

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département d'Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par :

Mlle. REBBAT Imane

Mlle. ZANE Aya

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Evaluation non destructive par courants de Foucault des structures multicouches

rivetées : Application au contrôle des fuselages d'avions

Soutenu le 07/07 /2022 devant le jury composé de :

Mme. MZIOU	Nassima	Professeur	UMBB	Président
Mr. HAMEL	Meziane	MCA	UMBB	Encadreur
Mme. ABDESLAME	Djamila	MCB	UMBB	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Département d'Ingénierie des Systèmes Electriques (ISE) de l'université M'Hamed BOUGARA de Boumerdès (UMBB).

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas vu le jour sans l'aide et l'encadrement de Monsieur Meziane HAMEL. Nous avons eu la chance de travailler avec lui et d'apprécier ses qualités et ses valeurs. Son sérieux, sa compétence et son sens du devoir, nous ont énormément marqués. Veuillez trouver ici l'expression de notre respectueuse considération et notre profonde admiration pour toutes vos qualités scientifiques et humaines.

Ce travail est pour nous l'occasion de lui témoigner notre profonde gratitude.

Nous remercions également Madame Nassima MZIOU, Professeur à l'UMBB, de nous avoir fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.

Enfin, nous remercions Madame Djamila ABDESLAME, MCB à l'UMBB, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Dédicaces

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu, le tout puissant, je rends grâce pour m'avoir donné la santé, la patience et la volonté.

Je tiens à dédier ce travail à :

Mes parents qui m'ont toujours soutenu et m'ont permis d'arriver là où je suis aujourd'hui. Aucun mot n'est assez fort pour vous témoigner toute ma reconnaissance.

Que Dieu vous garde et vous protège.

A mes sœurs, Hayet, Rania, Bouchra, et à mes frères Walid et Hamza vous êtes la joie de notre famille, merci pour l'ensemble des moments que nous passons ensemble.

A mes amis : Noura, Hadjer, Fadia, Loubna, Kawther, Sabrina, Meryem, Bouchra, Amel, Anissa. Merci pour votre amitié précieuse.

A ma binôme « Aya » je te souhaite un avenir plein de joie

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches, amis et collègues, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Imane

Je dédie ce travail à :

Ma chère mère,

Mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé de m'encourager, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse
atteindre mes objectifs.

A mes sœurs et mon petit frère,

Pour leur soutien moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A tous mes amis et tous mes camarades et collègues, et tous ceux que j'aime.

Aya

Sommaire

Chapitre I

Généralités sur le contrôle non destructif

I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. Le contrôle non destructif	5
I.4. Principe du CND.....	6
.....	6
I.5. Différentes techniques du CND.....	7
I.5.1. Examen visuel.....	7
I.5.2. Ressuage.....	7
I.5.3. Ultrasons	7
I.5.4. Magnétoscopie	8
I.5.5. Radiographie	8
I.5.6. Courants de Foucault	9
I.6. CND par courants de Foucault	12
I.6.1. Objectif du CND par courants de Foucault.....	12
I.6.2. Epaisseur de peau	13
I.6.3. Les avantages du CND par CF.....	14
I.6.4. Les inconvénients du CND par courants de Foucault	15
I.7. Types de capteurs.....	16
I.8. Classification par mode de contrôle	17
I.9. Eléments perturbateurs.....	18
I.10. Types de défauts.....	19
I.11. Conclusion	19

Chapitre II

Modélisation numérique des structures CND-CF

II.1. Introduction.....	20
II.2. Modélisation du dispositif de CND par CF	20
II.3. Mise en équations	21
II.3.1. Equations de Maxwell	21
II.3.2. Lois constitutives du milieu	22
II.4. Formulations duales en potentiels combinés	23
II.5. Formulation magnétodynamique	23
II.5.1. Formulation en champ électrique \vec{E}	24
II.5.2. Formulation en champ magnétique \vec{H}	24
II.5.3. Formulation $\vec{A} - \mathbf{V}$:	24

II.5.4. Formulation $\vec{T}-\phi$	25
II.6. Méthodes de résolution.....	26
II.6.1 Méthodes analytiques	27
II.6.2. Méthodes numériques.....	27
II.6.2.1. Méthode des différences finis.....	27
II.6.2.2. Méthode des volumes finis.....	28
II.6.2.3. Méthode des éléments finis.....	28
II.7. Résolution des EDP par la MEF.....	29
II.7.1. Etapes de résolution par la MEF.....	29
II.7.1.1. Maillage éléments finis.....	30
II.7.1.2. Forme de la matrice élémentaire :.....	31
II.7.1.3. Résolution du système algébrique :.....	32
II.7.1.4. Fonction d'interpolation	32
II.8. Calcul de l'impédance.....	32
II.8.1. Méthode directe	33
II.8.2. Méthode de l'énergie.....	34
II.9. Conclusion.....	35

Chapitre III

Simulation numérique du CND-CF d'une structure multicouche rivetée

III.1. Introduction.....	37
III.2. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell.....	37
III.3. Présentation application Benchmark.....	38
II.4. Simulation 1 : Simulation d'un système plaque/capteur sans défaut.....	40
III.4.1 Maillage.....	41
III.4.2. Distribution de courants de Foucault	42
III.5. Simulation d'un système plaques/capteur avec défaut.....	43
Configuration I : Défaut surfacique.....	43
III.5.2. Distribution de courants de Foucault	45
III.5.3 Variation de la longueur.....	47
III.5.4. Variation de la profondeur	48
Configuration II : Defaut enfouis	49
III.5.5. Variation de la fréquence	49
III.5.6. Maillage.....	50
III.5.7. Distribution des courants de Foucault.....	51
III.6. Conclusion.....	54

Chapitre IV

Etude du problème inverse

IV.1. Introduction	55
IV.2. Présentation de logiciel Minitab	55
IV.3. Problème inverse.....	56
IV.4. La méthode de régression	56
IV.4.1. Régression linéaire simple.....	56
IV.4.2. Régression linéaire multiple	57
IV.5 Droite de régression	58
IV.6. Calcul d'erreur	59
IV.7. Base de données	60
IV.6 Validation et Interprétation	61
IV.7 Conclusion	63

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

Figure I. 1: Principe du contrôle non destructif	6
Figure I. 2: L'examen visuel	7
Figure I. 3: Inspection par le ressuage.....	7
Figure I. 4: Inspection ultrasonique.....	8
Figure I. 5: Principe de la magnétoscopie	8
Figure I. 6: Principe de La Radiographie	9
Figure I. 7: Image réelle de CND par courants de Foucault.....	9
Figure I. 8: Schéma de principe du CND par courants de Foucault.....	12
Figure I. 9: Répartition des courants de Foucault dans une pièce	14
Figure I. 10: Capteur absolu	16
Figure I. 11: Capteur différentiel.....	17
Figure I. 12: Mesure absolue compensée	18
Figure I. 13: Mode différentiel.....	18

Chapitre II : Modélisation numérique de structures CND-CF

Figure II. 1: Cas général d'un problème magnétodynamique.....	21
Figure II. 2 : Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par MEF	29
Figure II. 3: Eléments à une dimension.....	30
Figure II. 4: Elément triangulaire à deux dimensions.....	30
Figure II. 5 : Eléments carré à deux dimensions.....	31
Figure II. 6: Eléments à trois dimensions.....	31
Figure II. 7: Triangle de Pascal.....	32

Chapitre III : Simulation numérique du CND-CF d'une structure multicouche rivetée

Figure III. 1: La fenêtre Maxwell 3D.....	38
Figure III. 2: Géométrie du Benchmark	38
Figure III. 3: Géométrie de la Simulation 1.....	40
Figure III. 4: Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur	40
Figure III. 5: Maillage au milieu du trou.....	41
Figure III. 6: Maillage à l'extrémité du trou.....	41
Figure III. 7: Maillage dans la zone saine	42
Figure III. 8: Densité du courant au milieu du trou.....	42
Figure III. 9: Densité du courant induit à l'extrémité du trou	42
Figure III. 10: Densité du courant dans la partie saine.....	43
Figure III. 11: Géométrie de la Simulation 2, Configuration 1	43
Figure III. 12: Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur de Simulation 2	44
Figure III. 13: Maillage au milieu du trou.....	44
Figure III. 14: Maillage à l'extrémité du trou.....	44
Figure III. 15: Maillage au milieu du défaut.....	45
Figure III. 16: Maillage à l'extrémité du défaut.....	45

Figure III. 17: Maillage dans la zone saine.	45
Figure III. 18: Densité du courant au milieu du trou.....	46
Figure III. 19: Densité du courant induit à l'extrémité du trou	46
Figure III. 20: Densité du courant induit au milieu du défaut.....	46
Figure III. 21: Densité du courant induit à l'extrémité du défaut.....	47
Figure III. 22: Densité du courant dans la partie saine.....	47
Figure III. 23: Variation de l'impédance en fonction de la longueur du défaut.....	48
Figure III. 24: Variation de l'impédance en fonction de l'épaisseur du défaut.....	48
Figure III. 25: Géométrie de la Simulation 2, Configuration 2.....	49
Figure III. 26: Variation de l'impédance en fonction de la fréquence.	49
Figure III. 27: Maillage au milieu du trou.....	50
Figure III. 28: Maillage à l'extrémité du trou.	50
Figure III. 29: Maillage au milieu du défaut	50
Figure III. 30: Maillage à l'extrémité du défaut.....	51
Figure III. 31: Maillage dans la zone saine.	51
Figure III. 32: Densité du courant au milieu du trou.....	52
Figure III. 33: Densité du courant induit à l'extrémité du trou	52
Figure III. 34: Densité du courant induit au milieu du défaut.....	53
Figure III. 35: Densité du courant induit à l'extrémité du défaut.....	53
Figure III. 36: Densité du courant dans la partie saine.....	53

Chapitre IV : étude du problème inverse

Figure IV. 1: la fenêtre principale Minitab	55
Figure IV. 2: Droite de la régression linéaire.....	58
Figure IV. 3: Droite d'ajustement de la longueur	61

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des différentes techniques du CND	10
Tableau III.1 : Les paramètres du Benchmark	39
Tableau IV.1 : Base de données	63
Tableau IV.2 : Résultats et validation	64

Abréviations et symboles

Abréviation

CND : Contrôle non destructif.

CF : Courants de Foucault.

3D : Tridimensionnel.

2D : Bidimensionnel.

EF : Eléments finis.

MEF : Méthode des Elément Finis.

MDF : Méthode Différence Finis.

EDP : Equation aux Dérivées Partielles.

Symboles

δ : épaisseur de peau [m]

σ : Conductivité électrique $[(\Omega \cdot m)^{-1}]$

J : densité de courants $[A/m^2]$

I : intensité de courants [A]

\vec{H} : Champ magnétique [A/m]

\vec{E} : Champ électrique [V/m]

\vec{B} : Induction magnétique [T]

\vec{D} : Induction électrique $[C/m^2]$

\vec{j} : Densité de courants de conduction $[A/m^2]$

ρ : Densité de charges électriques $[C/m^3]$

μ : Perméabilité magnétique [H/m]

μ_r : Perméabilité magnétique relative [H/m]

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide [H/m]

ε : Permittivité électrique [F/m]

ε_r : Permittivité électrique relative [F/m]

ε_0 : Permittivité électrique du vide [F/m]

\vec{T} : Potentiel scalaire électrique

\vec{A} : Potentiel vecteur magnétique

ϕ : Potentiel scalaire magnétique

∇ : Nabla

\vec{V} : Potentiel scalaire électrique

N : Nombre de spires

R : Résistance [Ω]

U : Tension [V]

L : Inductance [H]

r : Rayon d'une bobine [m]

W : Energie stockée [J]

P : Energie dissipée [J]

Z : L'impédance [Ω]

E_i : Valeur expérimentale.

P_i : Valeur prédite.

\bar{P}_i : Moyenne des données observées.

N : Nombre de données.

Introduction générale

L'aéronautique est un secteur industriel de plus en plus exigeant vis à vis des techniques de maintenance et de contrôle. Cette exigence est liée à une préoccupation évidente de sécurité, mais aussi aux contraintes économiques toujours plus pressantes, c'est-à-dire l'utilisation fréquente des appareils. Enfin, la complexité croissante des structures aéronautiques, qu'il s'agisse de composants de petite dimension (aubes, disques de turbines,...) ou de grandes dimensions (joints rivetés, assemblages, attaches), imposent des techniques de contrôles de plus en plus précises [Saoudi et al., 2018].

Pour répondre à ces exigences, que ce soit dans le domaine de l'aéronautique ou bien dans d'autres secteurs industriels sensibles tel que le nucléaire, les méthodes de contrôle non destructif deviennent incontournables [Diraison, 2009].

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. [Paillard, 2008]

Les méthodes électromagnétiques sont fréquemment utilisées pour le contrôle des pièces électriquement conductrices et/ou magnétiques. Le contrôle non destructif par courants de Foucault est bien adapté à la détection de défauts dans les pièces métalliques. C'est une méthode facile à mettre en œuvre d'un point matériel, elle est aisément transportable et ne nécessite pas obligatoirement de contact avec la pièce à contrôler, ni de produit annexe comme c'est le cas avec le ressuage, la magnétoscopie ou les ultrasons [Saoudi et al. ,2018].

La modélisation d'une configuration réelle de CND par courants de Foucault ne peut généralement pas être obtenue analytiquement et fait appel à des méthodes numériques. Parmi celles-ci, la méthode des éléments finis (MEF) qui permet de prendre en compte des géométries complexes de sondes et de pièces, est l'une des plus utilisées. Elle s'est en effet imposée comme un outil efficace pour résoudre numériquement les problèmes électromagnétiques [Hamel, 2018].

Le travail présenté dans ce mémoire est divisé en deux parties complémentaires. La première partie consiste à la simulation numérique par la méthode des éléments finis d'un système de CND par courants de Foucault dédié à la détection de défaut de type fissures dans

les structures rivetées des fuselages d'avions. Dans la seconde partie nous allons exploiter la technique de la régression linéaire multiple pour traiter la base de données obtenue par simulation numérique et pour pouvoir par la suite prédire les défauts non existant dans cette base.

Pour ce faire, notre mémoire est articulé autour de quatre chapitres décrits ci-dessous :

Le premier chapitre présentera les méthodes de CND les plus utilisées tout en expliquant leurs principes, leurs mises en œuvre et ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous détaillerons un peu plus la technique par courants de Foucault.

Le deuxième chapitre développe la modélisation des dispositifs de CND par courants Foucault en introduisant les équations décrivant le comportement du champ électromagnétique, les formulations magnétodynamiques nécessaires à la mise en œuvre d'un outil éléments finis 3D, et enfin à l'exposé des différentes formulations de l'impédance.

Le troisième chapitre est dédié à la simulation du CND par courants de Foucault d'une structure multicouches rivetée comportant des fissures. Les résultats de la simulation numérique seront confrontés aux données expérimentales tirées d'un article scientifique.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons converti les résultats de simulation numérique en base des données et utiliser la méthode de régression linéaire multiple pour résoudre le problème inverse et reconstruire les défauts.

Nous terminerons par une conclusion générale qui englobe l'ensemble des travaux effectués dans ce travail.

Chapitre I

Généralités sur le contrôle non destructif

I.1.	Introduction	3
I.2.	Historique	3
I.3.	Le contrôle non destructif.....	5
I.4.	Principe du CND	6
I.5.	Différentes techniques du CND.....	7
I.6.	CND par courants de Foucault	12
I.6.1.	Objectif du CND par courants de Foucault.....	12
I.6.2.	Épaisseur de peau	13
I.6.3.	Les avantages du CND par CF.....	14
I.6.4.	Les inconvénients du CND par courants de Foucault	15
I.7.	Types de capteurs.....	16
I.8.	Classification par mode de contrôle	17
I.9.	Éléments perturbateurs.....	18
I.10.	Types de défauts.....	19
I.11.	Conclusion	19

I.1. Introduction

Le Contrôle Non Destructif CND, consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant d'apprécier sans destruction l'état des pièces, et de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées ; il s'avère un outil très efficace pour la maintenance des installations industrielles. Il a donc d'une très grande utilité surtout dans certains domaines (aéronautique, nucléaire, ...), on peut trouver une très grande analogie entre le domaine médical où il s'agit de contrôler l'état d'un patient, et le contrôle non destructif qui diagnostique une pièce.

La définition suppose une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts et leur évolution dans le temps, ainsi que les lois générales de la mécanique de la rupture [Drai, 2005].

L'objectif de ce chapitre, est de présenter les principales méthodes de CND et en particulier celle des courants de Foucault.

I.2. Historique

Le CND est couramment employé par les industriels depuis le début du XXème siècle. Il est devenu indispensable lors de la fabrication ou l'assemblage de pièces ou encore dans le cadre de la maintenance industrielle. Autrement dit, il permet un contrôle de la matière brute jusqu'au produit fini. Le CND a pour but de détecter, entre autres, la présence de défauts, de mesurer l'épaisseur d'un matériau ou d'un revêtement ou encore de déterminer des paramètres caractéristiques d'un échantillon comme, par exemple, sa conductivité électrique.

Il n'est pas possible de donner une date précise de l'apparition du CND mais la liste ci-dessous [Hellier, 2001], non exhaustive, donne une idée de l'apparition des étapes clés dans le développement du CND :

- 1800 : Première observation thermographique par Sir William Herschel ;
- 1831 : Première observation de l'induction électromagnétique par Michael Faraday ;
- 1840 : Première image infrarouge produite par John Herschel ;
- 1868 : Première référence à l'inspection de défauts. Inspection de fissures longitudinales dans des tubes à l'aide d'une aiguille aimantée par Stephen Martin Saxby ;
- 1879 : Première exploitation des courants de Foucault pour contrôler les alliages de métaux par David Hughes

- 1895 : Découverte des rayons X par Wilhelm Conrad Roentgen ;
- 1898 : Découverte du radium par Marie et Pierre Curie ;
- 1922 : Première radiographie industrielle développée par le Dr. Horace Lester ;
- 1927 : Développement d'un système de contrôle courants de Foucault des rails de chemin de fer par le Dr. Elmer Sperry et Harcourt Drake ;
- 1929 : Développement d'un système de contrôle par particules magnétiques par Alfred deForest et Foster Doane ;
- 1929 : Première expérimentation des transducteurs à quartz par Sergey Sokolov
- 1930 : Première utilisation pratique des rayons gamma via le radium par le Dr. Robert Mehl ;
- 1935-1940 : Développement des premiers systèmes de mesure par courants de Foucault par Horace Knerr, Cecil Farrow, Theo Zuschlag et le Dr. Friedreich Förster ;
- 1940-1944 : Première méthode ultrasonique développée par le Dr. Floyd Firestone ;
- 1946 : Commercialisation du premier instrument portable à ultrasons par la société Branson.

Des années 1950 à nos jours, le CND s'est développé de façon importante. Son innovation s'est faite grâce au développement de l'électronique, des instruments mais surtout des outils informatiques. Ces outils informatiques ont modifié la vision du CND en introduisant la modélisation des phénomènes physiques sur lesquels reposent les différentes méthodes d'inspection. Cette modélisation permet notamment la réalisation de capteurs optimisés afin de répondre à des problématiques industrielles bien spécifiques. Le traitement des données et des images effectuées après l'acquisition de mesures à un rôle très important dans le développement du CND. En effet, le traitement des données est un plus lorsque l'on souhaite interpréter des résultats expérimentaux.

I.3. Le contrôle non destructif

On désigne par le (CND) l'ensemble des procédés permettant de caractériser l'intégrité des structures ou des matériaux sans les endommager. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple l'épaisseur d'une paroi, la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau ; la recherche d'une rupture de ces paramètres, dans le deuxième cas, il s'agit en général de défauts, qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou de la fatigue mécanique [Cherif, 2011].

L'emploi de cette procédure de contrôle se produit souvent à différentes étapes de la vie d'un produit, que ce soit au cours de sa fabrication, de son utilisation ou dans le cadre d'opérations de maintenance [Thomas, 2010].

Le CND intervient pour répondre à différents enjeux, et doit satisfaire au mieux les critères suivants :

- La rapidité d'exécution : Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.
- Le coût : Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- La reproductibilité : La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- La fiabilité : Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.
- La sensibilité : La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurant. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurant sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.
- La résolution : La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite. Parmi ces six critères, il est naturel de penser que la rapidité, la reproductibilité et la sensibilité sont respectivement fortement liées au coût, à la fiabilité et à la résolution. Il est très

souvent nécessaire de consentir à des compromis entre les trois groupes ainsi définis [Hamel, 2018] [Cherif, 2011].

I.4.Principe du CND

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, atténuation ou diffraction des rayons X ou γ , perturbation des courants de Foucault....sont à la base des évaluations non destructives, ils peuvent servir à caractériser les matériaux.

Les techniques de CND se différencient par l'énergie employée, énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...) ... [Abdou, 2006].

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.

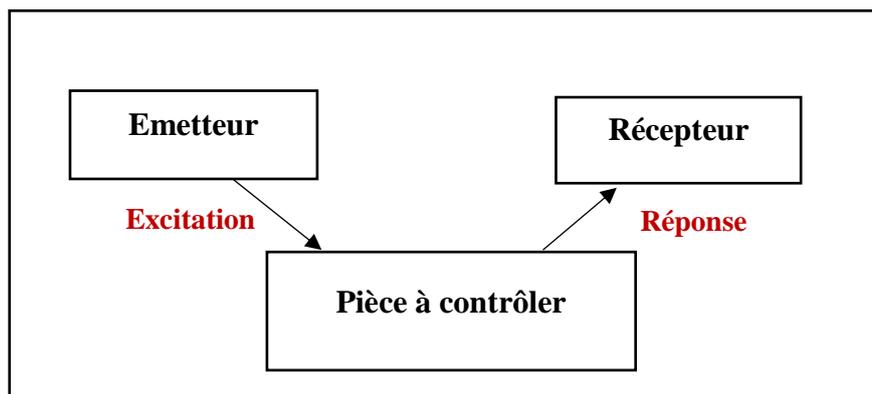


Figure I. 1: Principe du contrôle non destructif

I.5. Différentes techniques du CND

I.5.1. Examen visuel

Comme son nom l'indique, cette technique repose uniquement sur l'œil averti d'un opérateur pour détecter une anomalie. Une lumière rasante ou un système d'endoscopie peuvent par exemple être utilisés pour renforcer les capacités de détection. Il s'agit de la méthode la plus répandue, souvent préalable à des analyses plus approfondies [Rodat, 2021].

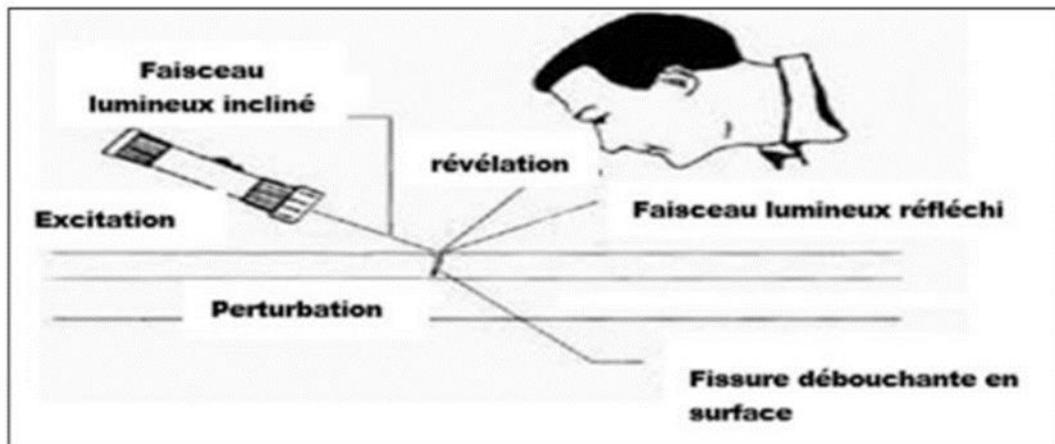


Figure I. 2: L'examen visuel

I.5.2. Ressuage

Lorsqu'une fissure débouche à la surface d'un matériau, elle peut être comblée par un liquide pénétrant. Après séchage, le liquide restant suinte vers l'extérieur marquant la zone affectée par la fissure. Cette technique, proche de la magnétoscopie, est moins facile de mise en œuvre mais peut s'appliquer à tout type de matériau.



Figure I. 3: Inspection par le ressuage

I.5.3. Ultrasons

À l'instar du sonar, une onde mécanique est envoyée dans la matière. L'énergie renvoyée ou transmise par la matière est ensuite analysée pour détecter les potentiels défauts. En effet, les imperfections de la structure sont trahies par leur capacité à réfléchir ou à diffuser l'onde mécanique. Les ultrasons entre 100 kHz et 25 MHz se propagent très bien dans tout type de solide et permettent de détecter des défauts jusqu'en-deçà du millimètre.

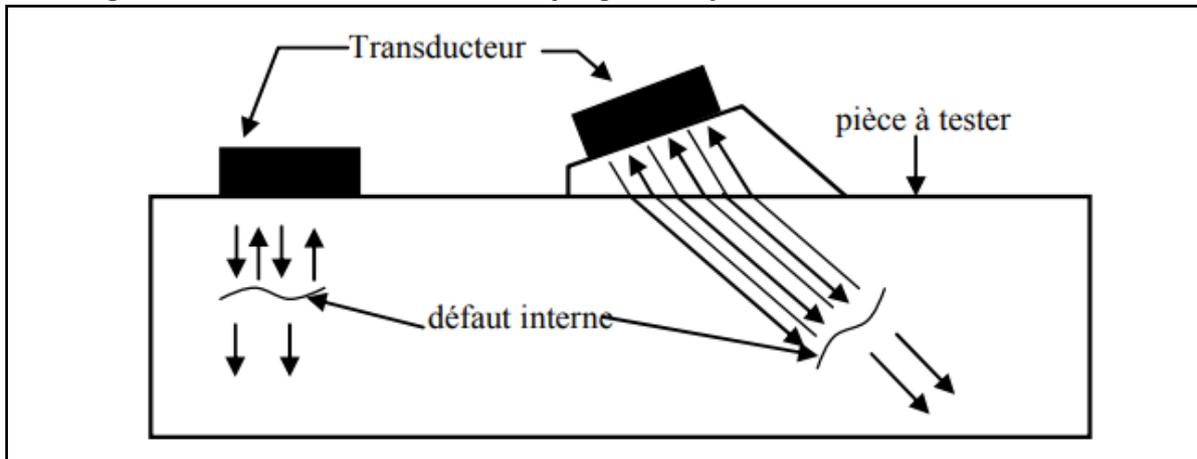


Figure I. 4: Inspection ultrasonique.

I.5.4. Magnétoscopie

Les matériaux ferromagnétiques ont la capacité de canaliser les lignes de champ magnétique. En présence d'un défaut de surface ou faiblement profond, les lignes de champ sont localement perturbées. Ces perturbations peuvent être mises en évidence par une poudre magnétique : les particules sont capturées par les lignes de champ déviées. La poudre s'accumule alors aux abords des défauts et indique leur présence. La méthode ne s'applique qu'aux matériaux ferromagnétiques et aux défauts de surface ou très proches de la surface. Par contre, les analyses sont rapides et précises.

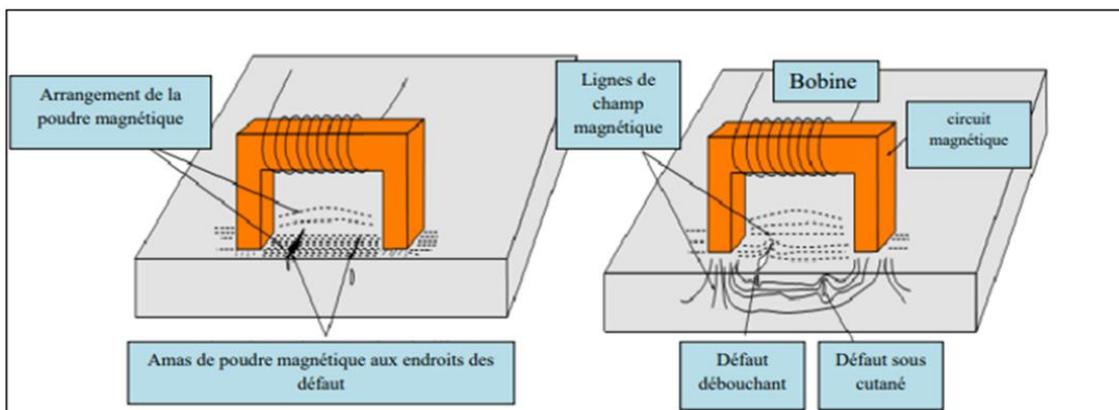


Figure I. 5: Principe de la magnétoscopie

I.5.5. Radiographie

Le rayonnement X voire γ est suffisamment énergétique pour sonder la matière en profondeur. La différence d'absorption du rayonnement par le cortège électronique des atomes permet d'évaluer les manques de matières. Pour les analyses plus poussées, la tomographie permet de reconstituer en trois dimensions la pièce inspectée avec une résolution autour de la dizaine de micromètres. Tous les matériaux peuvent ainsi être radiographiés mais l'aspect ionisant de ces rayonnements sur l'Homme impose des précautions importantes lors de la mise en œuvre.

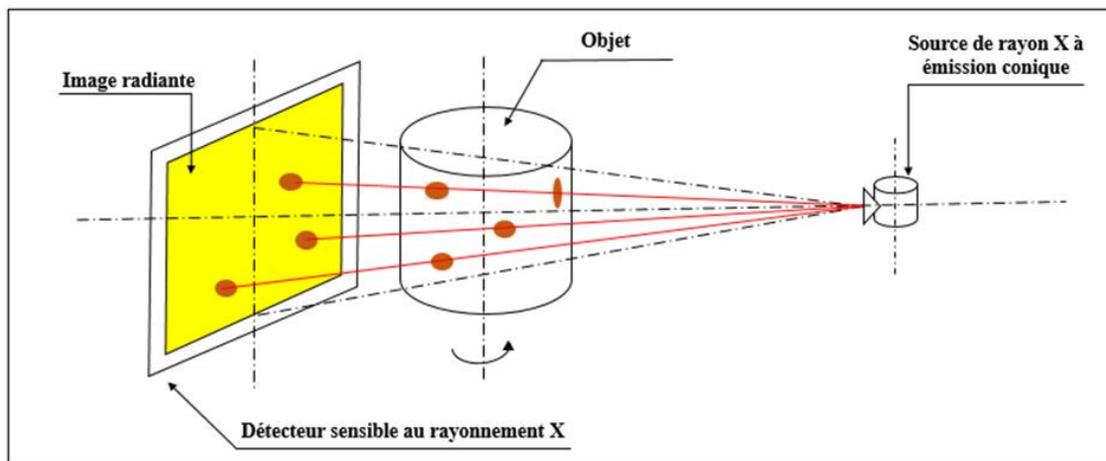


Figure I. 6: Principe de La Radiographie

I.5.6. Courants de Foucault

Lorsqu'une bobine est parcourue par un courant électrique variable, elle crée autour d'elle un champ magnétique également variable. En présence d'une pièce conductrice, ce champ va induire des courants dans le matériau. Si un défaut vient à perturber la circulation de ces courants de Foucault alors l'impédance mesurée va varier et indiquer la présence du défaut. Par nature des courants induits, une telle approche est limitée aux matériaux conducteurs et aux défauts de surface. Elle est notamment très adaptée à la détection de fissures de fatigue.

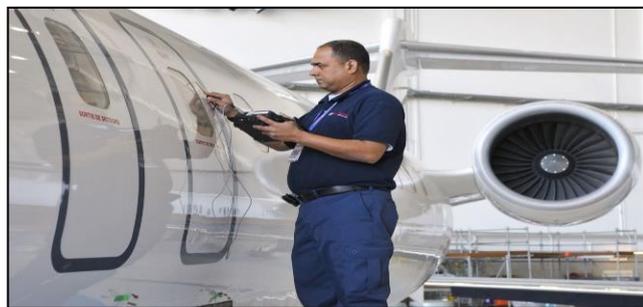


Figure I. 7: Image réelle de CND par courants de Foucault

I.5.7. Avantages et inconvénients des différentes techniques du CND

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des différentes techniques du CND

Méthode	Avantages	Inconvénients
Examen visuel	<ul style="list-style-type: none"> • Examen simple, rapide et peu coûteux. • Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Détection limitée aux défauts visibles. • La surface doit être propre.
Ressuage	<ul style="list-style-type: none"> • Simple à mettre en œuvre et relativement sensible aux fissures ouvertes (et en surface). • Elle n'est pas automatisable et les résultats restent à l'appréciation de l'opérateur. De plus, elle peut être effectuée sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux de géométrie et dimensions quelconques. • Facilité de mise en œuvre (pour pénétration pré émulsionnée) 	<ul style="list-style-type: none"> • Il est nécessaire de faire un décapage et un dégraissage soigné avant l'inspection. • L'interprétation des résultats est subjective : Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts. • Nécessite l'utilisation de produits non récupérables, voire contaminés après utilisation (ex : centrale nucléaire où cette technique va être complètement abandonnée pour des raisons de normes de dépollution). • Danger des solvants toxiques, corrosifs, inflammable
Ultrasons	<ul style="list-style-type: none"> • grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge). • haute sensibilité de détection des défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (Dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore). • localisation et dimensionnement des défauts. • examen à partir d'une seule face souvent suffisante. • détection instantanée, se prête bien à l'automatisation. 	<ul style="list-style-type: none"> • pour les contrôles "manuels" une grande expérience des opérateurs est nécessaire. • méthode impliquant un très haut niveau de technicité. • sensible à la géométrie (forme, rugosité). • sensible à la nature et à l'orientation des défauts. • technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle)
Magnétoscopie	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité à mettre en œuvre manuellement. • Economique. • Résultats quasi immédiats. • Détection des défauts débouchant et des défauts sous-jacents. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cette méthode à champ magnétique continu ne s'applique qu'à des matériaux ferromagnétiques, et ne détecte pas le défaut interne

Radiographie	<ul style="list-style-type: none"> • fournir une image constituant directement un document archivable du contrôle montrant L'absence présumée ou la présence d'un défaut dont on peut éventuellement apprécier la nature et la taille. • garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures. 	<ul style="list-style-type: none"> • toutefois, l'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur. De plus, cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurités pour l'opérateur et l'environnement, qui rendent son utilisation en industrie complètement inadaptée. • la nécessité de mettre en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel. • le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau. • la faible productivité alliée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films
Courants de Foucault	<ul style="list-style-type: none"> • Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement enfouis (quelques millimètres) dans tout matériau conducteur. • Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplant. Ceci en facilite par conséquent l'utilisation. De même, aucune nuisance ou pollution n'est engendrée ni pour l'utilisateur ni pour l'environnement, contrairement, par exemple au ressuage largement utilisé, qui nécessite l'application de produits chimiques nocifs. • Transportabilité : le CND par CF ne nécessite pas de dispositif encombrant, et peut donc être effectué à des endroits difficilement accessibles moyennant un équipement portable. De même les contrôles à température élevées sont possibles. 	<ul style="list-style-type: none"> • La profondeur d'inspection dépend de la fréquence d'excitation. • La détection des défauts 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. • À compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection

I.6. CND par courants de Foucault

Le phénomène de courants de Foucault (CF) a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851. Il est défini comme suit : lorsqu'on applique un champ magnétique variable dans le temps sur un objet conducteur ou on déplace un objet dans un champ magnétique constant, il apparaît des courants induits qui s'appellent les courants de Foucault. Leur distribution et leur répartition dépendent du champ magnétique d'excitation, de la géométrie et des caractéristiques de la structure examinée (σ , μ) [Chelabi, 2016].

La technique de CND par courants Foucault, repose sur l'utilisation d'une bobine parcourue par un courant d'excitation variable dans le temps, et placée au voisinage de la pièce conductrice testée (appelée cible). Des courants induits se créent dans la pièce en formant des boucles avec la même fréquence que le courant d'excitation. Ces courants à leur tour créent un champ magnétique de réaction qui s'ajoute au champ d'excitation. La présence d'un défaut dans la pièce perturbera la circulation des courants de Foucault, autrement dit, la déviation de la circulation des courants Foucault proches du défaut, modifiera donc le champ magnétique résultant. Cette modification entraîne une variation de l'impédance de la bobine. La figure I.8 illustre le principe du CND par courants de Foucault [Chelabi, 2016]

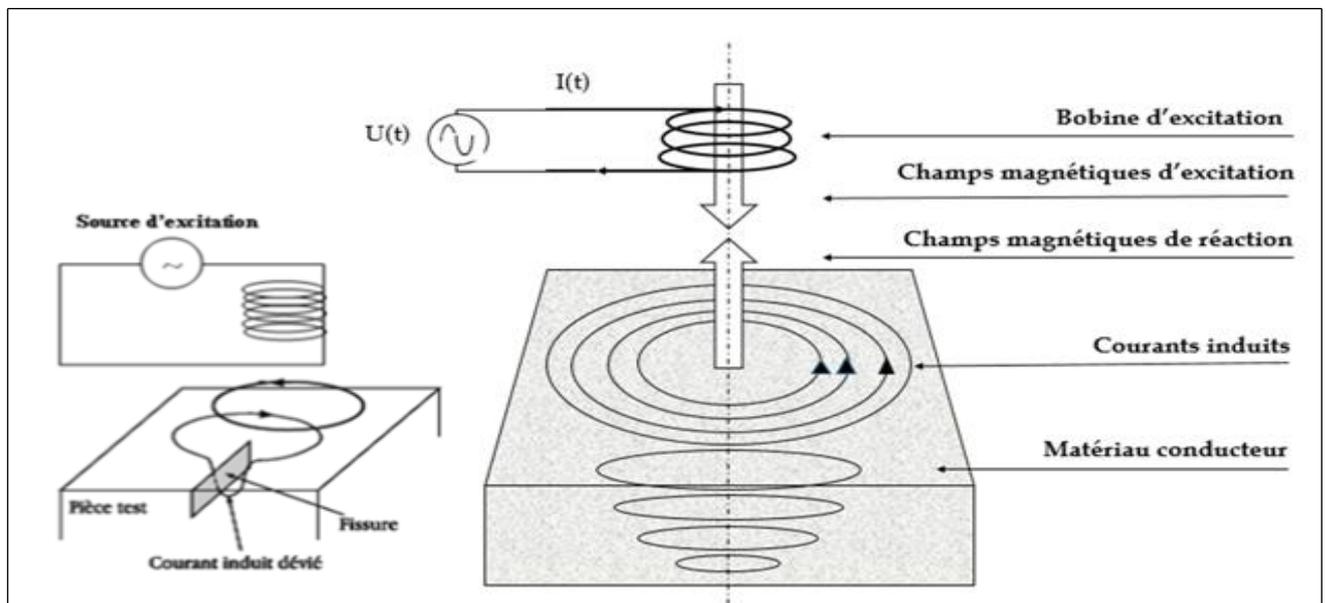


Figure I. 8: Schéma de principe du CND par courants de Foucault

I.6.1. Objectif du CND par courants de Foucault

Un capteur à courants de Foucault peut accomplir diverses tâches. Du fait que l'impédance du système capteur/pièce est en fonction des différentes caractéristiques électromagnétiques et géométriques. Cette technique est parfois utilisée pour la caractérisation géométrique et

électromagnétique, d'autre fois pour le contrôle de l'état de santé en cherchant et caractérisant les défauts [Dahia et al, 2014].

Caractérisation géométrique

- Mesure de l'entrefer.
- Mesure de l'épaisseur.

Caractérisation électromagnétique

- Mesure de la conductivité.
- Mesure de la perméabilité.

Contrôle de l'état de la santé

- Détection du défaut.
- Position du défaut.
- Taille du défaut.
- Forme du défaut.
- Propriété physique

1.6.2. Epaisseur de peau :

Le principe des capteurs inductifs est surtout utilisé pour détecter des défauts situés à proximité de la surface de la pièce étudiée, car les courants de Foucault ont tendance à se cantonner dans les couches proches de la surface du conducteur. Cette épaisseur moyenne δ (en m) dite de "peau" dans laquelle circulent les courants peut être estimée à l'aide de la formule [Lacroix,1996]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma\mu f}} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

σ : Conductivité électrique en [Siemens/m].

μ : Perméabilité magnétique en [H/m].

f : Fréquence de travail ($\omega = 2\pi f$: pulsation) en [Hz].

Les courants de Foucault, non homogènes dans la profondeur du matériau, sont régis par les équations de Maxwell. L'intensité des CF dans un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique σ [S/m] et une perméabilité magnétique μ [H/m], diminue avec la

profondeur notée z [m]. Dans le cas d'une pièce conductrice infiniment épaisse à surface plane, excitée uniformément à une fréquence f [Hz] par une onde plane, le module de la densité de courants J [A/m²] est exprimé par [Le Bihan,2003] :

$$J(z) = J_0 e^{-z\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \cos(\omega t - z\sqrt{\pi f \mu \sigma})$$

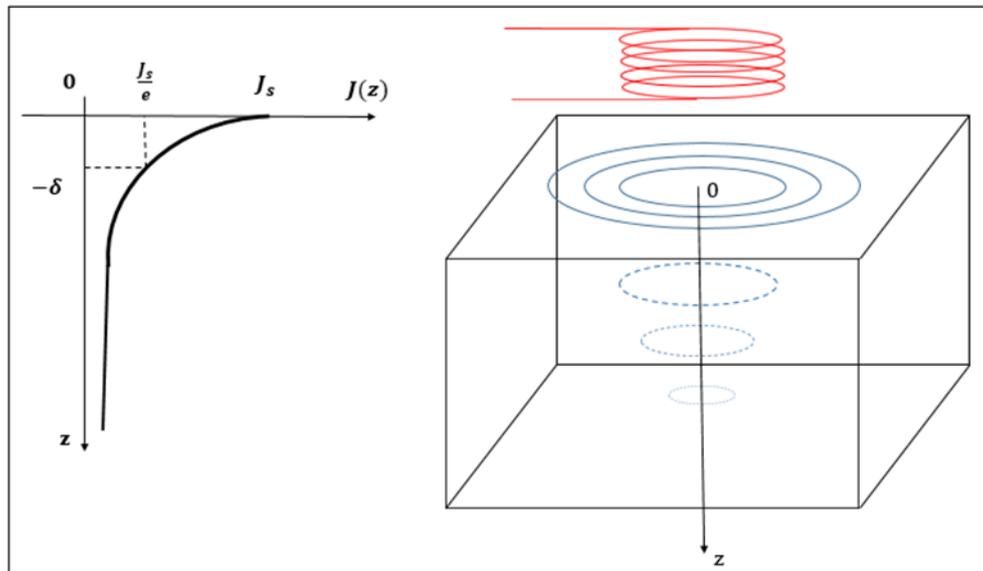


Figure I. 9: Répartition des courants de Foucault dans une pièce

I.6.3. Les avantages du CND par CF

- La simplicité

Le principal avantage des sondes à CF est leur facilité de mise en œuvre. Le contrôle est réalisé sans contact, et par conséquent sans utilisation de couplant. Le signal CF est obtenu directement et instantanément.

- L'intégration

La nature électrique du signal CF mesuré permet aussi de bénéficier fortement des avancées récentes au niveau de l'intégration des composants électroniques, en termes de réduction de volume comme d'augmentation des performances. Le signal CF est en effet directement utilisable pour d'éventuels traitements électroniques analogiques, suivis d'une numérisation et de traitements numériques ou informatiques. Cela permet d'envisager des appareils de contrôle à la fois plus petits, plus légers et plus rapides.

- Le coût

Un dispositif CF très simple est une unique bobine avec un générateur, un voltmètre et un ampèremètre. Il s'agit d'un dispositif très bon marché, qui même en augmentant la complexité

de la technologie ou de l'instrumentation (utilisation de multiplexeur, de détection synchrone, de capteurs de haute technologie), reste abordable et ne demande pas un investissement primordial trop important [Ravat, 2014].

I.6.4. Les inconvénients du CND par courants de Foucault

➤ La non-linéarité

Les équations différentielles ($\nabla \cdot \vec{H} = 0$) à ($\nabla \wedge \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$) ne sont pas linéaires par rapport aux paramètres constitutifs du matériau. Leurs solutions, comme la densité de courants définie par l'équation (I.2), ne le sont pas non plus. Cela entraîne une forte non-linéarité entre la géométrie des défauts situés dans la pièce à inspecter et la réponse obtenue avec une sonde CF. L'analyse des signaux produits est donc relativement complexe et l'opérateur doit être habitué à cette technique pour être efficace, c'est-à-dire réalisant un contrôle rapide et fiable.

➤ La résolution

Un défaut ponctuel de dimensions micrométriques dévie toutes les lignes de courants qui s'approchent de lui. Si l'émetteur fait une surface de l'ordre du millimètre carré, les courants induits parcourent une surface au moins égale voire plus grande que celle-ci. Par conséquent, le défaut micrométrique correspond à une réponse qui s'étend sur plusieurs millimètres carrés, ce qui a pour conséquence de détériorer nettement la résolution spatiale d'une sonde à courants de Foucault.

➤ L'effet de peau

L'équation (I.2) fait apparaître une décroissance exponentielle sur l'amplitude des courants : ceux-ci sont localisés à une faible profondeur. Ce phénomène, appelé effet de peau, a pour conséquence la difficulté voire l'impossibilité de détecter un défaut situé à une distance très supérieure à l'épaisseur de peau δ . En effet, les courants induits ont une amplitude inférieure à 95% de l'amplitude maximale au-delà d'une profondeur supérieure à 3δ .

➤ Le positionnement

L'induction des courants de Foucault est fonction du couplage entre la sonde et la pièce. Si celui-ci varie au cours de la mesure ou n'est pas celui attendu, la mesure sera faussée. Un décollement ou une inclinaison de la sonde par rapport à la surface de la pièce sont les deux principaux problèmes de positionnement rencontrés, qui conduisent à une variation parasite de

l'impédance mesurée. En particulier, le contrôle des surfaces non planes peut ainsi poser problème si la sonde ne se conforme pas à la surface. [Ravat, 2014]

I.7. Types de capteurs

Il existe de nombreuses façons pour réaliser et classer les sondes (capteurs) à courants de Foucault. Citons les deux types les plus rencontrés :

➤ Capteur à double fonction

C'est un capteur inductif constitué d'une seule bobine à double fonction, est chargé des deux fonctions : émission et réception du champ magnétique (Figure I.10). La mesure de l'impédance de la sonde informe sur la présence et l'ampleur du défaut.

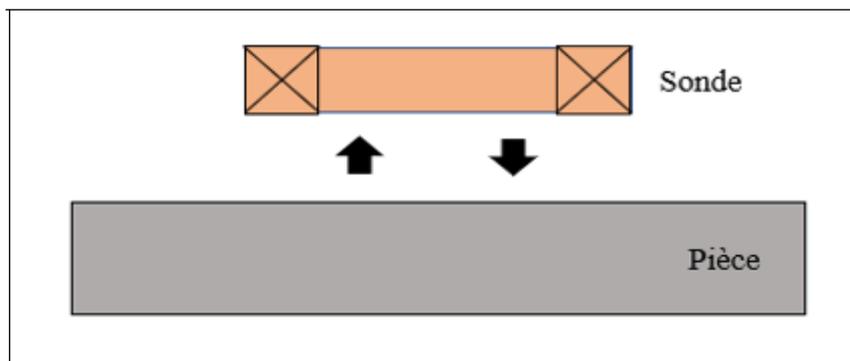


Figure I. 10: Capteur absolu

➤ Capteur à fonctions séparées

Ces capteurs possèdent un enroulement dédié à l'excitation et un autre à la mesure. Cette conception est souvent utilisée pour la détection de défaut de grande taille ou profond. Le principe de la détection est basé sur la traversée du champ d'une zone à une autre. La détection de ce genre de défaut nécessite l'augmentation des dimensions de la bobine d'excitation. Cette augmentation de la taille du capteur se fait au détriment de sa résolution spatiale lors de la réception. C'est alors qu'on associe la réception à une autre bobine de taille souvent plus petite que celle de l'émetteur. Les enroulements peuvent être alors enchevêtrés ou séparés.

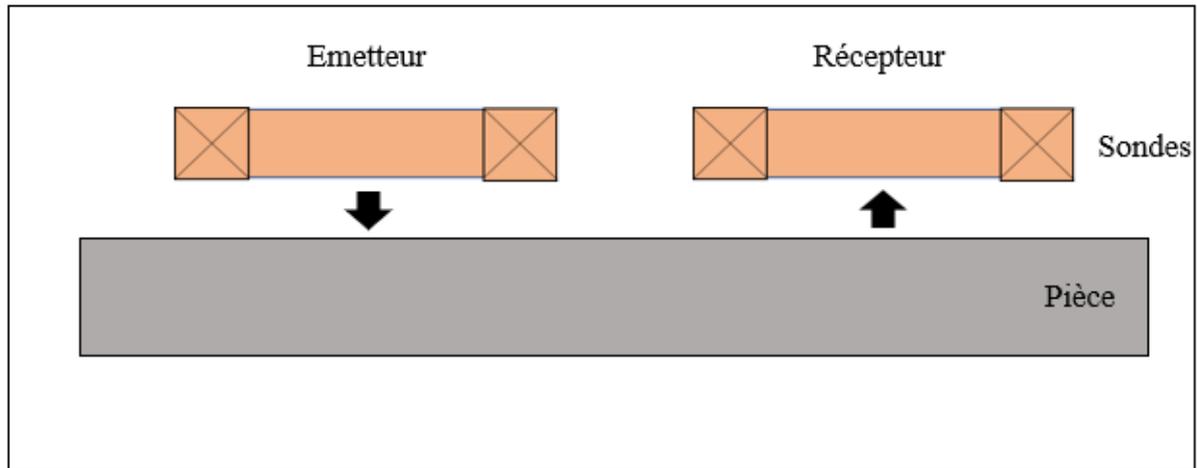


Figure I. 11: Capteur différentiel

I.8. Classification par mode de contrôle

En fonction de l'intensité du champ, qui dépend de caractéristique électromagnétique de la pièce à identifier ou à contrôle et des perturbations éventuelles, on compte deux modes de mesure :

➤ Capteur en mode absolu

Un capteur absolu est destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit à examiner par rapport à une référence fixe. Le signal récupéré par la bobine est très faible en comparaison au signal émis. C'est pourquoi on utilise, en contrôle par courants de Foucault, une mesure comparative. La méthode absolue utilise un capteur à double fonction et la mesure se fait par comparaison du signal reçu à une référence artificielle électronique. Ce mode de mesure permet d'accéder simultanément aux grandeurs utiles et perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau à tester), [Taleb et al, 2013] [Hellier, 2001] [Mephane, 1998].

➤ **Mode de contrôle compensé**

Pour s'affranchir des grandeurs perturbatrices, on réalise le mode absolu compensé. Dans ce mode de contrôle on utilise deux bobines.

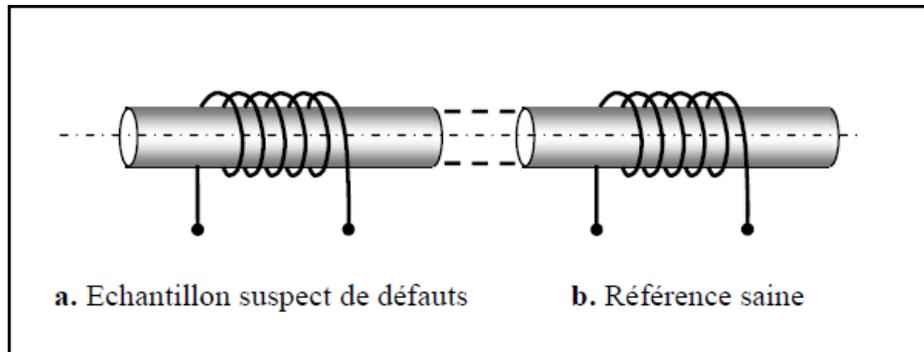


Figure I. 12: Mesure absolue compensée

➤ **Capteur en mode différentiel**

La mesure différentielle est une comparaison de deux mesures effectuées simultanément d'impédances de deux capteurs absolus dont les flux sont opposés. En effet, dans le cas d'une pièce saine l'impédance différentielle est nulle. Par contre, si la pièce présente une anomalie une valeur de l'impédance est signalée.

Le schéma de la figure (I.14) montre la mesure par un pont d'impédance, [Bouchala, 2009].

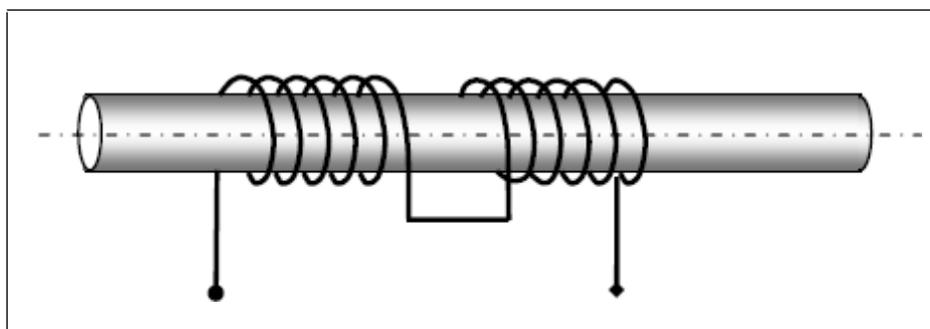


Figure I. 13: Mode différentiel

I.9. Éléments perturbateurs

Dans le domaine de contrôle et d'évaluation non destructifs par courants de Foucault, la température est le seul élément purement perturbateur. La perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau varient avec la température. Toute variation thermique devient très gênante pour les appareils qui assurent une mesure absolue tels que ceux destinés à des mesures d'épaisseur ou de détection d'anomalies.

I.10. 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, [Fillon, 1996], [Wanin, 1996].

➤ **Défauts de surface :**

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

- Les défauts ponctuels,
- Les défauts d'aspect.

➤ **Défauts internes :**

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, l'imagerie infrarouge et la neutronographie.

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les techniques de CND les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, et nous avons développé particulièrement le CND par courants de Foucault. Cette technique est basée sur la mesure de la variation de l'impédance complexe aux bornes du capteur. Cette grandeur, nous décrit les caractéristiques physiques et géométriques de la pièce à contrôler ainsi que son état de santé.

Chapitre II

Modélisation numérique des structures CND-CF

II.1. Introduction.....	20
II.2. Modélisation du dispositif de CND par CF	20
II.3. Mise en équations	21
II.4. Formulations duales en potentiels combinés	23
II.5. Formulation magnétodynamique	23
II.6. Méthodes de résolution	26
II.6.1 Méthodes analytiques	27
II.6.2. Méthodes numériques	27
II.7. Résolution des EDP par la MEF	29
II.8. Calcul de l'impédance	32
II.9. Conclusion	35

II.1. Introduction

Dans le domaine du CND par courants de Foucault, la modélisation numérique est devenue, grâce à la performance du matériel informatique, un outil majeur dans la conception des sondes et dans l'étude des performances de détection des systèmes. De manière générale la modélisation du CND par courants de Foucault est basée sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la complexité de la configuration à simuler, la résolution peut être analytique ou numérique. La résolution analytique des équations de Maxwell présente l'avantage d'être rapide et permet d'obtenir des résultats très précis. Cependant, la complexité des configurations de CND par courants de Foucault fait qu'une solution analytique est souvent impossible à obtenir. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques permettant d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées, comprenant des géométries quelconques de pièces, de défauts et de capteurs. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer la méthode des différences finies, la méthode des éléments de frontières, la méthode des intégrales de volume. La plus répandue des approches numériques est la méthode des éléments finis.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la méthode des éléments fini (MEF). Cette méthode est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles (EDP) en un système d'équations algébriques. D'une façon générale, la résolution d'un problème magnétique donné par la MEF inclut différentes étapes [Benguesmi, 2010].

Nous commencerons ce chapitre par décrire brièvement le problème à résoudre et les équations de Maxwell ainsi que les Lois constitutives du milieu associées. Ensuite, nous présenterons les différentes formulations magnétiques utilisables pour un tel problème, puis la formulation utilisée pour réaliser notre modèle 3D (\vec{T} - ϕ).

II.2. Modélisation du dispositif de CND par CF

Il s'agit des dispositifs constitués d'inducteurs filaires, de régions conductrices, non conductrices magnétiques ou amagnétiques et de sources de courant.

La modélisation de ces dispositifs peut être ramenée, dans le cas général, à un problème magnétodynamique type comme indiqué sur la figure (II.1). L'ensemble de ce système forme le domaine de calcul Ω de frontière Γ . [Adib,2014], [Taleb et al., 2013], [Lakhdari, 2011], [Slimane, 2008].

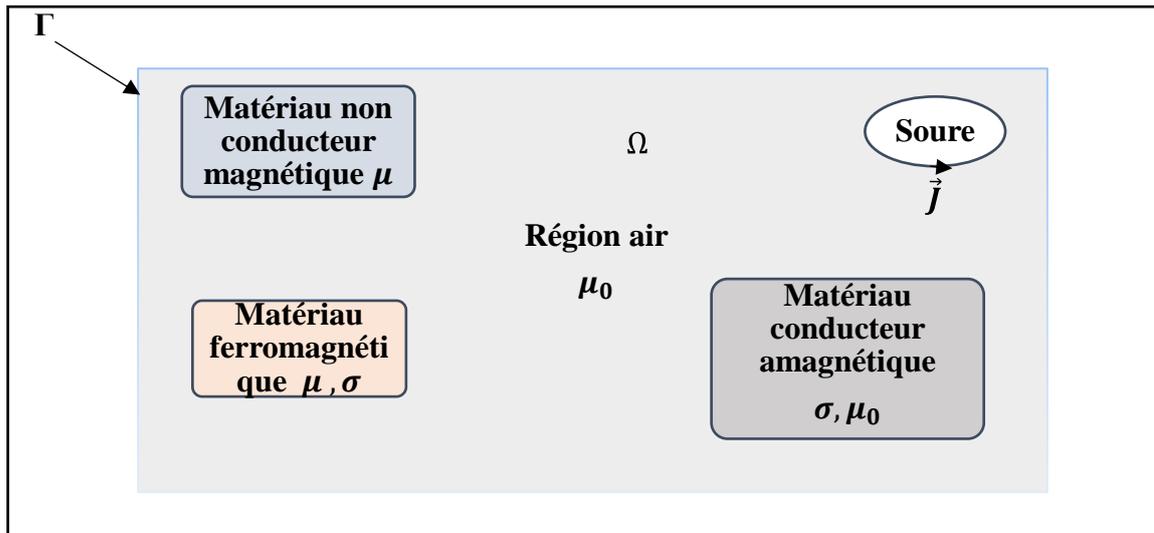


Figure II. 1: Cas général d'un problème magnétodynamique

L'objectif est d'évaluer les courants de Foucault dans la pièce défectueuse ainsi que la variation d'impédance de la bobine. Les dispositifs de CND que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire.

II.3. Mise en équations

La modélisation des interactions électromagnétiques qui se produisent entre deux pistes d'un circuit imprimé passe par l'élaboration d'un modèle physico-mathématique qui est basé sur les équations de Maxwell, les relations constitutives du milieu.

II.3.1. Equations de Maxwell

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques peut être décrit les équations de Maxwell qui décrivent, de façon générale, les lois de l'électromagnétique :

La première équation, dite équation de **Maxwell-Gauss** exprime le fait que le flux de champ électrique à travers une surface fermée et relie à la charge électrique contenue à l'intérieur de cette surface.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.1})$$

La deuxième équation, dite équation de **Maxwell-Faraday**, donne la relation entre la circulation du champ électrique sur un contour fermé et la variation temporelle du flux du champ magnétique à travers une surface qui s'appuie sur ce contour. C'est le phénomène d'induction.

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

La troisième équation, dit équation de **conservation du flux** exprime que le flux du champ magnétique à travers n'importe quelle surface fermée est nul. Il n'existe pas de monopoles magnétiques.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

La quatrième équation, dit équation de **Maxwell-Ampère**, exprime la relation entre la circulation du champ magnétique sur un contour fermé et le flux de courant à travers une surface s'appuyant sur ce contour.

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

Dans ce système d'équations, les relations (II.2) et (II.4) expriment le couplage entre les grandeurs électriques et magnétiques, les équations (II.1) et (II.3) expriment les lois de conservation.

II.3.2. Lois constitutives du milieu

Les équations de Maxwell sont générales et s'appliquent à tous les milieux. Pour prévoir le comportement des phénomènes électromagnétiques, il faut ajouter à ces équations des relations particulières aux milieux considérés : les relations de constitution. Ces relations se formulent de la façon suivante :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré [H/m].

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m].

ε : Permittivité électrique [F/m].

ε_r : Permittivité électrique relative du milieu considéré [F/m].

ε_0 : Permittivité électrique du vide, $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ [F/m].

σ : Conductivité électrique $[(\Omega \cdot m)^{-1}]$.

II.4. Formulations duales en potentiels combinés

Dans la littérature, il existe deux familles de formulations pour la résolution des équations de Maxwell. L'une repose sur le calcul du champ électrique et l'autre sur le calcul du champ magnétique. Cependant du fait des fortes discontinuités de certaines variables aux interfaces entre deux régions de propriétés différentes, la résolution directe des équations de Maxwell est délicate. Pour faciliter la résolution, ces équations sont transformées en équations de potentiels. Ceci conduit à la définition des formulations duales en potentiels combinés. Il est à noter qu'une formulation est entièrement définie par ces équations :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.8})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.10})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{II.11})$$

Avec les relations constitutives qui deviennent :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II.12})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.13})$$

Alors que les deux autres sont vérifiées dans la décomposition du champ. Cette décomposition met en évidence la dualité entre les deux groupes d'équations (II.8) - (II.9) d'une part et (II.10) - (II.11) d'autre part. Dans ce document, la modélisation des problèmes de CND par CF est faite en régime harmonique. La variation sinusoïdale des grandeurs dans le temps permet de travailler avec des variables complexes, les dérivées par rapport aux temps ∂t vont être remplacées par $j\omega$ ($\omega = 2\pi f$ la pulsation électrique avec f la fréquence utilisée).

II.5. Formulation magnétodynamique

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 basée sur le champ magnétique (H, T-Φ), comprend des formulations en H ou la formulation en J, [Benhadda, 2015].

II.5.1. Formulation en champ électrique \vec{E}

La formulation en champ électrique s'obtient en faisant la dérivée de l'équation Maxwell-Ampère (II.4) par rapport au temps, tout en supposant que la perméabilité est invariante par rapport au temps (cas des matériaux linéaires), la formulation s'écrit :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{E} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.14})$$

II.5.2. Formulation en champ magnétique \vec{H}

La combinaison des équations (II.10) et (II.12) conduit directement à l'équation à résoudre :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) + \sigma \frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.15})$$

II.5.3. Formulation \vec{A} -V :

D'après (III.3) on a :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \Rightarrow \exists \vec{A} / \vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{II.16})$$

De l'équation (II.5):

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

En combinant (II.16) et (II.2) on trouve :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \quad (\text{II.18})$$

D'après (II.18) on a :

$$\nabla \wedge (\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) = 0 \Rightarrow \exists \frac{V}{\vec{E}} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overline{\nabla V} \quad (\text{II. 19})$$

D'où :

$$\vec{E} = -\overline{\nabla V} - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II. 20})$$

En combinant les équations (II.20) et (II. 7) :

$$\vec{j} = -\sigma \overline{\nabla V} - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.21})$$

On pose :

$$\vec{j}_s = -\sigma \overline{\nabla V} \quad (\text{II.22})$$

$$\vec{j} = \vec{j}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.23})$$

De (II.4) et (II.16) et (II.23) on aura :

$$\overline{\nabla} \left(\frac{\overline{\nabla} \wedge \vec{A}}{\mu} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{j}_s \quad (\text{II. 24})$$

C'est l'équation magnétodynamique en termes de \vec{A} .

II.5.4. Formulation \vec{T} - ϕ

La formule $\vec{T} - \phi$, décrit la distribution du champ électromagnétique par l'utilisation du potentiel vecteur électrique T^{\rightarrow} et du potentiel scalaire magnétique Φ . Cette formulation a l'avantage de permettre une réduction du coût de calcul en diminuant les degrés de liberté de trois à un dans toutes les zones non conductrices [LE FLOCH, 2002].

Pour la solution du problème nous considérons une autre fois la condition de la continuité

$$\overline{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (\text{II.25})$$

A partir de l'équation (II.25), l'expression de la densité de courants en termes de potentiel vecteur électrique est donnée par l'équation :

$$\vec{j} = \overline{\nabla} \wedge \vec{T} \quad (\text{II.26})$$

On peut noter des équations (II.4) et (II.26) que T^{\rightarrow} et H^{\rightarrow} diffère par le gradient scalaire Φ :

$$\vec{H} = \vec{T} - \nabla \Phi \quad (\text{II.27})$$

La combinaison des équations (II.2), (II.5) et (II.7) nous donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \nabla \Phi) = 0 \quad (\text{II.28})$$

A partir de l'équation (II.3) on obtient :

$$\vec{\nabla} \cdot (\mu(\vec{T} - \nabla \Phi)) = 0 \quad (\text{II.29})$$

Dans l'air l'expression du champ magnétique est réduite à :

$$\vec{H} = -\nabla \Phi \quad (\text{II.30})$$

En remplaçant (II.30) dans (II.3) :

$$-\vec{\nabla} \cdot \mu \nabla \Phi = 0 \quad (\text{II.31})$$

La divergence de \vec{T} n'est pas encore définie et par conséquent \vec{T} et Φ restent ambigus. Pour y remédier on utilise l'une des jauges communément utilisées en électromagnétisme en l'occurrence la jauge de Coulomb :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{T} = 0 \quad (\text{II.32})$$

Cette condition nous autorise à rajouter à l'équation (II.28) le terme :

$$\vec{\nabla} \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) \quad (\text{II.33})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) - \vec{\nabla} \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \nabla \Phi) = 0 \quad (\text{II.34})$$

C'est ce modèle que nous avons adopté pour nos simulations en 3D.

II.6. Méthodes de résolution

La résolution des formulations électromagnétiques revient à résoudre des équations aux dérivées partielles (EDP). Cette résolution joue un rôle très important pour la modélisation des dispositifs électromagnétique. Il existe plusieurs méthodes pour la résolution des EDP, on mentionne deux méthodes [Nehal, 2009]

II.6.1 Méthodes analytiques

La résolution analytique des équations de Maxwell présente l'avantage d'être rapide et permet d'obtenir des résultats très précis. À titre d'exemple, nous pouvons citer les travaux de [Dodd & Deeds, 1968], [Theodoulidis, 2003] et [Theodoulidis, 2005] qui ont procédé à des résolutions directes des équations de Maxwell, par la méthode de séparation des variables. Parmi ces travaux on retrouve :

- ✓ Une bobine à air axisymétrique de section rectangulaire située au-dessus de deux couches métalliques parallèles de matériaux différents.
- ✓ Une bobine de section rectangulaire encerclant deux cylindres métalliques concentriques [Dodd & Deeds, 1968].

Des développements plus récents permettent notamment de considérer le cas d'une bobine avec noyau magnétique sur une pièce plane [Theodoulidis, 2003] ou le cas d'une bobine à air inclinée sur une pièce plane, [Theodoulidis, 2005]. Cependant, la complexité des configurations de CND par CF fait qu'une solution analytique est souvent soit impossible à obtenir, soit très complexe et très coûteuse en ressources de calcul. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques.

II.6.2. Méthodes numériques

La plupart du temps, où les solutions des équations de Maxwell sont difficiles ou impossibles, il faut utiliser les méthodes numériques. Ces dernières, permettent d'obtenir une solution Proche de la solution exacte du problème étudié. Ci-dessous, nous allons présenter les méthodes numériques les plus utilisées.

II.6.2.1. Méthode des différences finis

La méthode des différences finis est l'une des techniques de résolution approchée d'équations aux dérivées partielles qui consiste à résoudre un système de relations (schéma numérique) liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres. En apparence, cette méthode est en général simple à mettre en œuvre, elle procède en la discrétisation du domaine d'étude (l'espace discrétisé ou maillage) et des opérateurs de dérivation/différentiation. Une discrétisation des opérateurs différentiels (dérivées premières, secondes, etc., dérivées partielles) peut être obtenue par les formules de Taylor, en particulier celle de Taylor avec reste intégral permet de mesurer les erreurs [Hamidaoui, 2016]

II.6.2.2. Méthode des volumes finis

En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et celle des éléments finis. Contrairement à la méthode des différences finies qui met en jeu des approximations des dérivées, les méthodes des volumes finis et des éléments finis exploitent des approximations d'intégrales. Toutefois, la méthode des volumes finis se base directement sur la forme dite forte de l'équation à résoudre, alors que la méthode des éléments finis se fonde sur une formulation variationnelle de l'équation (on parle aussi de formulation faible) [Sbai, 2016].

II.6.2.3. Méthode des éléments finis

Cette méthode est très couramment employée lors de l'étude des systèmes électromagnétiques complexes. Elle permet d'obtenir des résultats de calcul avec une bonne précision et d'étudier de façon précise la répartition interne du flux magnétique. Elle consiste à discrétiser tout le domaine d'étude en des éléments finis (tétraèdres, prismes...). La MEF repose sur la transformation des EDP à un système d'équations algébriques (système matriciel).

Sans doute ce sont les éléments finis qui occupent une grande place dans la modélisation. Contrairement à la MDF, les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes, ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul par la prise en compte de différents types de fonctions d'interpolation des variables. La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. La méthode conduit à des systèmes algébriques de grande taille, et par conséquent nécessite une mémoire importante des calculateurs. L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important, [Lakhdari, 2011], [Belkhiri, 2003], [Khene, 2006]

Cette méthode est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques, Figure (II. 2) :

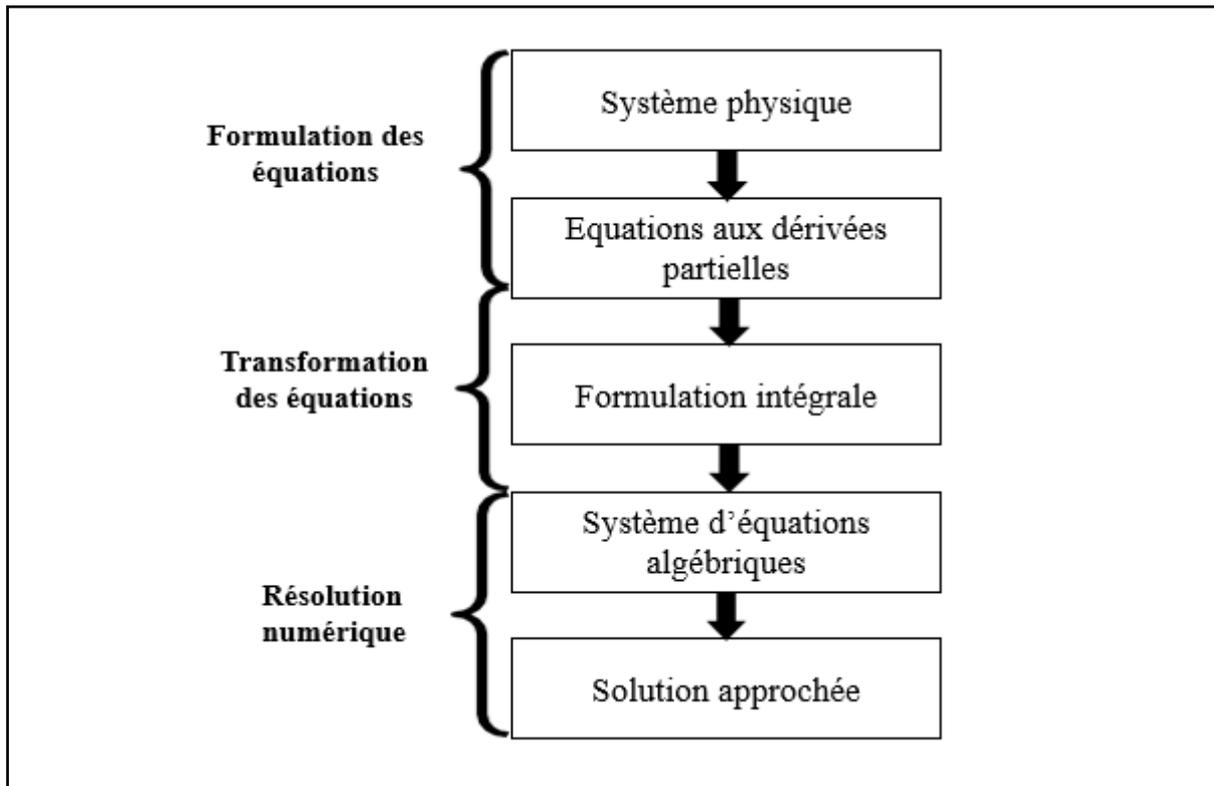


Figure II. 2 : Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par MEF

II.7. Résolution des EDP par la MEF

II.7.1. Etapes de résolution par la MEF

D'une façon générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes :

- Obtention de la formulation variationnelle du problème et définition des espaces fonctionnels de solutions admissibles, ou bien par la méthode des résidus pondérés [Hamel, 2018].
- Réalisation d'un maillage, correspondant à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangles, tétraèdres, hexaèdres...) sur lesquels les champs sont écrits en termes d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base à support local.
- Calcul des matrices élémentaires qui, après assemblage, génèrent un système matriciel creux.
- Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème.

II.7.1.1. Maillage éléments finis

L'approche de base de la MEF est de subdiviser le domaine d'étude en un nombre finis de sous domaines appelés éléments. Pour des domaines d'étude à une, deux ou trois dimensions, des éléments classiques peuvent être définis selon le degré de la courbe d'interpolation qui lui est associés. On rencontre généralement, des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques [Hamel, 2018]. Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

a) Eléments à une dimension

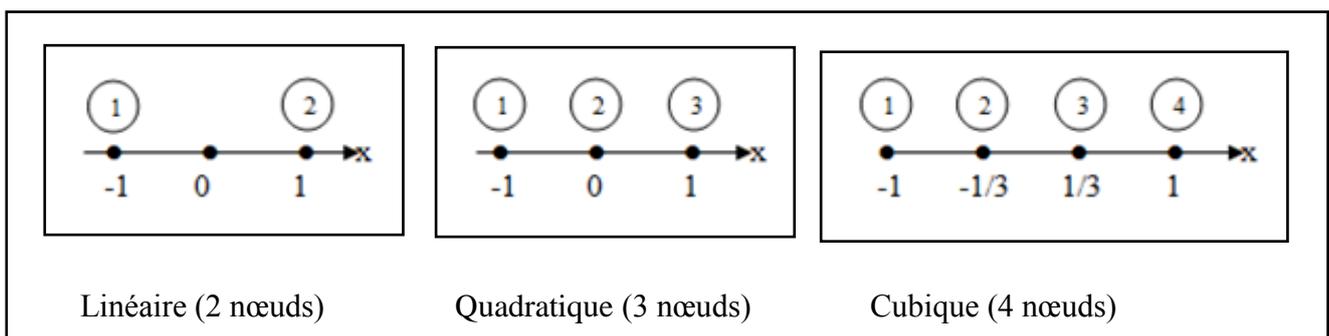
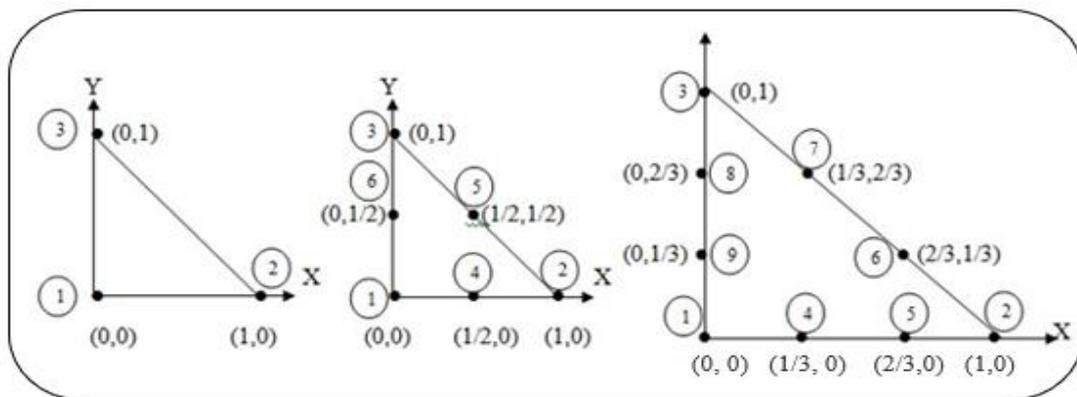


Figure II. 3: Eléments à une dimension

b) Eléments à deux dimensions

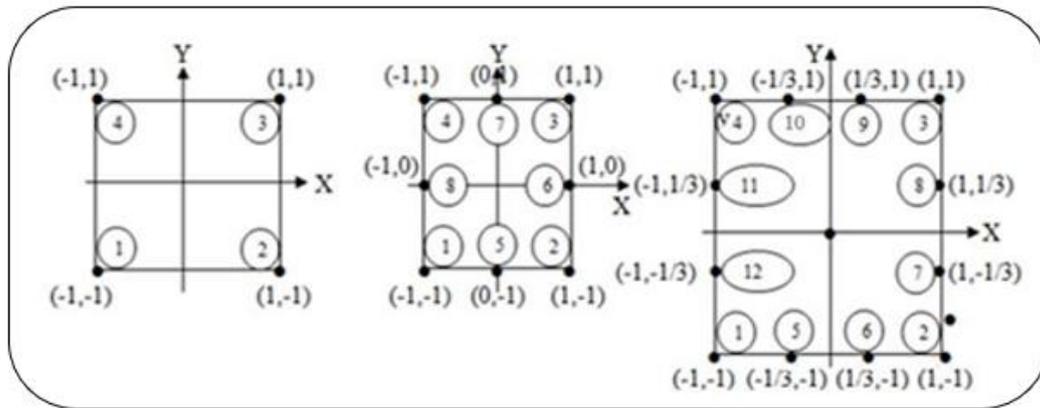
• Eléments triangulaires



Linéaire (3 nœuds) Quadratique (6 nœuds) Cubique (9 nœuds)

Figure II. 4: Élément triangulaire à deux dimensions

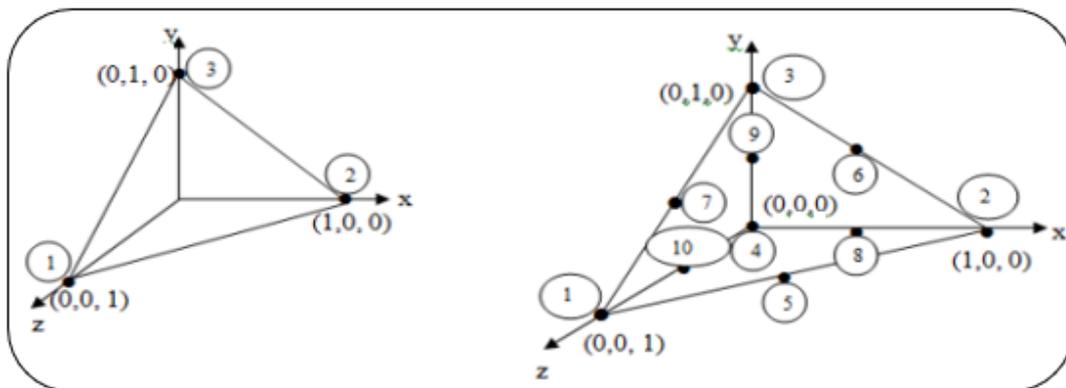
• **Eléments carrés**



Linéaire (4 nœuds) Quadratique (8 nœuds) Cubique (12 nœuds)

Figure II. 5 : Eléments carré à deux dimensions

c) **Eléments à trois dimensions**



Linéaire (3 nœuds) Quadratique (8 nœuds)

Figure II. 6: Eléments à trois dimensions

II.7.1.2. Forme de la matrice élémentaire :

Il s'agit de mettre sous forme matricielle les formes intégrales de l'équation à résoudre. Dans chaque domaine élémentaire on trouve une équation de la forme ci-dessous :

$$[K]^e \cdot [A]^e = [F]^e \tag{II.18}$$

Avec $[K]^e$ c'est la matrice associée à l'élément considéré. Les coefficients dépendent des coordonnées des nœuds de l'élément. Les composantes de $[A]^e$ sont les inconnues aux nœuds du même élément. La vectrice source élémentaire $[F]^e$ prend en compte les conditions aux limites éventuelles en certains nœuds de l'élément considéré. En écrivant l'équation (II.18) pour tous les éléments, on obtient une série d'équations algébriques.

II.7.1.3. Résolution du système algébrique :

L'assemblage est l'opération qui consiste à construire la matrice globale $[K]$ et le vecteur global $[F]$ à partir des matrices élémentaires $[K]^e$ et des vecteurs élémentaires $[F]^e$.

On obtient ainsi un système de la forme :

$$\sum_{n=1}^{ne} [k]^e \cdot [A]^e = \sum_{n=1}^{ne} [F]^e \quad (\text{II.19})$$

N'étant le nombre d'éléments dans le domaine d'étude.

Ainsi nous obtenons un système d'équations algébriques de la forme :

$$[K] \cdot [A] = [F] \quad (\text{II.20})$$

$[K]$ est la matrice de rigidité magnétique globale, obtenue par la sommation des matrices élémentaires étendues et $[F]$ c'est le vecteur source global.

La MEF permet de traiter des configurations complexes ce qui constitue un avantage par rapport aux autres méthodes. C'est bien cette méthode qu'on va utiliser dans notre étude (modélisation d'un système capteur cible).

II.7.1.4. Fonction d'interpolation :

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de Pascal, donné ci-dessous :

1	_____	Ordre0
U V	_____	Ordre1
U² UV V²	_____	Ordre2
U³ U²V UV² V³	_____	Ordre3

Figure II. 7: Triangle de Pascal

II.8. Calcul de l'impédance

Une fois les valeurs du potentiel vecteur magnétique tout nœud de la région maillé sont déterminées, l'impédance de la bobine qui est notre paramètre d'intérêt peut être calculée. Deux différentes approches couramment utilisées pour l'estimation de cette valeur, sont considérées : la méthode directe et la méthode l'énergie, [Bensalah, 2012].

II.8.1. Méthode directe

L'impédance d'une seule spire de bobine (sonde) de rayon r portant un courant alternatif I_s est donné par :

$$Z = \frac{V}{I_s} \quad (\text{II.21})$$

Où V est la tension induite dans la bobine, exprimée en termes de l'intensité de champ électrique E comme :

$$V = - \iint E \, dl \quad (\text{II.22})$$

A partir de l'équation :

$$E = - \text{grad}(v) - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (\text{II.23})$$

En régime harmonique :

$$\frac{\partial A}{\partial t} = j \cdot \omega A \quad (\text{II.24})$$

Nous avons :

$$E = -j\omega A - \text{grad}(v) \quad (\text{II.25})$$

De plus la tension induite est indépendante du potentiel scalaire ($\text{grad}(V)=0$), en remplaçant (II.25) dans (II.22), nous aurons :

$$V = j\omega \iint A \, dl \quad (\text{II.26})$$

A partir de l'équation (III.26) l'impédance de la bobine est donnée par :

$$Z = \frac{j\omega}{I_s} \iint A \, dl \quad (\text{II.27})$$

Qui, pour une seule spire de bobine de rayon r est :

$$Z = j \frac{2\pi\omega r A}{I_s} \quad (\text{II.28})$$

L'impédance du capteur est composée de deux parties, partie réelle qui est la résistance et une partie imaginaire, la réactance.

L'impédance de la bobine est toutefois calculée de façon approximative en utilisant la méthode des éléments finis. Considérons l'échantillon de la bobine, discrétisé par éléments triangulaires. Si les dimensions de ces éléments sont petites alors le potentiel vecteur

magnétique de toutes les spires couvertes par l'élément (i) peut être approximé par la valeur centrale a_i et similaire les rayons de toutes les spires de l'élément, peuvent être approchés par la valeur centrale r_{ci} . A partir de l'équation (III.28) l'impédance pour chaque spire à l'intérieur de l'élément i est donnée par :

$$Z=j \frac{2\pi\omega r_{ci} A_{ci}}{I_s} \quad (\text{II.29})$$

Si N_s est le nombre total de spire de la bobine dans l'échantillon, N_t tours/m, est la densité de spire de l'élément, et la surface de l'élément, l'impédance totale de l'ensemble des spires dans l'élément (i) est donnée par :

$$Z=j \frac{2\pi\omega r_{ci} A_{ci} a_i N_t}{I_s} \quad (\text{II.30})$$

Si le nombre d'éléments dans l'échantillon de la bobine est N_c alors l'impédance total est donnée par :

$$Z=j \frac{2\pi\omega N_t}{I_s} \sum_{i=1}^{N_c} a_i r_{ci} A_{ci} \quad (\text{II.31})$$

L'impédance de la bobine dans un problème 2D ou axisymétrique peut être calculée en utilisant de la méthode expliquée ici. Cette méthode prend la valeur du potentiel vecteur magnétique constante suivant la longueur du dispositif qui est parallèle à la source dans ce cas le plan d'étude est (x, o, y) ou dans la direction circumférentielle de la bobine (cas axisymétrique). Une autre méthode de calcul de l'impédance est basée sur le calcul des énergies stocké et dissipé est expliqué dans la section suivante.

II.8.2. Méthode de l'énergie

L'impédance d'une bobine peut être calculée à partir de l'énergie du système, puisque l'inductance et la résistance sont respectivement associées à l'énergie stockée :

$$W=\frac{1}{2} \iiint B \cdot H \cdot dv \quad (\text{II.32})$$

En supposant la relativité constante dans chaque sens, l'énergie stockée dans un élément fini de volume V_i peut être écrite, en termes des composantes de B seule sous la forme :

$$W_i=\frac{1}{2} V(B_{ri}^2+B_{zi}^2)V_i \quad (\text{II.33})$$

En additionnant sur tous les éléments (N) de la région du maillage, l'énergie stockée total est donnée par :

$$W=\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} V (B_{ri}^2+B_{zi}^2)V_i \quad (\text{II.34})$$

L'inductance de la bobine peut alors être calculée par :

$$L=2\frac{W}{I_s^2} \quad (\text{II.35})$$

Où I_s est le courant dans la bobine de la source. La résistance de la bobine est associée à l'énergie dissipée dans le système. L'énergie dissipée dans un élément fini de volume V_i est donnée par :

$$P_i=\frac{J_i^2 V_i}{\sigma} \quad (\text{II.36})$$

Où J_i est la densité du courants induit définie par :

$$J_i = -j\omega\sigma A_{ci} \quad (\text{II.37})$$

Où A_{ci} est la valeur du potentiel vecteur magnétique central pour l'élément (i).

Remplaçons l'équation (III.37) dans (III.36) et additionnons sur tous les éléments de la région du maillage, l'énergie dissipée total est donnée par :

$$P=\sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N V_i w^2 \sigma A_{ci}^2 \quad (\text{II.38})$$

La résistance de la bobine est donnée par :

$$R=\frac{P}{I_s^2} \quad (\text{II.39})$$

L'impédance de la bobine est définie par :

$$Z=R+j\omega L \quad (\text{II.40})$$

II.9. Conclusion

Les équations de Maxwell et les lois de constitutives du milieu permettent avec un judicieux raisonnement d'aboutir à une modélisation des phénomènes électromagnétiques sous forme d'équations aux dérivées partielles. Ces équations peuvent être résolues de diverses manières.

Dans ce chapitre, la modélisation des problèmes électromagnétiques liés aux équations de Maxwell dans le domaine CND-CF a été présentée, les différentes formulations en champs électrique et magnétique ont été illustrées, ainsi que les méthodes de résolution des problèmes direct ont été abordée. Sur le plan informatique, la méthode des éléments finis présente l'avantage de pouvoir traiter les géométries complexes et de tenir compte de l'hétérogénéité des matériaux.

Le chapitre suivant sera consacré à la simulation du CND-CF, cette approche est intégrée dans le logiciel Ansys-Maxwell qui permet de simuler avec efficacité l'interaction capteur/pièce avec défauts.

Chapitre III

Simulation numérique du CND-CF d'une structure multicouche rivetée

III.1. Introduction	37
III.2. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell.....	37
III.3. Présentation application Benchmark	38
III.4. Simulation 1 : Simulation d'un système plaque/capteur sans défaut	40
III.5. Simulation d'un système plaques/capteur avec défaut.....	43
Configuration I : Défaut surfacique.....	43
Configuration II : Défaut enfouis	49
III.6. Conclusion.....	54

III.1. Introduction

Le contrôle non destructif par courants de Foucault est employé pour inspecter des objets conducteurs. Afin de concevoir des systèmes de contrôle optimisés et démontrer leurs performances, les outils de simulations permettant de simuler et étudier les interactions entre la sonde et la pièce à contrôler, jouent un rôle prépondérant et deviennent de plus en plus riches en configuration et précises dans les résultats.

Construire un modèle électromagnétique d'un système constitué par une sonde, une pièce et une inhomogénéité que l'on souhaite détecter et/ou caractériser, permet de prévoir les conséquences des différents choix concernant la géométrie de la sonde, les matériaux à utiliser pour une application donnée sans devoir réaliser des prototypes coûteux en termes de temps et dépenses [Zorni, 2012].

Dans le domaine du CND par courants de Foucault, la modélisation numérique par éléments finis (MEF) est devenue grâce à la performance du matériel informatique, un outil majeur dans la conception des sondes et dans l'étude des performances de détection des défauts par courants de Foucault.

Dans ce chapitre, on présentera, en premier lieu, le modèle multicouche proposé ainsi que les caractéristiques géométriques et physiques, puis nous passerons à la modélisation et la simulation des défauts de type fissure, ensuite une validation du modèle sera proposée par comparaison avec les résultats expérimentaux, Les défauts présentant ce type de géométrie sont fréquemment rencontrés en CND-CF, notamment en aéronautique. La modélisation des systèmes capteurs/pièces se fera par la méthode des éléments finis, intégrée dans le logiciel Ansys-Maxwell.

III.2. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell

Ansys-Maxwell est un logiciel leader dans la conception, l'analyse et l'optimisation 2D et 3D des dispositifs électromagnétiques, tels que les machines électriques tournantes, les transformateurs, les actionneurs, des isolateurs, des bobines...etc. Ansys-Maxwell utilise l'approche par éléments finis pour résoudre des équations de Maxwell et le calcul du champ électromagnétique dans les structures avec la prise en compte des conditions aux limites [Testoni, 2003].

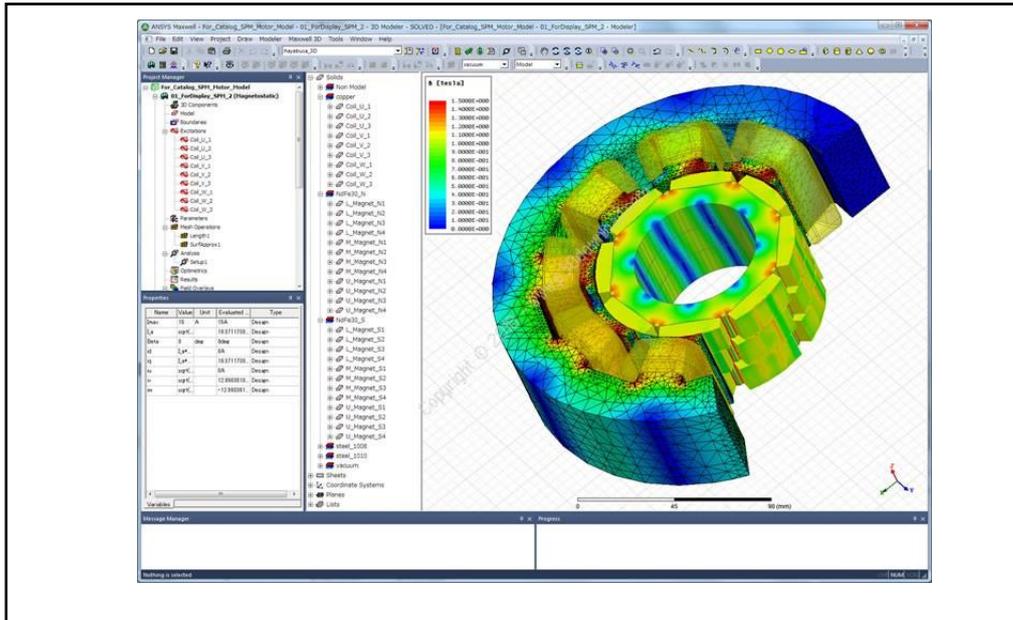


Figure III. 1 : La fenêtre Maxwell 3D

III.3. Présentation application Benchmark

Le problème traité est celui du Benchmark proposé pour simuler les défauts de type fissure dans les structures rivetées d'avions. Il est décrit par la figure III.6 et le tableau III.1. Deux plaques d'aluminium ont été utilisées dans les expériences pour simuler une structure multicouche. Les deux plaques ont des dimensions de 300×300 mm, une épaisseur de 2 mm et un trou à leur centre. De plus, l'un d'elles présente une fente étroite simulant une fissure adjacente au trou et dans une direction radiale par rapport à celui-ci. Si nous désignons la plaque sans fissure par A et celle avec la fissure par B, nous avons effectué des mesures pour les deux configurations suivantes qui sont nommées en fonction des plaques utilisées et de leur position une fois collées. [Martinos et al., 2014]

- 1) AB : plaque-A placée au-dessus de la plaque-B (fissure de la couche inférieure).
- 2) BA : plaque-B placée au-dessus de la plaque-A (fissure de la couche supérieure).

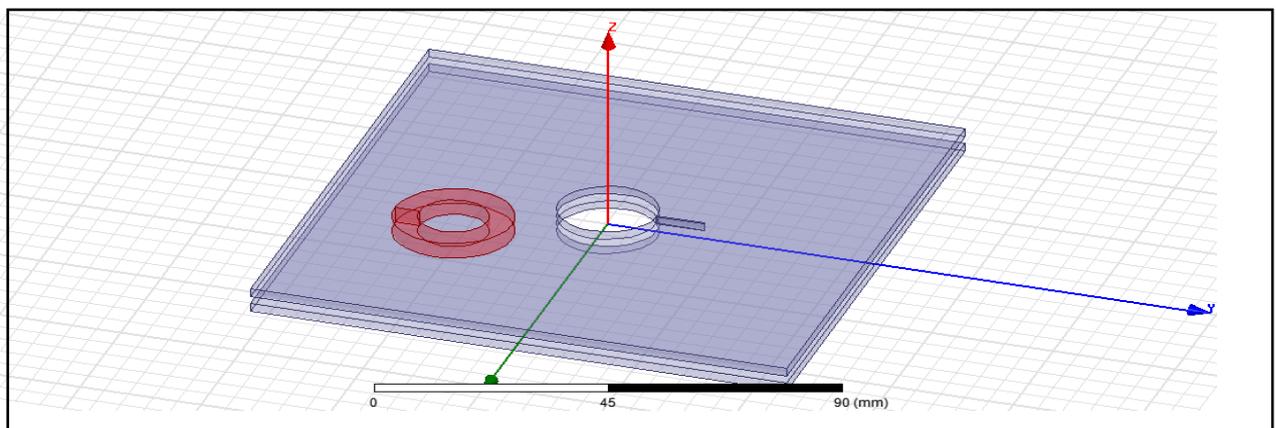


Figure III. 2 : Géométrie du Benchmark

La figure III.2 représente le système simulé, il s'agit d'une bobine à air qui se déplace au-dessus de deux plaques métalliques comportant une fissure débouchante orientée selon l'axe Oy. La fréquence et la distance bobine-pièce (lift-off) sont toutes les deux imposées et la variation de l'impédance, $\Delta Z = Z - Z_s$, de la sonde (bobine) est mesurée en fonction de la position de celle-ci. Z est l'impédance de la sonde en présence de la fissure et Z_s est l'impédance de sonde sans fissure. Tous les résultats sont normalisés par rapport à la valeur de l'impédance du capteur dans l'air Z_{max} . Les différents paramètres du système sont listés dans le Tableau (III.1) [Martinos et al., 2014].

Tableau III 1: Les paramètres du Benchmark

Paramètres	Valeurs
Bobine	
Rayon intérieur	7mm
Rayon extérieur	12mm
Hauteur	4mm
Lift-off	1.082mm
Nombre de spires	1650
Fréquences	1khz et 5khz
Plaques (A&B)	
Epaisseur	2mm
Conductivité	17.34MS/m
Gap	70 μ m
Fissure	
Longueur	9.8mm
Epaisseur	0.234mm

La variation d'impédance obtenue pour la bobine est comparée aux valeurs expérimentales du Benchmark. Le changement de la géométrie dû au déplacement du capteur par rapport à la position de la fissure nécessite le remaillage complet du domaine [Cardelli et al., 2005].

A chaque position (k) du capteur un maillage et un calcul 3D sont réalisés pour calculer l'impédance correspondante.

II.4. Simulation 1 : Simulation d'un système plaque/capteur sans défaut

Dans cette simulation, seul le trou de 10mm de diamètre est présent, traversant le milieu des deux plaques d'aluminium.

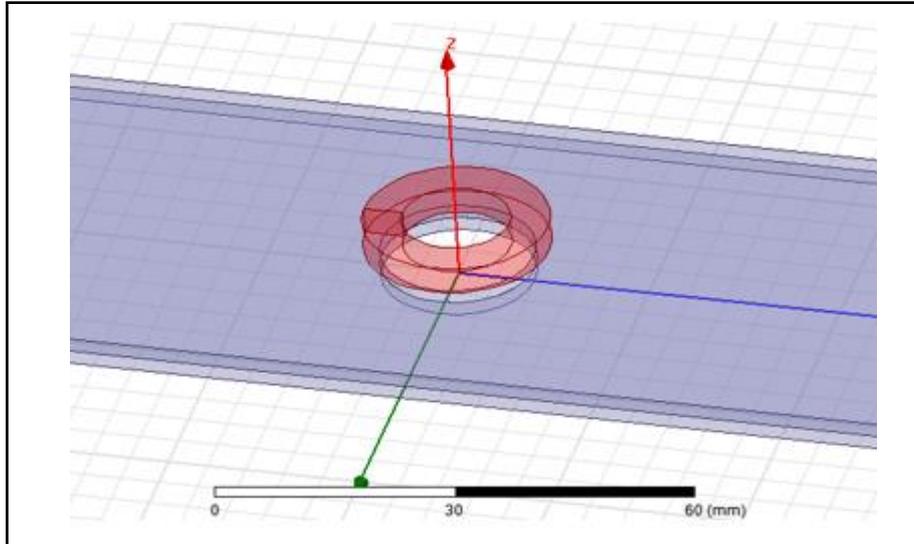


Figure III. 3 : Géométrie de la Simulation 1

Le signal produit à 5 kHz est représenté sur la figure III.4. Nous avons comparé les résultats numériques avec les résultats expérimentaux et nous remarquons que ce dernier est symétrique par rapport au centre du trou situé à ($x = 0$ et $y = 0$). Le signal obtenu est en bonne concordance avec le signal mesuré.

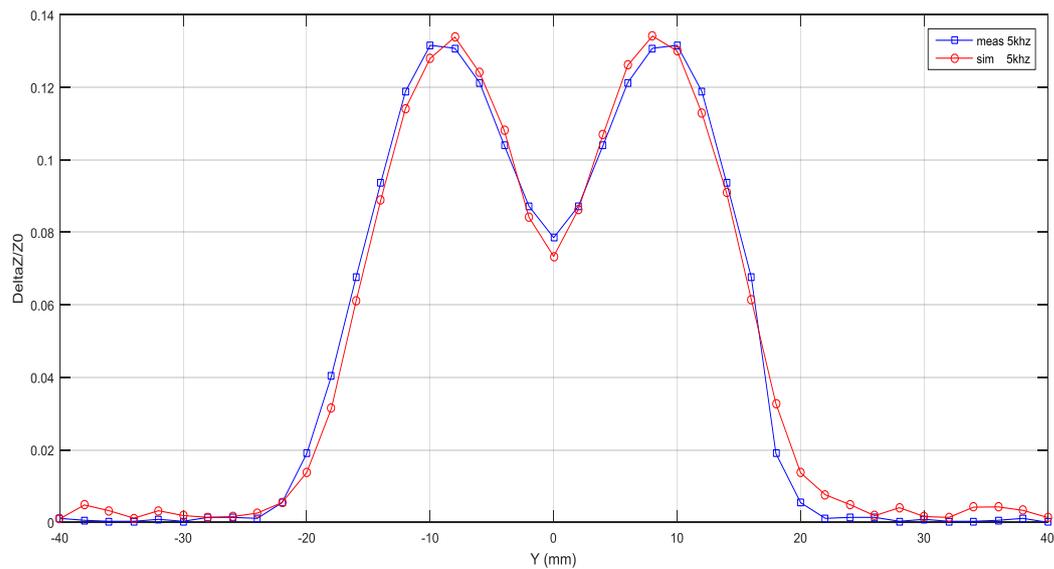


Figure III. 4 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur

III.4.1 Maillage

Le maillage du système capteur/plaque pour différentes positions du capteur est donné par les figures (III.5, III.6, III.7). Nous remarquons que la densité du maillage est plus importante près de la source et elle diminue en s'éloignant de cette dernière.

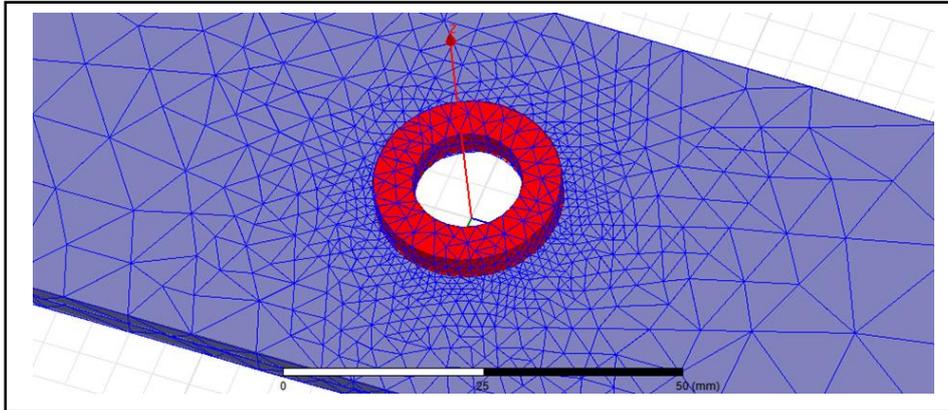


Figure III. 5 : Maillage au milieu du trou

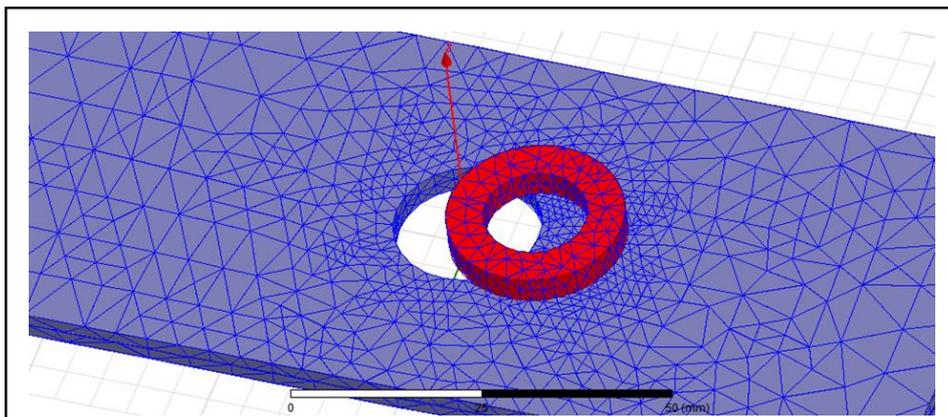


Figure III. 6 : Maillage à l'extrémité du trou

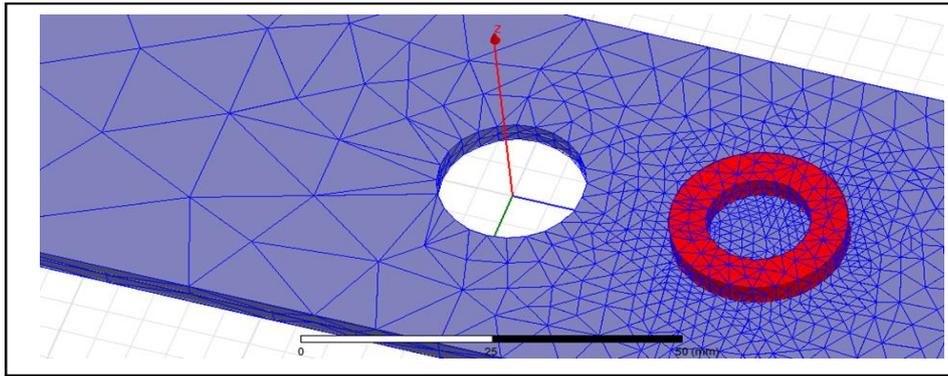


Figure III. 7 : Maillage dans la zone saine

III.4.2. Distribution de courants de Foucault

Les figures (III.8, III.9 et III.10) montrent les cartographies des courants de Foucault en fonction de la position du capteur. Les trois images montrent bien que, au tour du trou, la répartition du champ réfléchi va se modifier et de ce fait l'impédance du capteur.

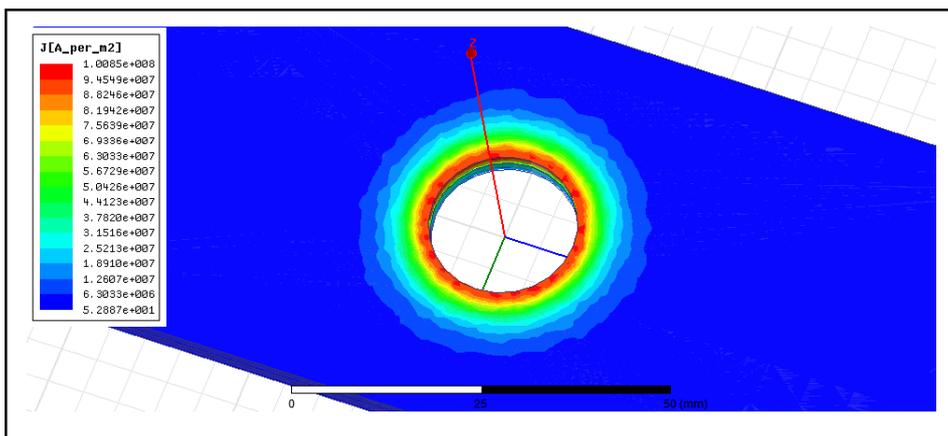


Figure III. 8: Densité du courant au milieu du trou

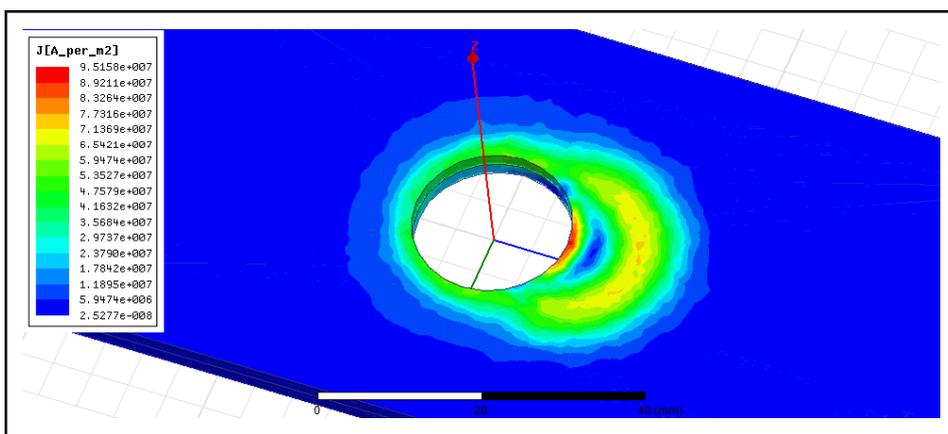


Figure III. 9 : Densité du courant induit à l'extrémité du trou

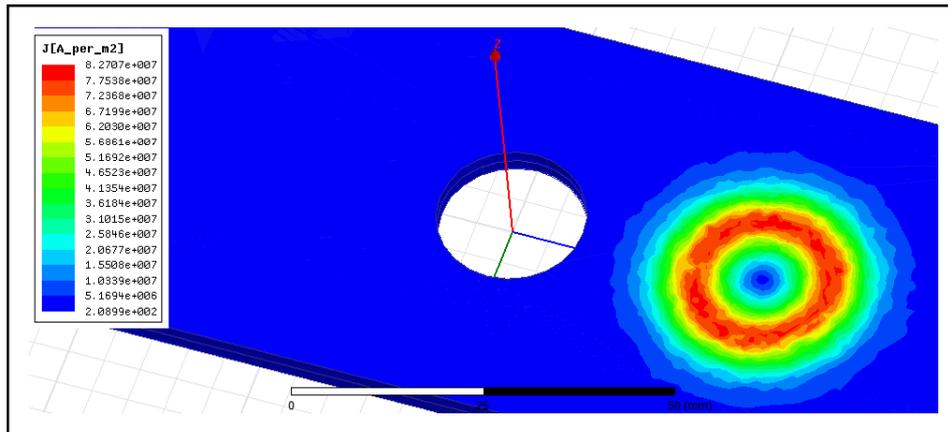


Figure III. 10 : Densité du courant dans la partie saine

III.5. Simulation 2 : Simulation d'un système plaques/capteur avec défaut

Deux plaques en aluminium ont été utilisées pour simuler la structure en question. De plus, pour simuler les défauts, une fissure adjacente au rivet a été insérée.

Si nous désignons la plaque sans la fissure A et celle avec la fissure B, nous avons effectué des mesures pour les deux configurations suivantes :

Configuration I : Défaut surfacique

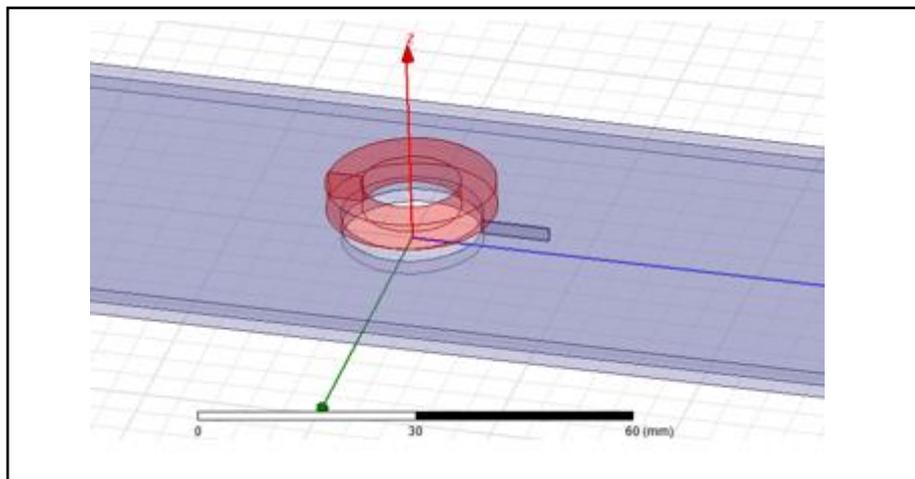


Figure III. 11 : Géométrie de la Simulation 2, Configuration 1

Dans un premier temps nous allons étudier la structure où la plaque sans défaut se situe au-dessous de celle avec fissure ; l'écart entre eux est de 70 μm . La figure III.12 montre la comparaison des résultats expérimentaux et numériques en fonction de la position de la bobine. Dans ce cas également, l'accord est excellent. Nous remarquons aussi une distorsion du signal vers la droite ce qui nous renseigne sur la présence de la fissure.

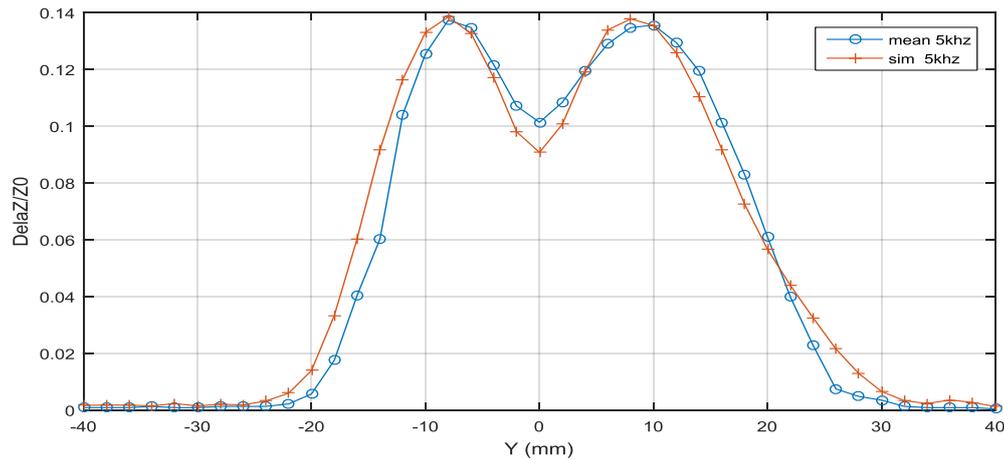


Figure III. 12: Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur de Simulation 2

III.5.1. Maillage

Le maillage du système capteur/plaque pour différentes positions du capteur est donné par les figures (III.13, III.14, III.15, III.16, III.17). Nous remarquons que la densité du maillage est plus importante près de la source et autour du défaut et elle diminue en s'éloignant de ces derniers.

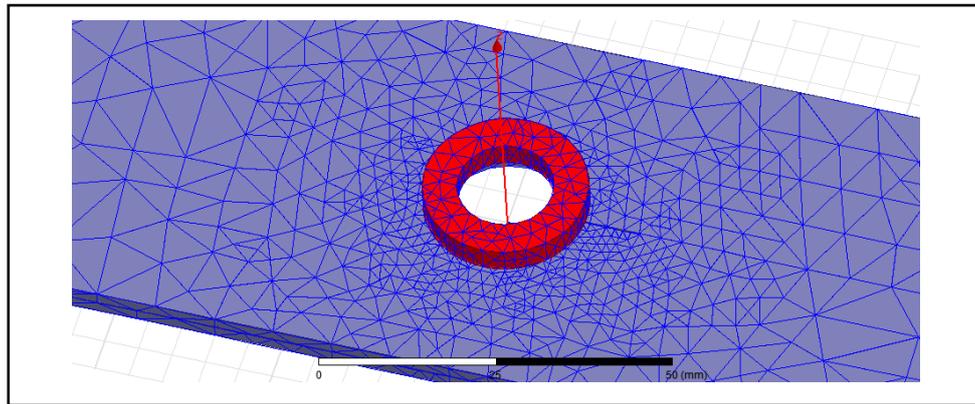


Figure III. 13 : Maillage au milieu du trou

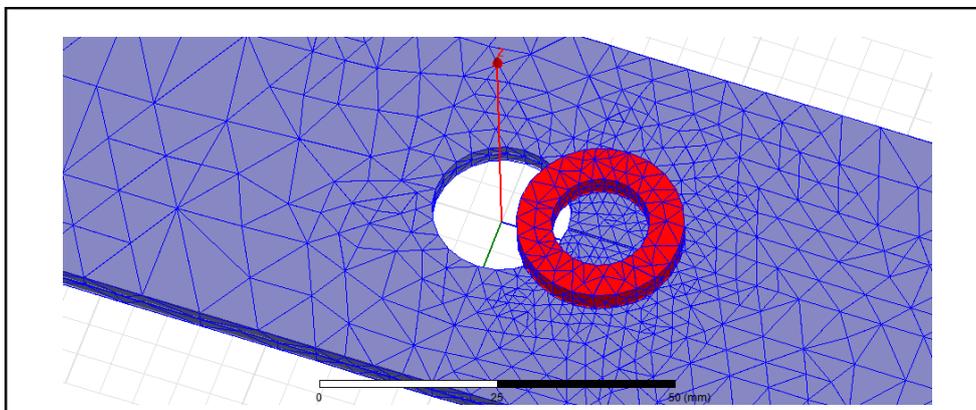


Figure III. 14 : Maillage à l'extrémité du trou

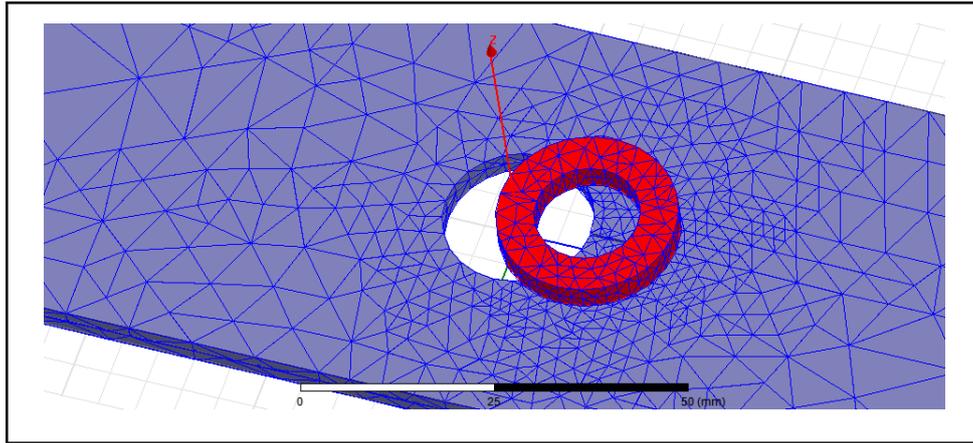


Figure III. 15 : Maillage au milieu du défaut

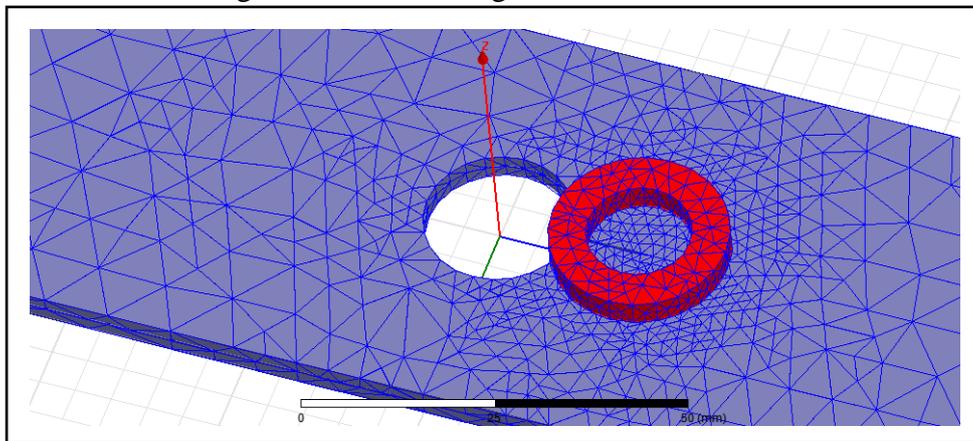


Figure III. 16 : Maillage à l'extrémité du défaut

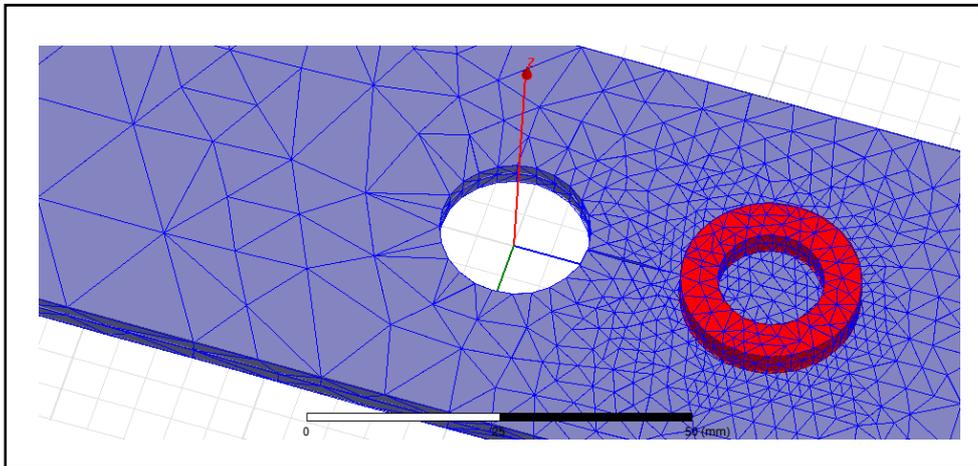


Figure III. 17 : Maillage dans la zone saine

III.5.2. Distribution de courants de Foucault

Les figures (III.18, III.19, III.20, III.21, III.22) montrent les cartographies des CF en fonction de la position du capteur. Les images montrent bien que, au tour du trouet du défaut, la répartition du champ réfléchi va se modifier et de ce fait l'impédance du capteur

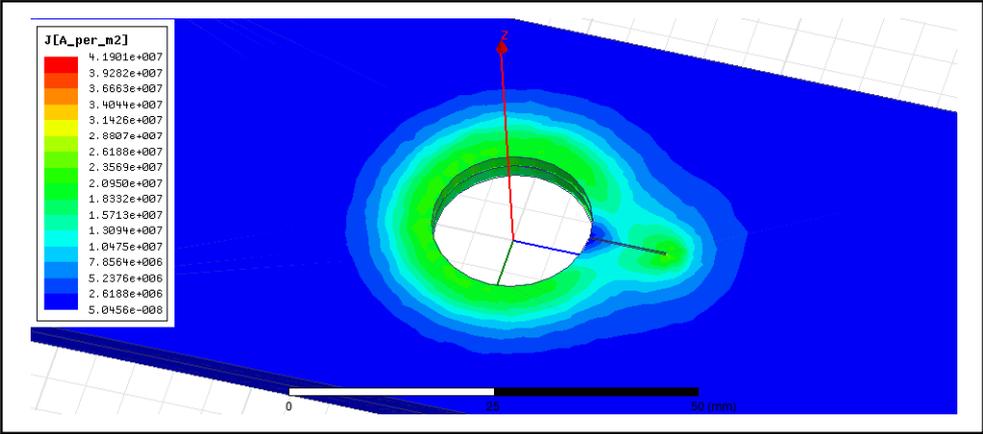


Figure III. 18 : Densité du courant au milieu du trou

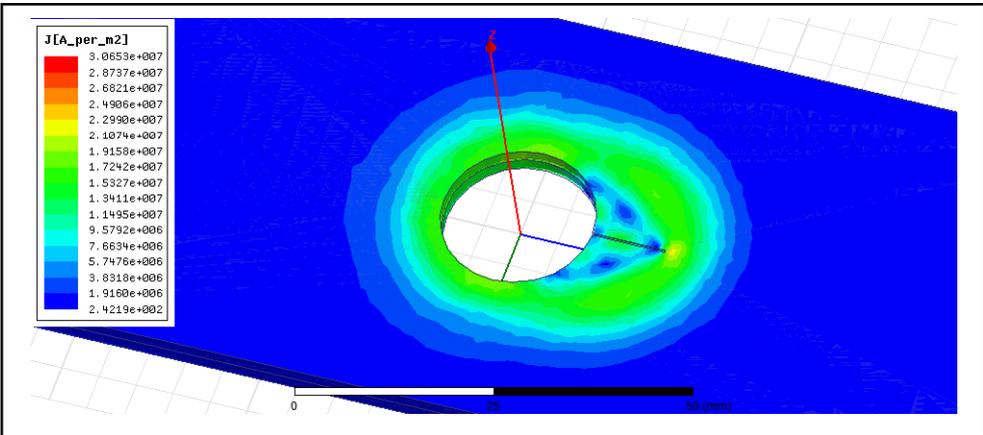


Figure III. 19 : Densité du courant induit à l'extrémité du trou

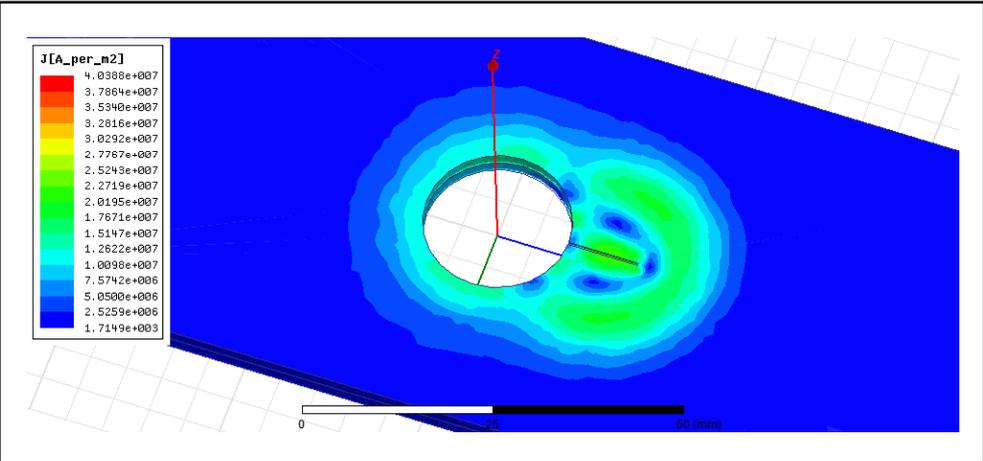


Figure III. 20 : Densité du courant induit au milieu du défaut

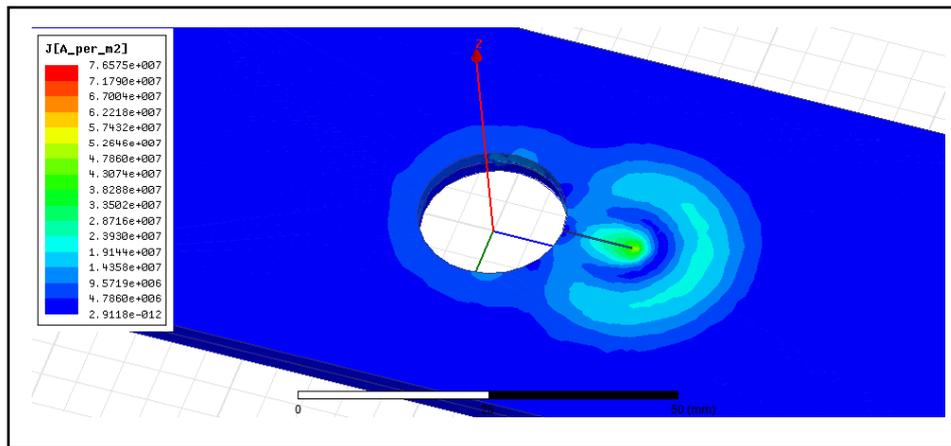


Figure III. 21 : Densité du courant induit à l'extrémité du défaut

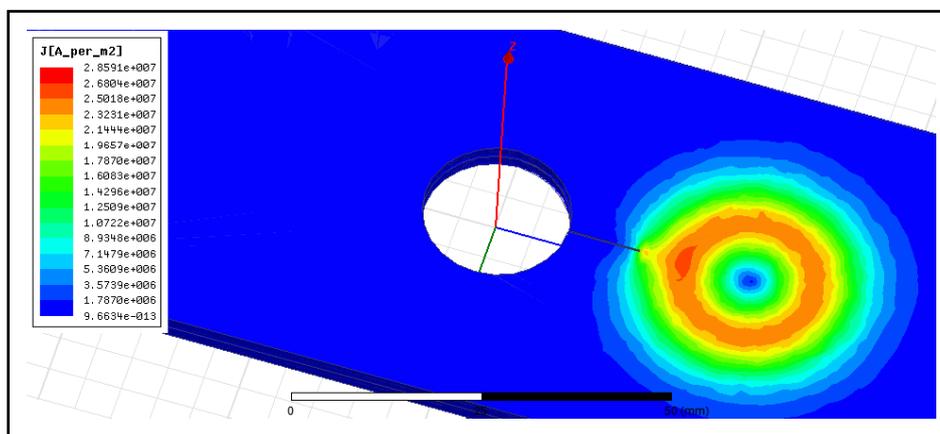


Figure III. 22 : Densité du courant dans la partie saine

III.5.3 Variation de la longueur

Pour une fréquence d'excitation de 5kHz et un lift-off de 1.082mm, on a effectué un scan des deux plaques en aluminium contenant un trou au milieu et une fissure adjacente à celui-ci. La figure (III.23) montre la variation de l'amplitude de l'impédance de la bobine en fonction du déplacement de cette dernière. L'asymétrie dans les signaux révèle la présence de la fissure radiale et ce pour différentes longueurs de cette dernière.

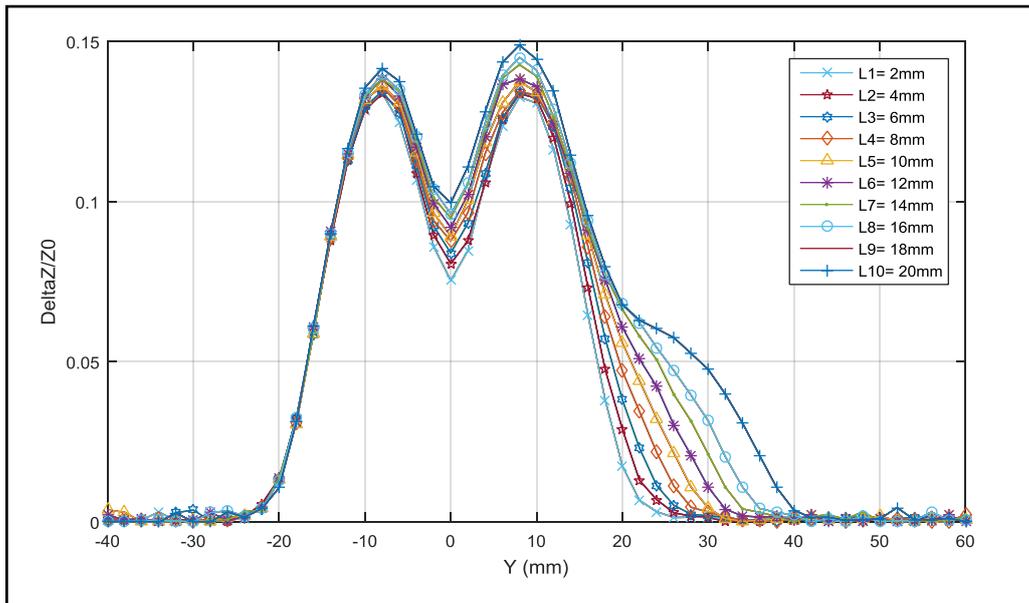


Figure III. 23 : Variation de l'impédance en fonction de la longueur du défaut

III.5.4. Variation de la profondeur

Pour une fréquence de 5 kHz, une longueur de 9.8mm et une épaisseur de 0.234mm, nous avons changé la profondeur du défaut radial ($P=0.5\text{mm}$, $P=1\text{mm}$, $P=1.5\text{mm}$, $P=2\text{mm}$) et étudier l'effet de cette variation. Nous remarquons que seule la fissure débouchante qui est détectée.

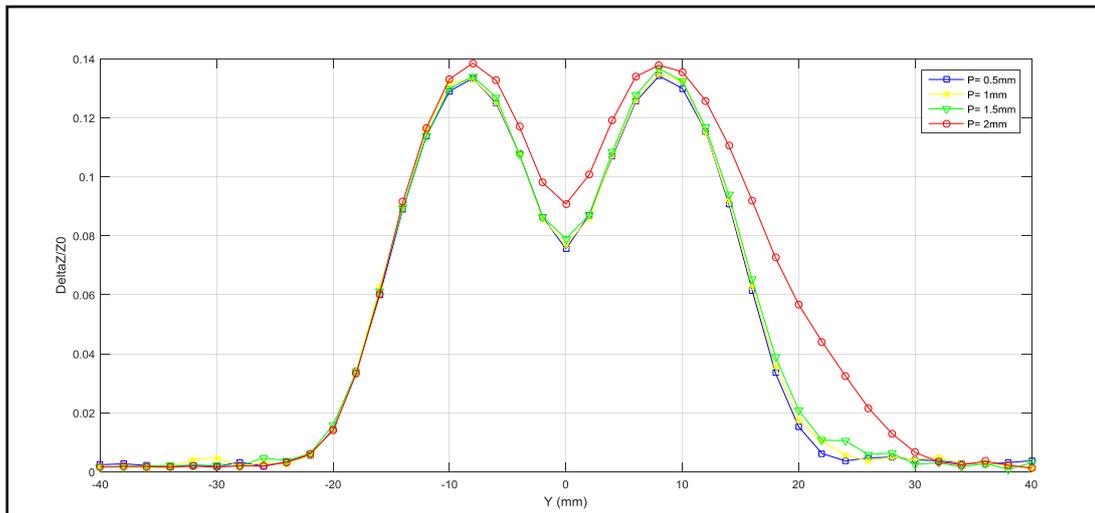


Figure III. 24 : Variation de l'impédance en fonction de l'épaisseur du défaut

Configuration II : Defaut enfouis

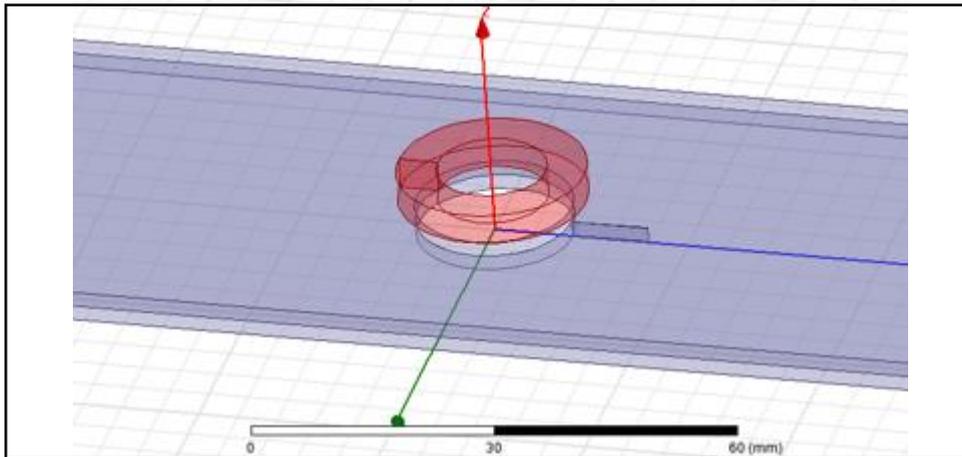


Figure III. 25 : Géométrie de la Simulation 2, Configuration 2

Dans un second temps, nous allons étudier la structure où la plaque avec fissure se situe au-dessous de celle sans défaut; l'écart entre eux est de 70 μm . La figure (III.25) montre la géométrie de la Simulation 2, Configuration 2.

III.5.5. Variation de la fréquence

D'abord nous allons varier la fréquence d'excitation du capteur de 1 kHz, 5kHz. La figure (III.26) montre la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux des deux fréquences en fonction de la position de capteur. Dans tous les cas, nous avons un très bon accord entre ces résultats.

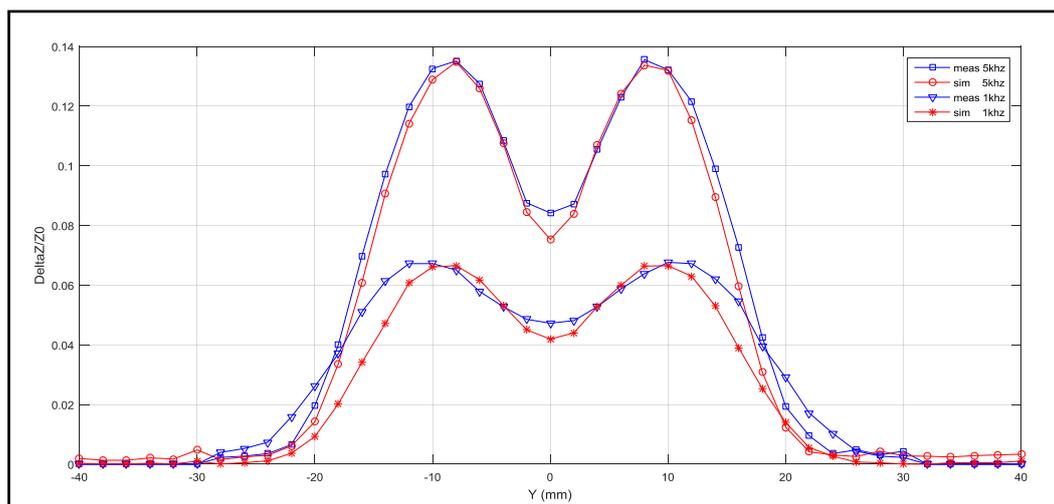


Figure III. 26 : Variation de l'impédance en fonction de la fréquence

III.5.6. Maillage

Le maillage du système capteur/plaque de la deuxième configuration pour différentes positions du capteur est donné par les figures (III.27, III.28, III.29, III.30, III.31). Nous remarquons que la densité du maillage est plus importante près de la source et autour du défaut, mais moins dense au tour du défaut par rapport à la configuration précédente, et elle diminue en s'éloignant de ces derniers

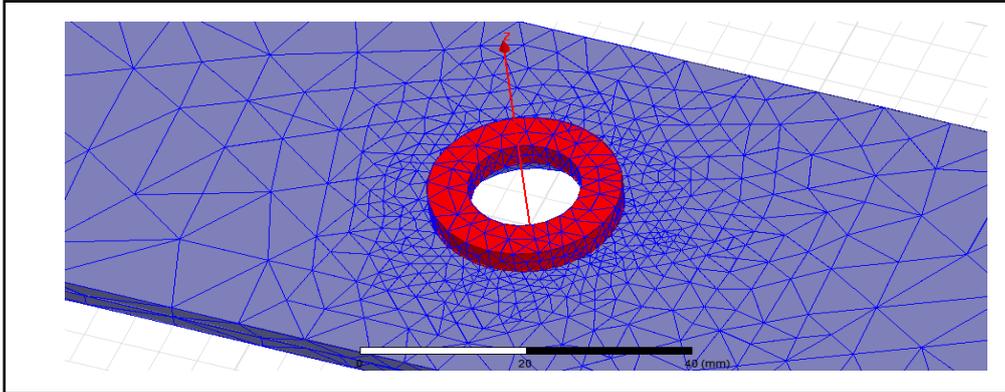


Figure III. 27 : Maillage au milieu du trou

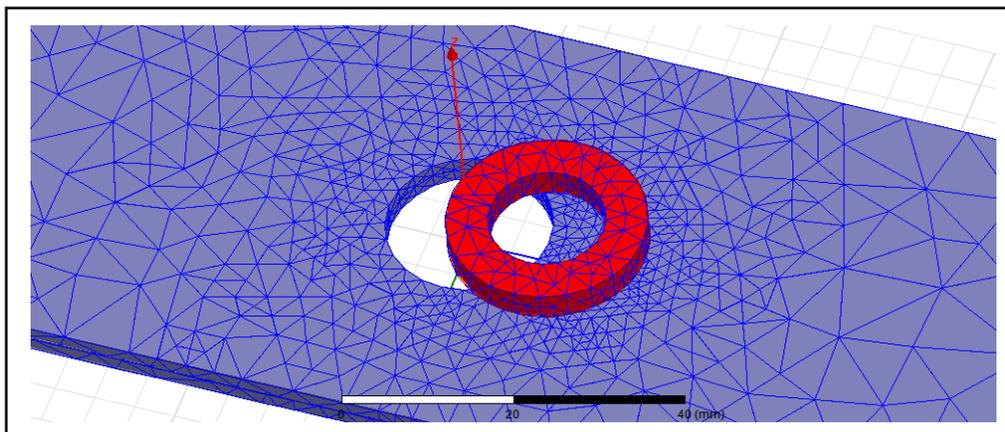


Figure III. 28 : Maillage à l'extrémité du trou

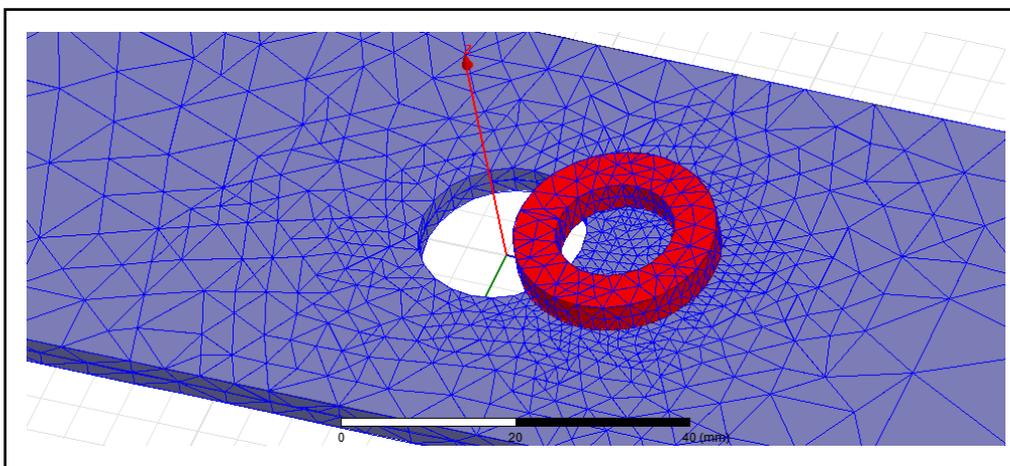


Figure III. 29 : Maillage au milieu du défaut

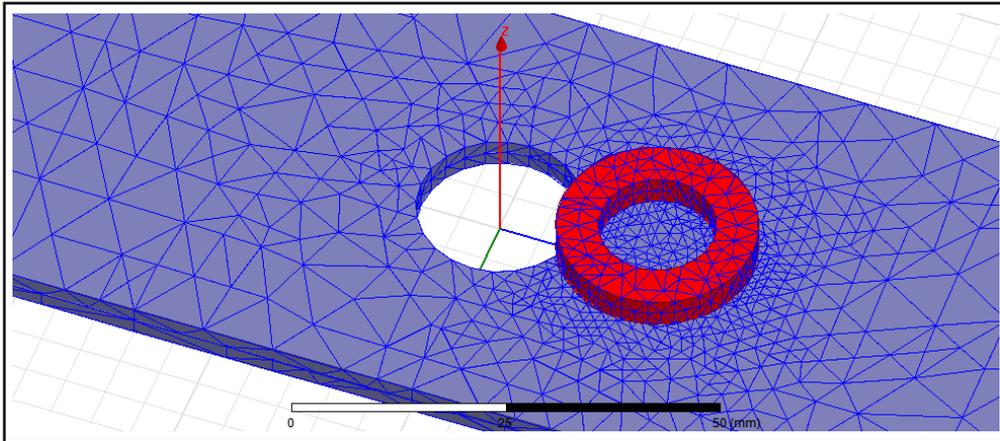


Figure III. 30 : Maillage à l'extrémité du défaut

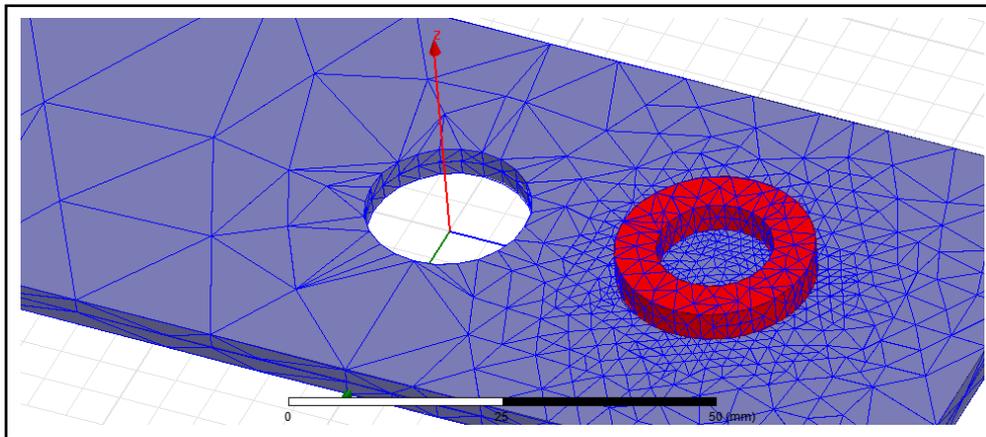


Figure III. 31 : Maillage dans la zone saine

III.5.7. Distribution des courants de Foucault

Les figures (III.32, III.33, III.34, III.35, III.36) montrent les cartographies des courants de Foucault en fonction de la position du capteur. Les images montrent bien que, au tour du trou et du défaut, la répartition du champ réfléchi va se modifier et de ce fait l'impédance du capteur mais elle reste moins dense autour du défaut par rapport à la configuration précédente.

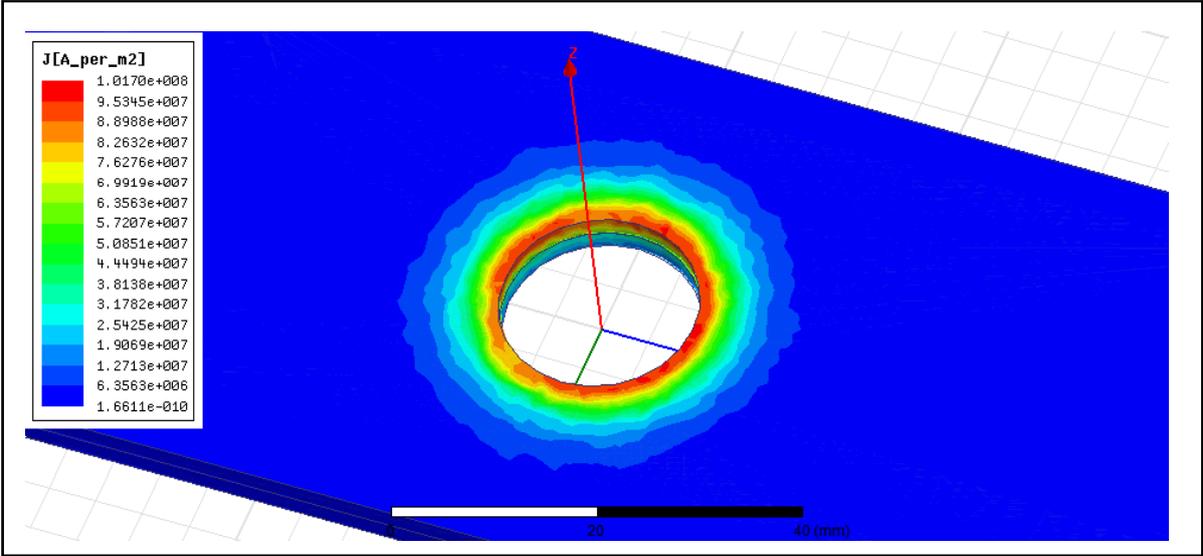


Figure III. 32 : Densité du courant au milieu du trou

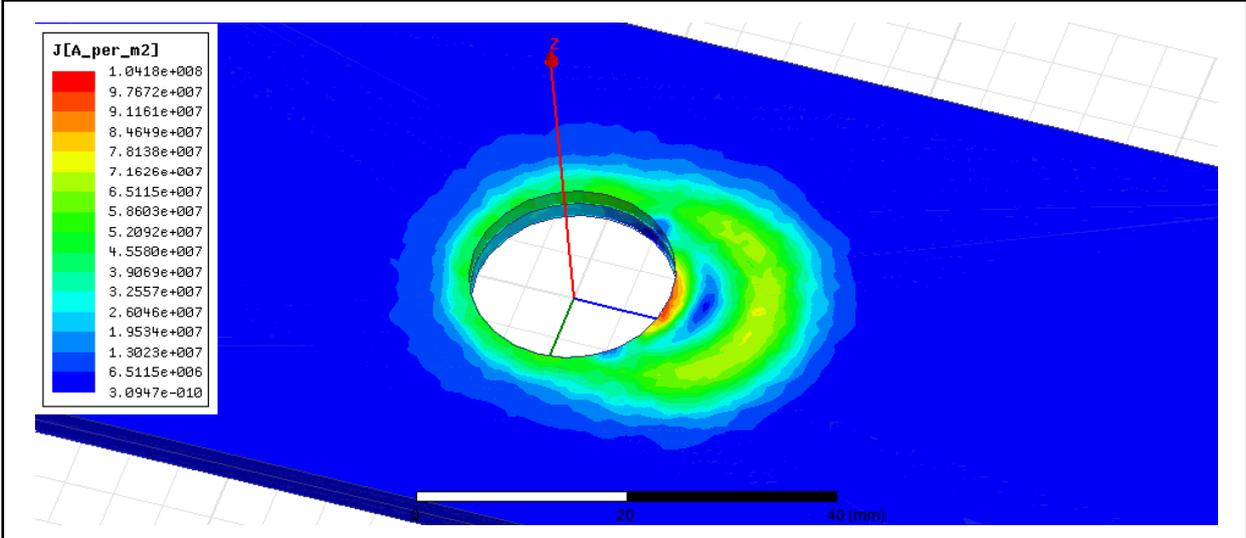


Figure III. 33 : Densité du courant induit à l'extrémité du trou

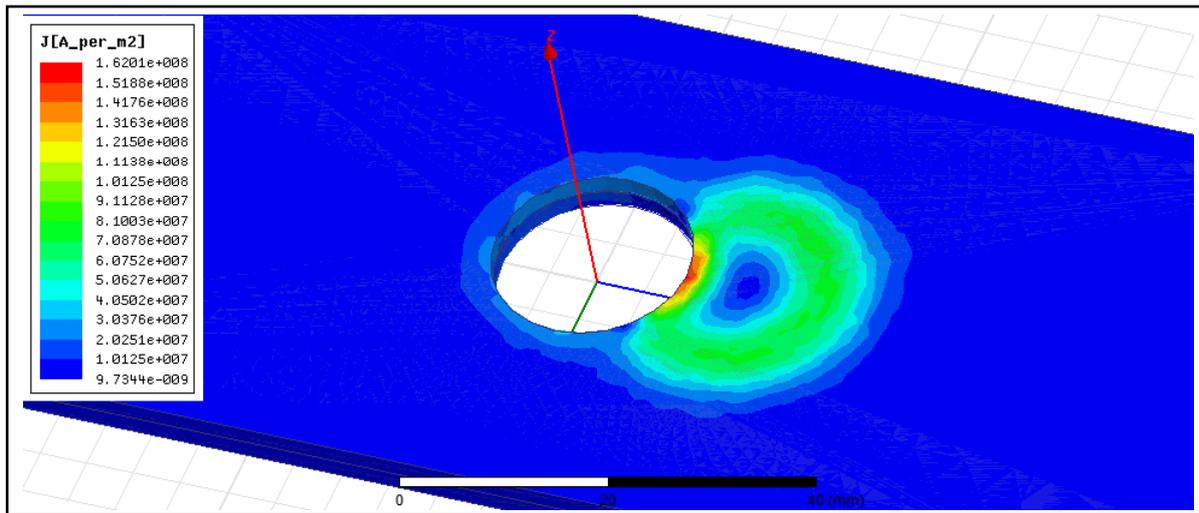


Figure III. 34 : Densité du courant induit au milieu du défaut

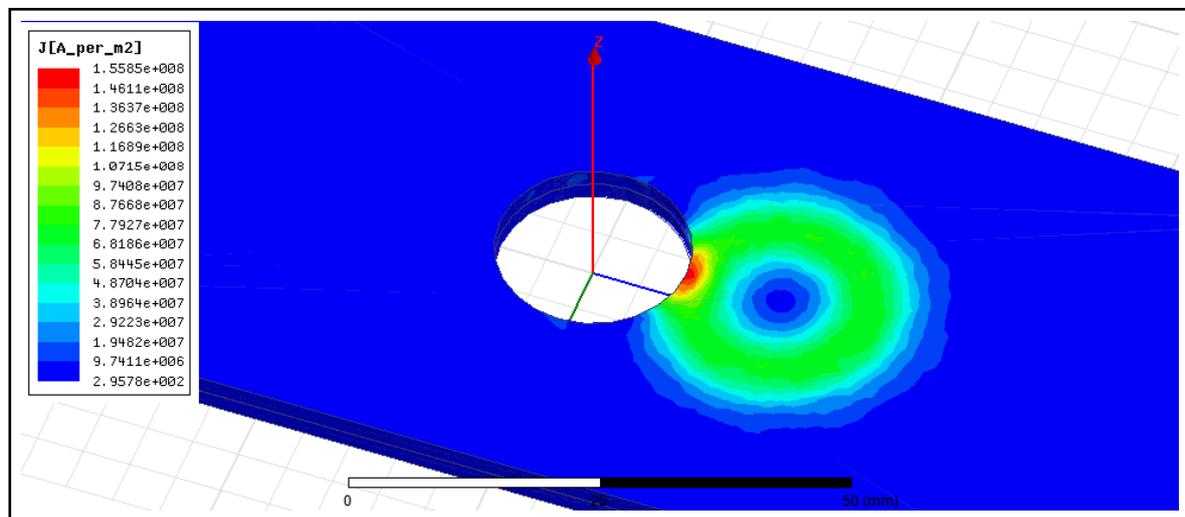


Figure III. 35 : Densité du courant induit à l'extrémité du défaut

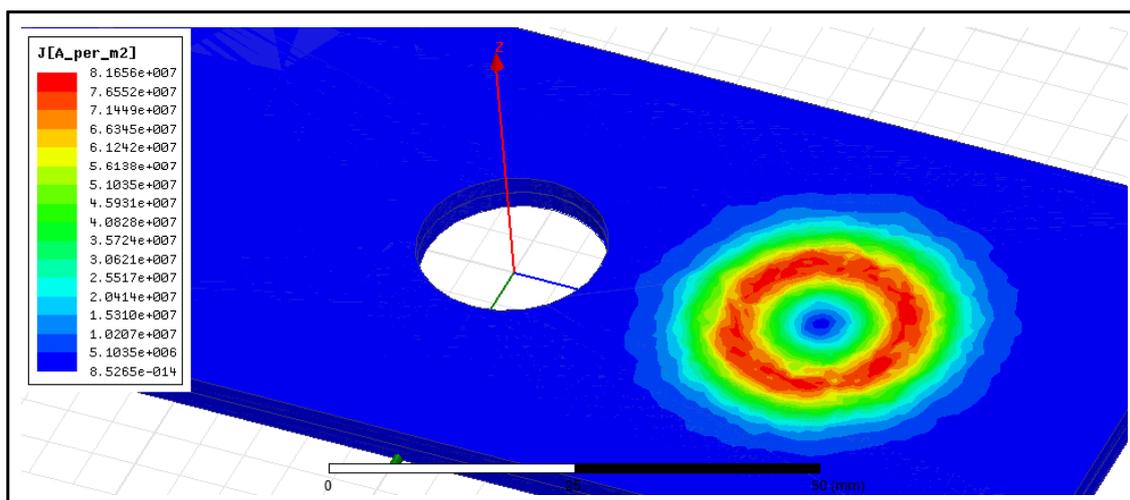


Figure III. 36 : Densité du courant dans la partie saine

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le logiciel de Ansys Maxwell pour l'étude du problème directe en CND-CF d'une structure multicouche rivetée. Un modèle d'éléments finis permettant de résoudre des problèmes de CND par courants de Foucault en présence de défauts a été présenté. Cette approche permet de simuler avec efficacité l'interaction capteur-cible avec défauts fins. Ce système a été étudié afin de valider la méthode de détermination de l'impédance du capteur à travers le calcul de l'énergie magnétique et obtenir une base de donnée pour l'inversion.

Chapitre IV

Etude du problème inverse

IV.1. Introduction	55
IV.2. Présentation de logiciel Minitab	55
IV.3. Problème inverse	56
IV.4. La méthode de régression	56
IV.4.1. Régression linéaire simple	56
IV.4.2. Régression linéaire multiple	57
IV.5 Droite de régression	58
IV.6. Calcul d'erreur	59
IV.7. Base de données	60
IV.6 Validation et Interprétation	61
IV.7 Conclusion	63

IV.1. Introduction

Un problème inverse consiste à déterminer des causes à partir de la connaissance des effets. Ce problème est l'inverse du problème dit direct, consistant à déduire les effets à partir de la connaissance des causes, ce à quoi nous sommes plus souvent habitués [Kern, 2002]. Par exemple, dans notre cas, nous devons déterminer les dimensions d'un défaut sur une plaque à partir de mesures CND-CF est un problème inverse.

Nous avons étudié dans le chapitre précédent un système pour valider la méthode de détermination de l'impédance du capteur à travers le calcul de l'énergie magnétique. Les résultats de cette modélisation sont fournis en termes d'impédance du capteur en fonction de la position de ce dernier et ce pour différentes dimensions géométriques du défaut.

Dans cette dernière partie du travail, on s'intéresse d'une base de données sur laquelle nous pouvons nous appuyer pour inverser les signaux obtenus précédemment et pouvoir prédire les défauts non existants dans la base utilisée.

IV.2. Présentation de logiciel Minitab

MINITAB est un logiciel statistique mis au point, à l'origine, par le Département de Statistique de l'Université de Pennsylvanie (U.S.A). Il est particulièrement bien adapté à l'analyse statistique de petits tableaux de données bien structurés : statistique descriptive, analyse de la variance, méthodes relatives à la corrélation et à la régression simple et multiple, séries chronologiques, tests d'indépendance, méthodes non paramétriques, analyse en composantes principales, analyse discriminante, contrôle statistique de la qualité, plans expérimentaux, etc.

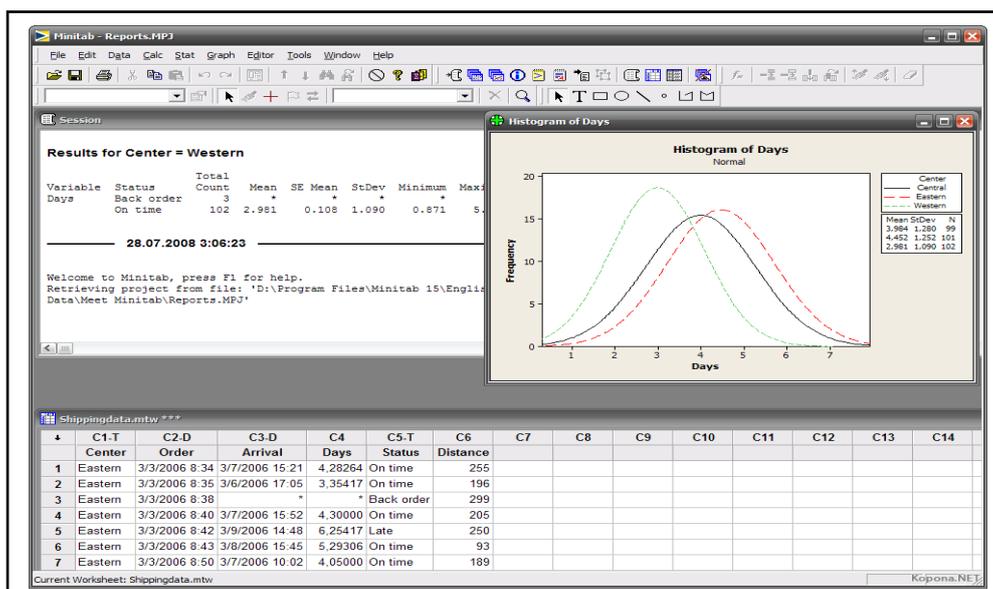


Figure IV. 1 : la fenêtre principale Minitab

IV.3. Problème inverse

Un problème inverse consiste à reconstruire une grandeur inconnue à partir d'un modèle physique et de mesures expérimentales. En fonction de la grandeur inconnue, on distingue plusieurs types de problème inverse :

- La construction et le développement d'un modèle direct représentatif de la réalité physique et adapté à des fins d'inversion.
- L'inversion des grandeurs observées en s'appuyant sur la résolution de ce modèle direct. [Halifa,2012]

IV.4. La méthode de régression

Les modèles de régression linéaire ont pour but d'expliquer ou prédire la variance d'une variable dépendante à l'aide d'une ou plusieurs variables indépendantes. Suivant le contexte et la finalité du modèle ainsi que les données traitées, nous retrouvons globalement deux types de régression :

La régression linéaire (simple et multiple) qui traite les variables dépendantes continues ou discrètes et les variables indépendantes [Benmakrelouf, 2014]

IV.4.1. Régression linéaire simple

La régression linéaire simple permet de « mettre en relation une variable continue Y à expliquer avec une variable explicative X continue ». On suppose que la connaissance de la valeur de X ($X=x$) permet de connaître l'espérance conditionnelle de Y sachant X : $E(Y|X=x)$. Cette relation est exprimée par [Tufféry, 2010] :

Pour tout $i = 1, \dots, n$

$$E(Y_i) = \alpha + \beta X_i \quad (\text{IV.1})$$

C'est équivalent à :

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i \quad (\text{IV.2})$$

Avec l'espérance de l'erreur ε_i nulle ($E(\varepsilon_i) = 0$) pour tout $i = 1, \dots, n$

On suppose aussi que :

- Les variables X et Y ne sont pas indépendantes ;
- La variance des erreurs est la même pour toutes les valeurs de X (Variance de $\varepsilon_i = s^2$);
- Les erreurs sont linéairement indépendantes ($\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ pour tous $i \neq j$);

- Les erreurs sont normalement distribuées ($\varepsilon_i \sim N(0, s^2)$).

On cherche a et b, les estimateurs de α et β respectivement, à partir d'un échantillon en utilisant plusieurs méthodes. Parmi celles-ci, la méthode de minimisation du critère des moindres carrés ordinaires qui consiste à trouver les estimateurs a et b qui minimisent :

$$\sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (\text{IV.3})$$

Les moindres carrés sont minimisés par :

$$b = \frac{\text{cov}(X,Y)}{s_x^2} \quad (\text{IV.4})$$

et

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (\text{IV.5})$$

On obtiendra pour tout X_i , la valeur prédite ou estimée de Y_i égale à $a + b X_i$. Les erreurs ε_i sont estimées par les résidus égaux à $Y_i - (a + b X_i)$

IV.4.2. Régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple est la généralisation de la régression linéaire simple. Elle met en relation une variable continue Y à expliquer avec plusieurs variables explicatives X_j . Elle est définie par l'expression suivante [Tufféry, 2010] :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon \quad (\text{IV.6})$$

Avec l'espérance de l'erreur ε égale à zéro : $E(\varepsilon) = 0$.

On suppose l'indépendance linéaire des variables explicatives X_j pour tout $j = 1, \dots, m$. Pour n observations, nous obtenons $Y = X\beta + \varepsilon$ exprimé sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & \dots & X_{1m} \\ \vdots & X_{21} & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & \dots & X_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix} \quad (\text{IV.7})$$

Le traitement de la régression linéaire multiple consiste à rechercher l'estimateur $b = \begin{pmatrix} b_0 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$ du vecteur β en utilisant par exemple la méthode des moindres carrés ordinaires. En appliquant cette méthode, l'expression à minimiser s'écrit :

$$\sum_{i=1}^n [y_i - b_0 - \sum_{j=1}^m x_{ij} b_j]^2 \quad (\text{IV.8})$$

En utilisant la notation matricielle avec (IV.8), nous obtenons :

$$\|Y - Xb\|^2 = (Y - Xb)^t(Y - Xb) = Y^tY - 2b^tX^tY + b^tX^tXb \quad (\text{IV.9})$$

La dérivation matricielle de (IV.9) sur b nous donne :

$$X^tXb - X^tY = 0$$

Avec l'hypothèse que la matrice (X^tX) est inversible, nous obtenons l'estimateur b :

$$b = (X^tX)^{-1}X^tY \quad (\text{IV.10})$$

Et les valeurs estimées (ajustées) de Y:

$$\hat{Y} = Xb = X(X^tX)^{-1}X^tY \quad (\text{IV.11})$$

Le vecteur des erreurs (résidus) permet de connaître l'écart entre les valeurs observées (réelles) de Y et celles qui sont estimées \hat{Y} , il nous renseigne donc sur la précision du modèle de régression obtenu. Il est calculé avec :

$$\varepsilon = Y - \hat{Y} = Y - Xb \quad (\text{IV.12})$$

IV.5 Droite de régression

C'est la représentation d'un ensemble ou d'un nuage de points figuratifs à l'aide d'une droite dont la somme des carrés des distances aux divers points figuratifs est minimale. Ces distances étant comptées parallèlement à l'axe des ordonnées.

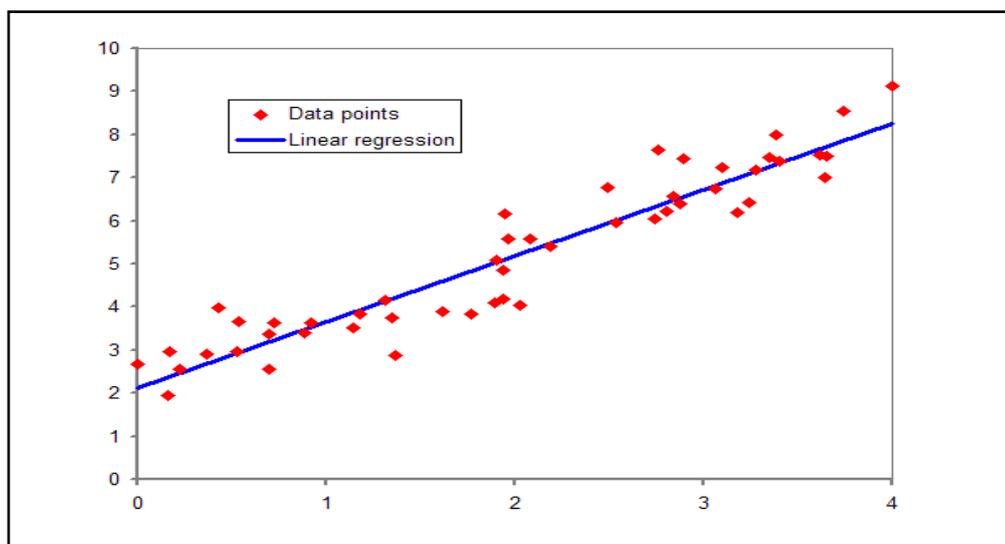


Figure IV. 2 : Droite de la régression linéaire

IV.6. Calcul d'erreur

Pour mesurer les performances du modèle développé, le coefficient de détermination R^2 et l'erreur fonctionnelle quadratique moyenne RMSE (RootMean Square Error) sont utilisés, conformément à l'Equation. (IV.13) et Equation. (IV.14).

$$RMSE_{err}^f = \sqrt{\frac{\sum(E_i - P_i)^2}{N \sum E_i^2}} \quad (IV.13)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{P}_i)^2} \quad (IV.14)$$

E_i : Valeur expérimentale.

P_i : Valeur prédite.

\bar{P}_i : Moyenne des données observées.

N : Nombre de données.

Le RMSE indique la précision des modèles pour prédire la réponse, il est considéré comme un critère d'ajustement important dans le cas où le but du modèle est la prédiction. Il montre à quel point les valeurs expérimentales sont proches des valeurs prédites par un modèle. Plus les valeurs de RMSE sont faibles, l'ajustement est meilleur.

Le RMSE est toujours positif et une valeur de 0 (presque jamais atteinte en pratique) indiquerait un ajustement parfait aux données. En général, une valeur de RMSE plus petite indique une meilleure précision qu'une valeur de RMSE plus élevée.

Concernant le coefficient de détermination, R^2 est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire. Il est utilisé pour évaluer l'ajustement des modèles et l'adéquation entre les données expérimentales et les données prédites en déterminant la dispersion des données le long de la droite de régression ajustée ou encore à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points.

Ce coefficient varie entre 0 et 1, soit entre un pouvoir de prédiction faible et un pouvoir de prédiction fort.

Si le R^2 est nul, cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0 % de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé n'explique absolument pas la distribution des points.

Si le R^2 vaut 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100 % de la distribution des points.

En bref, plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points se disperse autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus le nuage de points se resserre autour de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression, alors $R^2 = 1$. [Mougari et al, 2021]

IV.7. Base de données

Les signaux obtenus, après avoir effectué une simulation de différentes géométries du défaut, variation de longueur et de profondeur, représentent la variation de l'impédance du capteur en fonction du déplacement de ce dernier. Pour une meilleure exploitation de ces signaux dans la construction du problème inverse, nous avons procédé à l'extraction des caractéristiques principales de ce type de signaux qui sont : (les piques P1 ; P2 ; P3, l'écart type et la valeur moyenne). Les résultats sont collectionnés dans le tableau (IV.1) :

Tableau IV.1 : Base de données

Longueur	Profondeur	P1	P2	P3	Ecart type	Z moy
2	2	0,130619174	0,074089578	0,133606052	30	0,0375
4	2	0,134603147	0,08042498	0,13441582	32	0,0398
6	2	0,13481707	0,083496868	0,135613712	34	0,0412
8	2	0,138372057	0,087632856	0,136457004	38	0,043
10	2	0,137238893	0,089160321	0,138739196	40	0,0447
12	2	0,138580387	0,092864155	0,140102919	42	0,0462
14	2	0,13917168	0,09411547	0,142561809	44	0,0478
16	2	0,139459269	0,095883266	0,144922765	46	0,0498
18	2	0,139958692	0,097913269	0,147696922	48	0,051
20	2	0,142143528	0,099300719	0,148352928	50	0,0527

➤ Polynôme de régression :

Les résultats nous ont permis d'obtenir les polynômes suivants :

$$\text{Longueur} = -61,0 + 12 P_1 - 0,6 P_2 + 222 P_3 + 0,201 \text{ écart type} + 689 Z \text{ moy}$$

IV.6 Validation et Interprétation

Dans cette partie nous avons procédé au test du polynôme obtenu. Un ensemble de sept défauts a été utilisé pour la validation. Les résultats des tests sont collectionnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.2 : Résultats et validation

Valeurs Expérimentales	Valeurs Prédites	RMSE	R ²
7.6	7.2	0.199986	0.997
9.8	9.42		
11.6	11.48		
13.5	13.223		
14.3	13.94		
16.2	16.308		
19.2	18.8		

La droite d'ajustement pour les sept points considérés est donnée par la figure ci-dessous :

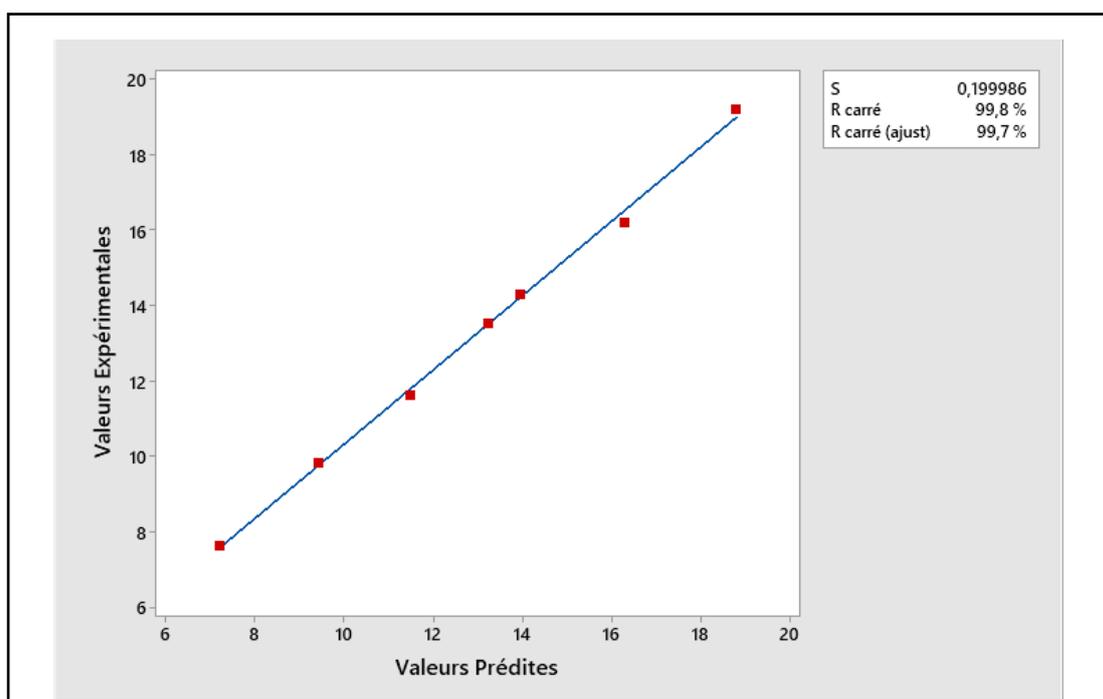


Figure IV. 3: Droite d'justement de la longueur

Le modèle a été entraîné avec un ensemble de données de 10 échantillons, et le processus de test avec un ensemble de données de 7 valeurs, qui n'étaient pas utilisées auparavant pour entraîner le modèle, a montré des valeurs RMSE égale 0.19 et R^2 égale 0,997 respectivement. Les valeurs de RMSE sont proches de 0 et R^2 proche de 1, ce qui indique la précision du processus d'apprentissage et de test.

Le tracé de régression des valeurs expérimentales par rapport aux valeurs prédites de test est présenté respectivement sur figure IV.3 Les données dispersées autour d'une ligne pointillée sont très proches de la ligne et montrent une forte corrélation entre les valeurs calculées et expérimentales. Cela indique une prédiction appropriée.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le logiciel de statistique Minitab pour l'étude du problème inverse en CND-CF.

Nous avons opté pour la méthode de la régression linéaire et constaté d'après les résultats de calcul d'erreur et le tracé de la droite d'ajustement que le modèle obtenu est très faible pour la prédiction des dimensions des défauts.

De nombreuses techniques de contrôle non destructif CND existent. Celle dite des courants de Foucault (CF) est très répandue en raison de sa facilité de mise en œuvre, de son faible coût et de son caractère non polluant. Elle est réservée aux pièces électriquement conductrices dans lesquelles elle permet de détecter la présence de fissures.

Le travail présenté dans ce rapport a pour objectif l'étude et l'analyse des performances des systèmes de CND par courants de Foucault pour structures multicouches rivetées.

Avant d'aborder les objectifs de cette étude, nous avons jugé utile de commencer par une recherche bibliographique des différentes techniques de CND les plus utilisées : l'examen visuel, le ressuage, les ultrasonores, la radiographie, magnétoscopie, et enfin le procédé la technique des courants de Foucault. Pour chaque technique d'inspection, nous avons évoqué 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 ainsi que sur les capteurs à courants de Foucault utilisés en CND-CF

Dans la deuxième partie, nous avons présenté un bref rappel sur les équations de Maxwell régissant le CND-CF, leur simplification relatives aux courants de Foucault, ainsi nous avons rappelé la modélisation du CND par courants de Foucault par méthode des éléments finis et les différentes techniques de calcul d'impédance.

Dans la troisième partie, nous avons traité la modélisation CND-CF par la méthode des éléments finis (MEF) sous Ansys Maxwell, un modèle d'une structure multicouche rivetée a été élaboré. Deux configuration sans/avec défaut ont été étudiées et mises en œuvre. La validation des résultats numériques obtenus à partir d'une configuration comprenant deux plaques conductrices avec une bobine à air. La validation a été faite en comparant les résultats numériques obtenus pour différents paramètres du système aux résultats expérimentaux trouvés dans la littérature.

Dans la quatrième partie nous avons créé une base de données pour le problème inverse, a l'aide du logiciel MiniTab nous avons opté pour la méthode de la régression linéaire et constaté d'après les résultats de calcul d'erreur et le tracé de la droite d'ajustement que le modèle obtenu est très faible pour la prédiction des dimensions des défauts.

Les résultats obtenus ont permis de reproduire avec une très bonne précision les dimensions de défauts qui n'existaient pas dans la base de données injectée.

[Abdou, 2006]

Abdou, A. (2006) « Contrôle non destructif par courant de Foucault étude et réalisation d'un capteur inductif », mémoire de magister ; université de Batna.

[Adib, 2014]

Adib, O. 2014« Etude et Modélisation de Capteur à courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND) », mémoire de master ; université de M'sila.

[Belkhiri, 2003]

Belkhiri.Y. (2003) « Modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécaniques couples par la méthode des volumes finis (CVM) », mémoire de magister en électrotechnique ; université de Batna.

[Benguesm, 2010]

Benguesmi, M. (2010) « contribution à l'étude théorique de l'effet magnet-impedance géante (GMI) », mémoire de magister ; université de Batna.

[Benmakrelouf, 2014]

Benmakrelouf, S. (2014) « Vers L'identification des profils des joueurs à travers l'analyse des données du jeu basée sur le modèle de régression et le regroupement », mémoire de magister ; Québec.

[Benhadda, 2015].

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) », thèse de Doctorat en Sciences ; université de Batna.

[Bensalah, 2012]

Bensalah, O. (2012) « Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentiel », mémoire de master ; université de M'sila.

[Bouchala, 2009]

Bouchala,T (2009) «application de la methode des elements finis», Osray

[Chelabi, 2016]

Chelabi, M. (2016) « Utilisation des machines à vecteurs de supports pour le contrôle non destructif par méthode électromagnétiques », thèse doctorat.

[Cherif, 2011]

Cherif., S. (2011) « Modélisation électromagnétiques des Systèmes multi capteurs –pièces à défauts complexes pour le contrôle non destructif par courants de Foucault », mémoire de magister ; université de Tizi-Ouzou.

[Choua, 2010]

Choua, Y. (2010) « Application de la Méthode des Eléments Finis pour la Modélisation de Configurations de Contrôle non Destructif par courants de Foucault », thèse de Doctorat ; université de Paris.

[Claustrioux, 1994]

Claustrioux J.J, Delvaux, A (1994) « Traitement de données par le logiciel Minitab. *Notes Stat. Inform*», Gembloux.

[Dahia et al., 2014]

A. Dahia, E. Berthelot, Y. Le Bihan, L. Daniel, (2014) « Caractérisation non destructive par courants de Foucault de l'état de contraintes dans les matériaux magnétiques, symposium de génie électrique », Paris.

[Dodd & Deeds, 1968]

Dodd, C. & Deeds, W. (1968) « Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems. *Journal of applied physics* », 39(6), 2829–2838.

[Doirat, 2007]

Doirat, V. (2007) « Contribution à la modélisation de système de Contrôles non destructifs par courants de Foucault, application à la caractérisation physique et dimensionnelle de matériaux de l'aéronautique », thèse doctorat ; Nantes.

[Dolabdjian et al., 2007]

Dolabdjian, C., Wach, G., & Perez, L. (2007) « Improvement in the detection of subsurface fatigue cracks under air frame fasteners using improved rotating giantmagneto-resistance magnetometer head. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* », 49(3), 133–136.

[Drai, 2005]

Drai, R. (2005). « Techniques de traitement des signaux ultrasonore appliquées au contrôle non destructif des matériaux » thèse doctorat ; Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB.

[Diraison, 2009]

Diraison, Yohan Le. (2009). « Rotating field eddy current imaging for the non-destructive evaluation of buried and oriented defects in riveted lap-joints », École normale supérieure de Cachan.

[Fillon, 1996]

Fillon, J, DUMONT-. (1996). Contrôle non Destructif (CND). Techniques de l'Ingénieur R1400,

[Hamel, 2018]

Hamel, M. (2018) « Etude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive », thèse de doctorat ; université de Tizi-Ouzou.

[Hamia, 2011]

HAMIA, R. (2011) « Performances et apports des capteurs magnétiques à très haute sensibilité aux systèmes de Contrôle Non Destructif par courants de Foucault », doctorat en Electronique ; université de Caen Normandi.

[Hamidaoui, 2016]

Hamidaoui, M. (2016) « Méthodes des différences finies appliquée aux EDPS fractionnaires », mémoire de fin d'étude ; université de Tlemcen.

[Helifa, 2012].

Helifa, B. (2012) « Contribution à la Simulation du CND par courants de Foucault Vue de la Caractérisation des Fissures Débouchantes », thèse de Doctorat ; Université de Nantes.

[Hellier, 2001]

Hellier, C.J (2001) The Handbook of Nondestructive Evaluation, New York, N.Y.: McGraw-Hill

[Khene, 2006]

Khene, M. (2006) « Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les structures a géométries complexes par adaptation de la méthode des volumes finis », mémoire de magister ; université de Batna.

[Lacroix, 1996]

Lacroix, M. (1996). Essais non Destructifs. Techniques de l'Ingénieur M110 et M111, 1996. pp. 1-21 et 1-17

[Lakhdari, 2011]

Lakhdari, A. (2011) « Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : application à la détection des fissures », mémoire de magister; université de Biskra.

[Le Bihan, 2003]

Le Bihan, Y. (2003). Study on the transformer equivalent circuit of eddy current nondestructive evaluation, NDT&E Int., vol. 36, No 5, pp. 297–302

[Le Floch, 2002]

Le Floch, Y (2002) « Développement de formulations 3D éléments finis $\vec{T} \rightarrow -\Phi$ pour la prise en compte de conducteurs massifs et bobinés avec un couplage circuit », thèse doctorat ; Rennes.

[Martinos et al., 2014]

Martinos, J. Theodoulidis, T. Poulakis, N and Tamburrino, A. « A benchmark problem for eddy current nondestructive evaluation», IEEE trans. Magn, vol 50, 7026104, 2014.

[Mephane, 1998]

Merphane, M (1998) « Modélisation de contrôle ultrasonore de tube d'acier présente des défauts de types » direction de l'information scientifique et technique.

[Mougari et al., 2021]

Mougari NE, Largeau JF, Himrane N, Hachemi M, Tazerout M. (2021) « Application of artificial neural network and kinetic modeling for the prediction of biogas and methane production in anaerobic digestion of several organic wastes ».

[Nehal, 2009]

Nehal, O. (2009) « Etude et modélisation des paliers planaires », mémoire de fin d'étude ; université de Constantine.

[Paillard, 2008]

Paillard, S. (2008) « Développement D'un Modèle Pour Le Contrôle Non Destructif par courants De Foucault De Structures Rivetées En Aéronautique », thèse de Doctorat ; université Paris.

[Ravat, 2014]

Ravat,C. (2014) «Conception de multi capteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif», thèse de doctorat ; université Paris.

[Rodat, 2021]

Rodat,D. (2021) «Simulation opérationnelle en contrôle non destructif», thèse de doctorat ; université de Paris.

[Sbai, 2016]

Sbai A (2016), « Méthode des volumes finis pour L'équation de convection-diffusion », mémoire de fin d'étude ; université Fès, Maroc.

[Saoudi et al., 2018]

Saoudi, A et Benhalima, A (2018) « Contrôle Non Destructif par courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques) », mémoire de Master ; université de M'sila.

[Slimane, 2008]

Slimane, W. (2008) « Conception d'un Système Multi-capteurs à courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND) », université de Batna.

[Taleb et al., 2013]

Taleb, M et Ghedamsi, E (2013) « Modélisation semi-analytique d'un système de CND-CF pour la caractérisation d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur », mémoire master ; université de Ourgla.

[Testoni, 2003]

P. Testoni, (2003) « Implementation in the ANSYS finite element code of the electric vector potential $T^{\rightarrow} - \Phi$, Φ formulation and its validation with magnetic vector potential $A^{\rightarrow} - V$, A^{\rightarrow} formulation », thèse de doctorat, Cagliari.

[Theodoulidis, 2003]

Theodoulidis. (2003). « Model of Ferrite-Cored Probe for Eddy Current Nondestructive Evaluation ». 2003. pp. 3071–3078. Vol. 93, No. 5.

[Theodoulidis, 2005]

Theodoulidis, T. P. (2005) « Analytical Model for Tilted Coils in Eddy-Current Nondestructive Inspection ». pp. 2447–2454. Vol. 41, No. 9.

[Thidé, 2004]

Thidé, B. (2004) « Electromagnetic field theory », Upsilon Books Uppsala ;Sweden.

[Thomas, 2010]

Thomas, V. (2010) « Système multi-capteurs et traitement des signaux associés pour l'imagerie par courants de Foucault de pièces aéronautique », thèse doctorat ; Paris.

[Testoni, 2003]

Testoni, P. (2003) « Implementation in the ANSYS finite element code of the electric vector potential $T^{\rightarrow} - \Phi$, Φ formulation and its validation with magnetic vector potential $A^{\rightarrow} - V$, A^{\rightarrow} formulation », thèse de doctorat, Cagliari.

[Tufféry, 2010]

Tufféry, S. (2010) « Data mining et statistique décisionnelle : l'intelligence des données », Paris.

[Wanin, 1996]

Wanin, M. (1996) « Evaluation non Destructive de la Qualité des Matériaux Partie 1 et Partie 2 », pp. 1-26 et 1-1

Résumé :

Le contrôle non destructif (CND), ou essai (évaluation) non destructif (END) est un domaine interdisciplinaire, utilisé dans des contextes industriels, qui vise à diagnostiquer l'état d'intégrité ou de santé d'une pièce, d'un composant ou d'une structure industrielle sans qu'il en résulte une altération préjudiciable à leur utilisation ultérieure.

La première partie de ce travail, aborde l'utilisation de la méthode des éléments finis, sous le logiciel Ansys-Maxwell, pour la modélisation tridimensionnelle (3D) d'un système de contrôle non destructif par courants de Foucault en mode absolu. Cette modélisation vise à déterminer l'interaction entre le capteur et la pièce à inspecter à travers le calcul de l'impédance d'un capteur à courants de Foucault pour des défauts manque de matière. C'est dans ce contexte qu'un modèle s'appuyant sur la discrétisation des équations de Maxwell a été développé puis une validation de ce modèle a été effectuée en comparant les résultats obtenus à ceux des données expérimentales du contrôle d'une structure multicouche rivetée.

La deuxième partie de ce mémoire, a été consacrée à l'étude du problème inverse. La méthode de régression linéaire est exploitée, et se montre efficace pour la reconstruction géométrique des défauts.

Mots clés : courants de Foucault, contrôle non destructif, éléments finis 3D, impédance, régression, problème inverse, caractérisation de défauts.

Abstract:

Non-destructive testing (NDT), or non-destructive testing (evaluation) (END) is an interdisciplinary field, used in industrial contexts, which aims to diagnose the state of integrity or health of a part, a component or an industrial structure without resulting in any detrimental alteration to their subsequent use.

The first part of this work deals with the use of the finite element method, under the Ansys-Maxwell software, for the three-dimensional (3D) modeling of a non-destructive testing system by eddy currents in absolute mode, this modeling aims to determine the interaction between the sensor and the part to be inspected through the calculation of the impedance of an eddy current sensor for lack of material defects. It is in this context that a model based on the discretization of Maxwell's equations was developed and then a validation of this model was carried out by comparing the results obtained with those of the experimental data obtained from the control of a riveted multilayered structure.

The second part was devoted to the study of the inverse problem. The linear regression method is used, and is effective for the geometric reconstruction of defects.

Keywords: eddy currents, non-destructive testing, 3D finite elements, impedance, regression, inverse problem, characterization of defects.