudiés.

Dans le contexte du CND par CF, les outils de modélisation permettent la conception des capteurs et la prédiction de leur comportement sans réalisation effective. Ces outils ont des conséquences sur le développement d'outils de production, en permettant de réduire le coût de la phase expérimentale. La modélisation comporte deux étapes : la première est l'étude et l'analyse du problème et la deuxième est la mise en œuvre d'une solution au problème. La première étape aboutit en CND par CF à des équations aux dérivées partielles (EDP) basées sur les lois de l'électromagnétisme. Des méthodes utilisées pour la résolution de ces dernières sont présentées dans la sous-section suivante.

8.2 Résolution des EDP :

Plusieurs techniques sont envisageables pour la résolution d'un système d'EDP. Les méthodes les plus utilisées en CND par CF sont introduites dans cette sous-section.

8.3 Résolution analytique :

Une résolution analytique repose sur le calcul direct d'une solution exacte des équations différentielles. Plusieurs configurations électromagnétiques de CND par CF ont été traitées analytiquement. Par exemple Dodd et Deeds sont arrivés à une solution analytique pour des configurations axisymétriques en utilisant des techniques d'intégration qui reposent sur le principe de séparation des variables [DD68] et [LDD70]. D'autres travaux ont été effectués dans la même direction : une bobine avec noyau magnétique [The03] et une bobine inclinée sur une pièce plane [The05]. Malgré ces travaux, le calcul d'une solution analytique pour une configuration électromagnétique donnée est souvent compliqué, voire impossible. En effet, pour chaque configuration qu'on désirera traiter (type de défaut, bord de pièce,...) il faudra repartir des équations de l'électromagnétisme et remettre en œuvre une nouvelle démarche de calcul parfois très complexe ou insolvable. Par conséquent, il y a très souvent besoin de recourir à des méthodes numériques pour arriver à une solution approchée du problème à résoudre.

Il existe plusieurs méthodes numériques [Mad98], [Mau08] et [Lim11]. Nous ne pouvons pas toutes les énumérer mais les plus utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles sont données ci-dessous.

8.3.1 Méthode par intégrales de volume :

Cette méthode est utilisée pour modéliser plusieurs configurations de CND par CF impliquant des défauts volumiques caractérisés par une variation de conductivité locale de la pièce. Elle utilise un formalisme par intégrales de volume qui s'appuie sur les dyades de Green. Elle est dite 'semi-analytique' car les équations sont résolues numériquement mais après des transformations analytiques. Elle ne nécessite généralement que la discrétisation du volume du défaut et permet donc de traiter plusieurs types de défauts. Cela constitue un avantage par rapport à la méthode de résolution analytique. Par contre, en dehors du défaut, puisque les dyades de Green ne sont connues que dans des géométries canoniques, cette méthode est limitée à des configurations simples. Elle présente, en cela, la même limitation que la résolution analytique. Enfin, des problèmes numériques surviennent lorsque l'on considère un défaut d'ouverture faible. Dans ce cas, le temps de calcul devient important. C'est pour cette raison que la méthode des équations intégrales de surface a été développée.

8.3.2 Méthode par intégrales de surface :

Avec cette méthode, le défaut est supposé de conductivité nulle avec une très petite ouverture. Il est pris en compte comme une surface empêchant le courant de passer. Cette méthode se révèle bien adaptée pour ce type de problème. Cependant, à cause de la définition des dyades de Green, elle reste limitée du point de vue des configurations traitables avec cette méthode [Mau08].

8.3.3 Méthode par intégrales de frontière :

Cette méthode consiste à exprimer les intégrales volumiques (utilisées avec la méthode intégrales de volume) en intégrales aux frontières surfaciques entre chaque sous domaines homogènes. En effet, En régime linéaire et pour une pièce isotrope homogène par morceaux, le champ électromagnétique peut être exprimé en fonction des densités de courants électrique et magnétique sur ces surfaces. Cette méthode utilise des dyades de Green qui sont indépendantes de la géométrie. Elle permet

donc de traiter des géométries compliquées par rapport à celle basée sur les intégrales de volume. Cette approche peut être intéressante pour certaines configurations mais est restreinte à l'étude de milieux simples. Par ailleurs elle entraîne la résolution d'un système linéaire plein dont l'assemblage est complexe (évaluation d'intégrales faiblement singulières).

8.3.4 Méthode des différences finies :

Cette méthode est basée sur deux notions: la discrétisation des opérateurs de dérivation ou différentiation et la convergence du schéma numérique ainsi obtenu. La discrétisation des opérateurs consiste à remplacer les dérivées partielles par des combinaisons de valeurs ponctuelles de cette inconnue en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage.

L'avantage de cette méthode est qu'elle a une grande simplicité d'écriture. Son principal inconvénient est qu'elle est limitée en 3D à des géométries très simples du fait du découpage en grille régulière du domaine d'étude.

8.3.5 Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis a été mise en œuvre initialement pour les simulations numériques des lois de conservation en mécanique des fluides (Navier Stokes...). Ultérieurement, elle a été utilisée pour résoudre les équations elliptiques et paraboliques. Elle s'appuie sur une subdivision du domaine d'étude en un nombre fini de sous-domaines élémentaires appelés volumes de contrôle. Ces volumes peuvent être construits autour des points d'un maillage initial (maillage dual) mais ce n'est pas une nécessité. Dans cette méthode, les inconnues sont les valeurs moyennes de la solution sur chaque cellule de contrôle. La méthode consiste à projeter et résoudre le problème sur chaque cellule. Elle nécessite la mise en place de termes de flux (appelé flux caractéristiques) qui ont pour but de décrire les échanges entre cellules voisines, en respectant les propriétés de conservation. La méthode des volumes finis permet de traiter des géométries complexes, ce qui constitue un avantage par rapport à la méthode des différences finies.

La méthode des volumes finis offre des meilleurs résultats de convergence à la modélisation des matériaux ayant des propriétés non linéaires. Cependant, sa

discrétisation devient délicat quand il s'agit des opérateurs d'ordre 2 contenant le gradient (ex laplacien) [NTIO9].

8.3.6 Méthode des éléments finis :

Cette méthode consiste à mailler tout le domaine d'étude par des volumes élémentaires (tétraèdres, prismes...). Ensuite, les EDP sont réécrites sous une forme variationnelle. Après discrétisation, cette dernière conduit à un système matriciel à résoudre directement ou par une méthode itérative. Contrairement à la plupart des méthodes numériques citées auparavant, la méthode des éléments finis permet de traiter des configurations de contrôle très variées, d'un point de vue géométrique (capteur et pièce inspectée) et de celui des caractéristiques physiques des matériaux. Ceci la rend très adaptée pour modéliser les capteurs souples et les pièces de formes complexes. C'est la méthode qui été retenue dans ce travail.

8.4 Principe de la méthode des éléments finis :

Pour résoudre numériquement une EDP nous utilisons dans ce mémoire la méthode des éléments finis [DT05] et [Ern05]. Les origines de cette méthode remontent aux années 50 lorsque les ingénieurs l'utilisèrent pour simuler des problèmes de mécanique. Depuis, son champ d'application s'est considérablement étendu. Aujourd'hui, il existe un nombre important de logiciels commerciaux et académiques qui utilisent la méthode des éléments finis comme outil de simulation dans un large spectre de domaines (mécanique, thermique, électromagnétisme...)

Le principe de cette méthode repose sur deux points fondamentaux. D'une part, la formulation d'un problème approché par la méthode de Galerkin ; d'autre part, la construction d'un espace d'approximation de dimensions finies. Cette démarche permet d'approcher des fonctions définies sur le domaine d'étude en maillant ce dernier puis en choisissant sur chaque maille une combinaison linéaire de fonctions d'interpolation (polynomiales par exemple). La méthode des éléments finis nécessite, avant tout, la transformation de la formulation initiale (dite formulation forte) du problème à résoudre en une autre formulation (dite formulation faible) dont l'ordre de dérivation est plus faible. Cette phase correspond à la mise sous forme variationnelle

du problème d'EDP. Dans cette dernière formulation, le problème est posé dans un espace de dimension infinie. La dernière étape de la méthode consiste à poser un problème analogue en dimension finie, à partir d'un maillage du domaine Ω où est définie l'EDP.

8.4.1 Formulation variationnelle :

On suppose que les équations à résoudre peuvent se ramener sous la forme suivante:

$$L(u) = g \text{ sur } \Omega \quad (3.40)$$

où L est un opérateur différentiel (scalaire ou vectoriel) linéaire. u est l'ensemble des inconnues du problème, g est le terme source et Ω le domaine d'étude. Cette équation est associée aux conditions aux limites sous la forme :

$$B(u) = h \text{ sur } \Gamma \quad (3.41)$$

Où B est lui aussi un opérateur différentiel qui peut être scalaire ou vectoriel. Il peut correspondre à plusieurs conditions aux limites de natures différentes appliquées sur des morceaux différents de la frontière Γ du domaine d'étude. La solution du problème initial existe dans un espace de dimension infinie. D'une façon générale, la formulation variationnelle s'obtient en faisant le produit scalaire de (1.2) par une fonction suffisamment régulière. En intégrant par parties les termes d'ordre les plus élevés et en tenant compte des conditions aux limites du problème (1.3), la solution de la forme faible est alors obtenue en résolvant le système suivant :

$$\begin{cases} \text{trouver } u \in V \text{ tel que} \\ a(u, v) = F(v) \forall v \in W \end{cases}$$

où V et W sont des espaces fonctionnels, généralement de Hilbert, a est une forme bilinéaire définie sur $V \times W$ et F une forme linéaire définie sur W . u est la solution du problème et v est appelée fonction test. On appelle V l'espace de solution et W l'espace test. L'existence et l'unicité de la solution de (1.4) sont discutées grâce au théorème de Lax-Milgram.

8.4.2 Méthode de Galerkin :

La méthode de Galerkin permet d'approcher la solution u en passant de la forme continue de la formulation variationnelle vers une approximation discrète du problème.

L'idée consiste à remplacer dans (1.4) les espaces fonctionnels V et W de dimension infinie par des espaces de dimension finie, notés V_h et W_h , ce qui conduit à :

$$\begin{cases} \text{trouver } u_h \in V_h \text{ tel que} \\ a(u_h, v_h) = F(v_h) \forall v_h \in W_h \end{cases} \quad (3.42)$$

Ce problème est appelé problème approché et u_h est la solution approchée. V_h est l'espace d'approximation et W_h est l'espace test discret. Un choix particulier, qui sera fait dans cette thèse, consiste à utiliser le même espace V_h comme espace d'approximation et espace test discret. Pour construire V_h nous commençons tout d'abord par mailler le domaine d'étude. Notant N_h la dimension de V_h , une base $\langle \phi_1, \dots, \phi_{N_h} \rangle$ est associée à cet espace. En écrivant u_h dans la base de l'espace d'appartenance, la résolution du problème discret (1.5) est équivalente à un système algébrique de dimension N_h de la forme suivante :

$$\begin{cases} A.U = F & \text{avec} \\ A_{ij} = a(\phi_i, \phi_j) & \forall 1 \leq i, j \leq N_h \\ F_i = F(\phi_i) \end{cases} \quad (3.43)$$

Avec A la matrice du système, U le vecteur des inconnues et F le vecteur source. u_h est ainsi écrit comme suit :

$$u_h = \sum_{j=1}^{N_h} U_j \phi_j. \quad (3.44)$$

9 Conclusion :

On a découvert dans ce chapitre les notions de base de l'électromagnétisme et les équations de Maxwell, du principe que le CND par courant de Foucault est régi par les phénomènes d'électromagnétiques. Pour résoudre ces équations à dérivées partielles obtenues, on a présenté ensuite la méthode de résolution numérique des éléments finis basée sur la formulation en potentiel vecteur magnétique.

Chapitre 4

Chapitre IV : Résultats et interprétations

1 Introduction :

La simulation consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système. Elle s'appuie sur une modélisation et fait appel à des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques.

Les défauts de types fissures ou cordons de soudure sont fréquemment rencontrés en CND. C'est ce type de défaut que nous avons simulé au cours de ce chapitre.

L'objectif de cette partie est d'évaluer le modèle de calcul par éléments finis de la densité du courant et sur le champ magnétique d'un capteur en prenant compte l'influence des paramètres géométriques, sur le logiciel ANSYS Maxwell en étudiant l'influence de la largeur, la profondeur et la fréquence du cordon sur ces caractéristiques électromagnétiques.

2 Présentation de logiciel ANSYS-Maxwell :

ANSYS-Maxwell est un logiciel commercial qui calcule le champ électromagnétique dans le domaine fréquentiel et temporel, et permet d'analyser le comportement électromagnétique d'une structure. Pour analyser ce comportement en détails, le logiciel met à notre disposition des outils d'interprétation post-traitement. Il effectue des calculs électromagnétiques par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis. Cette dernière est basée sur la discrétisation géométrique de la structure étudiée sous forme d'un maillage.

Un projet sous ANSYS-Maxwell se construit étape par étape. L'évolution du projet passe par le dessin de la géométrie, la définition des conditions aux limites ainsi que les matériaux et à la fin la visualisation des résultats de simulation dans le post-processeur [26].

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

La figure suivante montre la fenêtre principale du logiciel :

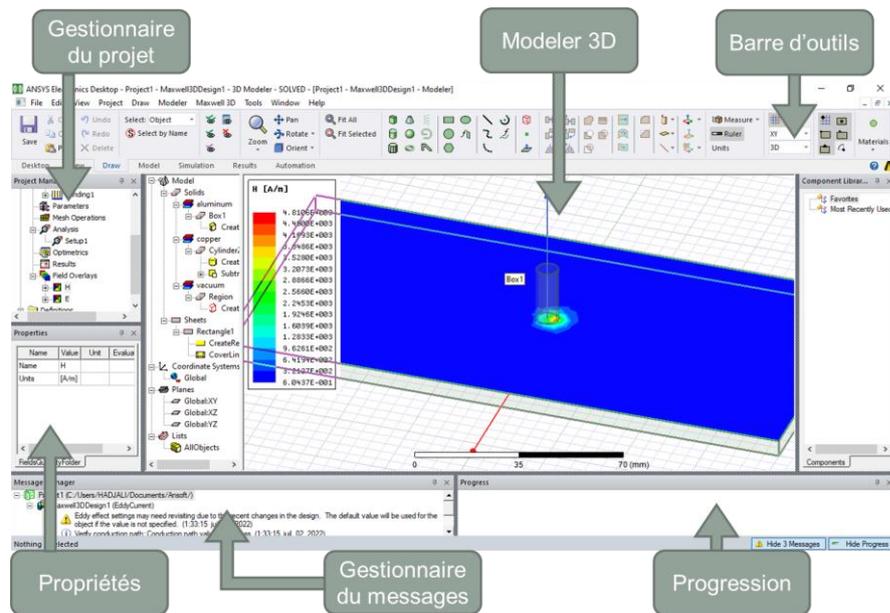


Figure IV.1. La fenêtre principale du logiciel Maxwell

- **Le Project Manager** : contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet ;
- **Le Message Manager**: permet d'afficher tous les erreurs avant de commencer la Simulation ;
- **La fenêtre de Propriété** : Permet d'afficher et modifier les paramètres du modèle ;
- **La fenêtre de Progress**: affiche les progressions de la simulation ;
- **La fenêtre de 3D Modeler**: contient le modèle et son arbre pour la conception géométrique.

La figure (IV.2) présente un organigramme décrivant les étapes de la résolution d'un problème électromagnétique avec le logiciel ANSYS Maxwell :

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

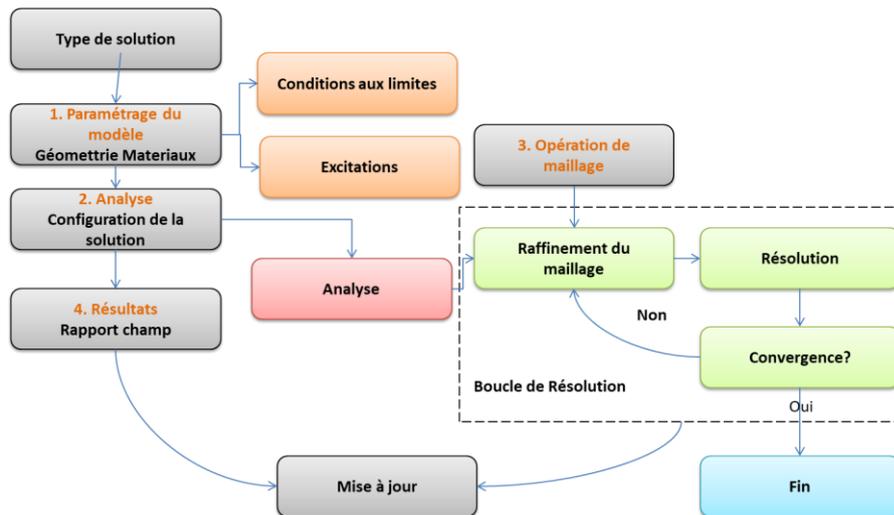


Figure IV.2. Organigramme de simulation sous Ansys-Maxwell

3 Présentation de l'application :

Pour réaliser notre simulation, on a traité les points suivant :

3.1 Géométrie du système :

Pour notre simulation on a utilisé un capteur à section circulaire qui contrôle une pièce en Alliage d'Aluminium de type 2017A-T451 de faible épaisseur qui contient une soudure FSW. La figure ci-dessous présente le domaine d'étude :

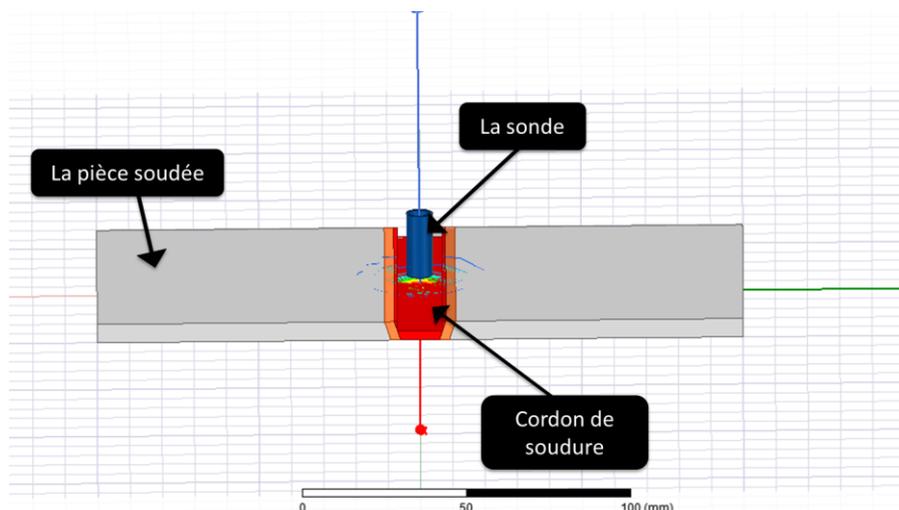


Figure IV.3. Géométrie du domaine d'étude

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

Les caractéristiques physiques et géométriques du système sont données dans les tableaux suivant :

Tableau VI.1. Les caractéristiques géométriques du système

Paramètres	Valeurs
Capteur	
diamètre	6.5mm
Hauteur	20mm
diamètre de fil	0.2mm
Fréquence	50Khz
Nombre de spires	100
Pièce	
Longueur	200mm
Largeur	100mm
Epaisseur	6mm
Cordon	
Longueur	100mm
Largeur	8mm-10mm-12mm-14mm
Profondeur	3mm – 2mm

Tableau IV.2. Les caractéristiques électromagnétiques de la plaque soudée

Alliage	Conductivité électrique	Perméabilité magnétique	Coefficient diélectrique
2017A-T451	$19 \cdot 10^6 (\Omega m)^{-1}$	$4\pi 10^{-7} F/m$	$8,8 \cdot 10^{-12} V/m$

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

Dans notre travail nous avons effectué des scans unidirectionnels suivant l'axe perpendiculaire à l'axe du cordon (OY). A chaque déplacement du capteur un calcul éléments finis est réalisé pour calculer le champ magnétique, le champ électrique et l'énergie correspondante.

3.2 Maillage du domaine :

Pour notre dispositif le type de maillage est triangulaire sachant que pour le capteur de section circulaire le maillage utilisée est de type triangulaire concentrique avec des éléments finis spéciaux T6 tel qu'il est présenté par la Figure VI.4. Ces derniers sont utilisés pour éliminer la singularité au milieu en utilisant la méthode d'extrapolation pour les calculs des intégrales.

3.3 Position du capteur :

Les figures ci-dessous illustrent les différentes position du capteur par rapport au centre du défaut (0mm ,5m, 10mm, 15mm, 20mm) :

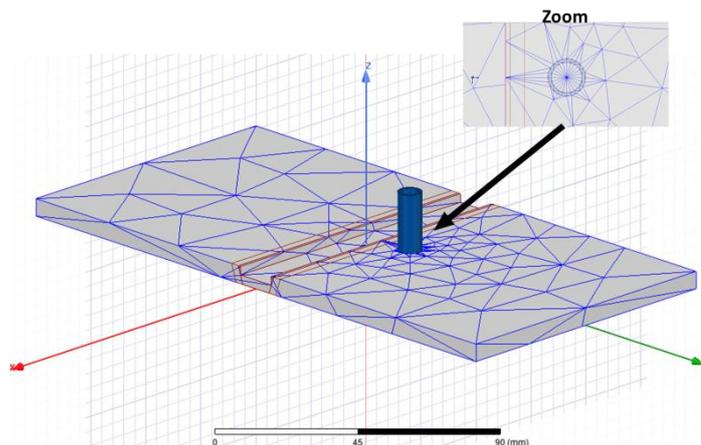


Figure IV.4. Maillage du domaine pour une position de 20mm du capteur

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

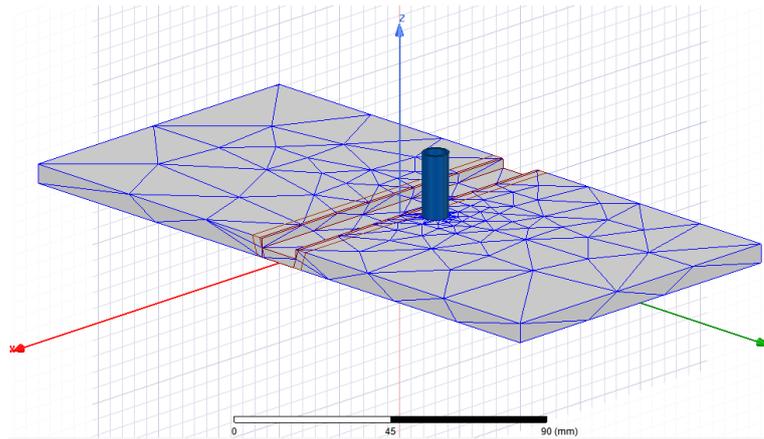


Figure IV.5. Maillage du domaine pour une position de 15mm du capteur

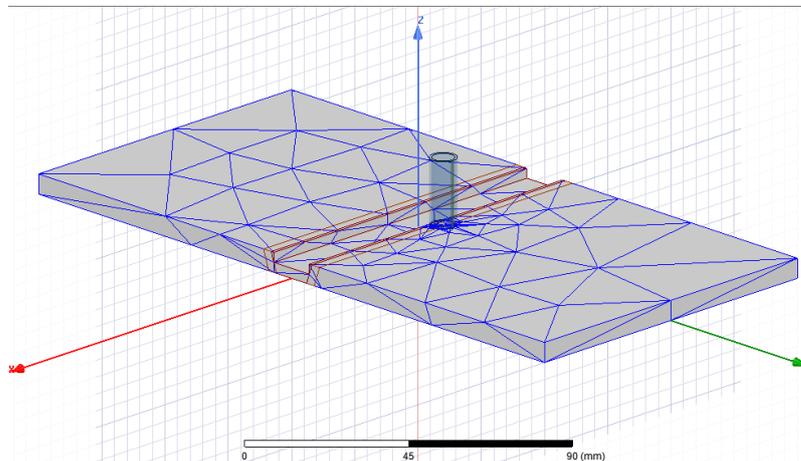


Figure IV.6. Maillage du domaine pour une position de 10mm du capteur

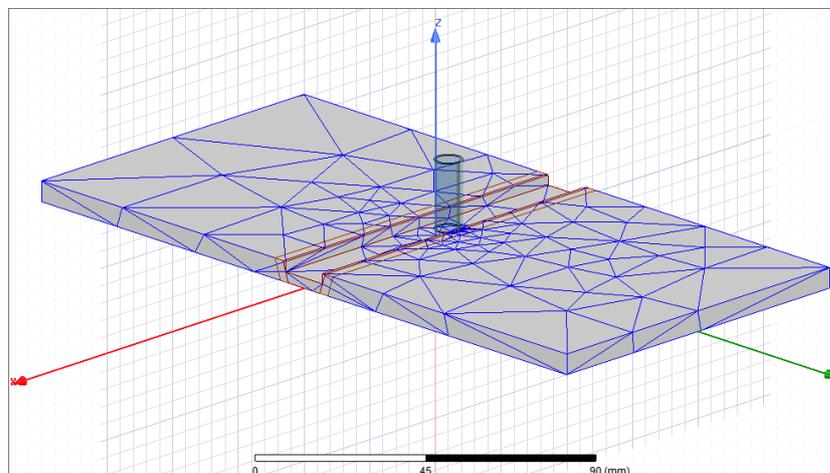


Figure IV.7. Maillage du domaine pour une position de 5mm du capteur

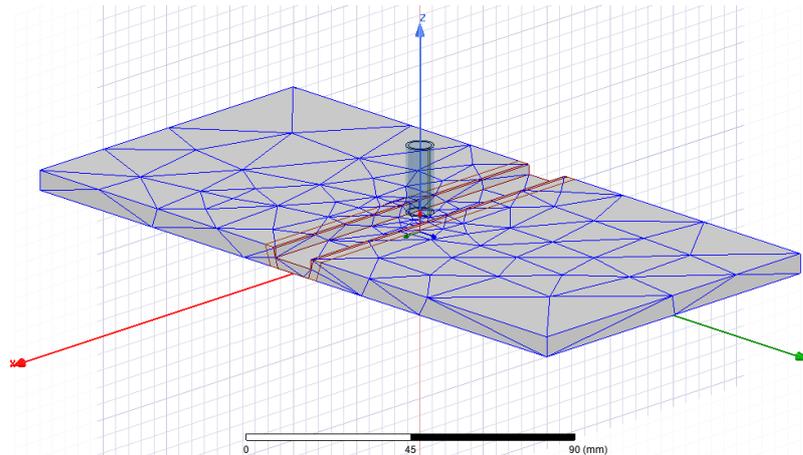


Figure IV.8. Maillage du domaine pour une position de 0mm du capteur

4 Résultats et interprétations :

4.1 Densité de courant induit :

Les résultats illustrés ci-dessous présentent la cartographie des CF, champs magnétique et électrique en fonction de la position du capteur :

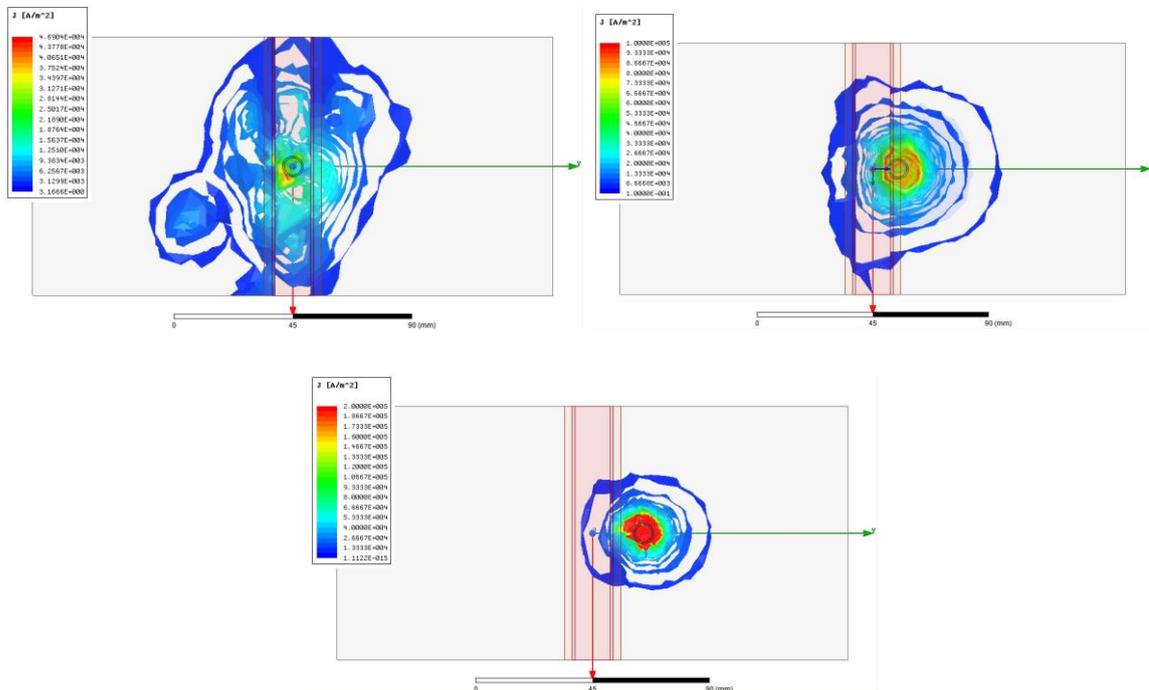


Figure IV.9. Densité de courant induit de la pièce en fonction de la position du capteur par rapport au cordon de soudure

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

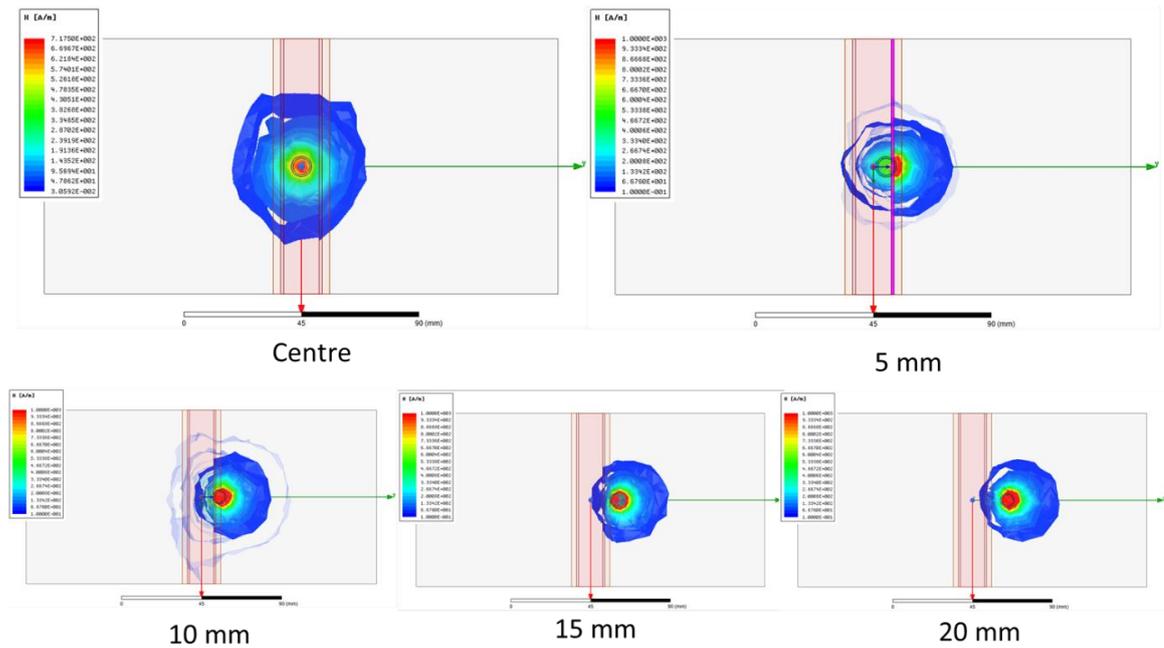


Figure IV.10. Cartographie du champ magnétique de la pièce en fonction de la position du capteur par rapport au cordon de soudure

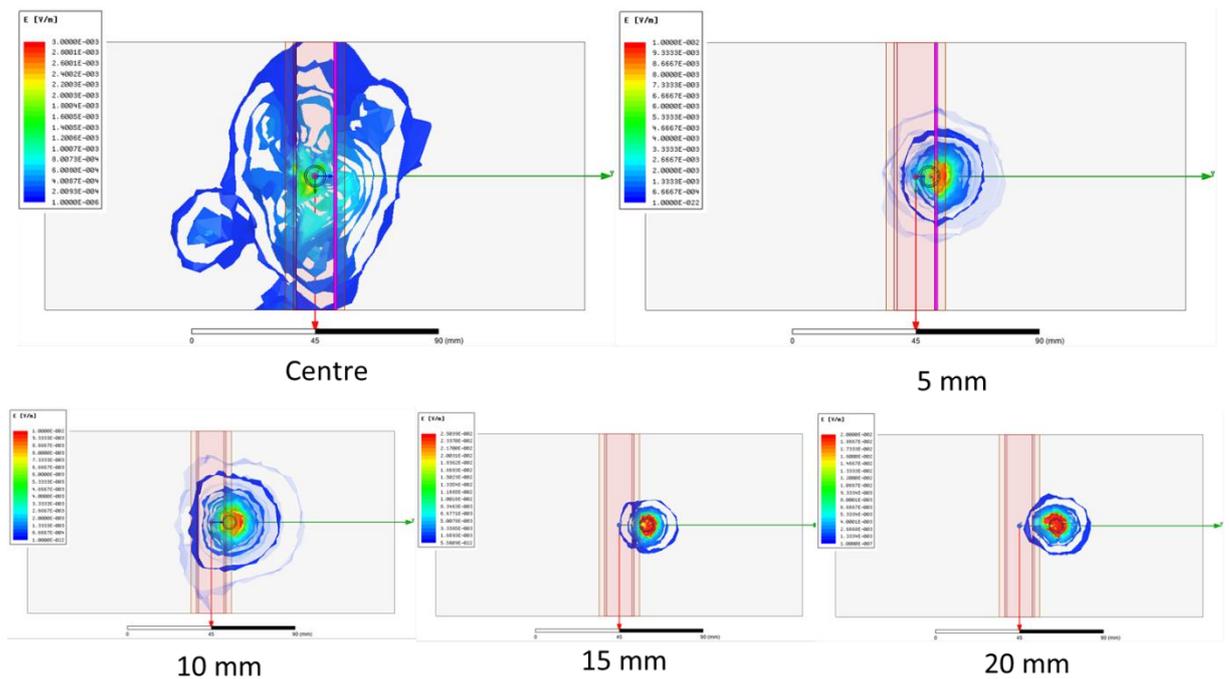


Figure IV.11. Cartographie du champ électrique de la pièce en fonction de la position du capteur par rapport au cordon de soudure

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

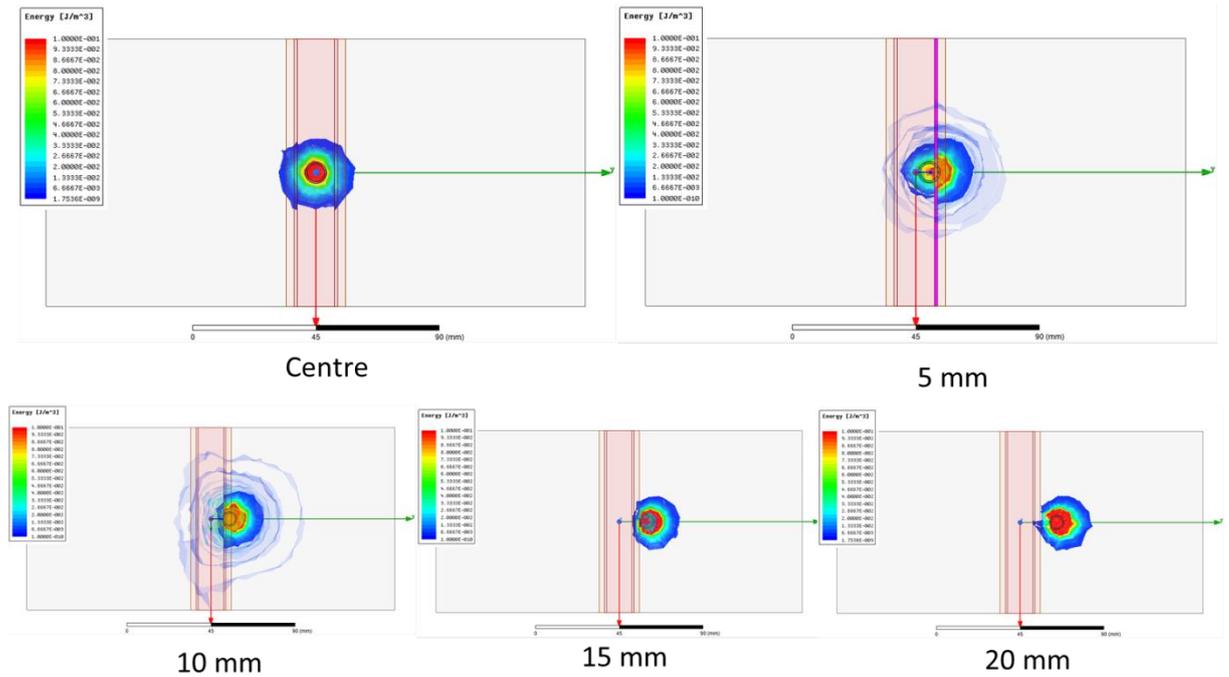


Figure IV.12. Cartographie de l'énergie en fonction de la position du capteur par rapport au cordon de soudure

Remarquant les figures présentées ci-dessus, on constate que la présence d'une anomalie dans la pièce a contrôlée, telle qu'un cordon de soudure entraîne une perturbation de la densité et la circulation des courants induits en modifiant localement le champ magnétique et électrique ainsi que l'énergie.

4.2 Influence de la largeur du cordon de soudure

Dans cette étape de la simulation, on fait varier la largeur du cordon de soudure, pour deux profondeurs différentes 2 et 3mm. Les résultats sont présentés par les figures suivantes :

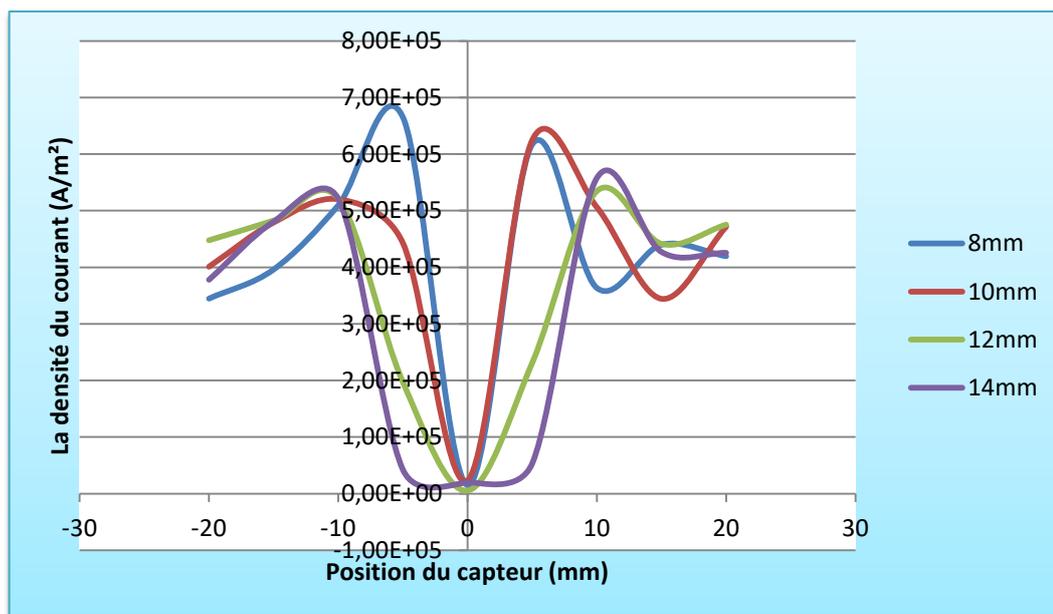


Figure V.13. Variation de la densité du courant en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 2mm

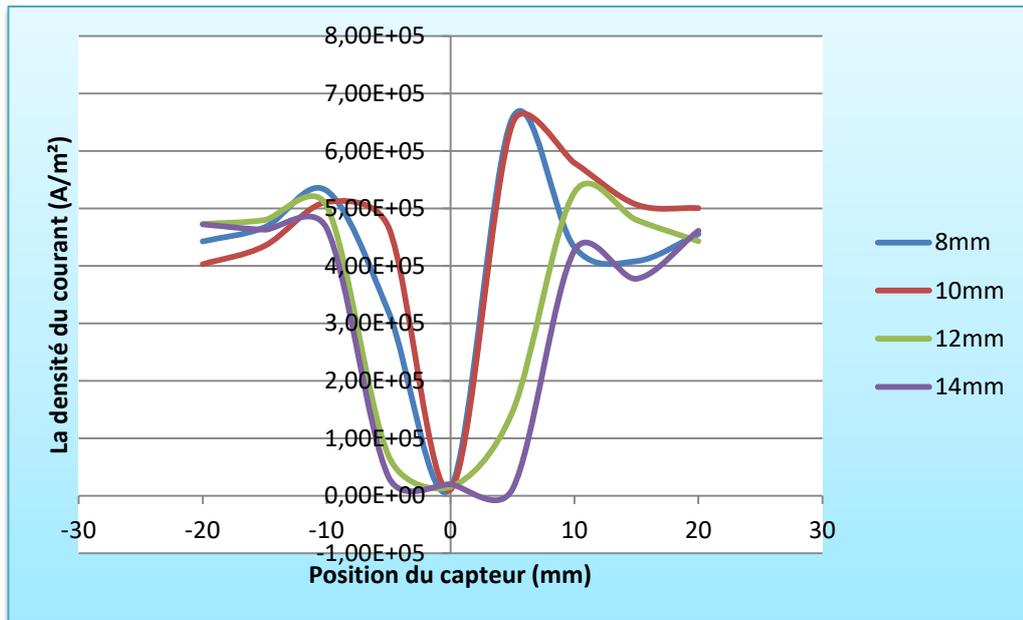


Figure V.14. Variation de la densité du courant en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 3mm

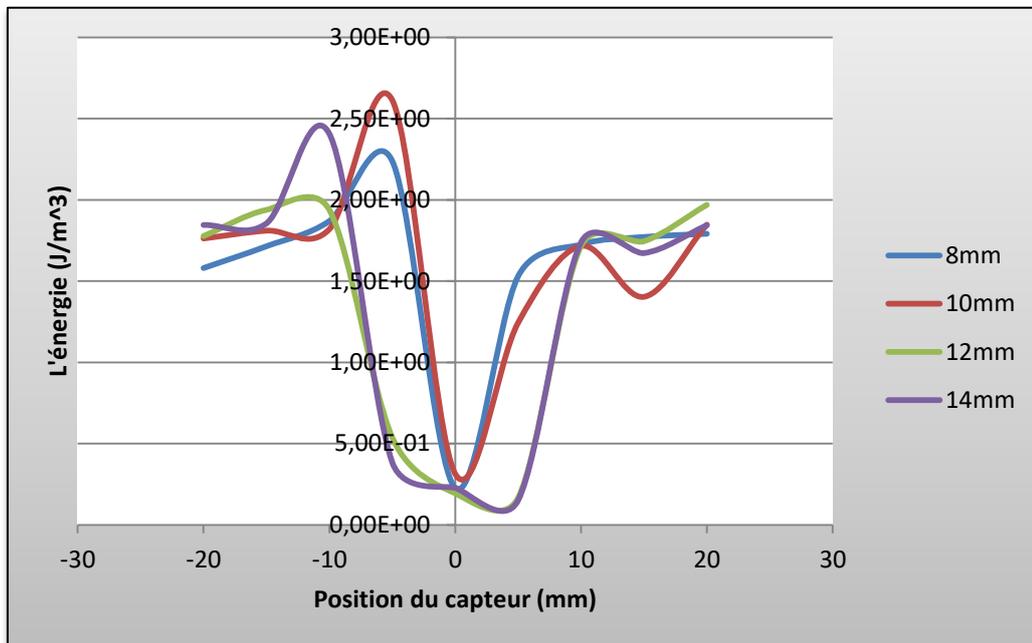


Figure V.15. Variation de l'énergie en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 2mm

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

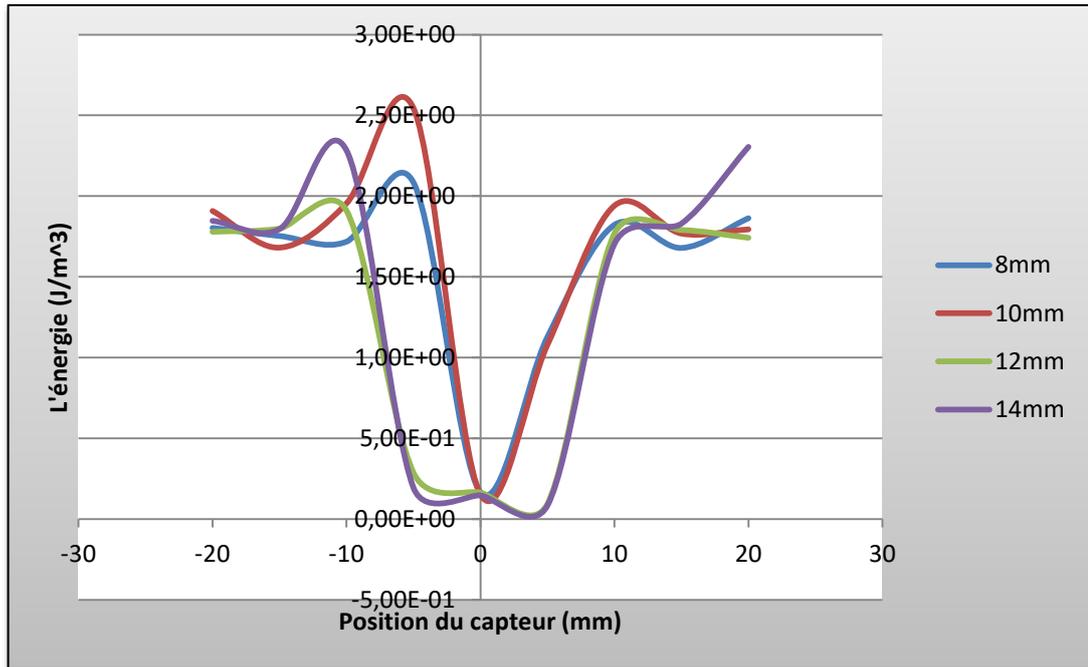


Figure V.16. Variation de l'énergie en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 3mm

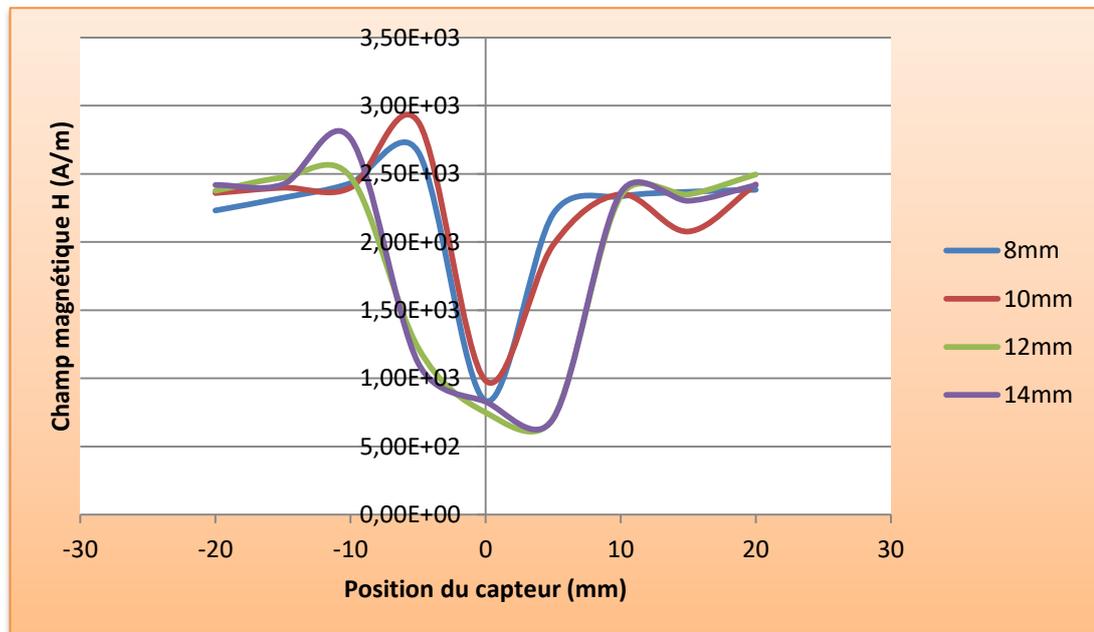


Figure V.17. Variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 2mm

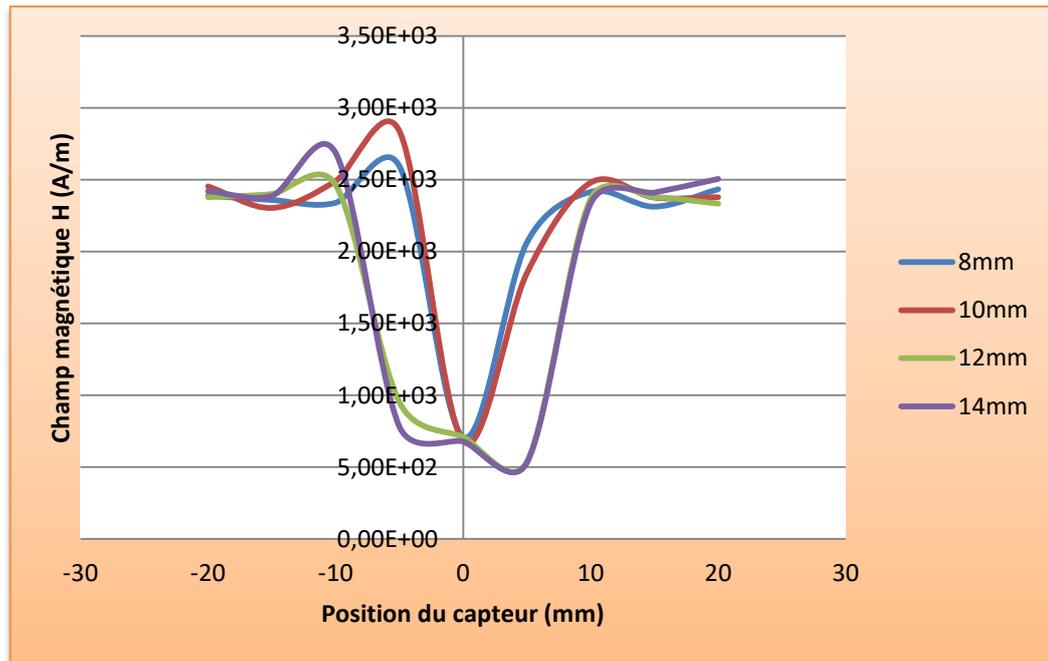


Figure V.18. Variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut pour une profondeur de 3mm

Analysant les résultats présentés ci-dessus, on remarque que :

- Les valeurs de toutes les courbes présentent une symétrie par rapport au milieu du cordon de soudure ;
- Les valeurs atteignent leur minimum lorsque le capteur est au milieu du défaut (la zone N) puis elles atteignent le maximum à la zone (ZATM), ensuite elles diminuent à la zone lointaine (La zone ZAT). Cela s'explique par la présence du maximum de contraintes résiduelles qui se trouve au niveau de la zone affectée thermo-mécaniquement ZATM (aux extrémités de l'épaulement de l'outil) 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 à chaque fois qu'on s'éloigne du cordon de soudure vers le métal de base qui n'a pas subi de modifications thermiques, mécaniques ou chimiques. La diminution des paramètres magnétiques au niveau de la zone N s'explique par la présence d'une faible contrainte résiduelle car dans cette zone la

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

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.

- Les résultats obtenus sont en accord avec des profils de contraintes résiduelles déterminées par d'autres méthodes de CND publiées dans la littérature.
- A travers les figures précédentes, nous voyons clairement que l'élargissement du cordon conduit l'élargissement de la zone où le champ magnétique et la densité du courant sont en leurs valeurs minimales. Et on voit que les cordons larges sont mieux détectés que ceux qui sont étroits.

4.2 Influence de la profondeur :

Dans l'étape suivante de la simulation, on fait varier la profondeur du cordon de soudure pour deux types de largeur du cordon de soudures 10mm et 14 mm. Les résultats sont présentés par les figures suivantes :

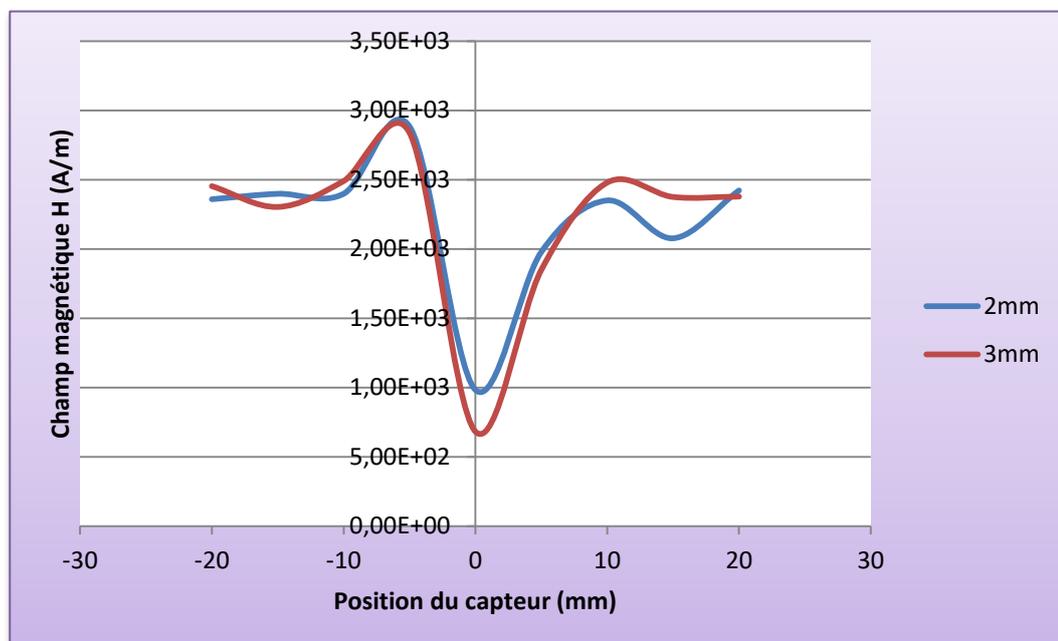


Figure V.19. Variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une largeur de 10mm

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

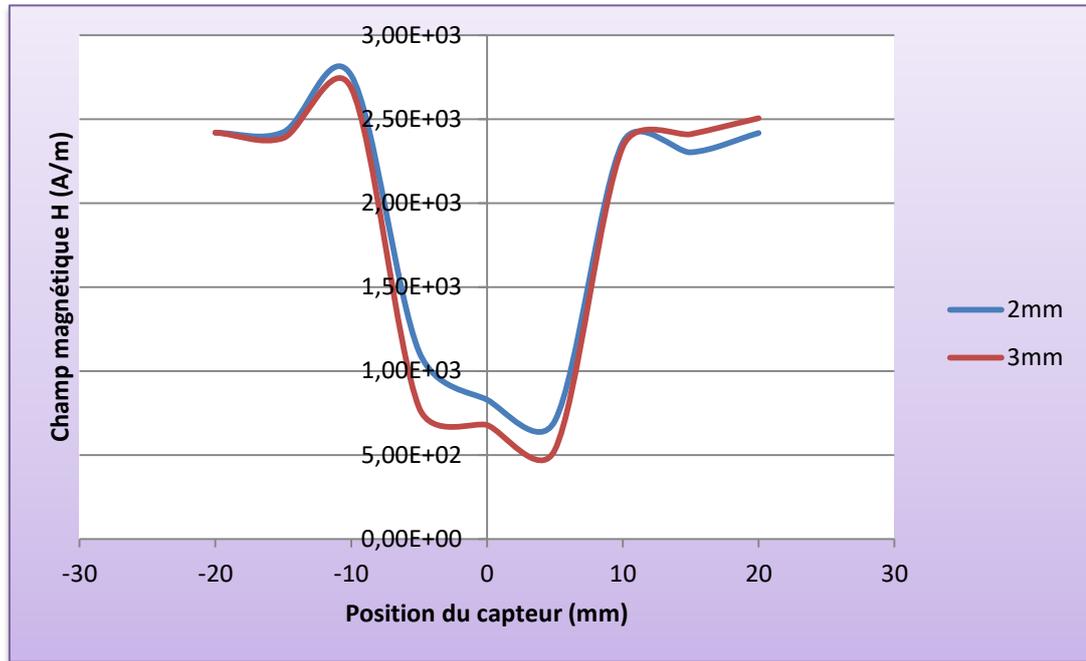


Figure V.20. Variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une largeur de 14mm

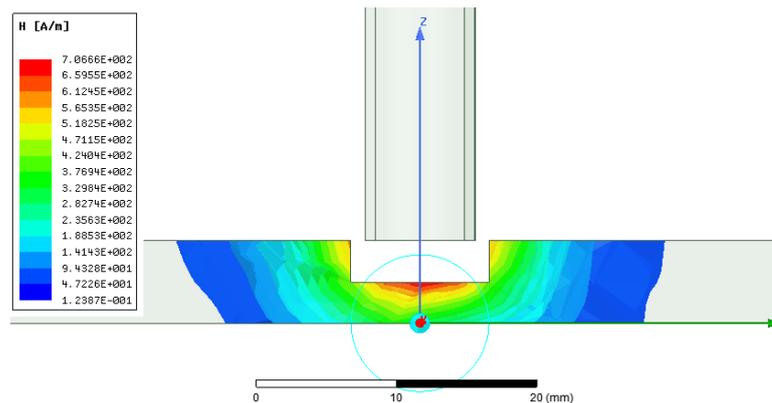


Figure IV.21. Variation du Champs magnétique en profondeur

Analysant les graphes précédents, nous constatons que l'augmentation de la profondeur de défaut conduit une diminution des paramètres magnétiques et on

remarque aussi que l'intensité du champ magnétique diminue avec ce qui explique le phénomène de peau.

4.3 Influence de la fréquence :

Dans cette dernière étape, on fait l'étude de l'influence de fréquences sur le champ magnétique avec la gamme de fréquence 50-500HZ :

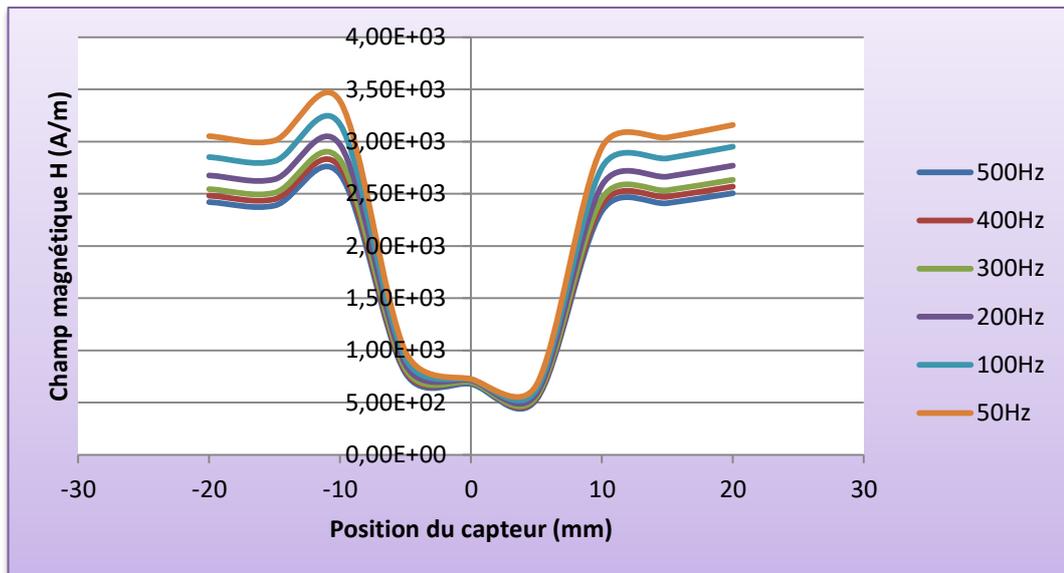


Figure V.22. Variation du champ magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences d'excitations pour une largeur de 14mm et une profondeur de 3mm.

En augmentant la fréquence on remarque une diminution du champ magnétique ce qui s'explique par l'augmentation de l'énergie dissipée par effet joule et la diminution de l'énergie emmagasinée.

5 Conclusion :

En simulant le CND par courant de Foucault à l'aide du logiciel Ansys-Maxwell et en analysant les résultats, on constate que la caractérisation des défauts par courant de Foucault se fait à l'aide de l'analyse des paramètres électromagnétiques qui sont très sensibles à la variation de la largeur et la

Chapitre 4 : Résultats Et Interprétation

profondeur du défaut, aussi bien que la position du capteur et la fréquence utilisée.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

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.

Le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault est l'un de systèmes de détection de défauts les plus fiables et les plus faciles à mettre en œuvre. Le phénomène moteur du CND par Courants de Foucault est l'induction électromagnétique.

Ce travail a été consacré à la modélisation et la simulation de dispositifs de contrôle non destructif par courant de Foucault, pour une structure soudée par friction-malaxage (FSW), et ceci a eu lieu à l'aide du logiciel ANSYS Maxwell qui est une suite de l'ANSYS version 19.0.

A partir de notre expérience numérique dont on a examiné un cordon de soudure FSW en calculant différents paramètres pour plusieurs positions de la sonde, on a démontré que :

- Toutes les figures possèdent la même forme en présentant une symétrie par rapport au noyau ;
- En augmentant la fréquence, le champ magnétique diminue, ce qui s'explique par l'augmentation de l'énergie dissipée par effet joule et la diminution de l'énergie emmagasinée ;
- Le champ magnétique maximal 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 à chaque fois qu'on

Conclusion Générale

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

- Le champ magnétique minimal se trouve au niveau de la zone N s'explique par 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 ;
- Les résultats obtenus sont en accord avec des profils de contraintes résiduelles déterminées par d'autres méthodes de CND publiées dans la littérature ;
- l'augmentation de la profondeur de défaut conduit une diminution des paramètres magnétiques ce qui explique le phénomène de peau ;
- Les CF sont très sensibles à la variation de la largeur et la profondeur du défaut, la position du capteur et la fréquence.

Perspective et recommandation

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

- Une partie expérimentale pour déterminer les paramètres électromagnétiques ;
- Simulation du procédé de soudage FSW ;
- Caractérisation du défaut par les réseaux de neurones ;
- Détermination un code de calcul pour le calcul de l'impédance en utilisant la densité de courant.

Références

Références :

- [1] Bilal Hannouf, Ammar Zeddani, « Utilisation des techniques du soft computing dans un procédé de contrôle non destructif », mémoire de mastère, Université de Jijel, Juin 2018.
- [2] M.S. Soudani, « Contrôle non destructif par ultrasons analyse et diagnostic », Thèse de Magister, Université Cheikh, Arbi Tébessi, Tébessa, 2009.
- [3] Abdelhak Abdou, « Contrôle non destructif par courant de Foucault étude et réalisation d'un capteur inductif», mémoire de magistère en électrotechniques, université el hadj Lakhdar Batna, septembre 2006.
- [4] Titouah Lounis, Ziane Abdeslam, « Caractérisation Non Destructive par Courants de Foucault Pulsés d'une rainure par inversion associé à méthode des circuits électriques couplés », mémoire de mastère, université a.mira-bejaia, 2014.
- [5] J. DUMONT-FILLON, « Contrôle non destructif (CND) », Techniques de L'ingénieur R1400, 1996, pp.1-42.
- [6] M. WANIN, « Evaluation non destructive de la qualité des matériaux partie 1, et partie 2 », Techniques de L'ingénieur R4130 et R4132, 1996, pp. (1-26 et 1-16).
- [7] M. LACROIX, « Essais non destructifs », Techniques de L'ingénieur M110 et M111, juillet 1996, pp.1-21.
- [8] PAUL E. MIX, "Introduction to non destructive testing: a training guide", Wiley Interscience, 2nd edition, United States of America, 2005.
- [9] Yahya. CHOUA, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault", Thèse de Doctorat, Spécialité Physique, Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », Université de Paris-Sud 11, 2009.
- [10] Brahim BENRAMDAN, "Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision", Thèse de Doctorat, Spécialité électrotechnique et génie électrique, Université de Nantes, 2009.

Références

- [11] Mohamed K. Bencharif, "Contrôle par Ressuage", Vinçotte International Algérie, Mai 2007.
- [12] Site internet, " Contrôle non destructif ", www.Techno-Science.net
- [13] Jacques ATTAL, " Microscopie acoustique", technique de l'ingénieur R1402, 1996, pp. (1-10).
- [14] Nabil. BENHADDA, "Modélisation des capteurs inductif par courant de Foucault", Mémoire de Magister, Spécialité électrotechnique, Option matériaux d'électrotechnique, Université de Batna, 2006.
- [15] Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). "Friction stir welding and processing",. Material Science and Engineering, R50, pp.1-78.
- [16] Aissani M., Gachi, S., & Bekache, I. (Déc. 2007). INAPI-Algérie Patent No. Invention - Mémoire descriptif: I. N. A. d. I. P. Industrielle.
- [17] Aissani M., Gachi, S., Bassir, D. H., Boubenider, F., & Benkedda, Y. (2008c). "Conception of a Friction Stir Welding Tool". Second International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications, 2-5 September, Gijon, Spain.
- [18] Mouloud AISSANI. (2013). ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE ET MECANIQUE DES MATERIAUX AERONAUTIQUES PAR DES METHODES NUMERIQUES : APPLICATION AU SOUDAGE DE STRUCTURES METALLIQUES.
- [19] S. Zimmer, W. Chapeau, B. Da Costa and al. "Manuel Pédagogique. Le Soudage par friction malaxage Friction Stir Welding". ISBN : 978-2-900781-67-8.
- [20] Mariem ZOGHLAMI. (2017) " Influence des paramètres du procédé fsw sur les caractéristiques des bandes alternées (onion rings) dans les alliages

Références

d'aluminium'.

- [21] Chen, Y. and K. Nakata, Effect of the surface state of steel on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal lap joints of aluminum and steel by friction stir welding. Metallurgical and materials transactions A, 2008. 39(8): p. 1985-1992.

- [22] Svensson, L. E., L. Karlsson, H. Larsson, B. Karlsson, M. Fazzini, and J. Karlsson. 2000. «Microstructure and mechanical properties of friction stir welded aluminium alloys with special reference to AA 5083 and AA 6082», Science and Technology of Welding and Joining, 5: 285-96.

- [23] Moreira, P. M. G. P., T. Santos, S. M. O. Tavares, V. Richter-Trummer, P. Vilaça, and P. M. S. T. de Castro. 2009. «Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6», Materials & Design, 30: 180-87.

- [24] Ganesh, P., and V. S. Senthil Kumar. 2015. «Superplastic Forming of Friction Stir Welded AA6061-T6 Alloy Sheet with Various Tool Rotation Speed», Materials and Manufacturing Processes, 30: 1080-89.

- [25] Houda Zaidi. 2013. Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples.

- [26] TAREK BOUCHALA. 2008. Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. – Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite.

- [27] Neimat Nahouli. 2017. Étude et réalisation d'un hystérésis-graphe d'un système de mesure du cycle d'hystérésis.

- [28] Bachir Helifa. 2012. Contribution à la Simulation du CND par Courants de

Références

- Foucault Vue de la Caractérisation des Fissures Débouchantes. Université de Nantes: Thèse de Doctorat, 2012.
- [29] RAVAT, Cyril. 2008. Conception de Multicapteurs à Courants de Foucault et Inversion des Signaux Associés pour le Contrôle non Destructif. Université Paris-Sud 11: Thèse de Doctorat, 2008.
- [30] Bensaïd, S. 2006. Contribution a la Caractérisation et à la Modélisation Electromagnétique et Thermique des Matériaux Composites Anisotropies. Université de Nantes: Thèse de Doctorat, à l'IREENA Saint-Nazaire, 2006.
- [31] Benhadda, N. 2015. Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND). Université Batna 2: Thèse de Doctorat en Sciences, 2015.
- [32] Zaoui, A. 2008. Contribution à la Modélisation de CND par Matrice à Courants de Foucault. Ecole Militaire Polytechnique, Alger: Thèse de Doctorat, 2008.