REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° : MEI

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : Electromécanique
OPTION Maintenance Des Equipements Industriels

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par:

Brahimi Yahia

Badi Abdeljalil

Intitulé

Etude et Simulation d'un Capteur Rotatif à Courants de Foucault pour l'Inspection des Structures Aéronautiques

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. SALIM CHAKROUNE	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. TARIK BOUCHALA	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr. ABDOU ABDELHAK	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examinateur

Année universitaire : 2019/ 2020

Remerciements

Remerciements

Nous remercions avant tous ALLAH pour son aide, qui nous a guidés sur la bonne voie ses innombrables dons, ALLAH qui nous donne la santé, la volonté la patience, le courage et la force pour accomplir nos études.

Nous tenons à exprimer toute nos gratitudes au Dr. Tarik Bouchala,, notre encadreur qui a assuré la direction de ce travail. Nous avons profité d'un encadrement scientifique de qualité.

Nous le remercions pour ses conseils pertinents et éclairés, son aide été pour nous d'une importance capitale dans la réalisation de ce travail et pour ses conseils.

Nous remercions :

- *Messieurs les membres de jury pour avoir accepté d'examiner notre travail.*
- *Pour tous les enseignants qui nous ont orientés le long des cinq années*
- *Pour tous les personnes administratives du département génie électrique de l'université de M'SILA.*
- *Pour toute la promotion Maintenance des Equipements Industriels2020.*

Dédicace

Dédicace

إلهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب النهار الا بطاعتك .. ولا تطيب اللحظات
إلا بذكرك ... ولا تطيب الاخرة إلا بعفوك
ولا تطيب الجنة إلا برؤيتك
(الله جل جلاله)

...إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة.. إلى نبي الرحمة ونور العالمين
سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار .. إلى من علمني العطاء بدون انتظار .. إلى من
أحمل اسمه بكل افتخار ... أرجو من الله أن يمد في عمرك لترى ثمارا قد حان قطافها
..بعد طول انتظار وستبقى كلماتك نجوم أهتدي بها اليوم وفي الغد والى الابد
(والدي العزيز)

إلى ملاكي في الحياة.. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني ...إلى بسمة
الحياة وسر الوجود ألى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى اغلى
...الحبايب
(أمي الحبيبة)

إلى من بهم أكبر وعليهم اعتمد ... إلى شمعات متقدة تنير ظلمة حياتي إلى من
...بوجودهم أكتسب قوة ومحبة لا حدود لها
...ألى من عرفت معهم معنى الحياة
(أخواتي)

إلى من أرى التفاؤل بعيونيهم .. والسعادة في ضحكاتهم
إلى من شاركتهم كل حياتي
(أخوتي)

إلى كل الأهل والأقارب، وإلى كل الأصدقاء والزملاء إلى من وسعتهم ذاكرتي ولم

تسعهم مذكرتي إليهم جميعا أهدي عملي المتواضع

Brahimi Yahia

Dédicace

نحمد الله تعالى ونشكره ونثني عليه أن وفقنا لإنجاز هذا العمل المتواضع . والذي أهديه إلى أعز ما أملك في الوجود ، إلى والديّ الكريمين .

إلى التي أعطت ولم تذخر إلى التي جادت ولم تبخل إلى التي عانت ولم تيأس إلي سر الوجدان منبع العطف والحنان ، أمي الغالية

الى من علمني معنى الكفاح والنضال وكان قوتي في الحياة والذي يفنى عمره وجهد نفسه من أجل تربيتي وتعليمي ، أبي العزيز.

إلى جميع اخوتي وأخواتي كل باسمه

وإلى الأستاذ المشرف وإلى كافة الأصدقاء والأحباب وكل الذين عرفتهم طوال مشواري الدراسي والى زملائي طلبة دفعة 2020 /2019 م

Badi Abdeljalil

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des illustrations

Introduction générale ..... a

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

I.1 Introduction 2

I.2 Différentes techniques du contrôle non destructif 2

I.2.1 Examen Visual 2

I.2.1.1 Principe 2

I.2.1.2 Domaine d'application 3

I.2.1.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par l'Examen Visual 3

I.2.2 Ressuage 3

I.2.2.1 Principe 3

I.2.2.2 Domaines d'application du Ressuage 4

I.2.2.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Ressuage 4

I.2.3 Magnétoscopie 4

I.2.3.1 Principe 4

I.2.3.2 Domaine d'application de la Magnétoscopie 5

I.2.3.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Magnétoscopie 5

I.2.4 Radiographie 5

I.2.4.1 Principe 5

I.2.4.2 Domaine d'application la radiographie 6

I.2.4.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Radiographie 6

I.2.5 Thermographie 7

I.2.5.1 Principe 7

I.2.5.2 Domaines d'applications de la thermographie infrarouge 7

I.2.5.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Thermographie 8

I.2.6 Ultrasons....8
I.2.6.1 Principe....8
I.2.6.2 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Ultrasons....9
I.3 Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault....9
I.3.1 Principe du CND-CF....9
I.3.2 Objectifs du CND-CF....10
I.3.3 Avantages et Inconvénients....11
I.3.4 Application du CND-CF en aéronautique....11
I.3.5 Classification des capteurs....11
I.3.5.1 Selon la position....12
I.3.5.2 Selon la Fonction du capteur....14
I.3.5.3 Selon le mode....15
I.3.6. Différents types de défauts....17
I.3.6.1 Défauts surfaciques....17
I.6.3.2 Défauts internes....17
I.4 Conclusion....17

Chapitre II : Modélisation du Contrôle Non Destructif par CF

II.1 Introduction....19
II.2 Modélisation du dispositif de CND par CF....20
II.3 Intérêt de la modélisation....20
II.4 Mise en équations....21
II.4.1 Équations de Maxwell....22
II.4.2 Lois constitutive....23
II.4.3 Conditions aux limites....24
II.4.4 Conditions de continuité....24
II.4.5 Conditions de Jauge....26
II.4.6 Hypothèses simplificatrices....26
II.5. Formulations magnétodynamiques....27
II.5.1 Formulations basées sur le champ électrique E....27
II.5.2 Formulation en A-V....28
II.5.3 Formulation en H....28
II.5.4 Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique T-Φ....29
II.5.5 Comparaison entre les formulations....29

II.6 Méthodes de résolution des EDP 30
II.6.1 Méthodes analytiques 30
II.6.2 Méthodes numériques 30
II.6.2.1 Méthode des intégrales de volume (MIV) 30
II.6.2.2 Méthode des intégrales de surface (MIS) 31
II.6.2.3 Méthode des intégrales de frontières (MIF) 31
II.6.2.4 Méthode des différences finies (MDF) 31
II.6.2.5 Méthode des éléments finis (MEF) 31
II.6.2.6 Méthode des volumes finis (MVF) 32
II.6.3 Méthodes semi-analytiques 33
II.7 Méthode des éléments finis (MEF) 33
II.7.1 Principe de la méthode variationnelle 34
II.7.2 Formulation résidus pondérés: 34
II.7.3 La discrétisation du domaine 35
II.7.4 Calcul de l'impédance du capteur 36
II.7.4.1 Calcul de l'impédance à travers l'énergie magnétique emmagasinée et des pertes joules 36
II.7.4.2 Calcul de l'énergie électromagnétique de la bobine 37
II.8 Conclusion 39

Chapitre III :Simulation d'une sonde rotative opérant sur une structure multicouche rivetée

III.1 Introduction 41
III.2 Contrainte et recommandation liées à l'inspection des systèmes multicouches 41
III.3 Présentation du dispositif à étudier 42
III.3.1 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5 42
III.3.2 Création du modèle de simulation 43
III.3.3 Vue 3D et 2D du modèle proposé 44
III.3.4 Maillage du modèle proposé 45
III.3.5 Simulation du comportement du système 45
III.4 Étude de l'effet de la variation des paramètres du défaut 48
III.4.1 Effet de la variation de la longueur 48
III.4.2 Effet de la variation de la largeur 49
III.4.3 Effet de la variation de la profondeur 50

III.4.4 Effet de la position angulaire du défaut 51
III.5 Étude de l'effet de la distance Capteur/Rivet 52
III.6 Conclusion 53
Conclusion et perspectives 53

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

Figure I.1 Principe de l'Examen Visual....3
Figure I.2 Principe du CND par Ressuage....4
Figure I.3 Principe du CND par magnétoscopie....5
Figure I.4 Principe du CND par Radiographie....6
Figure I.5 Principe du CND par Thermographie....7
Figure I.6 Principe du CND par Ultrason....9
Figure I.7 Principe du CND par courant de Foucault [5]....10
Figure I.8 Objectif du CND par CF [5]....11
Figure I.9 Critères de classification des capteurs [5]....12
Figure I.10 Sonde interne [5]....12
Figure I.11 Sonde encerclante [5]....13
Figure I.12 Bobine ponctuelle (Palpeur) [5]....13
Figure I.13 Bobine plate [5]....14
Figure I.14 Sonde interne tournante [5]....14
Figure I.15 Capteur à double fonction [5]....15
Figure I.16 Capteur à fonctions séparées [5]....15
Figure I.17 Capteur absolu [5]....16
Figure I.18 Capteur absolue en mode compensé [5]....16
Figure I.19 Capteur en mode différentiel [5]....16
Figure I.20 Perturbation du signal d'alimentation [5]....17

Chapitre II : Modélisation du Contrôle Non Destructif par CF

Figure II. 1 Schéma du système de contrôle étudié. 46
Figure II. 2 Domaine d'étude d'un problème de CND-CF....21
Figure II. 3 James Clerk Maxwell 1831-1879....22
Figure II. 4 Surface $\sum$ séparant deux milieux $\Omega 1$ et $\Omega 2$ 25
Figure II. 5 Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF 32

Liste des tableaux

Tableau II. 1Comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF……30
Tableau III. 1 Description de la configuration ……..……...43

Table des illustrations

Figure III. 1Interface utilisateur de COMSOL 5.5 43
Figure III. 2 Création du modèle géométrique. 43
Figure III. 3 Vue 3D du système à étudier 44
Figure III. 4 Vue 2D du système à étudier 44
Figure III. 5Maillage du dispositif en 3D. Boite d'air cachée. 45
Figure III. 6Variation des parties réelle et imaginaire de l'impédance du capteur en fonction de position du capteur ..... **خطأ! الإشارة المرجعية غير معرّفة.**
Figure III. 7 Densité des courants induits dans la plaque 1 46
Figure III. 8 Densité des courants induits dans la plaque 2. 47
Figure III. 9 Densité des courants induits dans la plaque 3 47
Figure III. 10 Maillage dans la zone de défaut 48
Figure III. 11 Variation de la résistance et de la réactance en fonction du déplacement du capteur (Ld=3, Ld=5 et Ld=7.5 mm) 48
Figure III. 12 Déformation des lignes des courants induits par le défaut (Ld=3 et Ld=7.5mm) ... 49
Figure III. 13 Variation de la résistance et de la réactance en fonction du déplacement du capteur (Wd=0.2, Wd=0.5 et Wd=0.8mm) 49
Figure III. 14 Déformation des lignes des courants induits par le défaut (Wd=0.8 et Wd=0.2mm) 49
Figure III. 15 Variation de la résistance et de la réactance en fonction du déplacement du capteur (Pd=2, Pd=3 et Pd=4mm) 50
Figure III. 16 Déformation des lignes des courants induits par le défaut (Pd=14 et Pd=18mm) ... 50
Figure III. 17 La trajectoire rotationnelle du capteur 51
Figure III. 18 Variation de la résistance et de la réactance en fonction de la position angulaire du défaut 51
Figure III. 19 la distance Capteur/Rivet 52
Figure III. 20 Variation de la résistance et de la réactance en fonction de la distance Capteur/Rivet 52

Introduction générale

Introduction générale

Le contrôle non-destructif (CND) permet l'évaluation de l'état de santé d'une pièce sans en altérer les propriétés mécaniques. Il s'oppose ainsi aux méthodes dites destructives. Les contrôles sont utilisés dans l'industrie lors des phases de fabrication et de maintenance, pour divers objectifs, tels que la caractérisation de matériaux, la mesure d'épaisseur, les contrôles de serrage, les contrôles à chaud ainsi que la détection et la caractérisation des défauts, [1].

Les techniques utilisées en CND sont diverses (ultrasons, examen Visual, magnétoscopie, courants de Foucault, rayons X, radiographie, ressuage...). Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui..) ; les conditions de mise en œuvre…etc.

Le contrôle par courants de Foucault CND-CF) est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre (il est très facile de créer des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde) et complexe. En effet, pour un contrôle donné, comment créer une "bonne" répartition des CF permettant d'avoir un "signal de défaut" aussi important que possible ? Il est nécessaire avant toute chose d'avoir une connaissance suffisamment complète du phénomène physique. Les courants de Foucault (CF), n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent tel que l'impédance du capteur, [2].

La modélisation d'une configuration réelle de CND par CF 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 utilisée. Elle s'est, en effet, imposée comme un outil efficace pour résoudre numériquement les problèmes électromagnétiques, [3].

Un des enjeux du CND par CF dans le domaine aéronautique est l'inspection des structures rivetées, en particulier celle avec des têtes rondes, pour détecter d'éventuels défauts qui peuvent se créer en pied de rivet. La détection de ces défauts doit être effectuée de manière précoce avant que celui-ci ne se propage de rivet en rivet pouvant provoquer l'arrachage du fuselage durant un vol. Cependant, la méthode habituelle d'inspection des lignes de rivets à tête plate rencontre des problèmes pendant l'inspection des rivets à tête ronde, car ce dernier entrave le mouvement du capteur à cause du débordement de sa tête ; ce qui fait bouger le capteur en hauteur par apport au fuselage de l'avion. Pour répondre à cette problématique nous proposons l'étude d'un capteur rotatif qu'on va modéliser et simuler grâce au logiciel COMSOL Multiphysics qui est un outil de conception et de modélisation dont l'avantage principal est de ne pas être dédié à un domaine d'application particulier. Principalement, ce mémoire est organisé comme suit :

Dans un premiers temps, le **premier chapitre** sera dédié des généralités sur le CND. Les principales méthodes de CND sont rappelées. Le contrôle basé sur les courants de Foucault est particulièrement détaillé. Puis, nous présenterons les notions de base concernant les capteurs à courants de Foucault.

comportement du champ électromagnétique, les formulations magnétodynamiques nécessaires à la mise en œuvre d'un outil éléments finis 3D soit en formulations type champ ou potentiel.

Après cela, dans le **troisième chapitre**, on présentera le dispositif à étudier ainsi que les caractéristiques géométriques et physiques, puis l'étude de l'effet de la variation des paramètres du défaut. Enfin, nous présentons les résultats de simulation suivis d'une analyse permettant une interprétation adéquate.

Enfin, nous terminerons ce travail par une **conclusion générale** et des **perspectives** permettant de faciliter le chemin aux chercheurs souhaitant exploiter et améliorer cette étude.

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

I.1 Introduction

Le contrôle non destructif regroupe un ensemble de techniques et de procédés permettant de fournir des informations sur l'état de santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des dégradations nocives à leur utilisation ultérieure. [4]

Celui-ci a pour objectif de contrôler l'état des pièces industrielles et de vérifier le fonctionnement correct des parties critiques d'un système sans en altérer les propriétés physiques, soit au cours de la production, soit au cours d'utilisation, soit dans la phase de maintenance. [4] [5]

L'histoire du CND commence à la fin du XIX siècle, avec la physique moderne, mais c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie. Vers les années 1960-1970, le développement des centrales nucléaires et de l'aéronautique a engendré une forte accélération du progrès du CND, et des différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe, …) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service).[6]

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. [2]

Le premier chapitre est consacré à la présentation des principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault qui fera l'objet d'étude de ce manuscrit.

I.2 Différentes techniques du contrôle non destructif

La diversité des pièces à inspecter, de leurs géométries, de leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de technique existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. [7]

Parmi les techniques de contrôle non-destructif existant, nous proposons d'étudier, les techniques de ressuage, examen Visual, la magnétoscopie, la radiographie, la thermographie, les courants de Foucault et l'ultrason.

I.2.1 Examen Visual

Le contrôle visuel est le plus ancien des contrôles non-destructifs, c'est la méthode la plus utilisée, car la plus économique à mettre en œuvre. Elle nécessite uniquement les « bons yeux » d'un opérateur.

I.2.1.1 Principe

L'examen visuel est le procédé de contrôle le plus ancien, le plus simple et le plus général. L'examen visuel contrôle ancestral le plus élémentaire, est la base des contrôles optiques non automatiques. Il peut être aidé, par un éclairage laser ou classique, une loupe binoculaire, ou un système de télévision.

De façon automatique, sont réalisées en général des acquisitions d'images par balayage laser ou par utilisation de barrettes de capteurs optiques suivies de traitement d'images tels que le seuillage ou la reconnaissance de formes (**Figure I.1)**.

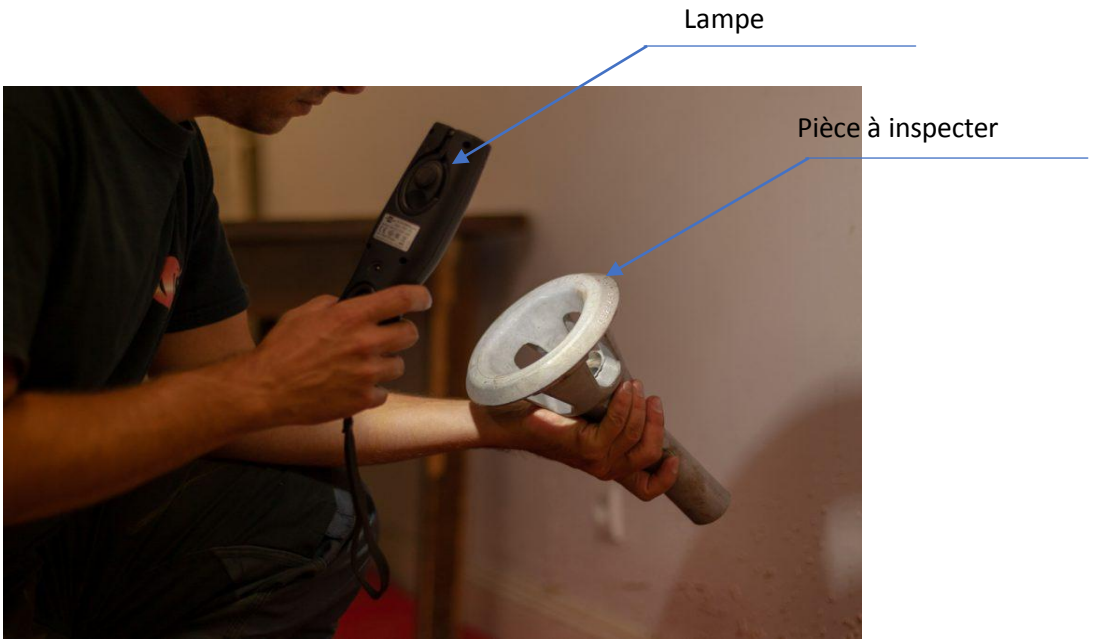


Figure I.1 Principe de l'Examen Visual

I.2.1.2 Domaine d'application

Applicable pour tous les matériaux et pour défauts débouchant.

I.2.1.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par l'Examen Visual

❖ **Avantages**

- Souplesse de mise en ouvre
- Ce type de contrôle beaucoup plus efficace, rapide et fiable.

❖ **Inconvénients**

- Un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface.
- Définition incomplète des critères.
- Complémentaire à une autre technique.

I.2.2 Ressuage

Le ressuage, appelé aussi « liquide pénétrant d'inspection », est l'une des techniques de CND les plus simples et les plus largement utilisées. Cette technique ne permet de détecter que les défauts de surface, quelque soit leur forme et leur taille, dans tous les matériaux.

I.2.2.1 Principe

Le ressuage consiste à appliquer sur la surface de la pièce à contrôler, préalablement nettoyée et séchée, un liquide d'imprégnation coloré ou fluorescent. La première étape de la méthode consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. Un liquide coloré ou fluorescent dit « pénétrant » est ensuite appliqué sur la surface de la pièce. Il va s'infiltrer à l'intérieur des

anomalies (fissures, porosités…). L'excès de liquide présent à la surface de la pièce est éliminé par lavage. La surface est ensuite recouverte d'un révélateur qui attire le liquide d'imprégnation retenu dans les défauts, ce que désigne le terme « ressuage ». (Voir la **figure I.2).**

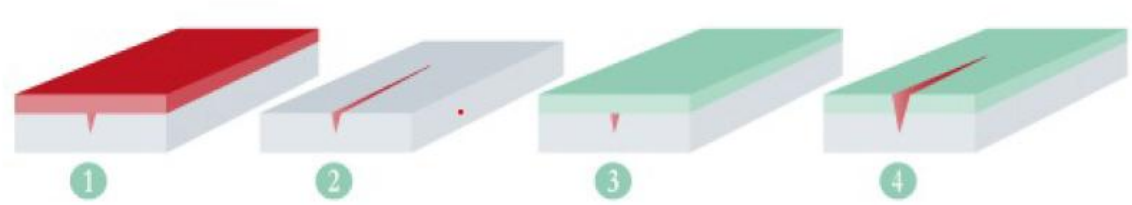


Figure I.2 Principe du CND par Ressuage

I.2.2.2 Domaines d'application du Ressuage

Permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métallique.

I.2.2.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Ressuage

❖ **Avantage**

- Facile à mettre en œuvre manuellement ;
- Économique ;
- Détection possible de petits défauts susceptibles de générer des fuites ;
- Utilisable sur des pièces ferromagnétiques lorsque les problèmes des désaimantations sont critiques ou lorsque les pièces présentent une géométrie trop complexe ;

❖ **Inconvénients**

- Uniquement sur défauts surfaciques ;

I.2.3 Magnétoscopie

La magnétoscopie est une technique de CND qui permet de détecter les défauts de surface (défauts débouchant) ainsi que ceux proche de la surface (défauts sous-jacents) dans les matériaux ferromagnétiques (les aciers ordinaires, le fer, le nickel, le cobalt…). Cette technique est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et son efficacité maximale dans la détection des défauts de surface.

I.2.3.1 Principe

On applique un fort champ magnétique ou un fort courant sur la pièce et on visualise à l'aide d'une poudre métallique les lignes de champ au droit des défauts. L'examen des pièces se fait le plus souvent sous éclairage UV.

L'examen magnétoscopie consiste à soumettre la pièce ou une partie de la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques qui sont mise en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. L'image magnétique obtenue est observée dans

des conditions qui dépendent du produit indicateur utilisé. (Soit à l'aide d'un film magnétisable (magnétoscopie), soit à l'aide d'appareils de mesure de champ magnétique, magnétoscopie) (**Figure I.3**).

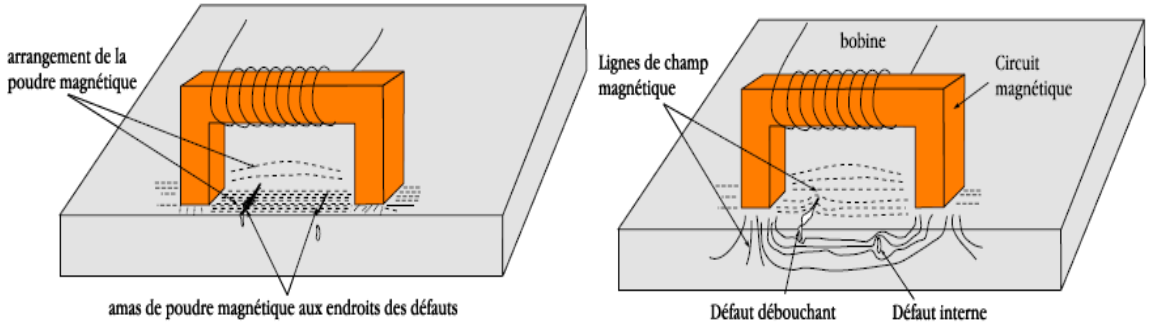


Figure I.3 Principe du CND par magnétoscopie

I.2.3.2 Domaine d'application de la Magnétoscopie

Elle ne s'applique qu'aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte, …).

I.2.3.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Magnétoscopie

❖ **Avantages**

- La méthode est relativement simple de mise en œuvre ;
- Permet une localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous-jacentes ;
- Les différentes séquences de la mise en œuvre se prêtent bien à l'automatisation ;

❖ **Inconvénients**

- La méthode ne s'applique que sur les matériaux ferromagnétiques ;
- La sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction ;

I.2.4 Radiographie

La radiographie est l'une des techniques de contrôle non destructif, les largement utilisées. Dans cette technique, les rayons x (ou les rayons gamma) sont utilisés comme moyen de détection.

I.2.4.1 Principe

Le principe de fonctionnement de la radiographie repose sur la différence d'absorption. Un matériau présentant un défaut et ayant un coefficient d'absorption massique μ est placé sous une source de rayons x. Etant donné que l'aire n'atténue pas le faisceau de rayons x. On peut supposer que le défaut n'absorbe pas les rayons x. Par conséquent, l'intensité du faisceau de rayon x détectée dans le point A sera inférieur à celle enregistrée en B. cela peut s'expliquer par le fait que le faisceau de rayon x passant par le trajet menant au point A traversera plus de matière que celui allant vers le point B, **(Figure I.4)** [8].

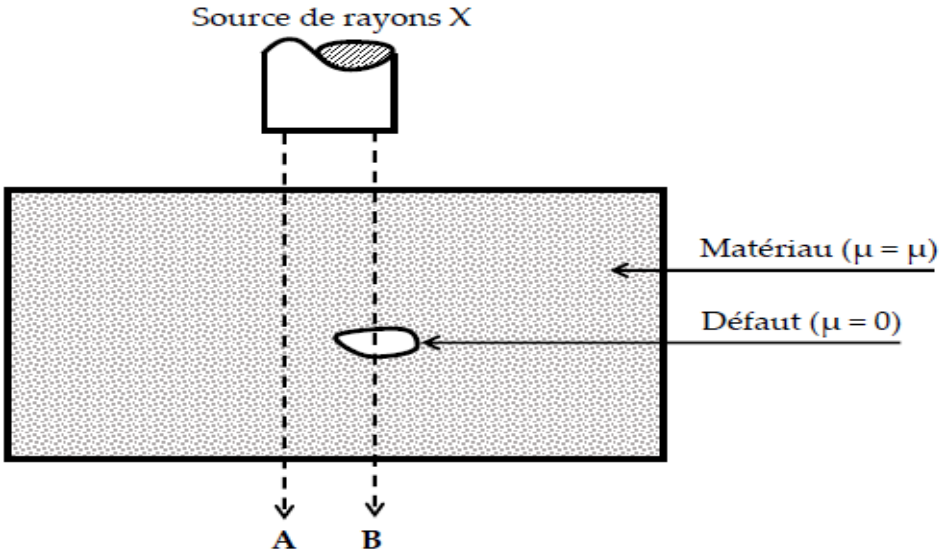


Figure I.4 Principe du CND par Radiographie

I.2.4.2 Domaine d'application la radiographie

Le champ d'application de la radiographie industrielle est très vaste ; c'est en effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui des contrôles de maintenance.

La quasi-totalité des matériaux peut être examinée en radiographie et les épaisseurs contrôlées peuvent être importantes. En revanche, la méthode est coûteuse sur le plan du matériel et de la mise en œuvre.

I.2.4.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Radiographie

❖ **Avantages**

Les **avantages** majeurs des techniques radiographiques X et γ sont :

- De 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 ;
- Contrôle des objets de forme compliquée ;
- De garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures grâce à l'utilisation des témoins IQI.

❖ **Inconvénients**

- Les **inconvénients** principaux de ces techniques sont :
- 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.

I.2.5 Thermographie

L'AFNOR définit la **thermographie** comme la " technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène thermique observée dans un domaine spectral de l'infrarouge " (**Figure I.5).** [4]

Figure I.5 Principe du CND par Thermographie

I.2.5.1 Principe

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermogrammes) des surfaces observées.

Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple). Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique. [2]

Cette technique est bien adaptée pour la détection des défauts sous-jacents dans les matériaux métalliques et composites. Toutefois, elle ne permet pas de déceler les défauts profonds puisque sa sensibilité diminue avec les fortes épaisseurs et la géométrie de la pièce contrôlée doit être relativement simple. [9]

I.2.5.2 Domaines d'applications de la thermographie infrarouge

L'analyse thermographique est utilisée dans des domaines divers, dans le but d'établir un diagnostic :

- **Industrie** : contrôle des installations électriques, électromécaniques, hydrauliques, frigorifiques…
- **Bâtiment** : contrôle thermique des infiltrations et de l'isolation (sociétés de gestion immobilière, hôpitaux…)

I.2.5.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Thermographie

❖ **Les avantages**

- Méthode relativement rapide ;
- Mesure sans contact ;
- Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée ;
- La précision ; grâce à l'image vous savez exactement à quel endroit porter votre attention ;
- La sensibilité à la détection des défauts de faibles dimensions ;
- Mesure en temps réel ;
- Prédiction des défauts, car les gros échauffements sont signes de défaillances annoncées ;
- La possibilité d'archivage des résultats par la caméra infrarouge.

❖ **Inconvénients**

- Nécessite un opérateur compétant et formé ;
- Perturbation des mesures par l'environnement ;
- Des difficultés de localisation de la profondeur des défauts ;
- Nécessite du matériel spécifique et onéreux ;
- Difficulté d'interprétation des résultats.

I.2.6 Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Cette technique permet la détection de défaut à l'intérieur d'un matériau par a transmission et la réflexion d'onde de type ultrasons à l'intérieur de ce dernier.

I.2.6.1 Principe

Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure **(Figure I.6).** [10]

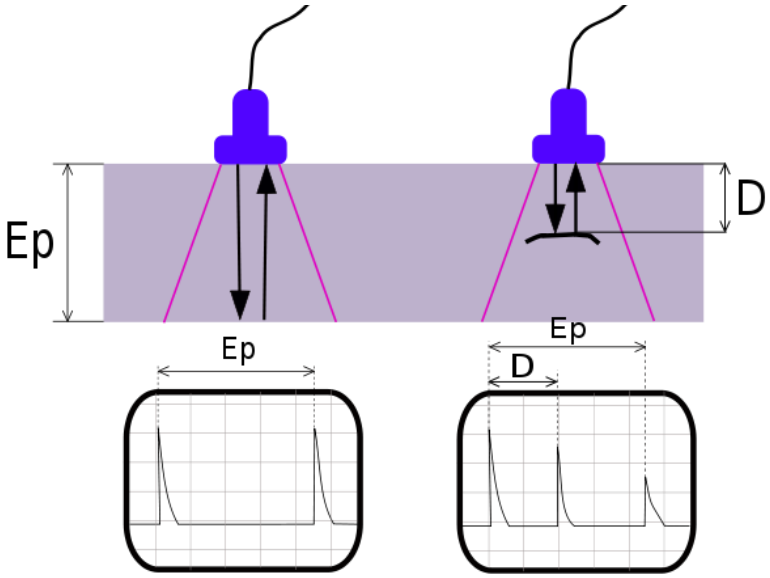


Figure I.6 Principe du CND par Ultrason

I.2.6.2 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Ultrasons

❖ **Avantages**

- Méthode de contrôle rapide ;
- Adaptée aux zones d'accès difficiles ;
- Détection, localisation et dimensionnement des défauts;
- Acquisition et analyse en temps réel ;
- Haute sensibilité de détection des défauts ;
- Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge) ;
- Sauvegarde numérique des données.

❖ **Inconvénients**

- Une méthode qui nécessite une expérience un très haut niveau de technicité ;
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- Inspection limitée par la complexité de la forme de la pièce contrôlée.

I.3 Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault

Par sa simplicité et son efficacité, le contrôle par courants de Foucault (CND-CF) est la technique la plus utilisée dans la caractérisation des défauts de surfaces dans les matériaux conducteurs d'électricité. Le CND-CF repose sur le phénomène d'induction électromagnétique dont une particularité essentielle est de pouvoir injecter de l'énergie électromagnétique dans un matériau conducteur (induit), sans qu'il y ait contact avec l'inducteur.

I.3.1 Principe du CND-CF

Lorsque l'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent en circuit fermé à l'intérieur de celui-ci : ce sont les courants de Foucault (Physicien Français 1819-1868)**(Figure I.7).**

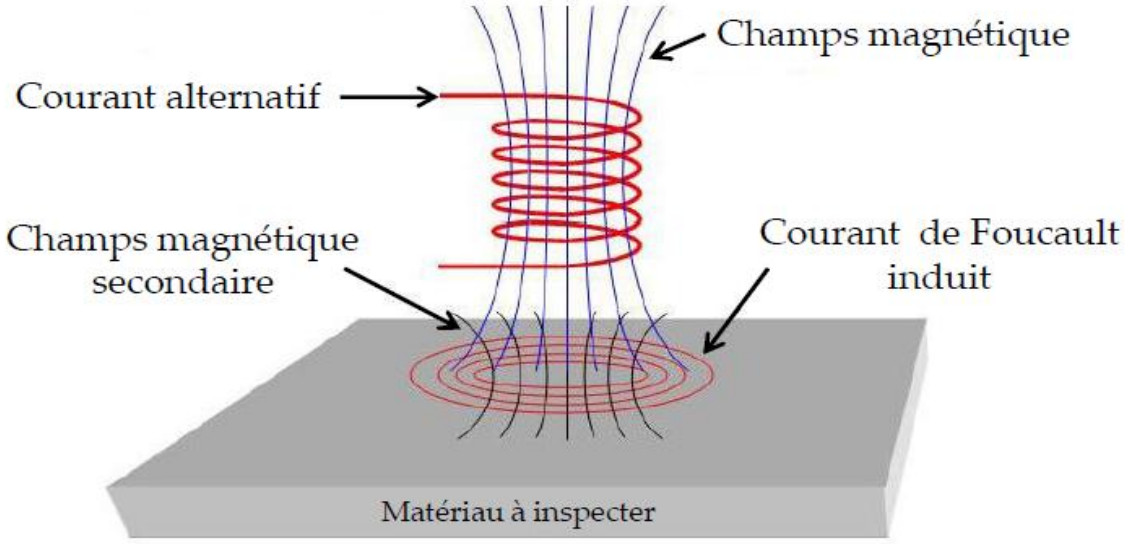


Figure I.7 Principe du CND par courant de Foucault [11]

Une bobine du capteur placée à proximité d'une pièce conductrice parcourue par un courant variable, courant alternatif par exemple, génère de tels courants induits dans la pièce. Appelés courants de Foucault.

Ces courants reproduisent à leur tour un flux magnétique opposant au flux d'excitation, modifiant par la même la f.e.m de la bobine. On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation de la f.e.m induite dans la bobine ou de manière équivalente la variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation, [4].

I.3.2 Objectifs du CND-CF

Le contrôle non destructif par courant de Foucault consiste la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation de paramètres physiques ou géométriques et la caractérisation électromagnétiques, d'autre parte pour le contrôle de l'état de santé et la détection des défauts. La figure illustre les différents objectifs visés par le CND-CF**(Figure I.8).**

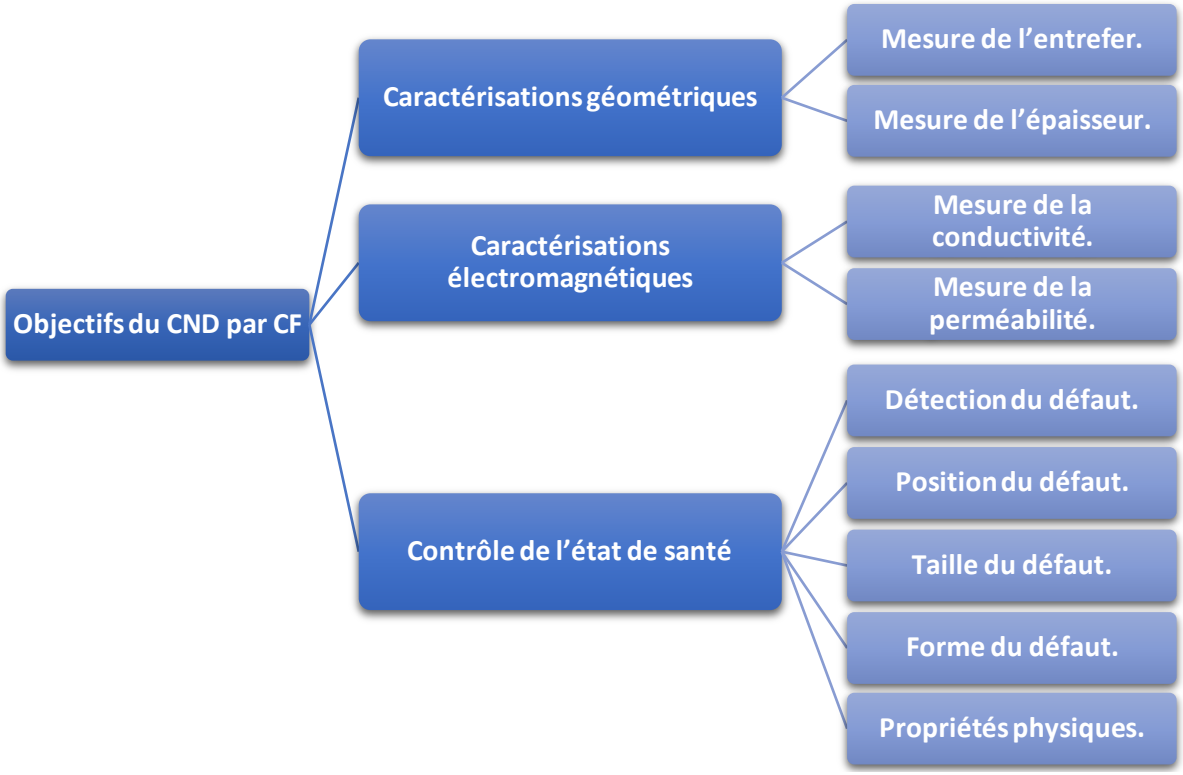


Figure I.8 Objectif du CND par CF [11]

I.3.3 Avantages et Inconvénients

Le contrôle par courants de Foucault présente plusieurs avantages tels que :

- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement en fois (quelques mm) dans tout matériau conducteur.
- Rapidité de balayage et de détection.
- La simplicité de leur mise en œuvre.
- Aucune préparation particulière de la surface contrôlée.
- Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplant.
- Aucune nuisance ou pollution.
- Traitement informatique avec stockage des données de modélisation.

I.3.4 Application du CND-CF en aéronautique

- Applicable aux matériaux conducteurs et ferromagnétiques.
- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe de composants aéronautiques.
- Utiliser pour la recherche de fissures de fatigue au cours des opérations de maintenance du matériel aéronautique.

I.3.5 Classification des capteurs

Le capteur est une bobine ou un ensemble de bobines, il sert à générer les courants de Foucault ainsi qu'à capter leurs effets. La grandeur mesurée est l'impédance ou une différence de potentiel représentant l'image des courants de Foucault. La forme du capteur, sa position relative au matériau, sa fonction et sa conception varient en fonction de son utilisation. Il peut être classé en fonction de trois caractéristiques : sa position, sa fonction et sa mode de contrôle**(Figure I.9).** [10]

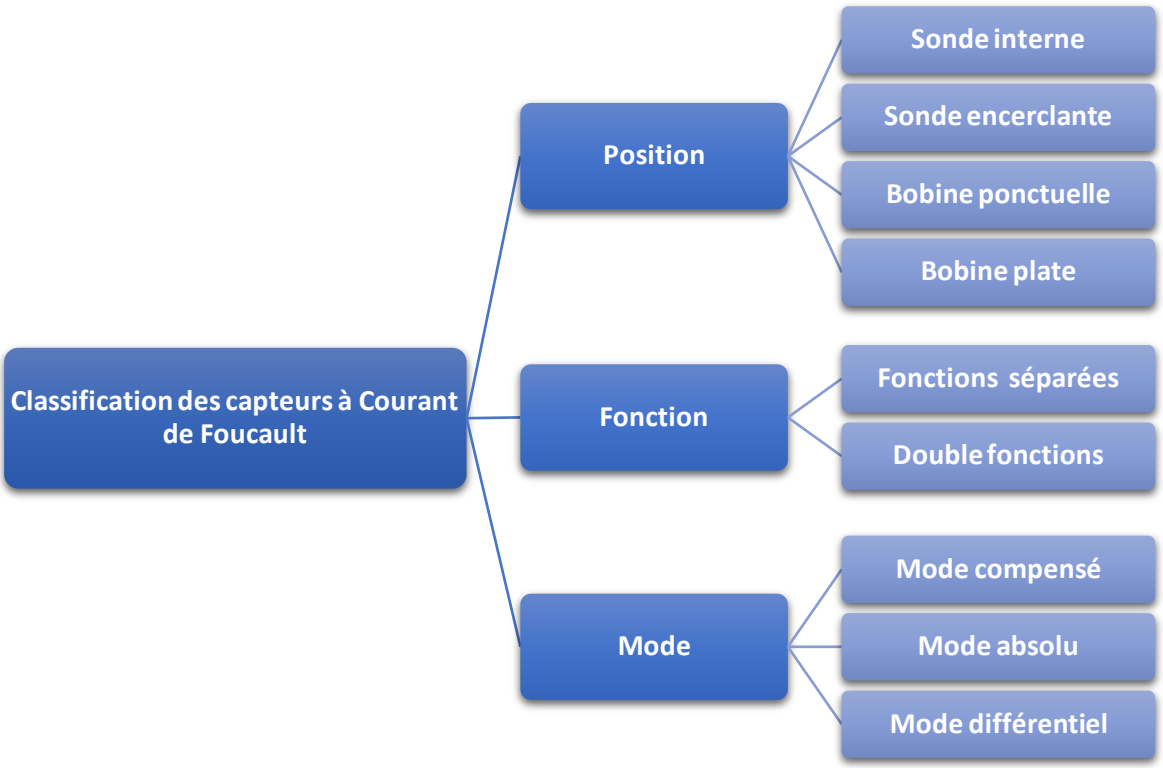


Figure I.9 Critères de classification des capteurs [11]

I.3.5.1 Selon la position

Sonde interne

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau **(Figure I.10).** [10]

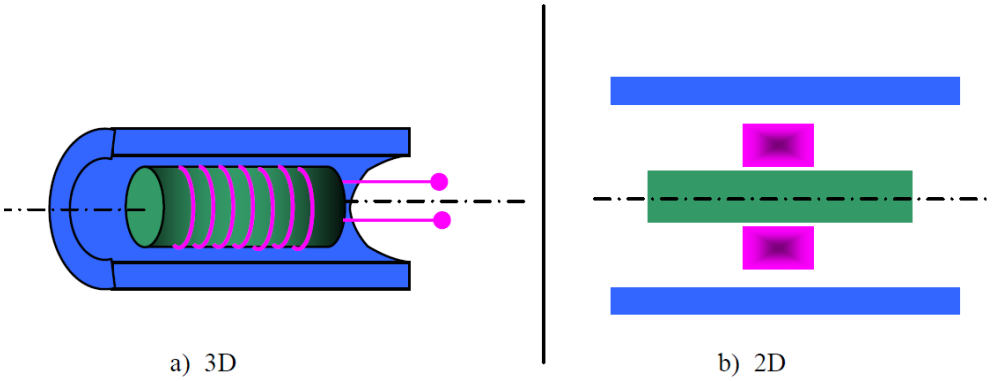


Figure I.10 Sonde interne [11]

Sonde encerclante

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner **(Figure I.11).** Dans la majorité des cas, il s'agit de bobines à section circulaire. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, les barres. [11]

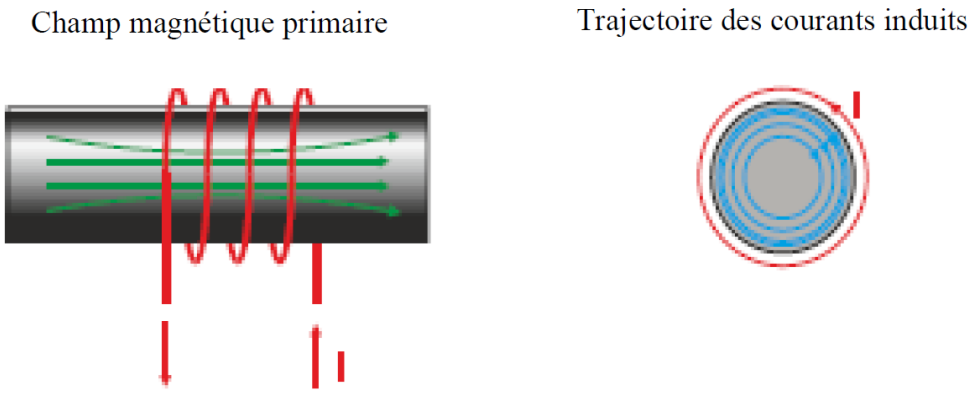


Figure I.11 Sonde encerclante [11]

Bobine ponctuelle (Palpeur)

Ses enroulements forment une petite bobine qui peut être placée sur, ou près, de la surface de la pièce. Il est destiné au contrôle local d'un produit à partir de la surface, sur laquelle il peut se déplacer avec deux degrés de liberté. Elle analyse une zone essentiellement égale à l'aire de sa section transversale. Elle permet donc une inspection locale de la pièce et elle peut atteindre des régions d'accès réputées difficiles. Dans le cas de l'examen d'une surface importante, il nécessite un balayage méthodique de la pièce **(Figure I.12).** [10]

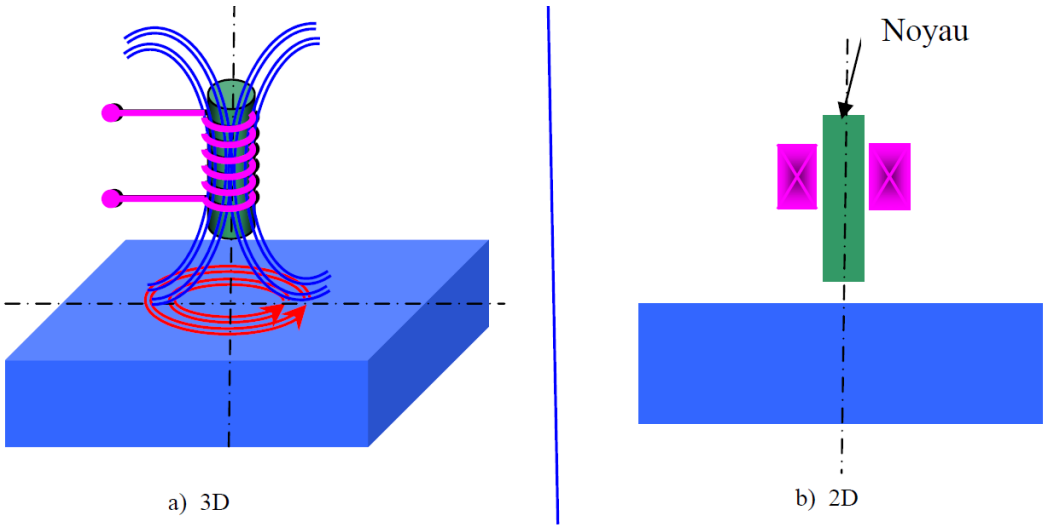


Figure I.12 Bobine ponctuelle (Palpeur) [11]

Bobine plate

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large **(Figure I.13).** [12]

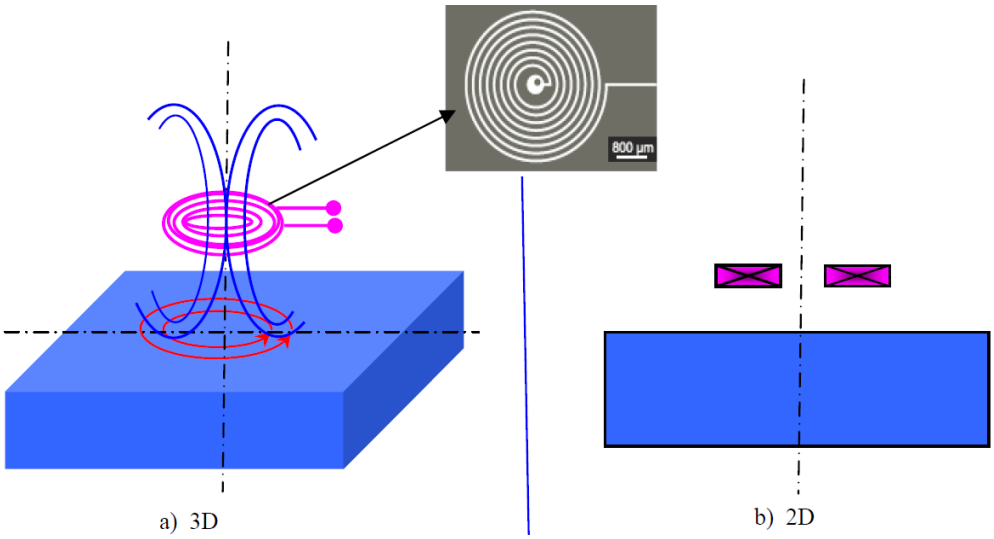


Figure I.13 Bobine plate [11]

Sonde interne tournante

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube**(Figure I.14).** [10]

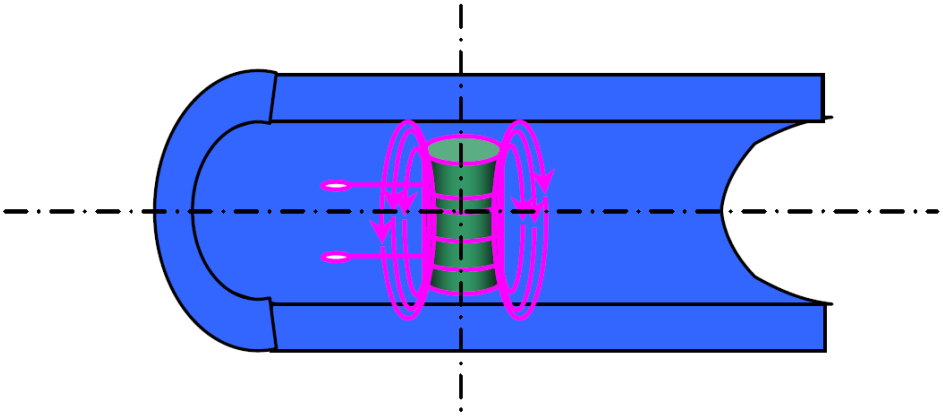


Figure I.14 Sonde interne tournante [11]

I.3.5.2 Selon la Fonction du capteur

Par définition, l'émetteur alimenté par un courant alternatif crée un champ magnétique, répondant ainsi à la fonction d'émission, et le récepteur fait une mesure de champ magnétique, c'est la fonction de réception. Les capteurs CF se décomposent en deux configurations : les capteurs à double fonction et les capteurs à fonction séparées.

1) Capteur à double fonction

Le capteur à double fonction est un capteur dont le ou les éléments constitutifs jouent simultanément le rôle d'émetteur et de récepteur. Le capteur à double fonction le plus simple est constitué d'une seule bobine**(Figure I.15).** [13]

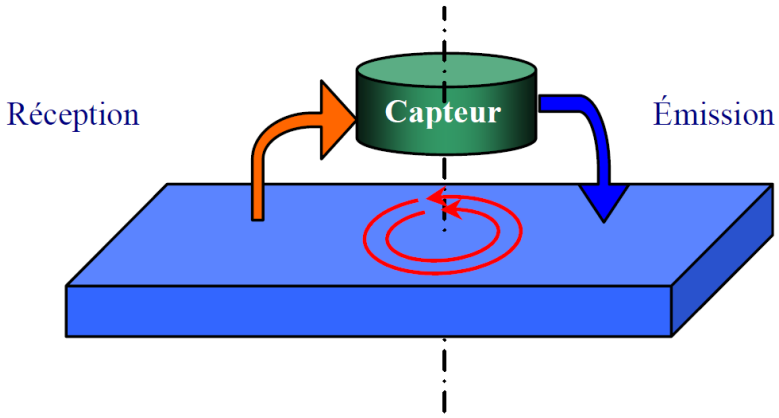


Figure I.15 Capteur à double fonction [11]

2) Capteurs à fonctions séparées

Dans ce cas, le capteur contient au moins deux éléments, une bobine pour l'émission d'un champ alternatif et une autre bobine ou un capteur de champ magnétique pour la réception de la réponse de la pièce examinée. Dans le cas où le récepteur est une bobine la grandeur mesurée est la force électromotrice (f.e.m) induite aux bornes de celle-ci **(Figure I.16).**

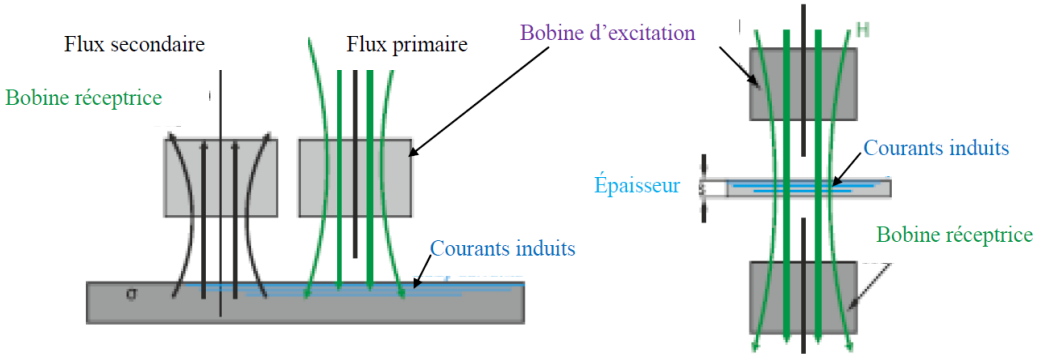


Figure I.16 Capteur à fonctions séparées [11]

I.3.5.3 Selon le mode

1) Mode absolu

Le mode absolu utilise un capteur à double fonction, qui est destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit à examiner par la comparaison du signal reçu à une référence artificielle**(Figure I.17).**

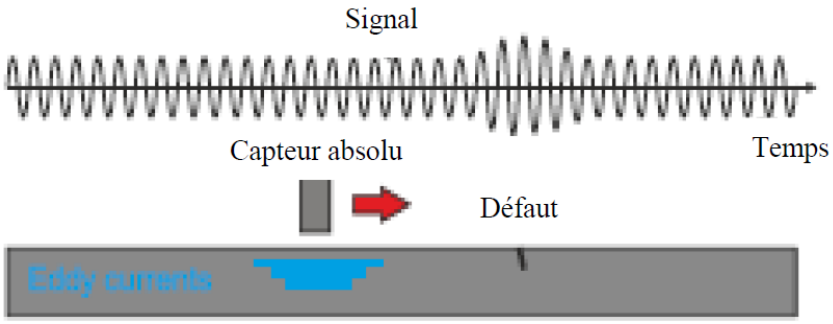


Figure I.17 Capteur absolu [11]

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) [11][10]

Pour réduire l'effet de la variation de la température sur la performance du contrôle, le mode absolu compensé est le mieux adapté **(Figure I.18)**

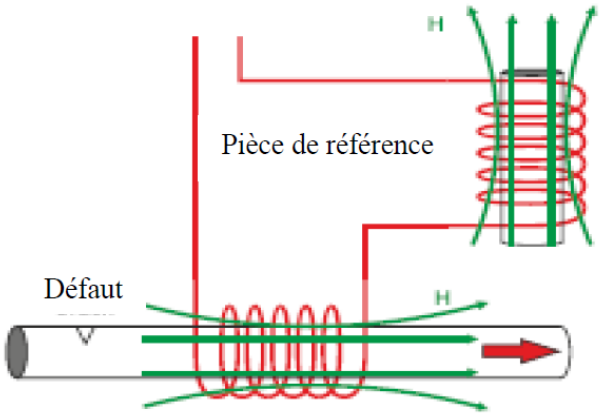


Figure I.18 Capteur absolue en mode compensé [11]

2) Mode différentiel

La mesure différentielle est une comparaison de deux mesures effectuées simultanément d'impédances de deux capteurs absolus dont les flux sont opposés **(Figure I.19)**

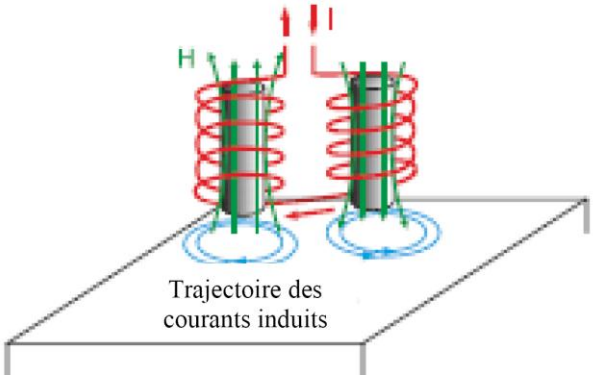


Figure I.19 Capteur en mode différentiel [11]

En effet, dans le cas d'une pièce saine, l'impédance différentielle est nulle. Par contre, si la pièce présente une anomalie l'amplitude de la grandeur d'alimentation est modifiée**(Figure I.20).** [11]

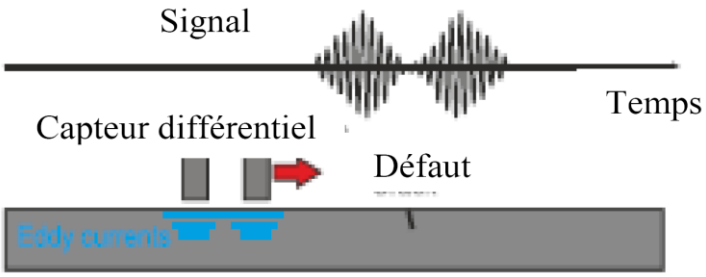


Figure I.20 Perturbation du signal d'alimentation [11]

I.3.6. Différents types de défauts

Le contrôle par courants de Foucault est surtout est utilisé pour détecter et quantifier divers défauts superficiels, tels que les fissures et hétérogénéités chimiques, microstructurales ou mécanique. Il est également utilisé pour mesurer les épaisseurs de revêtements métalliques ou isolants sur des matériaux conducteurs. [14]

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

I.3.6.1 Défauts surfaciques

Les défauts surfaciques sont les plus problématiques sur le plan technologique. Ils incluent les criques, les fissures, les piqûres, les craquelures pouvant provoquer à terme la rupture de la pièce, ou d'aspect, c'est-à-dire la variation de paramètres géométriques et/ou physique de la pièce tels que sa rugosité, son épaisseur, l'homogénéité de la surface, qui rendent la pièce inutilisable.

I.6.3.2 Défauts internes

Les défauts internes sont des hétérogénéités de nature, forme et dimensions variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Ils sont susceptibles d'affecter la santé de la pièce et peuvent se présenter sous la forme d'une crique interne, des porosités, des soufflures.

La majorité des techniques précédemment citées utilisent le capteur comme outil de détection des défauts. Les capteurs sont les premiers éléments rencontrés dans une chaîne de mesure. [3]

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les principes, les avantages et les inconvénients ainsi que les domaines d'application des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, la thermographie, les ultrasons et enfin la technique des courants de Foucault.

Ensuite on s'est focaliser sur le CND par courant de Foucault ou on a éclairci son principe, son objectif, ses avantages et inconvénients et son application en aéronautique.

Enfin, on a parlé de la classification des capteurs en CND-CF et de différents défauts.

Nous avons constaté qu'il n'y a pas de technique de CND qui soit valable pour tous les matériaux et tous les défauts mais qu'ils sont complémentaires, car le choix d'une technique dépend de plusieurs facteurs parmi eux : le but du contrôle, la nature du matériau à contrôler (conducteur ou isolant), les dimensions et l'état de surface de ce dernier.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation, qui ; à l'aide des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques, permet de reproduire par simulation, le fonctionnement d'un système.

Chapitre II : Modélisation du Contrôle Non Destructif par CF

II.1 Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre précédent les différentes techniques du CND, spécialement celle par courants de Foucault. En effet, la procédure d'inspection nécessite un ensemble de connaissance sur les propriétés physiques des matériaux, sur les phénomènes électromagnétiques mis en jeu, sur le traitement du signal associé ainsi que sur les défauts et les pièces à inspectées. Il est donc nécessaire de développé une modélisation de cette technique pour une bonne compréhension du comportement de ces dernier pour une prédiction et une détectabilité optimale des défauts.

Dans le domaine du CND par CF, 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.

La modélisation du CND par CF est basée sur la résolution des équations de Maxwell. Ces équations constituent la traduction mathématique des lois de la physique qui régissent le comportement du système. Selon la complexité de la configuration à simuler, la résolution peut être analytique ou numérique ou même mixte.

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 CF 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 celle des Éléments Finis (EF). [41] [2] [15] [10]

Nous commencerons ce chapitre par décrire brièvement le problème à résoudre et les équations de Maxwell ainsi que les conditions aux limites associées. Ensuite, nous présenterons les différentes méthodes utilisées pour la résolution de ces équations différentielles aux dérivées partielles, ainsi que la méthode de calcule d'impédance. Enfin nous allons nous intéresser plus précisément à la méthode des éléments finis.

II.2 Modélisation du dispositif de CND par CF

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le système représenté sur la (Figure II.1). Un matériau, constituant la pièce critique et contenant la fissure, est soumis à l'action d'un champ électromagnétique produit par une bobine représentant un capteur CF où une densité de courant variable dans le temps est imposée.

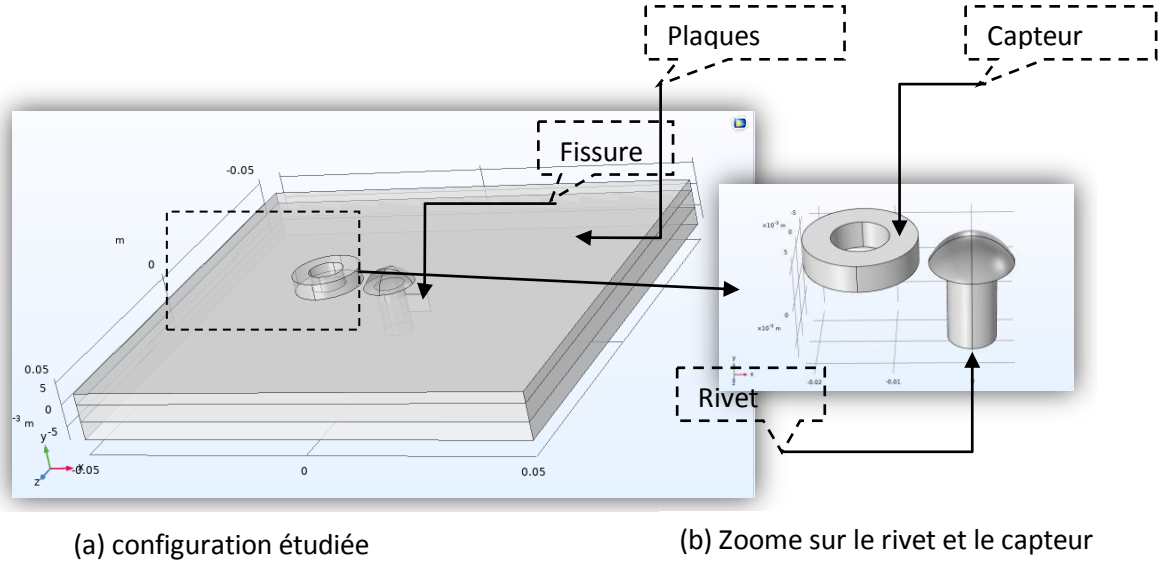


Figure II. 1 Schéma du système de contrôle étudié.

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.[10] [3]

II.3 Intérêt de la modélisation

La modélisation nous permet de rechercher un modèle qui réagit d'une manière semblable au composant qu'on étudie, pour observer ou évaluer une action que l'on souhaite exercer sur ce dernier. Ce modèle permettra de déduire les résultats souhaités. Donc dans de nombreux cas, il est obligatoire de faire recours à la modélisation car l'exercice une action réel irréalisable, couteuse ou même dangereuse.

Le CND par courants de Foucault est largement employé pour inspecter les matériaux électriquement conducteurs. Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier

les interactions sonde-pièce et jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances.

La modélisation consiste à créer une représentation mathématique d'un problème réel moyennant certaines hypothèses. Cette représentation permet aux utilisateurs de prévoir le comportement des systèmes étudiés

La modélisation comporte deux étapes: la première est l'étude et l'analyse du problème et la deuxième est la mise en œuvre d'une solution au problème. La première étape aboutit en CND par CF à des équations aux dérivées partielles (EDP) basées sur les lois de l'électromagnétisme. Des méthodes utilisées pour la résolution de ces dernières sont présentées dans le chapitre suivant.

II.4 Mise en équations

Les problèmes liés au calcul des courants de Foucault peuvent être schématisés par un modèle type composé de l'air, du matériau conducteur et d'une source de courant (Figure II. 2). Ces trois objets forment le domaine de calcul Ω de frontière Γ. [16]

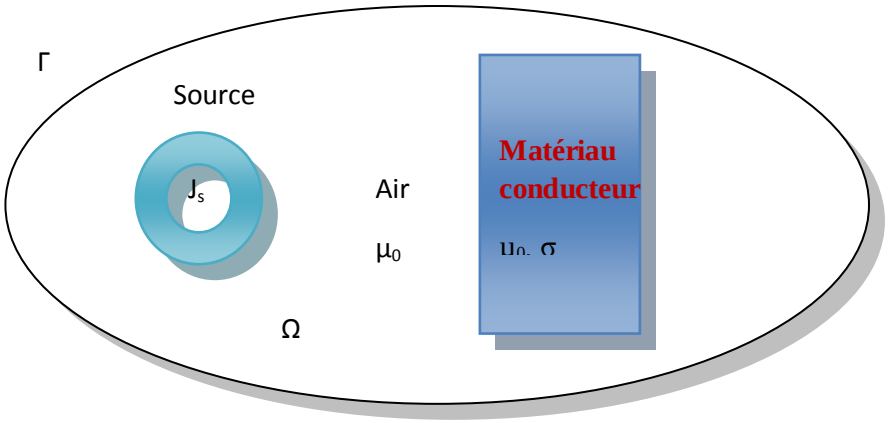


Figure II. 2 Domaine d'étude d'un problème de CND-CF.

- Ω **:** Domaine d'étude.
- *Js*: Densité de courant électrique dans la source.
- Γ : Les frontières qui enveloppent le domaine d'étude.

- σ : Conductivité électrique.
- μ 0: Perméabilité magnétique absolue du vide.

II.4.1 Équations de Maxwell

- Aperçu historique

James Clerk Maxwell, né en 1831 à Édimbourg en Écosse, est principalement connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations l'électricité, le magnétisme et l'induction en développant la formulation mathématique des travaux précédents réalisés par Michael Faraday et André-Marie Ampère. Il a démontré que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière. Les équations de Maxwell dérivent d'un ensemble de vingt équations différentielles à vingt variables, plus tard réduites à quatre. Ces équations sont présentées la première fois à la Royal Society en 1864 et décrivent le comportement et les relations du champ électromagnétique ainsi que son interaction avec la matière.

Dans la suite des ces travaux seul le régime harmonique sera étudié avec une convention en temps choisie en $e^{-j\omega t}$où ωreprésente la fréquence angulaire ou pulsation et f la fréquence en Hz. Pour simplifier la notation la dépendance en ω de toutes les grandeurs sera implicite sauf lorsque nécessaire. [6]

Figure II. 3 James Clerk Maxwell 1831-1879

L'étude d'un dispositif électromagnétique est basée essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et des équations de Maxwell. Ces équations sont l'expression la plus généralisée des lois de l'électromagnétisme classique. Elles constituent le modèle général de description du comportement et des interactions des champs électriques et magnétiques, et elles s'écrivent : [16]

$div\vec{D} = \rho$ Loi de Maxwell Gauss (électrique) (II-1)

$div\vec{B} = 0$ Loi de Maxwell Gauss (magnétique) (II-2)

$\overrightarrow{rot}\vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}$ Loi de Maxwell Faraday (induction) (II-3)

$\overrightarrow{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ Loi de Maxwell Ampère (II-4)

$\vec{E}$: Champ électrique [V/m].

$\vec{H}$: Champ magnétique [A/m].

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

$\vec{B}$: Induction magnétique [T].

$\vec{J}$: Densité de courant [A/m^2].

ρ : Densité volumique des charges électriques [C/m^3].

II.4.2 Lois constitutive

Physiquement, la conductivité électrique, la perméabilité magnétique et la permittivité électrique sont des paramètres physiques qui attachent les équations de Maxwell à travers des relations appelées « lois de comportement des matériaux » (lois constitutives). Ces relations sont décrites comme suit : [6] [17]

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu\vec{H} + \overrightarrow{B_r} \\ \mu = \mu_0\mu_r \end{cases} \quad \text{(II-5)}$$

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

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon\vec{E} \\ \varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r \end{cases} \quad \text{(II-7)}$$

Où :

- **μ**: Perméabilité magnétique [H/m].

- $\mu_0 = 4\pi 10^{-12}$ Perméabilité magnétique [H/m].
- μ_r: Perméabilité magnétique relative du milieu [H/m].
- **σ**: Conductivité électrique [S/m].
- **ε** : Permittivité électrique [F/m].
- $\varepsilon_0 = 8.85.10^{-12}$ Constante diélectrique du vide [F/m].
- ε_r : Permittivité électrique relative du milieu [F/m].

Où, μ et σ peuvent être soit des scalaires, modélisant le comportement de matériaux isotrope, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie. [17]

La relation entre l'induction magnétique $\vec{B}$ et le champ magnétique $\vec{H}$ peut être non linéaire.

Pour assurer l'unicité de la solution du système d'équations (II.4) à (II.7), il est nécessaire d'ajouter trois types de conditions: les conditions aux limites, les conditions de continuité ainsi que les jauges. [17]

II.4.3 Conditions aux limites

La résolution du système composé des équations de Maxwell et des lois de comportement admet une infinité de solutions. Par conséquent, des conditions aux limites doivent être données sur la frontière Γ du domaine d'étude Ω afin d'assurer l'unicité de la solution. Ces conditions aux limites (spatiales) s'énoncent de façon générale pour un domaine Ω de frontière Γ avec $\vec{n}$ un vecteur normal (unitaire) à Γ pour la variable u. [2] [10] [18]

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

II.4.4 Conditions de continuité

Lors du passage d'un milieu à un autre, les champs électromagnétiques subissent des discontinuités aux interfaces et, ne sont pas différentiables. Cependant, il est possible de définir des conditions de passage des champs entre deux milieux.

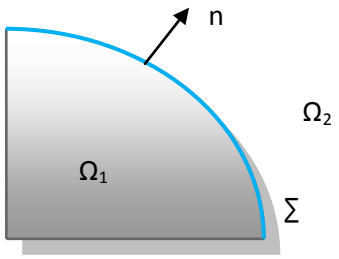


Figure II. 4 Surface ∑ séparant deux milieux Ω1 et Ω2

Considérons deux milieux $\Omega_1$et $\Omega_2$ayant des propriétés physiques différentes, séparées par une interface∑ (figure II.5), Les conditions traduisant la continuité des champs à l'interface ∑ sont alors définies par les relations suivantes :

- La discontinuité de la composante tangentielle de H, cette discontinuité est égale aux courants superficiels J_s.

$$\vec{n} \times (\vec{H}1 - \vec{H}2) = \vec{J}s \qquad \text{(II-8a)}$$

- La continuité de la composante tangentielle de E

$$\vec{n} \times (\vec{E}1 - \vec{E}2) = 0 \qquad \text{(II-8b)}$$

- La continuité de la composante normale de B.

$$\vec{n}.(\vec{B}1 - \vec{B}2) = 0 \qquad \text{(II-8c)}$$

- La discontinuité de la composante normale de D, cette discontinuité est égale aux charges superficielles ρ_s

$$\vec{n}.(\vec{D}1 - \vec{D}2) = \vec{\rho}s \qquad \text{(II-8d)}$$

Où :

$\vec{\rho s}$: La densité surfacique de charge.

$\vec{Js}$: La densité surfacique de courant.

$\vec{n}$: La normale à l'interface ∑ séparant les deux milieux

Ces conditions de continuité (II.8), les composantes tangentielles E et Het les composantes normales B et D sont continues à travers l'interface ∑.

Par contre, si des densités surfaciques de charges ρ_s ou de courant j_s sont présentes à l'interface $\sum$, la composantes normale de l'induction électrique D et la composante tangentielle du champ magnétique H sont discontinues. [9] [19]

II.4.5 Conditions de Jauge

Dans les équations de Maxwell, les champs s'expriment soit à un gradient près (champ rotationnel), soit au rotationnel près (champ à divergence) ce qui justifie l'utilisation des jauges dans certaines formulations pour assurer l'unicité de la solution. Soient $\vec{U}$ et $\vec{W}$ deux

$div\vec{U} = 0$	Jauge de Coulomb
$div\vec{U} + K\frac{\partial u}{\partial t} = 0$	Jauge de Lorentz
$\vec{U}.\vec{W} = 0$	Jauge adapté pour les éléments d'arêtes

champs de vecteurs, les conditions de jauge s'écrivent de façon générale par : [10],

Par exemple, lorsqu'on utilise une formulation en potentiel vecteur, la solution est obtenue à un gradient près. La jauge de Coulomb s'écrit donc $div\vec{A} = 0$normal à la surface de séparation des deux milieux Ω1 et Ω2 et dirigé vers l'extérieur.

II.4.6 Hypothèses simplificatrices

Suivant les dispositifs que l'on étudie certains phénomènes deviennent négligeables (régimes quasi-stationnaires), ce qui va nous donner des équations découplées plus simples à résoudre, ajouté aussi que certaines hypothèses simplificatrices sont introduites. Dans notre cas d'étude nous allons considérer que :

1) Dans un milieu conducteur σ est de l'ordre de 10^6 [S/m], et ε_0 de l'ordre de $\varepsilon_0 = 8.85.10^{-12}$ [F/m] jusqu'à des fréquences qui avoisinent les MHZ nous avons $\omega.\varepsilon_0 \ll \sigma$ ce qui nous permet d'avoir : $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$
2) La densité volumique de charge est considérée comme nulle ($\rho = 0$).
3) Les paramètres **σ, μ, ε,** sont considères linéaires, donc ils ne dépendent pas de la solution du système
4) Le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale.

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

$$div\vec{B} = 0 \quad \text{(II-9)}$$

$$div\vec{D} = 0 \quad \text{(II-10)}$$

$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{(II-11)}$$

$$\overrightarrow{rot}\vec{H} = \vec{J} \quad \text{(II-12)}$$

Avec les relations constitutives suivantes :

$$\vec{J} = \vec{J_s} + \sigma\vec{E} \quad \text{(II-13)}$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad \text{(II-14)}$$

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

II.5. Formulations magnétodynamiques

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 nôtre système.. En générale il est plus fréquent, dans les travaux CND-CF, d'avoir recours à l'utilisation au champ électrique et magnétique en fonction de potentiels. Car la solution converge mieux que si les inconnues étaient les champs (*E*, *H*). [20]

Deux familles de formulations peuvent être mises en évidence.

- Formulations basées sur le champ électrique (**E**, **A-V**), formulation en potentiel vecteur magnétique A
- Formulation basées sur le champ magnétique (**H-Φ, T-Ω**)n , comprend des formulations en H ou la formulation en J .

II.5.1 Formulations basées sur le champ électrique 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 : [20]

$$rot\left[\frac{1}{\mu}(rot\vec{E})\right]+\sigma\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}=\vec{0} \quad \text{(II-15)}$$

II.5.2 Formulation en A-V

D'après l'équation de la conservation de flux (II.2), l'induction magnétique $\vec{B}$ dérive d'un potentiel magnétique $\vec{A}$, tel que : [20]

$$\vec{B}=\overrightarrow{rot}\,.\vec{A} \quad \text{(II-16)}$$

Lorsque cette équation est remplacée dans (II.8a), on obtient :

$\vec{A}$ Est le potentiel vecteur magnétique

$$\overrightarrow{rot}\left[\vec{E}+\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right]=\vec{0} \quad \text{(II-17)}$$

Un potentiel électrique v peut être déterminé à partir de l'équation (II.17), qui est donné par la relation ci-après :

$$\vec{E}+\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}=-\overrightarrow{grad}(v)\Longleftrightarrow\vec{E}=-\overrightarrow{grad}(v)-\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} \quad \text{(II-18)}$$

La combinaison de l'équation (II.13) et (II.17) nous permet d'écrire :

$$\vec{J}=\vec{J}_s+\sigma E=\vec{J}_s-\sigma\left[\overrightarrow{grad}(v)+\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right] \quad \text{(II-19)}$$

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

$$rot\left[\frac{1}{\mu}rot\vec{A}\right]+\sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}+\overrightarrow{\sigma grad}(v)=\vec{J}_s \quad \text{(II-20)}$$

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

$$div\vec{A}=0 \quad \text{(II-21)}$$

II.5.3 Formulation en H

La combinaison des équations (II.12) et (II 13) conduit directement à l'équation à résoudre:[20]

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

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

II.5.4 Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique T-Φ

Comme la densité de courant induite est à divergence nulle $(div\vec{A}=0)$, un potentiel vecteur électrique, noté$\vec{A}$, peut être introduit, tel que : [20]

$$\vec{J}=rot\vec{T}$$

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

$$rot\left[\frac{1}{\sigma}rot\vec{T}\right]+\mu\frac{\partial}{\partial t}\left[\vec{T}-\overrightarrow{grad}\Phi\right]=0$$

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

II.5.5 Comparaison entre les formulations

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

Le Tableau 2.1 récapitule une comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF

Tableau II. 1 Comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF.

II.6 Méthodes de résolution des EDP

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles et elles peuvent se diviser en deux grandes familles : analytiques et numériques. La géométrie du problème considéré joue un rôle fondamental dans le choix de la méthode.

II.6.1 Méthodes analytiques

Les premiers travaux se sont basés sur des méthodes de résolution analytiques des équations issues des modèles à une seule dimension. Leurs l'intérêt réside dans la simplicité de calcul et permettent d'obtenir une solution mathématique exacte du problème. Mais cette méthode devient rapidement impraticable si l'on étudier des problèmes présentant des formes complexes (bidimensionnels…), d'où la naissance des méthodes numériques. [2][5][9] [21]

II.6.2 Méthodes numériques

Avec l'évolution de l'outil informatique, l'utilisation des méthodes numériques pour la résolution de cette catégorie d'équations se généralise de plus en plus. Les méthodes numériques permettent d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées. Parmi ces méthodes, on pourra citer la Méthode des **intégrales de volume** (MIV), Méthode des **intégrales de surface** (MIS), Méthode des **différences finies** (MDF), Méthode des **volumes finis** (MVF), Méthode des **intégrales de frontières** (MIF**)**, Méthode des **éléments finis** (MEF). [2][5][9] [21]

II.6.2.1 Méthode des intégrales de volume (MIV)

La méthode des intégrales de volumes repose sur la résolution des équations intégrales précédemment citées. Une fois les fonctions de Green correspondant à la géométrie étudiée obtenues, les champs électrique ou magnétique dus à l'interaction capteur-cible sont déterminés par convolutions entre ces fonctions de Green et les sources (électriques ou magnétiques) mises en jeu.

En pratique, ces équations intégrales sont discrétisées par la méthode des moments : les champs et les grandeurs constitutives électromagnétiques sont supposés constants dans des cellules élémentaires cubiques. La résolution numérique s'effectue alors par inversion itérative. [2][5][9] [21]

II.6.2.2 Méthode des intégrales de surface (MIS)

Avec cette méthode, le défaut est supposé de conductivité nulle avec une très petite ouverture. Il est pris en compte comme une surface empêchant le courant de passer. Cette méthode se révèle bien adaptée pour ce type de problème. Cependant, à cause de la définition des dyades de Green, elle reste limitée du point de vue des configurations traitables avec cette méthode. [2][5][9] [21]

II.6.2.3 Méthode des intégrales de frontières (MIF)

Cette méthode est basée sur une subdivision de nœuds distribués sur les frontières des différentes régions de dispositif. À partir des valeurs sur les frontières, il est possible dans certains cas de calculer les champs, si c'est nécessaire, à l'intérieur du domaine de résolution.

L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de prendre en considération la saturation, la nécessité d'un espace mémoire et d'un temps de calcul importants, car les matrices issues de cette méthode sont de rang élevé.

La méthode des intégrales de frontières est utilisée généralement en magnétostatique ou bien elle est couplée avec la méthode des éléments finis pour calculer des champs électromagnétiques dans les milieux linéaires et non conducteurs.[2] [10] [9] [21]

II.6.2.4 Méthode des différences finies (MDF)

Cette méthode historiquement la première est relativement simple de mise en œuvre, mais présente l'inconvénient d avoir une faible qualité d'approximation des variables et l'incapacité de modéliQser des géométries de forme complexe. Elle consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mailles rectangulaires. La méthode est basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Si cette méthode est simple à programmer, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes. [2][5][9] [21]

II.6.2.5 Méthode des éléments finis (MEF)

Cette méthode consiste à mailler tout le domaine d'étude par des volumes élémentaires (Tétraèdres, prismes....). Ensuite, les EDP sont réécrites sous une forme variationnelle. Après discrétisation, cette dernière conduit à un système matriciel à résoudre directement ou par une méthode itérative.

Contrairement à la plupart des méthodes numériques citées auparavant, la méthode des éléments finis permet de traiter des configurations de contrôle très variées, d'un point de vue géométrique (capteur et pièce inspectée) et de celui des caractéristiques physiques des matériaux. Ceci la rend très adaptée pour modéliser les capteurs souples et les pièces de formes complexes. C'est la méthode qui été retenue dans ce travail. [5] [2] [9] [21] [20]

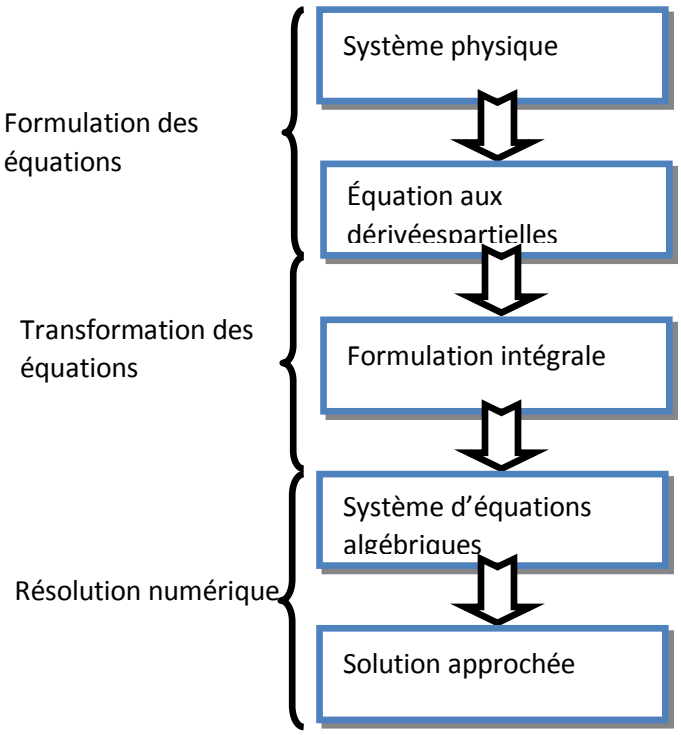


Figure II. 5 Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF

II.6.2.6 Méthode des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation utilisée en particulier en mécanique des fluides. Elle a connu aussi un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie : transfert thermique, électromagnétisme …etc. La méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude Ω en volumes élémentaires (tétraèdres, hexaèdres, prismes…etc.) de telle manière que chaque volume entoure un nœud. La difficulté de leur détermination limite l'application de cette méthode à des géométries canoniques.

L'équation EDP (Équation aux dérivées partielles) du problème est intégrée sur un volume élémentaire. Afin de calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, …etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude .Par rapport aux éléments finis, la discrétisation par la méthode des

volumes finis conduit à un système linéaire avec une matrice plus creuse. Cet avantage permet une convergence plus rapide des solveurs itératifs [2][5][9] [21]

II.6.3 Méthodes semi-analytiques

Ce sont des méthodes mixtes, qui sont une combinaison de méthodes analytiques couplées à des méthodes numériques. Ces méthodes ne sont appliquées que pour résoudre certains types de problèmes. Cette approche nous permet d'obtenir des expressions analytiques faciles à résoudre et de réduire le temps de simulation tout en ayant des résultats assez proches de la réalité.

Les résistances, les inductances et mutuelles élémentaires sont calculées analytiquement. Ensuite une sommation numérique permet de calculer ainsi l'impédance totale de l'inducteur. Donc, cette impédance contient des expressions analytiques qui sont sommées numériquement; d'où vient l'appellation **semi-analytique**.

Elles regroupent la méthode des **multi-transformateurs** et celle des **circuits couplés**,[11].

II.7 Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis est apparue dans les années 1950 et n'a été introduite en électromagnétisme qu'en 1970 par M.V.K.Chari et P.P. Sylvester. Et elle a connu dés lors un développement considérable.[12] [22]

Contrairement à la MDF, les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes, ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul. Cette méthode est l'une des plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions.

La MEF 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. 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[5] [21]

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation des solutions d'équations différentielles aux dérivées partielles qui est construite à partir d'une formulation équivalente du problème, elle peut être soit une **formulation variationnelle** ou en **résidus pondéré.**

II.7.1 Principe de la méthode variationnelle

La méthode variationnelle nécessite la connaissance à priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée par le principe de l'action Hamiltonnienne qui stipule l'existence d'un fonctionnel type intégral défini par: [18]

$$F(A) = \int_{\Omega} L.\, d\Omega \qquad \text{(II-25a)}$$

Où :

$$L = Wc - Wp \qquad \text{(II-25b)}$$

- L : est la fonction de la grange résultant de la coénergie du système de type cinétique et de son énergie potentiel.
- Ω: est le domaine d'étude

La résolution du problème variationnelle défini par la fonction d'énergie F(A) revient à minimiser cette fonctionnelle.

La minimisation s'effectue en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A\mathrm{n}} = 0 \qquad \text{(II-25c)}$$

Où :

- n : nombre de nœud dans le domaine d'étude.
- A : inconnue au nœud n du domaine.

II.7.2 Formulation résidus pondérés:

Le principe de la méthode des résidus pondérés est de remplacer la solution exacte par la approchée, ce qui va engendrer une erreur appelée résidus R, solution ;

$$R\mathrm{i} = L(A) - f$$

Tel que :

- R : est le résidu de l'approximation.
- L(A) : opérateur différentiel.

- f : fonction définie sur le domaine d'étude Ω.
- A : l'inconnue à chercher.

À l'aide de fonction de pondération bien choisie, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en N points du domaine Ω.

$$\int_{\Omega} Ri\Phi i \,.\, \partial\Omega = 0$$

Φ_i : Fonction de pondération ou de projection.

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu. [22] [18]

Plusieurs méthodes peuvent être déduites de la formulation résidus pondérés, ces dernières sont essentiellement liées au choix des fonctions de pondérations, parmi elles on citera :

1- La méthode de collocation par points, ou la fonction de Dirac sont prises comme fonctions de pondérations ou on impose au résidu de s'annuler dans chaque pont ou on veut approcher la solution.

2- Méthode des moindres carrés qui est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites.

3- La méthode de Galerkine qui consiste à choisir des fonctions de projections identiques aux fonctions d'approximation, qui donne à la fin un système algébrique symétrique facile à résoudre.

Contrairement à la méthode variationnelle, la méthode des résidus pondérés, ne nécessite pas la connaissance au préalable de la fonctionnelle d'énergie du système.

II.7.3 La discrétisation du domaine

Le domaine de résolution est discrétisé en petits domaines appelés éléments finis, l'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément, grâce aux fonctions d'interpolation.

L''interpolation dans un élément est effectuée en fonction des valeurs de l'inconnue aux nœuds de cet élément. On parle alors d'interpolation nodale,[15] [21].

II.7.4 Calcul de l'impédance du capteur

Le CND par courants de Foucault repose sur l'analyse des différentes grandeurs électriques du capteur lors de son déplacement par rapport aux défauts, ces grandeurs sont influencées par de nombreux paramètres.

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.

Comme l'obtention des courants de Foucault n'est pas directement accessible expérimentalement, donc le passage par la mesure ou le calcul d'autres grandeurs (potentiel vecteur magnétique, champ électrique, impédance) est nécessaire. Plusieurs expressions de l'impédance ont été formulées et développées dans le domaine de contrôle non destructif par courants de Foucault. Parmi elles citons: [20]

II.7.4.1 Calcul de l'impédance à travers l'énergie magnétique emmagasinée et des pertes joules

La variation d'impédance peut être déterminée en calculant l'énergie magnétique emmagasinée W_m dans tout l'espace d'étude et les pertes Joule P_J, définies par les relations suivantes :

$$W_m = \frac{1}{2}\iiint_V \frac{1}{\mu}\left|\vec{B}\right|^2 dv \tag{II-26}$$

$$P_J = \frac{1}{2}\iiint_{conducteur} \frac{1}{\sigma}\left|\vec{J}\right|^2 dv \tag{II-27}$$

Connaissant $W_m$et P_J, nous pouvons accéder facilement à la résistance R et à la réactance X, équivalentes du capteur. Les expressions reliant la résistance aux pertes Joule, et la réactance de l'énergie magnétique sont données par les relations suivantes,

$$R = \frac{P_J}{I^2} \tag{II-28}$$

$$X = \frac{2\omega}{I^2} W_m \tag{II-29}$$

Avec I et ωreprésentent respectivement le courant d'excitation parcourant la bobine et sa pulsation. D'où on peut déduire les variations ΔX et ΔR

(II-30)

$$\Delta X = \frac{\omega}{\mu . I^2} \iiint_V (|B_0|^2 - |B|^2) . dv$$

(II-31)

$$\Delta R = \frac{1}{2 . \sigma . I^2} \iiint_{conducteur} (|J_0|^2 - |J|^2) . dv$$

Avec

- B_0 : Induction pour pièce de référence (sans défaut);
- B : Induction pour pièce de à tester (avec défaut);
- J_0 : Densité des courants induits;
- J : Densité des courants induits.

II.7.4.2 Calcul de l'énergie électromagnétique de la bobine

On peut calculer la variation de l'impédance par la détermination de l'énergie électromagnétique de la bobine constituant le capteur. Cette variation est donnée par la formule ci-après. [20]

$$I^2 \Delta Z = - \int_{\Omega_s} (\vec{E} - \vec{E}_0) . \vec{J_s} d\Omega_s \quad \text{(II-31)}$$

Avec:

E et $\vec{E}$ représentent les champs électrique respectivement en présence et en absence de la fissure. I est l'intensité du courant parcourant la bobine et Ω_s représente le volume occupé par la bobine.

Dans la bobine, le champ électrique s'écrit:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -j\omega \vec{A} \quad \text{(II-32)}$$

D'où, l'expression de la variation d'impédance:

$$I^2\Delta Z = -j\omega \int_{\Omega_s} (\vec{A} - \vec{A}_0).\vec{J_s}d\Omega_s \quad \text{(II-33)}$$

Où:

$\vec{A}$ et $\vec{A}_0$ étant les potentiels vecteurs magnétiques respectivement en présence et en absence de la fissure.

On doit noter que le terme $\frac{I^2\Delta Z}{j\omega} = \int_{\Omega_s} (\vec{A} - \vec{A}_0).\vec{J_s}d\Omega_s$ représente la variation de l'énergie électromagnétique de la bobine en présence et en absence du défaut.

Les deux méthodes aboutissent aux mêmes résultats. Dans nos calculs, nous avons optée pour la première méthode.

La taille des matrices obtenues est importante, d'où la nécessité de recourir à des algorithmes de préconditionnement ainsi que l'utilisation des méthodes itératives pour la résolution du système obtenu.

Actuellement, divers logiciels de simulation numérique sont disponibles et permettent de faciliter la résolution numérique des systèmes d'équations aux dérivées partielles décrivant les phénomènes électromagnétiques intervenant dans le CND-CF. Le logiciel utilisé est le COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis et qui permet aussi la possibilité de se coupler à Matlab. [20]

II.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation du CND par CF où il a fait l'objet d'une présentation des Équations de Maxwell, les conditions aux limites, les conditions de continuité ainsi que les conditions de jauges. Ensuite on a vu les méthodes utilisées pour la résolution de ces équations différentielles aux dérivées partielles, telle que, les méthodes analytiques, numériques, et semi analytiques. Enfin on a présenté les différentes expressions de l'impédance qui ont été formulées et développées dans le domaine de contrôle non destructif par courants de Foucault.

Comme le logiciel COMSOL Multiphysics est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel, nous l'utiliserons comme outil de simulation pour le CND-CF appliqué aux structures multicouches rivetées utilisées en aéronautique La résolution dans nôtre mémoire est basée sur la méthode des éléments finis…

Chapitre III : Simulation d’une Sonde Rotative Opérant sur une Structure Multicouches Rivetée

III.1 Introduction

Une des applications du CND par CF en aéronautique est l'inspection des structures Multicouches rivetées (ex. coque d'avion). Le contrôle de ces structures a pour but de détecter des défauts près des rivets, défauts qui peuvent se développer en raison des contraintes mécaniques qu'elles subissent, [2].

Pour répondre à cette problématique, un modèle de simulation au sein de plate-forme logicielle COMSOL Multiphysics, a été adapté à ce type de configuration, pour la mise au point de méthodes de contrôle, leur optimisations et leur qualifications. En effet, ce logiciel est un outil de conception et de modélisation dont l'avantage principal est de ne pas être dédié à un domaine d'application particulier. Par ailleurs, il rassemble un ensemble d'outils et une bibliothèque de modèles prédéfinis permettant la simulation de tout processus physique pouvant être décrit par des équations aux dérivées partielles (EDP), y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF.

La configuration concernée par notre étude est constituée de trois couches d'aluminium empilées et rivetées avec un défaut fin. Le problème est résolu en utilisant le modèle éléments finis implémenté sous COMSOL Multiphysics.

Dans ce chapitre, nous présenterons, en premier lieu, le dispositif à étudier ainsi que les caractéristiques géométriques et physiques, puis l'étude de l'effet de la variation des paramètres du défaut sur les signaux du capteur.

III.2 Contrainte et recommandation liées à l'inspection des systèmes multicouches

Les trous de fixation font généralement l'objet d'un examen plus approfondi, car ils sont souvent des emplacements d'initiation et de propagation de fissures en raison du transfert de charge et de la concentration des contraintes. Actuellement les techniques les plus avancées du CND-CF doivent prendre en considération les points suivants :

- Détecter un défaut enfoui dans l'une des couches en présence des rivets et boulons.
- Pénétration importante afin d'assure l'inspection d'un empilement de couches en Aluminium (Al), Titane (Ti) … etc.
- Détection de défauts de faible tailles apparaissant dans l'alésage et cela en présence ou en absence des rivets.
- Distinguer les perturbations du à de nombreux facteurs tels que les vibrations, effet de bord, espace entre couche …etc.
- Portabilité et commodité d'usage.

III.3 Présentation du dispositif à étudier

Une simulation d'un phénomène électromagnétique sous COMSOL Multiphysics se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. La simulation se décompose ainsi en trois étapes principales: le prétraitement, le calcul et le post-traitement. L'étape de prétraitement inclut l'implantation du modèle géométrique et affectation des propriétés physique de composants domaine de travail, introduction des conditions aux limites et la discrétisation du domaine sur un maillage. Lorsque le problème est complètement défini, l'étape du calcul est consacrée à la résolution numérique en utilisant les différents solveurs proposés par COMSOL. Finalement, le post-traitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement (Excel, Matlab…), [22].

III.3.1 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5

L'interface de COMSOL peut être séparée en quatre parties. A gauche, on retrouve le Model où il est possible de définir des variables et autres paramètres du problème (Parameters), le modèle (Model) où se retrouvent la géométrie (Geometry), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles de physique s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh). Le Modèle comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur (Study) et les options d'affichage et de post traitement des données (Results). La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans le Modèle, par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans Geometry. C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc. Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre. Finalement, au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, le progrès des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée. Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 5.5 sont présentés à la (figure III.1), [10].

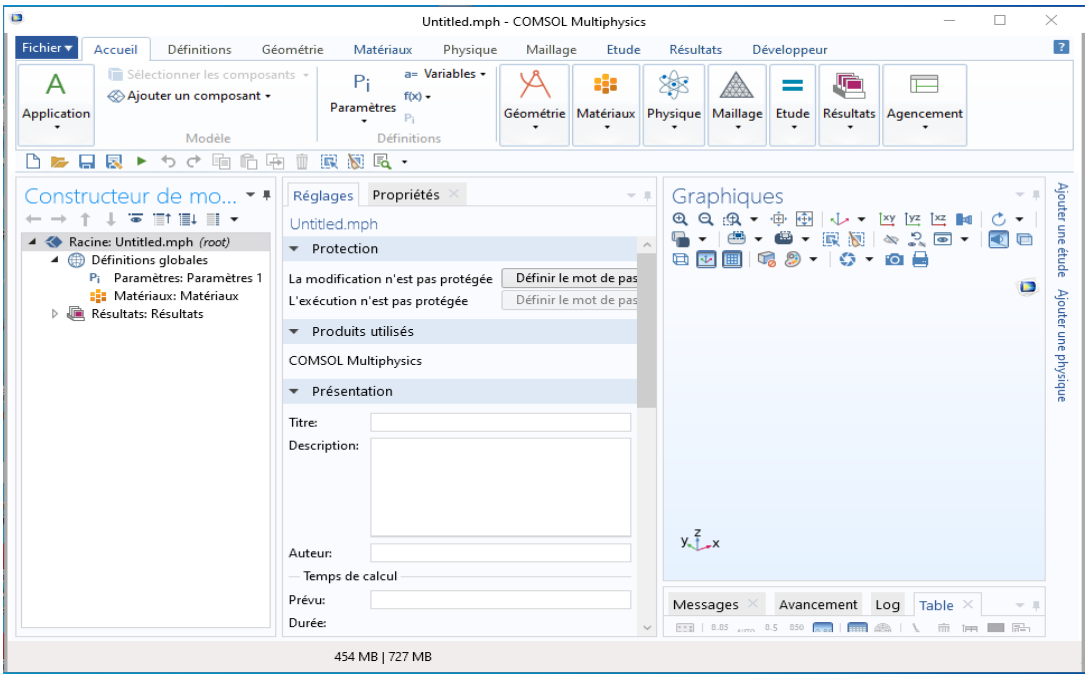


Figure III. 1 Interface utilisateur de COMSOL 5.5

III.3.2 Création du modèle de simulation

Les étapes de création et simulation sous COMSOL Multiphysics sont :

- choix du modèle spatial en 3D,
- choix du domaine physique de travail (domaine magnétique (mf) sous AC/DC),
- choix du domaine d'étude, le domaine fréquentiel,
- implantation de la géométrie (3D) du modèle,
- affectation des propriétés physiques de chaque domaine,
- maillage des différentes parties du modèle,
- simulation et exploitation des résultats.

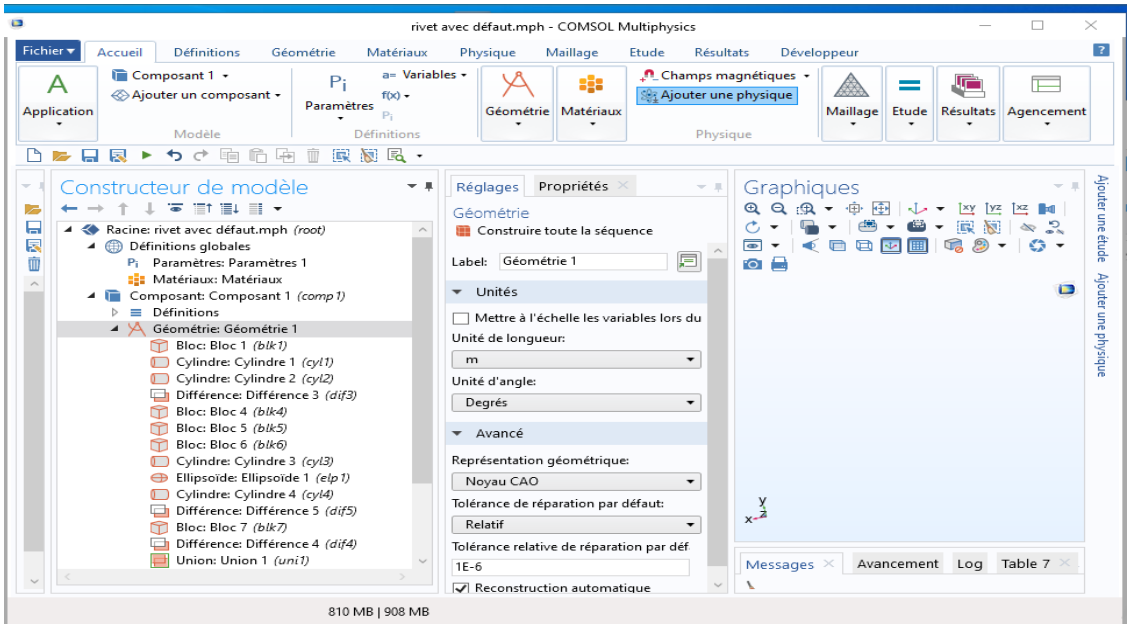


Figure III. 2 Création du modèle géométrique.

III.3.3 Vue 3D et 2D du modèle proposé

La configuration d'étude est constituée de trois couches d'aluminium empilées et rivetées avec un défaut fin. Le capteur est composé d'une bobine disposée sur un pot en ferrite. Les différents paramètres de capteur et de la configuration étudiée sont présentés dans les figures III.3, III.4 et dans le tableau III.1.

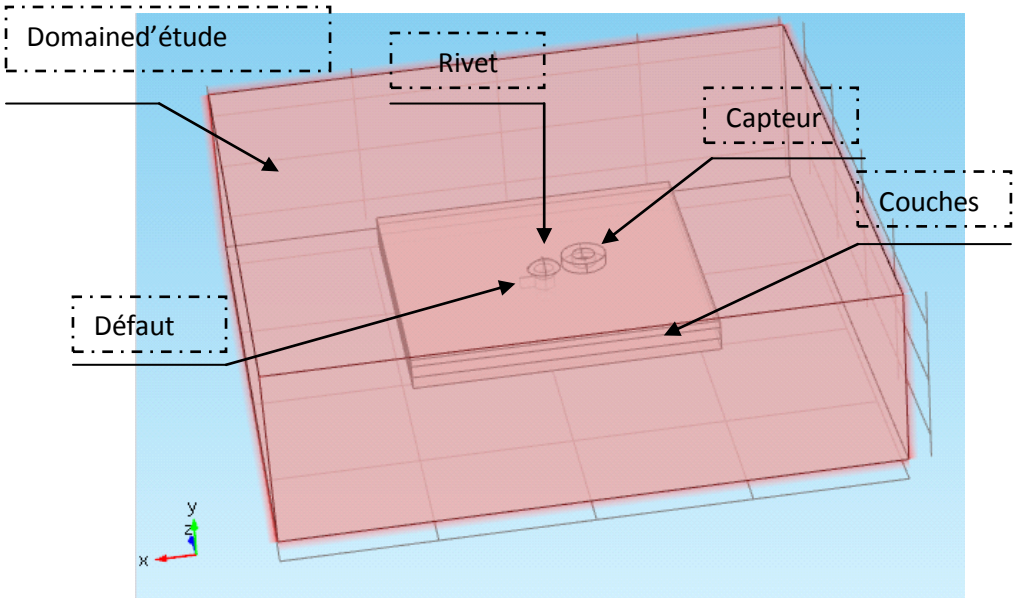


Figure III. 3 Vue 3D du système à étudier

Vue 2D du système à étudier

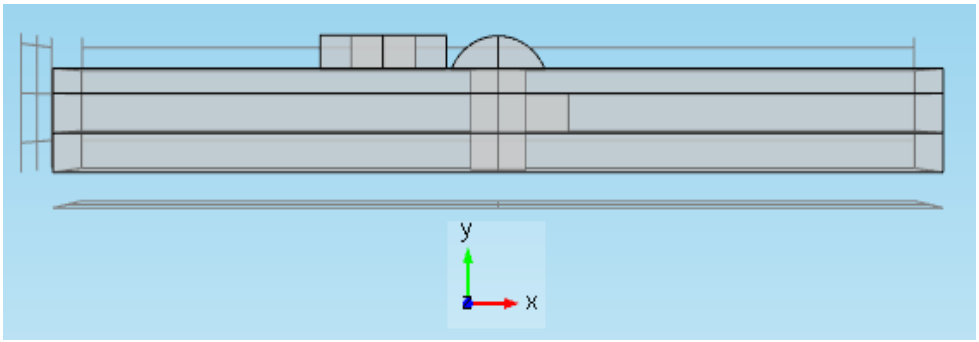


Figure III. 4 Vue 2D du système à étudier

Les caractéristiques géométriques du modèle de la plaque sont données par les Tableau III.1 :

Capteur		**Alésage**	
Rayon externe (mm)	7.325	Rayon (tête de rivet) (mm)	6
Rayon interne (mm)	3.74	Rayon (corps de rivet) (mm)	3.175
Hauteur (mm)	3.46	Hauteur (mm)	10.5
Nombre de spires	926	Hauteur (tête de rivet) (mm)	8.5
lift-off (mm)	2	**Défaut**	
Fréquence (Hz)	1600	Longueur (mm)	4
Tôles		profondeur (mm)	5
Conductivité (S/m)	$17*10^7$	Largeur (mm)	0.2
Épaisseur couche 1(mm)	200	**Autres**	
Épaisseur couche 2(mm)	100	Épaisseur de peau δ (mm)	3.04
Épaisseur couche 3(mm)	100		

Tableau III. 1 Description de la configuration

III.3.4 Maillage du modèle proposé

La première tâche à accomplir lors de la réalisation d'une simulation numérique consiste à définir le domaine de calcul, suivi par la création du maillage pour le domaine retenu. Cette étape peut être considérée à la fois comme la plus importante et la plus délicate dans ce travail préliminaire. Plusieurs types d'éléments de discrétisation (tétraédrique, hexaédrique ou prisme,) sont proposées par COMSOL Multiphysics. Dans notre cas, nous avons adopté un maillage avec des éléments tétraédriques car ce choix permet de mailler automatiquement des géométries différentes.

Maillage fin aux alentours du capteur et du défaut

.

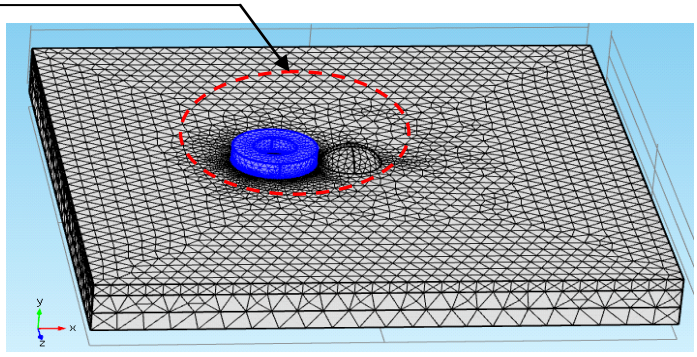


Figure III. 5 Maillage du dispositif en 3D. Boite d'air cachée.

III.3.5 Simulation du comportement du système

Après avoir implémenté le modèle sous COMSOL Multiphysics, nous procédons à étudier nos comportement électromagnétique. Pour le faire, nous faisons déplacer le capteur suivant une trajectoire circulaire. Étant donné que le signal est périodique nous limitons le tracé du signal du capteur de 0° à 350°. En effet, la variation de l'impédance du capteur en fonction de la position angulaire est donnée sur la figure III.6.

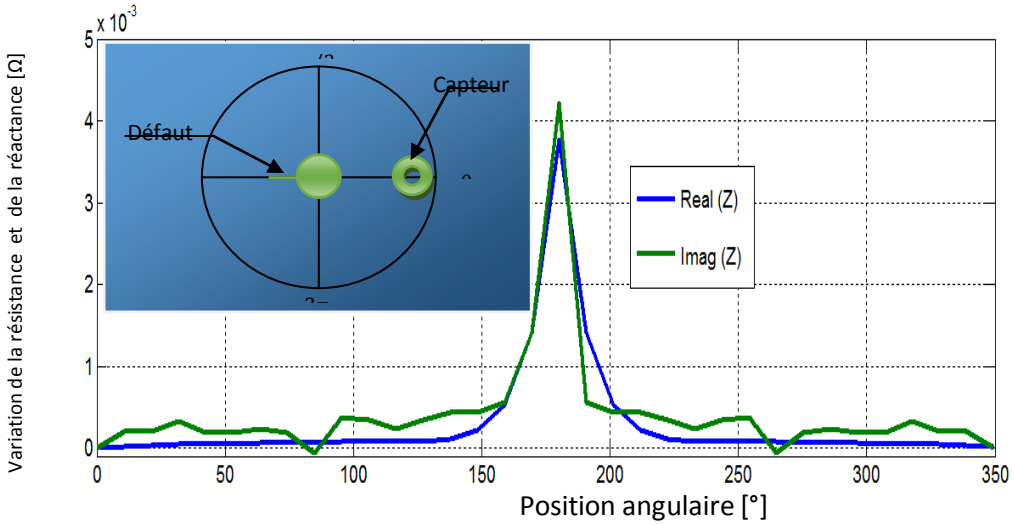


Figure III. 6 Variation des parties réelle et imaginaire de l'impédance du capteur en fonction de position du capteur

Nous pouvons constater clairement à travers la figure précédente que le signal du capteur est plus important lorsqu' il s'approche du défaut dont l'axe et sur un angle de 180°. D'autre part, l'amplitude du signal s'affaiblît au fur à mesure que le capteur s'éloigne du défaut. Cela peut être justifié par la déformation de la trajectoire des courants induit à l'approche du capteur de l'endroit affecté (signaux III.7, III.8 et III.9).

La répartition de la densité des courants induits dans la plaque 1 donnée par la (figure III.8) :

La répartition de la densité des courants induits dans la plaque 2 donnée par la (figure III.9) :

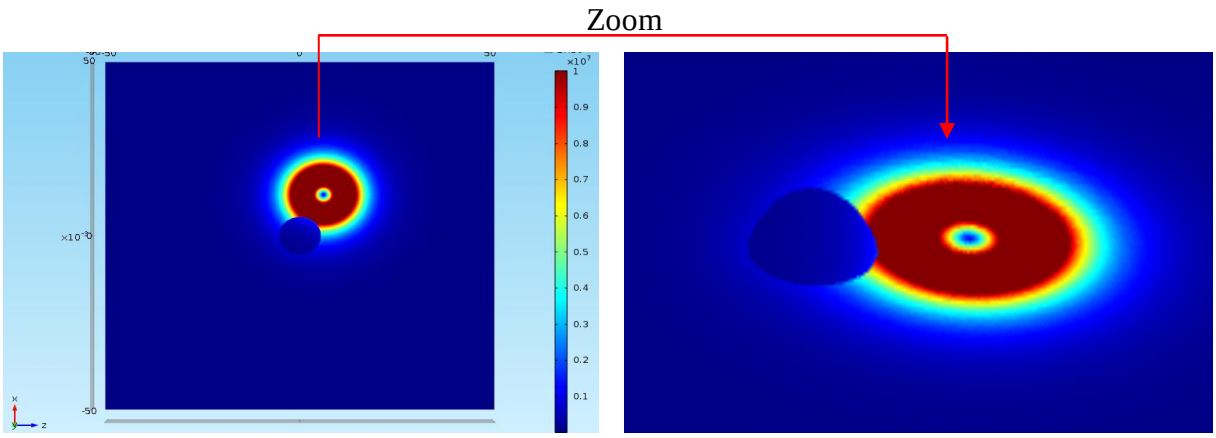


Figure III. 7 Densité des courants induits dans la plaque 1

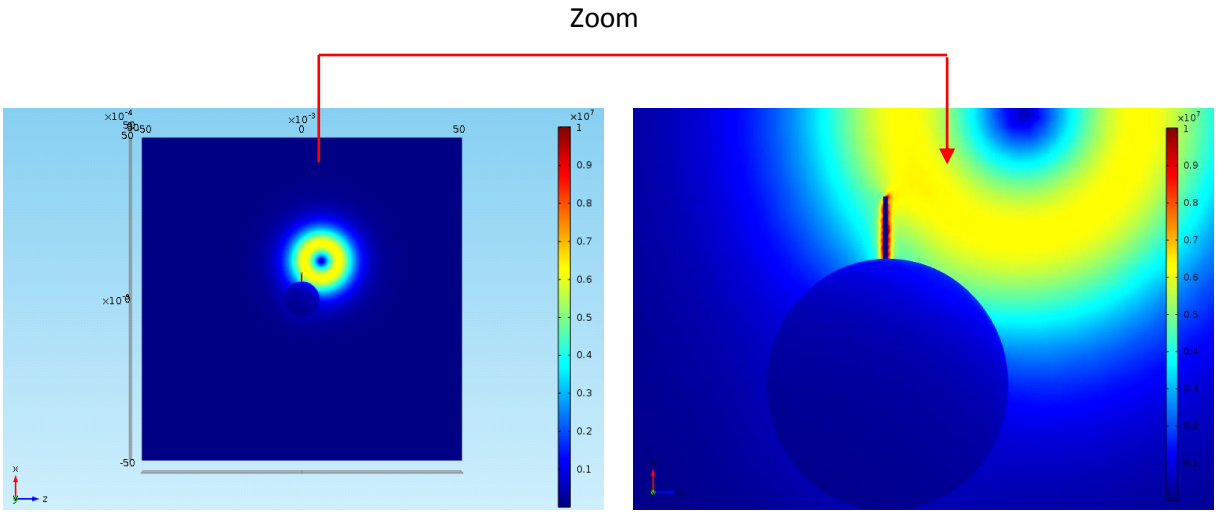


Figure III. 8 Densité des courants induits dans la plaque 2.

La répartition de la densité des courants induits dans la plaque 3 donnée par la (figure III.10) :

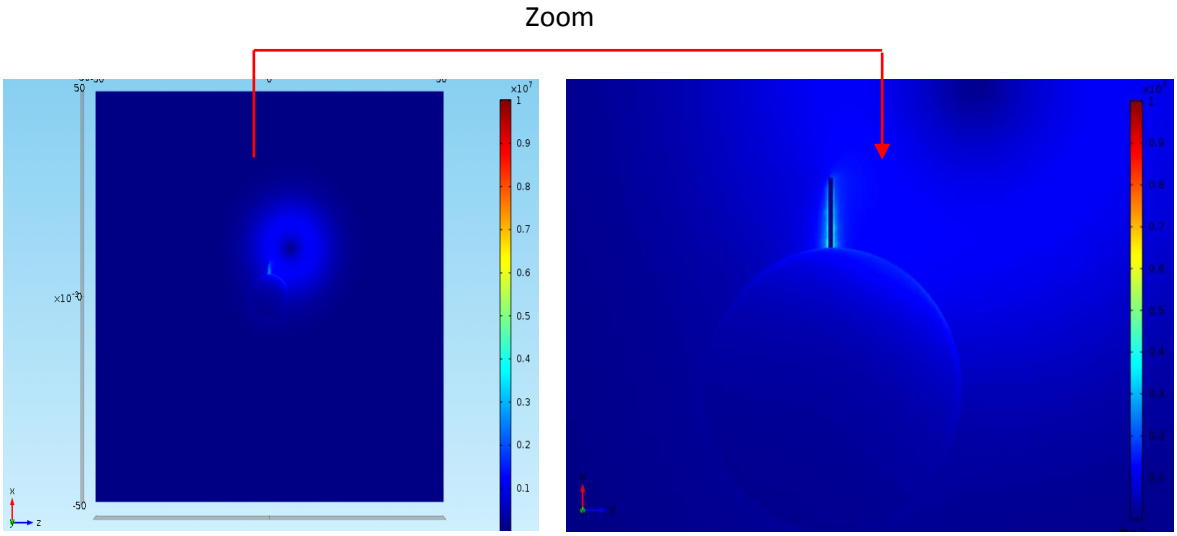


Figure III. 9 Densité des courants induits dans la plaque 3

Par ailleurs, plusieurs remarques peuvent être tirées des signaux (III.7, III.8 et III.9), telle que la diminution de l'amplitude maximum des courants induits en partant de la couche supérieur à la couche inférieur (variation des couleurs bar).

Cela peut être justifié par l'effet de la profondeur de (effet de peau). D'où le choix des basses fréquences lorsque de l'inspection des structures multicouches (exemple fr = 1.6 KHz).

Dans les applications industrielles il n'est pas suffisant de détecter le défaut mais d'évaluer aussi sa dangerosité en connaissant ses caractéristiques géométriques (Ld, Pd et Wd) ainsi que son orientation relative à l'axe du rivet

Pour cette raison, dans les prochaines sections, nous entamerons l'étude de l'effet de tous ces paramètres sur les signaux captés.

III.4 Étude de l'effet de la variation des paramètres du défaut

Dans cette partie nous entamons l'étude de l'effet de la variation des paramètres géométriques du défaut à savoir : la longueur Ld, la largeur Wd, la profondeur Pd ainsi que la position angulaire θ du défaut par rapport au capteur.

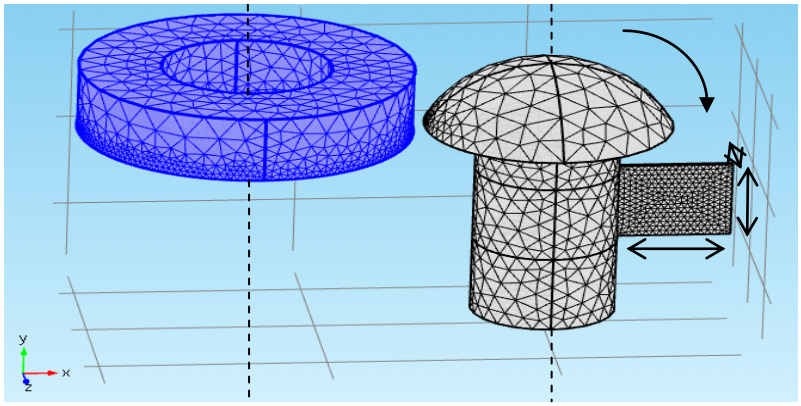


Figure III. 10 Maillage dans la zone de défaut

III.4.1 Effet de la variation de la longueur

Nous présentons sur les figures III.11a et III.11b les signatures CF représentant les variations de la résistance et de la réactance en fonction du déplacement du capteur, dû à la présence d'un défaut de 0.2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur ayant différentes valeurs de langueurs.

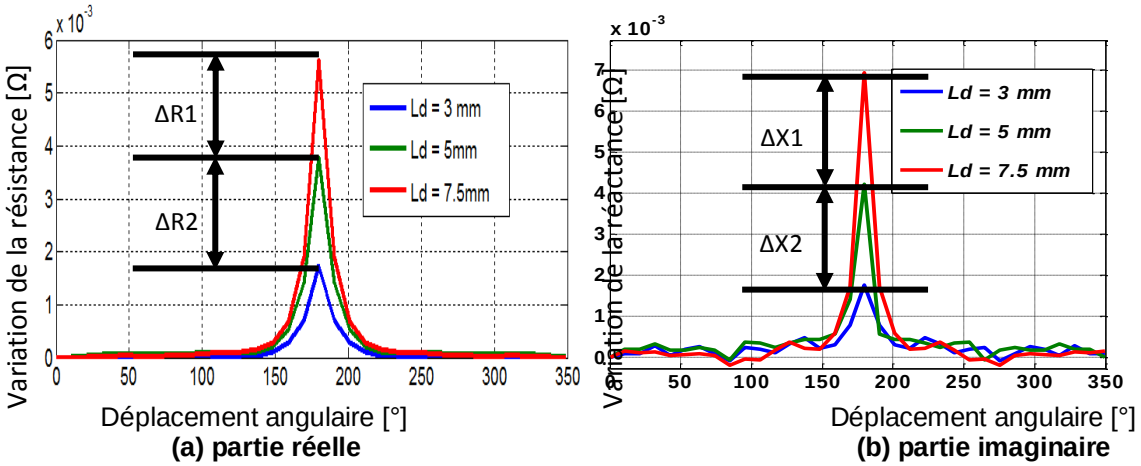


Figure III. 11 Variation de la résistance et de la réactance en fonction du déplacement du capteur (Ld=3, Ld=5 et Ld=7.5 mm)

À travers les résultats obtenus, nous remarquons que ; quand la longueur du défaut augmente, la variation de la résistance et de la réactance augmente aussi, c'est-à-dire l'impédance du signal est proportionnelle à la taille du défaut.

Cela est aisément justifié par l'augmentation des lignes des courants induits déformées lorsque la taille du défaut augmente. Tel qu'il est montré dans les figures ci-dessous.

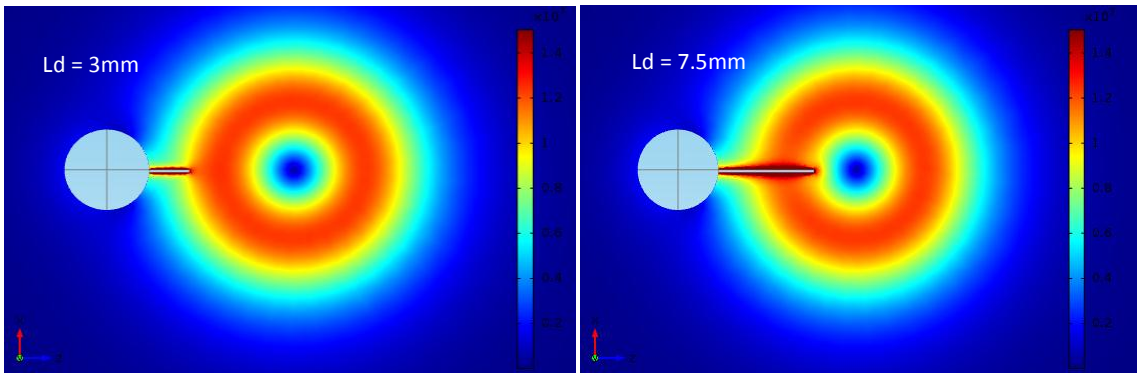


Figure III. 12 Déformation des lignes des courants induits par le défaut (Ld=3 et Ld=7.5mm)

III.4.2 Effet de la variation de la largeur

De la même manière que l'étude précédente, nous fixons respectivement la longueur et la profondeur à 9 mm et 2 mm et nous ferons varier la largeur du défaut. Les résultats sont donnés sur la figure ci-dessous.

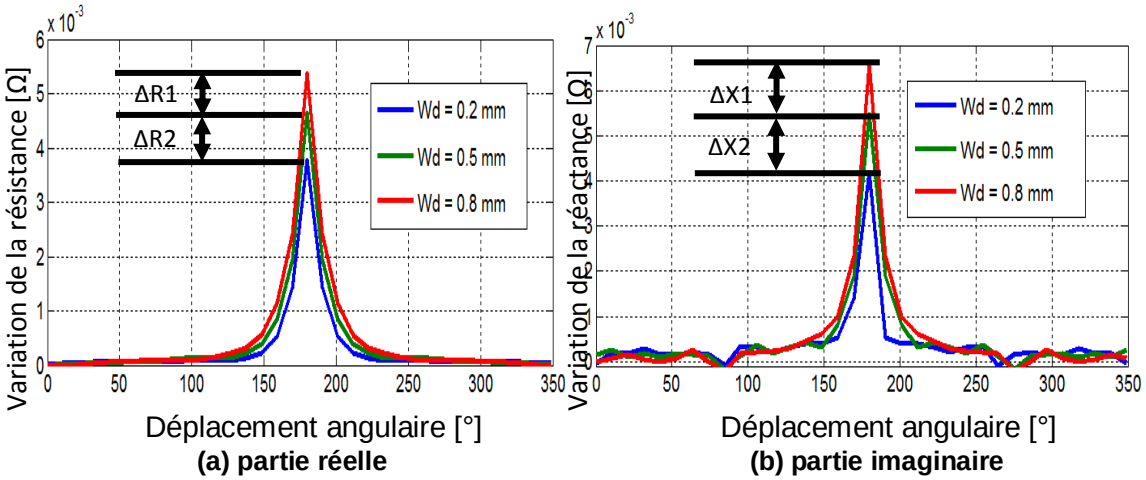


Figure III. 13 Variation de la résistance et de la réactance en fonction du déplacement du capteur (Wd=0.2, Wd=0.5 et Wd=0.8mm)

Tel que prévu, au fur et à mesure que le défaut s'ouvre les courants induits auront plus de difficulté à traverser l'endroit affecté et les variations d'impédances correspondantes seront plus importantes. Tel qu'il est montré dans les figures ci-dessous.

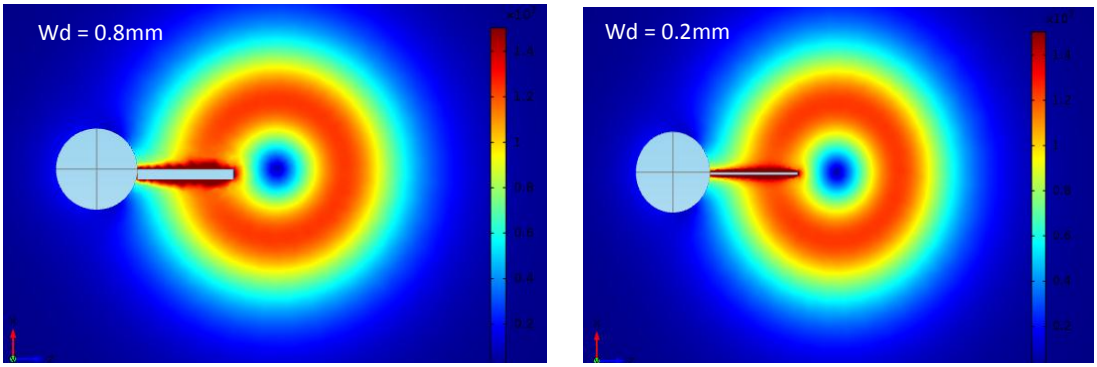
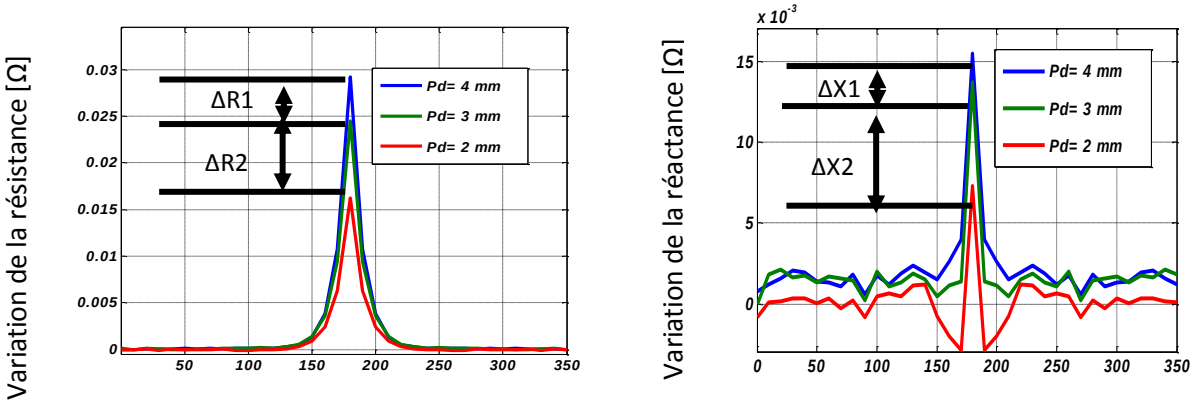


Figure III. 14 Déformation des lignes des courants induits par le défaut (Wd=0.8 et Wd=0.2mm)

III.4.3 Effet de la variation de la profondeur

L'un des paramètres concerné par l'étude est la profondeur du défaut. Pour le faire, nous prenons successivement trois valeurs de profondeur et nous traçons les courbes correspondantes (figure III.15).



Déplacement angulaire [°](a) partie réelle Déplacement angulaire [°](b) partieimaginaire

Figure III. 15 Variation de la résistance et de la réactance en fonction du déplacement du capteur (Pd=2, Pd=3 et Pd=4mm)

Nous savons théoriquement que les courants induits occupent la partie la plus proche du capteur ; malgré que les courants induits diminuent en allant sur la profondeur, le capteur reste relativement sensible à la profondeur. C'est cela qui justifie la différence entre les signaux obtenus pour un même écart (ΔX, ΔR). Tel qu'il est montré dans les figures ci-dessous.

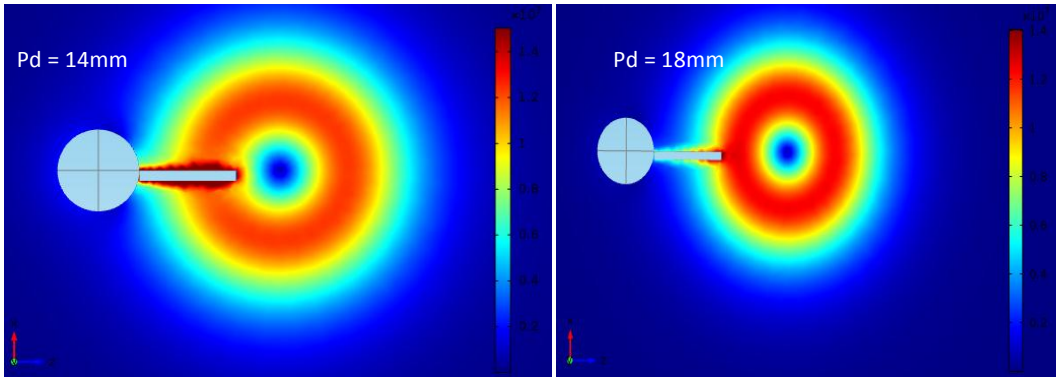


Figure III. 16 Déformation des lignes des courants induits par le défaut (Pd=14 et Pd=18mm)

III.4.4 Effet de la position angulaire du défaut

Nous présentons sur les figures III.18a et III.18b les signatures CF représentant les variations de la résistance et de la réactance en fonction de la position angulaire θ du défaut,

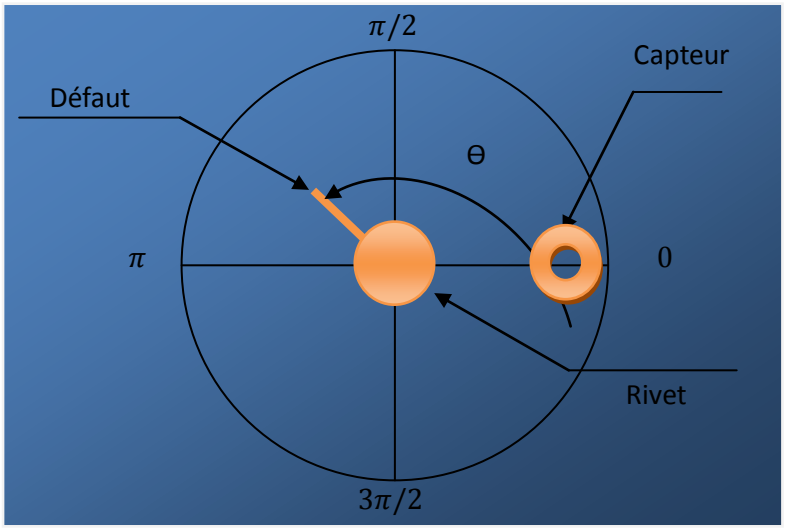


Figure III. 17 La trajectoire rotationnelle du capteur

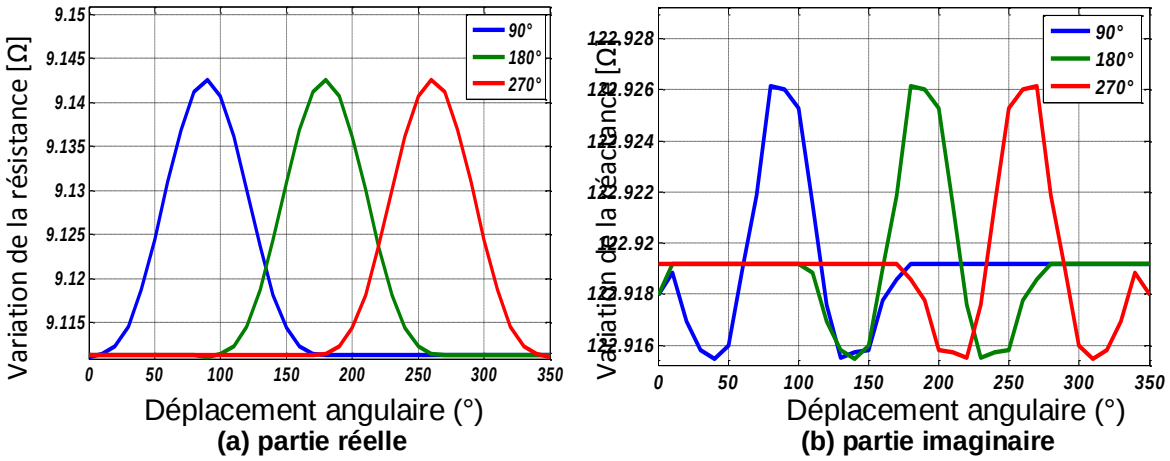


Figure III. 18 Variation de la résistance et de la réactance en fonction de la position angulaire du défaut

D'après les résultats, on remarque que l'amplitude du signal CF du défaut ne dépend pas de la position angulaire. Par contre, son amplitude maximale est obtenue lorsque l'axe du capteur coïncide avec celui du défaut.

III.5 Étude de l'effet de la distance Capteur/Rivet

Après avoir étudié l'effet des paramètres liés au défaut, nous étudions l'effet de la distance Capteur/ Rivet D afin de déterminer la configuration optimale du dispositif de motorisation du capteur assurant un encombrement minimal et une sensibilité maximale.

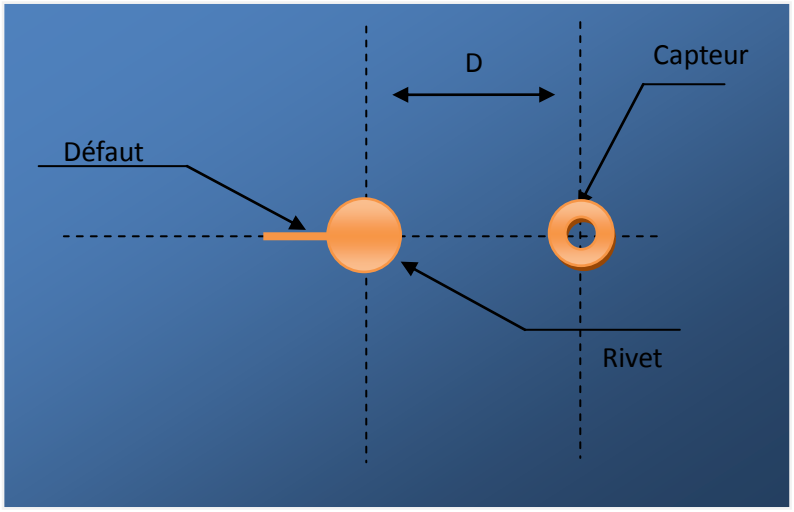


Figure III. 19 la distance Capteur/Rivet

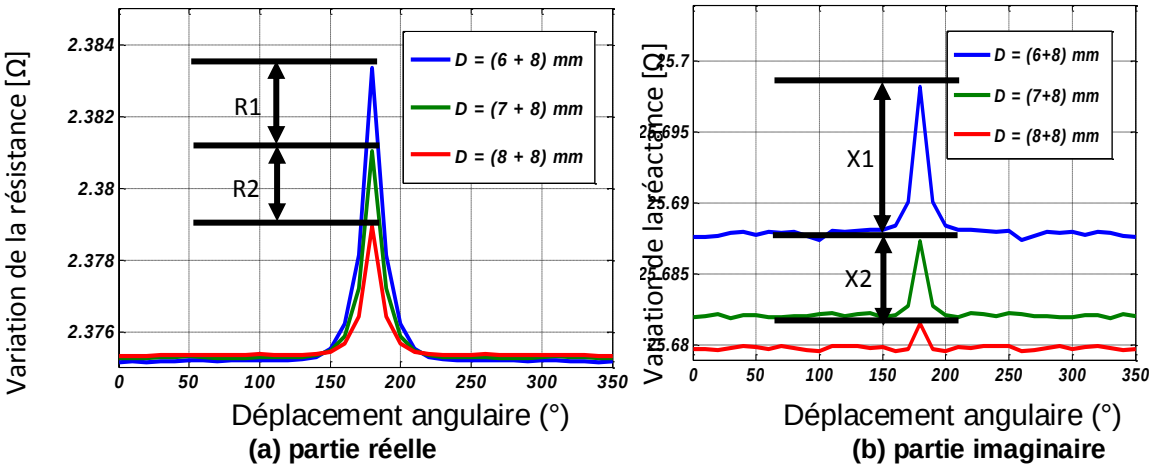


Figure III. 20 Variation de la résistance et de la réactance en fonction de la distance Capteur/Rivet

D'après les résultats, on remarque que lorsque la distance Capteur/Rivet augmente, la variation de la résistance et de la réactance diminue. C'est-à-dire une variation inversement proportionnelle à la distance Capteur/Rivet.

Pratiquement, cela conduit à positionnement de capteur le plus proche possible de l'axe du rivet.

III.6 Conclusion

Âpres avoir implémenté le système à étudier sous COMSOLMultiphysics, nous l'avons exploité pour étudier le signal du capteur en fonction des paramètres géométriques tels que ; la longueur, la largeur ainsi que la profondeur du défaut.

D'autre part, nous avons pu mettre en évidence l'effet de l'orientation du défaut et la distance de celui-ci par apport à l'axe du capteur.

En effet les résultats ont montré que le capteur est sensible à la variation de la dimension du défaut et de son orientation. D'autre part, le capteur devient plus sensible à ces variations lorsque la distance Capteur/Rivet est minimale.

Conclusion et Perspectives

Conclusion et perspectives

Conclusion

Pour se familiariser avec le contrôle non destructif, nous avons commencé notre travail par une recherche bibliographique sur les différentes techniques du CND les plus utilisées ainsi que la classification des capteurs en CND-CF et des différents défauts. Où il nous est été très claire que qu'il n'y a pas de technique de CND qui soit valable pour tous les matériaux et tous les défauts mais qu'ils sont complémentaires.

Ensuite, en deuxième partie, nous avons rappelé les équations de Maxwell régissant le CND, leurs simplifications relatives aux CF ainsi que les différentes techniques de calcul de l'impédance.

Dans le but de résoudre les équations précédentes et reproduire par une simulation numérique le comportement électromagnétique du dispositif étudié, une attention particulière est réservée au logiciel Comsol multiphysics en citant les étapes de d'implémentation du système et effectuer les tests ciblés.

En effet, après avoir implémenté le système à étudier sous COMSOL Multiphysics, nous l'avons exploité pour étudier le signal du capteur en fonction des paramètres géométriques tels que ; la longueur, la largeur ainsi que la profondeur du défaut. D'autre part, nous avons pu mettre en évidence l'effet de l'orientation du défaut de la distance de celui-ci par apport à l'axe du capteur. En effet:

- Le signal du capteur est important lorsque le volume (longueur, largeur et profondeur) du défaut augmente.
- Le capteur opère avec une haute sensibilité lorsque le CR est minimal.
- Les hautes fréquences sont les plus favorables car le défaut est débouchant est localisé dans la tôle supérieure.

Perspective

Ce travail nécessite des études complémentaires en vue d'améliorer l'aspect qualitatif et quantitatifs de ce mémoire par :

- Etude de l'effet de la taille des bobines du capteur sur sa sensibilité ;
- Etude des cas ou le défaut est localisé dans la deuxième et la troisième couche ainsi que les critères de choix des fréquences optimales correspondantes ;
- Réalisation d'une sonde rotative au lieu de la mise en rotation du matériau inspecté car cela correspond aux commodités des inspections réalistes.
- Comparer les performances de cette configuration avec un capteur multiéléments fonctionnant en mode multiplexé.
- Remplacer l'alimentation en mode harmonique des bobines par le mode pulsé afin de permettre aux courants de Foucault de descendre en profondeur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : **BASTIEN, Clausse, «** Modélisation des traducteurs électromagnétiques acoustiques (EMAT) pour le contrôle non-destructif (CND) de milieux ferromagnétiques ». Thèse de Doctorat ; Université Paris-Saclay. 2018.

[2] : **CHOUA Yahya**, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configuration de contrôle non destructif par courants de Foucault », Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud 11, PARIS 2010.

[3] : **BENHALIMA, SAOUDI**, « Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques) ». Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf-M'sila, M'sila 2018.

[4] : **H Brahim RAMADANE,** « Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil deconception, d'analyse et d'aide à la décision » Thèse de Doctorat, Université de Nantes. 2009.

[5] : **LAKHDARI, Ala-Eddine ,** « ETUDE ET MODELISATION DE CAPTEURS EN CND PAR COURANTS DE FOUCAULT : APPLICATION A LA DETECTION DES FISSURES ». Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2011.

[6] : **ZORNI, Chiara**, « Contrôle non destructif par courants de foucault de milieux ferromagnétiques :de l'expérience au modèle d'interaction », Thèse de Doctorat, université Paris-Sud11, Paris 2012.

[7] : **J. Dumont-Fillon** : « Contrôle non destructif (CND) ». Techniques de l'Ingénieur, R1400, 1996

[8] : **E. AIT MOKHTAR**, « Cours Technique Détection des Défaillances », université A/MIRA de Béjaia, 2019.

[9] : **ZAIDI, Houda,** « Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples ». Thèse de Doctorat ; Université Paris Sud - Paris XI, 2012.

[10] : **BAKAI, LAYACHI**, « contrôle Non Destructif par Courants de Foucault. (Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Muni d'un Alésage) », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila,2018.

[11] : **BOUCHALA Tarek**, « Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les systèmes de CND par Courants de Foucault », Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Batna 2013.

[12] : **BOUCHALA Tarek,** « Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. (Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite) », Mémoire de Magister, Université ElhadjLakhder Batna, 2008.

[13] : **BELABRE Benjamin**, « Développement de capteur flexibles à courants de foucault : application à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et la détection de défauts par imagerie statique », Thèse de Doctorat, université PARIS-SACLAY, 2016.

[14] : **Bachire HELIFA,** « Contribution à la simulation du CND par courants de foucault en vue de la caractérisation Des Fissures Débouchantes » Thèse de Doctorat, Université de Nantes. 2012.

[15] : **BENSALAH, Oussama,** « Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentiel ». Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf. M'sila, 2012.
[16] : **BOULOUDENINE, Abderraouf, «** Etude de dispositifs de CND-CF (Contrôle non destructif par Courants de Foucault) appliqués à la caractérisation de matériaux composites à fibres de carbone ». Thèse de Doctorat ; Université des Frères Mentouri de Constantine Algérie 2018.
[17] **: SAFER Omar Adib «** étude et modélisation de capteur à courants de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) ». Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf. M'sila, 2013/2014.

[18] : **KHEBBAB MOHAMED** « Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) » Mémoire de Magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2007.

[19] : **Pauline FERROUILLAT** « Développement de formulations éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique : application aux machines asynchrones en mouvement **»** Thèse de Doctorat, université de Grenoble Alpes, 2006.

[20] :**Abdelhak ABDOU,** «Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif», Thèse de Doctorat, Batna 2018.

[21] : **NABIL BENHADDA** « Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault » Mémoire de Magistère, université El Hadj Lakhdar Batna, 2006.

[22] : **KHEBAL, DALI,** « Contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques », Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf. M'sila, 2019.

Résumé

Dans ce travail nous avons commencé par une recherche bibliographique du CND_CF. Dans la deuxième partie nous avons rappelé les équations de Maxwell régissant le système CND-CF. A la troisième parties nous avons fait une simulation numérique du comportant électromagnétique, une attention particulière est réservée au logiciel COMSOL multiphsics d'implémentation du système à étudier. Et enfin nous avons exploités ce système pour étudier ce signal en fonction des paramètres géométriques tels que la longueur, la larguer et la profondeur de défaut.

ملخص

فيعملناهذابدأنابابحثببلوغرافيعلىمختلفطرقالاختبارالغيرمدمروترتيبمختلفاجهزةالاستشعارمعالعيوبالمحتملةوفيالجزءالثانيقمنابالتذكيرعلىمختلفالمعادلاتاللعالمماكسويلريجيسونوفيالجزءالثالثوالاخيرقمنابمحكاترقميةللسلوكالكهرومغناطيسيللجهازالمدروسويولىباهتمامخاصللبرنامجكوصولهذكرخطواتتنفيذالنظامواجراءالاختباراتالمستهدفةوفيالاخيراستعملناهذاالنظاممناجلدراسةاشارةالاستشعارودورهوالضوابطالهندسيةمثل (الطول،العرض،العمق،العيب)

Abstract

In our work, we started with a bi biographic search on the various path of non destructive selection and the arrangement of various sensors with potentiel defects and in the second part we have reminded on the various equation scientist Maxwell regison in the third and final part , we have done a numerical simulation of the electromagnetic behaviour of the studied device and it is given special interest with a reminder of the system implementation steps and the parts of the targeted tests In the last we took advantage of this system it's role and engineering controls, sush as the length, width and depth of the defect.