

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

FACULTE DE TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° : ELM



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Par :

✓ **LOUAKHCHE YASSINE**

✓ **EL-KATIB MOHAMED**

Intitulé :

**ETUDE ET MODELISATION D'UN CONTROLE NON
DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULT PAR
BOBINES TANGENTIELLES**

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. GHEMARI Zine	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. ABDOU Abdelhak.	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur
Pr. BOUCHALA Tarik	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Co-Rapporteur

Année universitaire : 2022/ 2023

DÉDICACES

À NOS PARENTS

À NOS FRÈRES ET NOS SŒURS

À TOUS NOS AMIS

Yassine

Mohamed

Remerciements

Nous commençons par remercier et rendre grâce à **DIEU**, le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté de mener à bon terme ce travail. Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous voulons dans un premier temps remercier, notre directeur de mémoire, **Mr. ABDOU Abdelhak**, pour la patience, la disponibilité et surtout les judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion,

Je remercie aussi mon co-directeur de mémoire, **Mr BOUCHALA Tarik**, Professeur à l'université à l'université de M'sila , qui par ses critiques fondées et objectives, nous a permis d'avancer correctement dans notre travail.

Nous tenons à adresser nos plus sincères remerciements aux membres du jury : **Mr GHEMARI Zine**, Professeur à l'Université de M'sila, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury, ainsi que **Mr BELKHIRI Salah**, Maitre de conférences à l'Université de M'sila pour avoir accepté d'examiner notre mémoire

Nous remercions également toute l'équipe pédagogique et l'ensemble du personnel et tous les intervenants du département génie électrique de l'Université de M' sila.

Nous remercions nos parents pour leurs soutiens constants et leurs encouragements ainsi que tous nos amis et proches.

Résumé :

Résumé du rapport bibliographique du projet de Mémoire de Master

De nombreuses technologies CND non destructives ont été mises au point et utilisées avec succès au cours des dernières décennies pour divers domaines, y compris la détection de défauts de surface comme des fissures, des piqûres, de corrosion, etc. La détection de défauts sur des plaques conductrices électriquement une bobine conventionnelle est largement suffisante, par contre pour des pièces dont la surface n'est pas parfaitement plane, les résultats en utilisant cette dernière peuvent être perturbés par la variation du lift-off due à la variation de la surface non uniforme à inspecter, comme dans le domaine du contrôle de soudures. Pour palier à ce problème, on utilise une bobine tangentielle. Le but de ce mémoire est simuler sous COMSOL Multiphysics le CND-CF avec un capteur (Tangential Eddy Current TEC) ou en mode multiéléments et multiplexé (Tangential Eddy Current Array TECA)

Mots clés : Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (CND-CF), Contrôle par Capteur Tangentiel Multi-éléments TECA, méthode éléments fine, MEF.

Summary of the bibliographic report of the Master Thesis project

Many non-destructive NDT technologies have been successfully developed and used over the past decades for various fields including detection of surface defects like cracks, pits, corrosion, etc. The detection of faults on electrically conductive plates a conventional coil is largely sufficient, on the other hand for parts whose surface is not perfectly flat, the results using the latter can be disturbed by the variation of the lift-off due to the variation of the non-uniform surface to be inspected, such as in the field of weld inspection. To overcome this problem, a tangential coil is used. The purpose of this thesis is to simulate under COMSOL Multiphysics the CND-CF with a sensor (Tangential Eddy Current TEC) or in phased array and multiplexed mode (Tangential Eddy Current Array TECA)

Keywords: Eddy Currents Testing (ECT), Tangential Eddy Current Array TECA, fine element method, MEF.

ملخص التقرير البيبليوغرافي لمشروع لرسالة الماجستير:

لقد تم تطوير العديد من تقنيات الاختبارات الغير التدميرية و استخدمت بنجاح على مدى العقود الماضية في مجالات مختلفة بما في ذلك الكشف عن عيوب السطح مثل الشقوق والحفر والتآكل وما إلى ذلك. يعد اكتشاف الشقوق على القطع الناقلة للكهرباء والملتقط التقليدي كافيًا إلى حد كبير ، ومن ناحية أخرى بالنسبة للأجزاء التي لا يكون سطحها مسطحًا تمامًا ، يمكن أن تتأثر النتائج باستخدام هذا الأخير بسبب تباين الإقلاع ، كما هو الحال في مجال فحص اللحام. للتغلب على هذه المشكلة ، يتم استخدام الملتقط عرضي. الغرض من هذه الأطروحة هو محاكاة CND-CF باستخدام البرنامج COMSOL Multiphysics باستخدام مستشعر تيارات فوكو عرضي أو في صفيح مرحلي

الكلمات الرئيسية: التحكم غير المدمر (CND)، تيارات إيدي (CF)، معادلات ماكسويل، مستشعر زاوية دوامة متعدد العناصر TECA، طريقة العناصر الدقيقة، MEF.

Table des matières

<i>Dédicaces</i>	1
<i>Résumé</i> :	3
<i>Table des matières</i>	4
<i>Liste des Figures</i>	7
<i>Liste des Tableaux</i>	9
<i>Nomenclature</i>	10
<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I. Généralités sur le Contrôle Non Destructif</i>	4
<i>I.1. Introduction</i> :	4
<i>I.2. Types de Défaut à détecter par le Contrôle Non Destructif</i> :	4
I.2.1. Principe de détection des défauts :	5
<i>I.3. Méthodologie de développement des systèmes de CND</i> :	5
<i>I.4. Différentes méthodes de CND</i> :	6
I.4.1. Examen visuel :	6
I.4.2. Le ressuage :	7
I.4.3. La magnétoscopie :	8
I.4.4. Radiographie :	8
I.4.5. Thermographie :	9
I.4.6. Ultrasons :	10
<i>I.5. CND par les courants des Foucault</i> :	10
I.5.1. Principe :	10
I.5.2. Effet de peau :	11
<i>I.6. Comparaison entre les principales méthodes de CND</i> :	12
<i>I.7. Différentes technologies des capteurs inductifs</i> :	13
<i>I.8. Principe physique de CND-CF</i> :	14
I.8.1 Objectifs de CND-CF :	14
I.8.2. Classification des capteurs :	15
I.8.3 Différents fonctions de capteurs :	15
I.8.3.A. Capteurs à double fonctions :	15
I.8.3.B Capteurs à fonctions séparées :	16
I.8.4. Différents types de mesures :	16
I.8.4.A. Capteur à mesure absolue :	16
I.8.4.B. Capteur à mesure différentielle :	16
I.8.5. Différents types de bobines :	17
I.8.5.A. Bobines classiques :	17
I.8.5.B Bobines gravées :	17
I.8.5.C. Bobines souples :	18
I.8.6. Différents types des Sondes :	18
I.8.6.A. Sonde encerclant :	18
I.8.6.B. Sonde interne :	19
I.8.6.C. Sonde ponctuelle :	19
I.8.6.D. Sonde plate :	20
I.8.7. Différents types d'alimentations :	20
I.8.7.A. Signal mono-fréquentiel :	20
I.8.7.B. Signal multifréquences :	20
I.8.7.C. Signal pulse :	21
<i>I.9. Plan d'impédance normalisée</i> :	21
<i>I.10. Intérêt de la modélisation</i> :	22

I.11. Conclusion.....	23
Chapitre II : Capteur et Modélisation pour le CND par Courants de Foucault.....	34
II.1. Introduction :.....	34
II.2. Principe des capteurs inductifs :.....	34
II.3. Principes et caractéristiques de base des sondes à courants de Foucault :.....	35
II.3.1. Sondes à double fonction :	35
II.3.2. Sondes à fonction séparées	36
II.4. Mesure absolue et différentielle :	37
II.4.1. Sondes absolues :	37
II.4.2. Sondes différentielles :	37
II.5. Types de sonde :	37
II.5.1. Sonde interne:	37
II.5.2. Sondes encerclant :.....	38
II.5.3. Sondes surfacique :	38
II.6. Modes d'excitation :	39
II.6.1. Contrôle mono-fréquence :.....	39
II.6.2. Contrôle multi-fréquences :	40
II.6.3. Contrôle par courants de Foucault pulsés :.....	40
II.7. Plan d'impédance normalisée :.....	41
II.8. Intérêt de la modélisation :	41
II.8.1. Modélisation mathématique du système :.....	42
II.8.1.A. Formulation en potentiel vecteur A-V :	44
II.8.1.B. Relations de continuité et Conditions aux interfaces :	44
II.8.1.B. Conditions aux limites :.....	47
II.9. Méthode des éléments finis :	47
II.9.1. Principe de la méthode variationnelle :	48
II.9.2. Principe de Formulation résidus pondérés :	48
II.9.3. Organigramme de résolution des EDP's par la méthode des éléments finis :	49
II.10. Conclusion :	50
Chapitre III. Résultats de simulation pour un Contrôle par bobine tangentielle :	52
III.1. Introduction :	52
III.2. Bobine plate et tangentielle	52
III.3. Résultats de simulation avec une bobine tangentielle TEC :	54
III.3.1. Modèle développé :.....	54
III.3.1.1. Domaine d'étude :	54
III.3.1.2. Caractéristiques géométriques du modèle :	55
III.3.1.3. Maillage :	55
III.3.2. Effet des paramètres géométriques et électriques sur les signaux de détection des défauts :	56
III.3.2.1. Effet des paramètres du défaut sur les variations d'impédance :	56
III.3.2.2. Effet de la fréquence du défaut sur les variations d'impédances :	62
III.4.2.3. Effet du lift off sur les variations d'impédances :	63
III.4. Capteurs tangentiels multiéléments TECA:.....	66
III.4.1. Définition TECA :.....	66
III.4. 2. Avantages du TECA :.....	66
III.4.3. TECA 5 bobines pièce longue munie de trois défauts :	66
III.4.6. Effet variations la profondeur des 5 défauts et TECA bobine :	71
III.4.6.1. Maillage du domaine d'étude :.....	71
III.4.7. Balayage surfacique par série de bobines en mode multiplexage : Error! Bookmark not defined.	

III.4.7.1 Capteurs multiéléments :	Error! Bookmark not defined.
III.4.7.2. Maillage du domaine d'étude :.....	Error! Bookmark not defined.
III.4.7.3. Les signaux et imagerie en 3D modèle.....	Error! Bookmark not defined.
III.4.8. Effet de la forme du défaut sur les variations d'impédances :	Error! Bookmark not defined.
defined.	
<i>III.5. Conclusion</i> :.....	73
<i>Conclusion générale</i>	75
<i>Bibliographie</i>	76

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I. 1 Examen visuel.	6
Figure I. 2 Principe de la méthode de ressuage[8].	7
Figure I. 3 Principe de la magnétoscopie [13].	8
Figure I. 4 Principe de la radiographie[13]	9
Figure I. 5 Principe de contrôle par thermographie.	9
Figure I. 6 Principe du CND par courant de Foucault [7].	11
Figure I. 7 Répartition des courants de Foucault sous une surface plane[11]	12
Figure I. 8 Différente technologies des capteurs inductifs (CCF et CM) [4].	14
Figure I. 9 Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault [4]	14
Figure I. 10 Nature du CND par CF [4].	15
Figure I. 11 Critères de classification des capteurs [4].	15
Figure I. 12 Capteur à fonction double [6].	16
Figure I. 13 Capteur à fonctions séparées [6].	16
Figure I. 14 Etapes de réalisation des bobines micro moulées[5]	17
Figure I. 15 Capteur constitué de quatre couples de bobines sur un film de kapton souple[5].	18
Figure I. 16 Bobine encerclant[2]	19
Figure I. 17 bobine interne avec noyau.	19
Figure I. 18 Bobine externe glissante avec noyau	19
Figure I. 19 Bobine plate [2].	20
Figure I. 20 Influence de σ ou du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée (cas d'une pièce amagnétique) [2].	22
Figure I. 21 Effet du défaut sur la valeur de l'impédance de la bobine [2].	22

Chapitre II

Figure II. 1 Capteur Magnétique ou CM.	35
Figure II. 2 sonde à double fonction.	36
Figure II. 3 Sonde a fonction séparée.	36
Figure II. 4 Sonde Interne.	38
Figure II. 5 Sonde Encerclant.	38
Figure II. 6 Sonde Surfaceutique.	39
Figure II. 7 Plan d'impédance (a) Non-normalisé ; (b) Plan d'impédance normalisé.	41
Figure II. 8 Equation de magnétodynamique dans des différentes régions.	46
Figure II. 9 Organigramme de calcul par élément finis.	49

Chapitre III

Figure III. 1 Bobine circulaire (plate).	53
Figure III. 2 Bobine tangentielle	54
Figure III. 3 Vue 3D du système à étudier.	55
Figure III. 4 Maillage du dispositif en 3D.	56
Figure III. 5 Vue de la position des 3 défaut de largeurs différentes.	57
Figure III. 6 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.	57
Figure III. 7 Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.	57
Figure III. 8 Variation des courants induits en fonction de la position de la bobine.	58
Figure III. 9 Vue de la position des 3 défauts de longueurs différentes.	59
Figure III. 10 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.	59

Figure III. 11	Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.	59
Figure III. 12	Vue de la position des 3 défauts de profondeurs différentes.	60
Figure III. 13	Maillage du dispositif en 3D.	60
Figure III. 14	Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.	60
Figure III. 15	Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.	61
Figure III. 16	Variation des courants induits en fonction de la position de la bobine.	62
Figure III. 17	Vue de la position d'une bobine TEC avec un seul défaut.	62
Figure III. 18	Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.	63
Figure III. 19	Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.	63
Figure III. 20	Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.	64
Figure III. 21	Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.	64
Figure III. 22	Variation des courants induits en fonction de la position de la bobine.	65
Figure III. 23	Vue de la position des TECA 5 bobines, pièce longue munie de trois défauts.	67
Figure III. 24	Vue la Maillage des TECA 5 bobines, pièce longue munie de trois défauts.	67
Figure III. 25	Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.	68
Figure III. 26	Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.	68
Figure III. 27	vue la variation de la densité de courant.	70
Figure III. 28	Maillage du domaine d'étude.	71
Figure III. 29	Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.	71
Figure III. 30	Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.	71
Figure III. 31	vue la variation de la densité de courant.	73
Figure III. 32	Balayage d'un capteur mono-élément et multiéléments.	Error! Bookmark not defined.
Figure III. 33	Modèle géométrique « multiéléments en mode de multiplexage.	Error! Bookmark not defined.
Figure III. 34	Maillage domaine d'étude « multiéléments en mode de mutliplaxage ». ...	Error! Bookmark not defined.
Figure III. 35	Imagerie 3 D de résistance et réactance.	Error! Bookmark not defined.
Figure III. 36	Imagerie pour défauts de formes variables.	Error! Bookmark not defined.
Figure III. 37	Maillage domaine d'étude "défauts de formes variables".	Error! Bookmark not defined.
Figure III. 38	Imagerie 3 D de la variation de résistance	Error! Bookmark not defined.

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 Comparaison différentes méthodes CND	13
Tableau III-1 Caractéristique de dispositif	55

Nomenclature

Acronymes

CND	Contrôle Non Destructif
END	Evaluation Non Destructif
CF	Courants de Foucault
CND-CF:	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
CCF:	Capteur par Courants de Foucault.
CM	Capteur Magnétique.
MEF	Méthode des Eléments Finis.
MCC	Méthode des Circuits Couplés.
2D	Bidimensionnel.
3D	Tridimensionnel.
TEC	Tangential Eddy Current (Courants de Foucault Tangentiel)
TECA	Tangential Eddy Current Array (Courants de Foucault Tangentiel Multiéléments)

Symboles

A	Potentiel Vecteur magnétique	(T.m)
B	Induction magnétique	(T)
D	Induction électrique	(C/m ²)
E	Champ électrique	(V/m)
F	Fréquence	(Hz)
H	Champ magnétique	(A/m)
I :	Intensité de courant électrique	(A)
J	Densité de courant	(A/m ²)
J _s :	Densité de courants surfaciques	(A/m ²)
T	temps	(s)
U :	Tension aux bornes du capteur	(V)
V	Potentiel scalaire électrique	(V)
Φ	Potentiel scalaire magnétique	(T.m)
Ω	Pulsation électrique	(rad/s)
Σ	Conductivité électrique	(S/m)
σ _p :	Conductivité électrique de la pièce	(S/m)
P	Résistivité électrique	(Ω.m)
δ	Épaisseur de peau	(m)
μ ₀	Perméabilité magnétique absolue du vide	4π 10 ⁻⁷ (H/m)
μ _r	Perméabilité magnétique relative	
ε ₀	Permittivité électrique absolue du vide	36π10 ⁻⁹ (F/m)
ε _r	Permittivité électrique relative	
R	Résistance électrique	(Ω)
ΔR	Variation de la résistance	(Ω)
L	Inductance propre	(H)
X	Réactance	(Ω)
X _n	Réactance normalisée	
ΔX:	Variation de la réactance	(Ω)
Z	Impédance	(Ω)
ΔZ :	Variation de l'impédance	(Ω)
S :	Surface	(m ²)

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale

Les technologies d'essais non destructifs (END) ont de nombreuses applications pour les industries du transport, de l'aérospatiale, du nucléaire, de l'automobile, de la fabrication, de la pétrochimie et de la défense, [1]. Le CND est maintenant un domaine relativement mature et le CND par courants de Foucault électromagnétique est largement utilisé pour l'inspection des métaux depuis plus de quatre décennies. Cependant, la caractérisation précise des défauts de surface et de sous-surface pose toujours un défi majeur, [2] [3] [4].

La technique des courants de Foucault (ECT) est l'une des méthodes non destructives efficaces pour détecter les défauts dans les tuyauteries et les plaques conductrices. Au fil des ans, de nombreux chercheurs ont appliqué l'ECT pour détecter et évaluer les défauts tels que les fissures sur des surfaces non uniformes telles que les zones de soudure.

L'inspection par courants de Foucault tangentiels (Tangential Eddy Current : TEC) est une autre technique basée sur l'induction magnétique. La principale différence entre les courants de Foucault tangentiels et conventionnels est que les bobines sont orientées tangentiellement à la surface. Considérant que les courants de Foucault sont créés perpendiculairement à la surface, cette orientation améliore le positionnement en profondeur et le dimensionnement des défauts.

Le courant de Foucault tangentiel est utilisé pour la détection et la caractérisation des fissures de rupture de surface dans les matériaux conducteurs. Cette technologie est principalement utilisée sur les soudures et la zone affectée thermiquement. Les courants de Foucault tangentiels peuvent également être regroupés dans un réseau pour augmenter la couverture de surface (Tangential Eddy Current Array (TECA))

L'objectif visé par ce travail est l'étude d'un système de détection par Courants de Foucault par bobine tangentielle, en mode multiéléments (TECA) ou mode en élément unique (TEC) . La résolution des équations formulées s'est faite par la méthode des éléments finis implantés sous environnement COMSOL multiphysics. Ce logiciel permet de simuler un nombre important de phénomène physique et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multiphysiques, y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF. [1] [5] [6]

Ce mémoire comportera trois chapitres structurés comme suit :

- *Le premier chapitre sera dévoué à une recherche bibliographique concernant les techniques du CND ainsi que leurs avantages, inconvénients et leurs domaines d'application. On terminera cette partie par un Tableau récapitulatif sur les différentes techniques et leurs applications.*

- *Au deuxième chapitre, la première partie sera dédiée au capteur inductif, les paramètres qui influent sur le contrôle, la mise en œuvre, c'est-à-dire aux différents types de sondes, leurs branchements électriques et leurs modes de contrôle, par contre la deuxième partie sera consacrée aux rappels des principales lois qui gouvernent chaque phénomène électromagnétique (équation de Maxwell) pour formuler les équations en régime de la magnétodynamique, ces équations sont des équations différentielles aux dérivées partielles dont la solution dépend entièrement des conditions aux limites.*

- *Quant au troisième chapitre, il sera réservé pour sa première partie à l'étude de l'effet de certains paramètres électriques et géométriques (fréquence, Lift-off, largeurs et profondeurs) sur les performances de la détection CND-CF avec bobine tangentielle en mode absolue pour les deux types de topologies TEC et TECA. Quant à la deuxième partie elle sera dédiée à l'imagerie par CF.*

- *Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués et les perspectives à envisager.*

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉS SUR
LES TECHNIQUES DU CND

Chapitre I. Généralités sur le Contrôle Non Destructif

I.1. Introduction :

Le contrôle non destructif (CND) est l'utilisation de techniques physiques pour tester les matériaux, les composants et les assemblages pour les défauts structurels sans compromettre leur utilité future. Le but du CND est de trouver des défauts dans la structure d'un produit. Les techniques de CND varient de simples à complexes. La méthode la plus simple est l'inspection visuelle. Des méthodes pénétrantes ou magnétiques peuvent révéler des imperfections de surface invisibles à l'œil. Il est souvent inutile de procéder à des examens plus complexes de l'intérieur par ultrasons ou radiographie si des défauts de surface vraiment graves sont détectés. L'inspection visuelle ou optique, les tests de pénétration de liquide, les tests de particules magnétiques et les tests CND sont des méthodes couramment utilisées. [8] [9]

Les techniques de CND sont nombreuses. Citons : [6]

- *Le ressuage.*
- *La magnétoscopie.*
- *Les courants de Foucault.*
- *Les ultrasons.*
- *La radiographie.*

Auxquelles il faut ajouter l'émission acoustique (en plein développement), la tomographie et la neutronographie. Certains classent également la thermographie, l'holographie, le contrôle d'étanchéité et l'analyse de signature mécanique parmi les techniques du CND.

I.2. Types de Défaut à détecter par le Contrôle Non Destructif :

Diverses techniques ont été créées pour répondre aux exigences liées au type de défaut souhaité, à la pièce à examiner (par exemple, rivetée, soudée, laminée, de forme complexe...) et aux conditions dans lesquelles le test doit être effectué (par exemple, en cours de fabrication, en recette, en service...). Les défauts surfaciques et internes sont les deux principales catégories des défauts recherchés.

Sur le plan technologique, les défauts surfaciques sont les plus problématiques. Ils comprennent les fissures, les criques, les piqûres, les craquelures qui peuvent entraîner la rupture de la pièce ou son aspect, c'est-à-dire la variation des paramètres géométriques et/ou physiques de la

pièce, tels que sa rugosité, son épaisseur et l'homogénéité de la surface, ce qui rend la pièce inutilisable.

Les défauts internes, ce sont tous les défauts localisés dans le volume du corps à contrôler qu'il s'agisse de pièces moulées, forgées, laminées ou soudées. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans l'industrie des métaux il peut s'agir par exemple de porosité, de soufflures ou d'inclusions. Dans tous les autres cas, il peut s'agir de la présence d'un corps étranger au sein d'une pièce ou d'un produit. Pour ce type de défauts le contrôle visuel est exclu d'office, [9].

I.2.1. Principe de détection des défauts :

Exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée : [4] [8]

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique.
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts.
- Détection de ces modifications par un capteur approprié.
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée. [8]

I.3. Méthodologie de développement des systèmes de CND :

Indépendamment de la technique de CND utilisée, l'élaboration d'un système peut être décomposée en cinq phases fortement couplées figure (I.1). Tout d'abord, on se fixe l'objectif du contrôle qui est souvent : [2] [11]

- Caractérisation (électrique, magnétique et géométrique) des matériaux.
- Recherche des défauts dans la structure des matériaux.
- Caractérisation des défauts.

La première phase consiste à essayer de comprendre et d'analyser l'interaction entre le champ émis par le capteur et la pièce à contrôler. Ensuite, vient la traduction des phénomènes mis en jeu par des modèles analytiques, semi-analytiques ou numérique. Ces outils de simulation sont à la base de la conception et l'optimisation des capteurs. Ils permettent aussi d'inverser le rapport capteur/pièce, cela permet à partir de signaux recueillis de s'informer des caractéristiques de la pièce (ou du défaut). [10]

I.4. Différentes méthodes de CND :

Il existe une variété de méthodes de CND qui peuvent être utilisées, notamment la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, les courants de Foucault, etc. Ils dépendent du type de contrôle envisagé. Ces techniques utilisent divers phénomènes et sont souvent complémentaires. Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...), du type de contrôle à utiliser (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué. La plupart de ces méthodes ont automatisé les procédures d'acquisition, permettant le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données. Le premier chapitre se concentre sur la présentation des principaux outils de CND, en particulier celui basé sur les courants de Foucault. [2] [10] [7]

I.4.1. Examen visuel :

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. [2] [11] [10] [12]

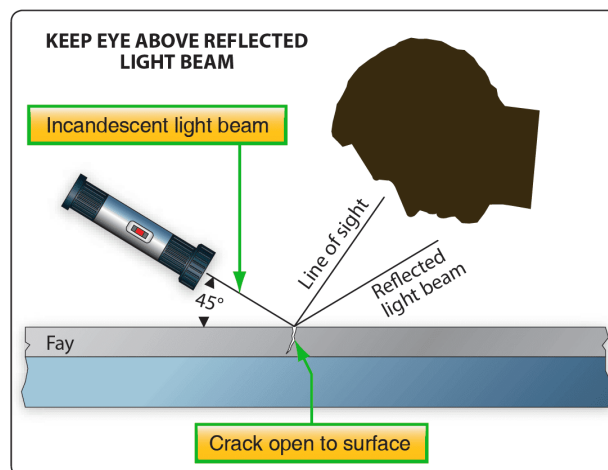


Figure I. 1 Examen visuel.

L'examen visuel comprend, la :

- Vérification de l'état de surface de l'éprouvette.
- Vérification de l'alignement des surfaces de contact.

Vérification de la forme du composant :

- Vérification des signes de fuite.
- Vérification des défauts latéraux inter.

I.4.2. Le ressuage :

Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchant, un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...) ; la pièce étant ensuite examinée visuellement. [2] [10] [7].

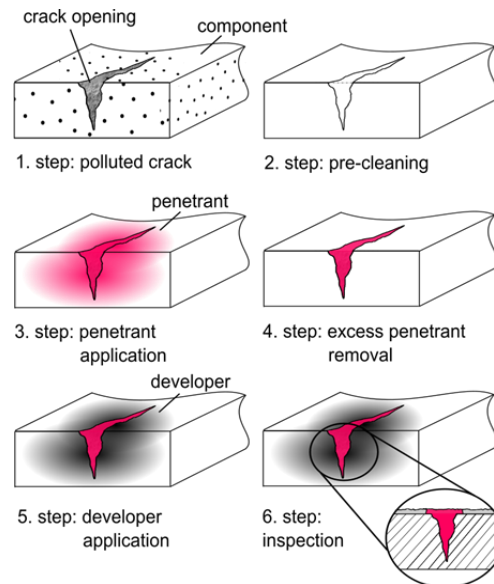


Figure I. 2 Principe de la méthode de ressuage[8].

Par ordre décroissant de sensibilité et de coût, les processus de pénétration des liquides peuvent être classés comme :

1. Colorant fluorescent post-émulsionnable.
2. Pénétrant fluorescent amovible au solvant.
3. Pénétrant fluorescent lavable à l'eau.
4. Colorant visible post-émulsionnable.
5. Pénétrant de colorant visible amovible au solvant.
6. Colorant visible lavable à l'eau.

Certains des avantages des tests de ressuage sont les suivants :

- Coût relativement faible.
- Méthode CND hautement portable.
- Très sensible aux discontinuités fines et serrées.
- Méthode assez simple.
- Peut être utilisé sur une variété de matériaux.
- Toutes les discontinuités de surface sont détectées en une seule opération, quelle que soit l'orientation.

Certaines des limites des tests de ressuage sont les suivantes :

- La surface d'essai doit être exempte de tout contaminant (saleté, huile, graisse, peinture, rouille, etc.).
- Détecte uniquement les discontinuités de surface.
- Ne peut pas être utilisé sur des échantillons poreux et est difficile à utiliser sur des surfaces très rugueuses.
- L'enlèvement de tous les matériaux pénétrants, après le test, est souvent nécessaire.
- Il n'y a pas de méthode simple pour produire un enregistrement permanent.

I.4.3. La magnétoscopie :

Les défauts débouchant ou sous-jacents (de 1 à 2 mm de la surface) dans les matériaux ferromagnétiques peuvent être détectés par magnétoscopie, une technique de contrôle non destructive. Elle implique la création d'un flux magnétique intense dans les structures, ce qui entraîne des flux de fuite au droit des défauts. Des révélateurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux peuvent mettre en évidence ces flux ou, de manière plus marginale, des mesures directes avec des capteurs peuvent être effectuées. La plupart du temps, c'est une inspection visuelle effectuée par un opérateur. La granulométrie des poudres magnétiques utilisées, qui doivent être très homogènes, affecte en partie la sensibilité de détection. Les pièces de forme simples peuvent être contrôlées automatiquement, [13] [5].

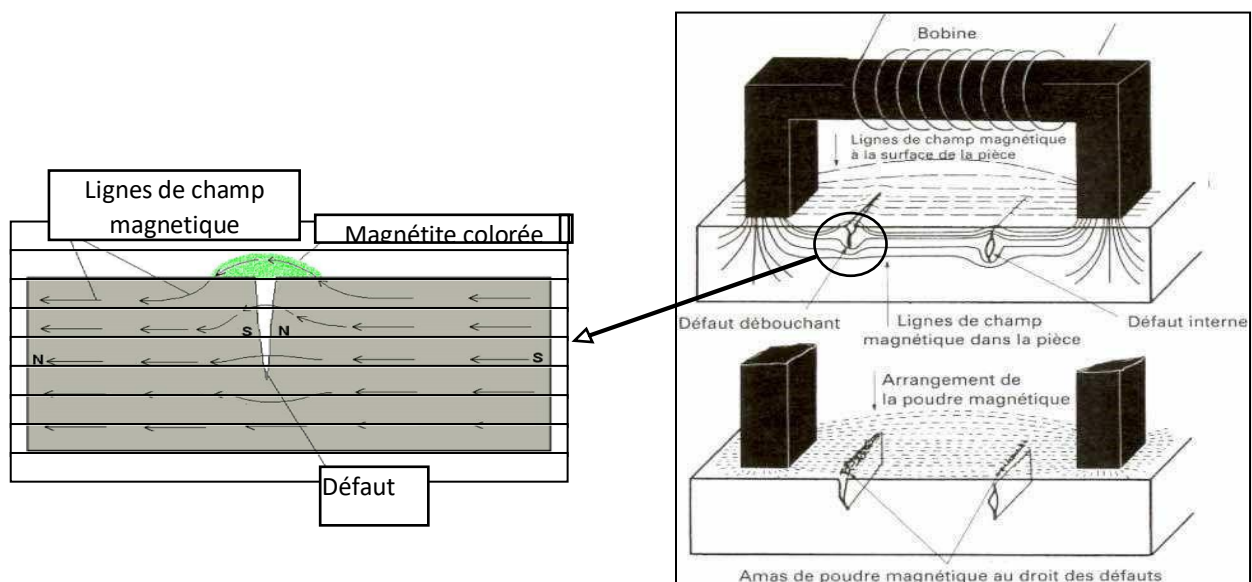


Figure I. 3 Principe de la magnétoscopie [13].

I.4.4. Radiographie :

Le contrôle par radiographie implique la diffusion d'un rayonnement ionisant (rayons x ou γ) à travers un matériau et la collecte du signal atténué sur un récepteur, qui peut être un film photographique ou un capteur électronique, qui transforme le rayonnement en une image visible.

L'absorption des rayonnements est proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé. Comme indiqué dans la figure 1.4. Ce contrôle peut être utilisé avec de très nombreux types de matériaux au stade de la production ou de la maintenance pour mettre en évidence et dimensionner des hétérogénéités telles que des porosités, des soufflures, des amas d'inclusions, des criques, des fissures, des manques de pénétration en soudure. Les défauts perpendiculaires à la direction du faisceau sont plus difficiles à détecter, [5] [10] [12].

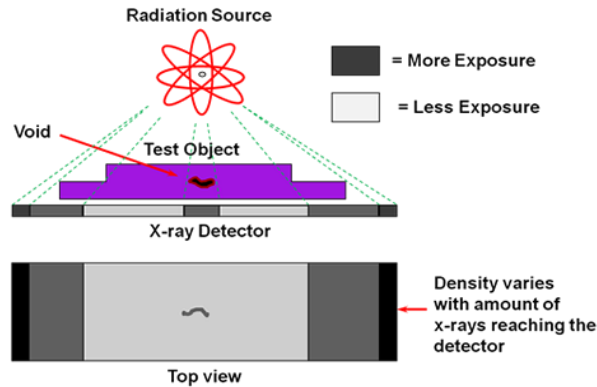


Figure I. 4 Principe de la radiographie[13] .

I.4.5. Thermographie :

Les défauts de surface et volumiques peuvent être contrôlés à l'aide de cette technologie. Le contrôle par thermographie consiste à tester un échauffement local homogène dans la structure et à observer l'évolution de la température après un temps de latence. Les défauts dans le matériau entravent la transmission de la chaleur et provoquent des anomalies thermiques en surface qui peuvent être détectées par une caméra infrarouge. La stimulation et l'observation peuvent avoir lieu sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette méthode est idéale pour trouver des défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages) et pour gérer les matériaux céramiques, qui sont des conducteurs de chaleur peu performants, [5] [10] [12].

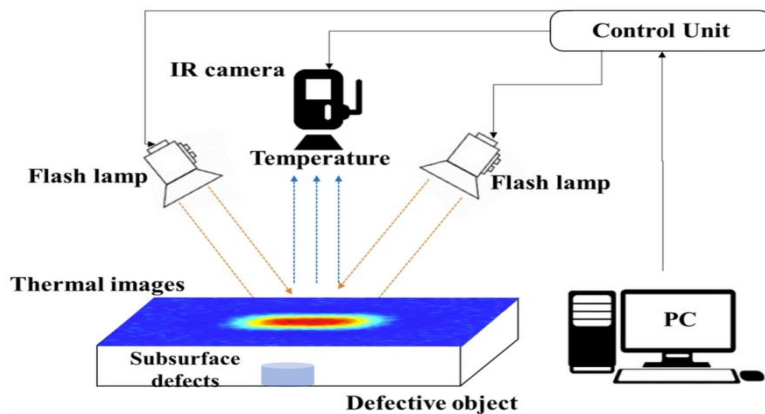


Figure I. 5 Principe de contrôle par thermographie.

I.4.6. Ultrasons :

Les vibrations mécaniques appelées ultrasons se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et réfléchit aux obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce) à la manière d'un écho, [10]. Les échos sont traités dans une chaîne de mesure ou analysés sur un écran. Lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises, le signal est maximal, (Figure 1.7), [2] [10] [5].

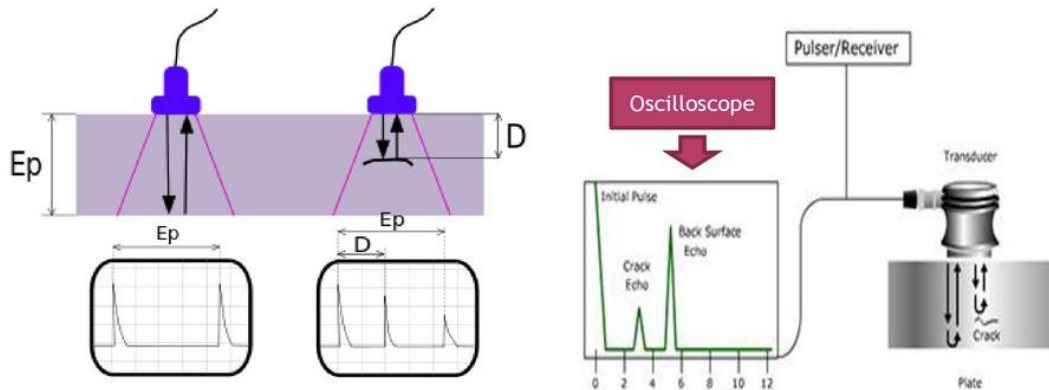


Figure 1. 6 Principe des ultrasons [10].

Une couche d'air sépare toujours le transducteur et la cible, ce qui rend leur contact incomplet. La plupart de l'énergie émise par le transducteur à l'interface air-matériau ne pénètre pas dans le matériau. Par conséquent, un couplant (eau, huile, par exemple) doit être déposé entre le transducteur et le matériau. [10] [15] [16]

I.5. CND par les courants de Foucault :

I.5.1. Principe :

L'une des méthodes électromagnétiques de CND est le contrôle par courant de Foucault. Ce n'est qu'aux composants conducteurs électriquement que cette technique peut être utilisée. Elle est particulièrement efficace pour mettre en évidence les défauts superficiels ou sous-cutanés ou toute variation des paramètres physiques du matériau à contrôler (σ , μ). Pour utiliser la technique de CND par CF, une bobine (également connue sous le nom d'émetteur ou d'excitateur) parcourue par un courant alternatif est placée à proximité de la pièce conductrice testée. Des boucles se forment dans la pièce grâce aux courants de Foucault. Certains de ces courants produisent et ont la même fréquence que le courant émetteur, [12] [16] [17].

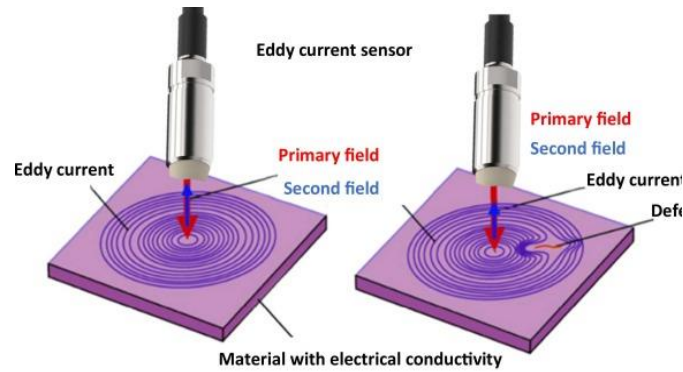


Figure 1. 6 Principe du CND par courant de Foucault [7].

Les fréquences utilisées en CND par CF sont généralement faibles (au plus quelques dizaines de MHz), ce qui signifie que la longueur d'onde est grande par rapport aux dimensions de la pièce. Cela permet de minimiser l'impact de la propagation de l'onde. [13] [14]

I.5.2. Effet de peau :

Tous matériaux conducteurs parcourus par un courant électrique alternatif ou soumis à un champ électromagnétique variable dans le temps présentent ce phénomène d'origine électromagnétique. Dans le cas d'un contrôle non destructif, les courants induits dans la pièce commencent à décroître d'une manière exponentielle à partir de la surface. La profondeur de pénétration donnée par détermine la grandeur caractéristique de ce phénomène : [17] [19]

$$\delta = \frac{1}{\pi \cdot \sigma \cdot \mu \cdot f} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}}$$

f : La fréquence d'alimentation [Hz].

μ_0 : La perméabilité magnétique du vide [H/m].

μ_r : La perméabilité magnétique relative du matériau [H/m].

σ : La conductivité électrique [S/m].

Par conséquent, la profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la fréquence du champ et à la nature du matériau. Le module de la densité de courant d'une cible plane semi-infinie excitée par une nappe de courants extérieurs parallèles au plan est régi par la relation suivante.: [1]

$$[3] \quad J(z) = J_0 \cdot e^{-z \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \mu_r \sigma}} = J_0 \cdot e^{-\frac{z}{\delta}}$$

➤ z : La profondeur considérée à l'intérieur de la cible [m].

➤ $J(z)$: Le module de la densité de courant en fonction de la profondeur [A/].

➤ σ : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau [m].

On peut constater que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur (figure 1.8). [2] [13]

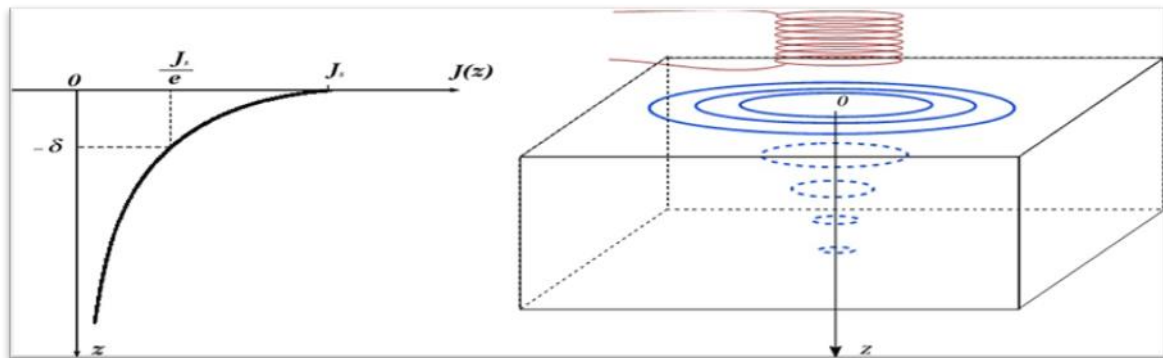


Figure I. 7 Répartition des courants de Foucault sous une surface plane[11].

Un élément sensible à une grandeur électromagnétique collecte la réponse d'une cible à une excitation. Il s'agit généralement de déterminer une impédance ou une différence de potentiel (d.d.p) qui représente la variation d'un flux. Souvent, cette mesure est effectuée à l'aide d'une bobine. [13] [7]

I.6. Comparaison entre les principales méthodes de CND :

Le tableau III 1 présente une comparaison des différentes méthodes CND les plus courantes, en fonction du type de défaut à détecter, de la nature du matériau à contrôler et des avantages et inconvénients de la méthode.

Tableau I. 1–Comparaison entre les différentes méthodes de CND, [6].

Tableau I. 1–Comparaison entre les différentes méthodes de CND, [6].

Méthode	Défauts détectés	Matériaux contrôlés	Avantages et limites
Ressuage	Défauts débouchant. Sensibilité : 80 : 200 μm et 1 $\mu\text{m}/30$ μm pénétrant fluorescent	Métaux, plastiques, céramiques, composites	Pour des matériaux compacts et non poreux
Courants de Foucault	Défauts de surface. Caractérisation de la microstructure du matériau.	Matériaux conducteurs électriques	Contrôle fidèle. Contrôle en continu possible (Utilisé pour le contrôle en fabrication des tubes et barre)
Magnétoscopie	Défauts débouchant et sous-cutanés	Matériaux Ferro-magnétiques	Grande sensibilité. Importance de l'orientation des défauts par rapport aux lignes de champ. Contrôle unitaire. Désaimantation des pièces après contrôle.
Ultrasons	Défauts internes. Caractérisation de la Microstructure du matériau et du Niveau de contrainte.	Métaux, plastiques, céramiques, composites	Appareils portables. Contrôle en continu possible. Cartographie de la répartition de défauts. Nécessite d'un milieu de couplage pour les méthodes classiques. Méthodes sans contact disponibles.
Radiographie	Défauts internes	Métaux, plastiques, céramiques, composites	Contrôle unitaire. Importance de l'orientation des défauts. Perméabilité aux rayonnements ionisants. Protection des opérateurs contre les rayonnements.
Thermographie	Défauts internes et de surface	Composites, plastiques, céramiques, métaux	Bien adaptée pour le contrôle des composites, polymères ou céramiques (délaminage).

I.7. Différentes technologies des capteurs inductifs :

Les composants à contrôler déterminent principalement la technologie des capteurs inductifs. Pour des cibles qui ne sont pas conductrices Dans le cas d'une cible magnétique non conductrice qui provoque une modification des lignes du champ du capteur et qui est attirée par la pièce, le dispositif fonctionne en "capteur magnétique ou CM". (Fig. 1-10). [2] [7]



Figure 1. 8 Différente technologies des capteurs inductifs (CCF et CM) [4].

I.8. Principe physique de CND-CF :

Sous la loi de Maxwell-Ampère, un champ d'excitation variable est créé lorsque la bobine du capteur est alimentée par un courant variable. Les courants de Foucault seront créés par toute pièce conductrice qui baigne dans ce champ. Ces courants reproduisent à leur tour un champ magnétique opposé à leur origine en vertu de la loi de Lenz. Le champ résultant modifiera le courant de la source et l'impédance du capteur. Le principe de CND par courant de Foucault est résumé dans la figure (I.11). [2] [3]

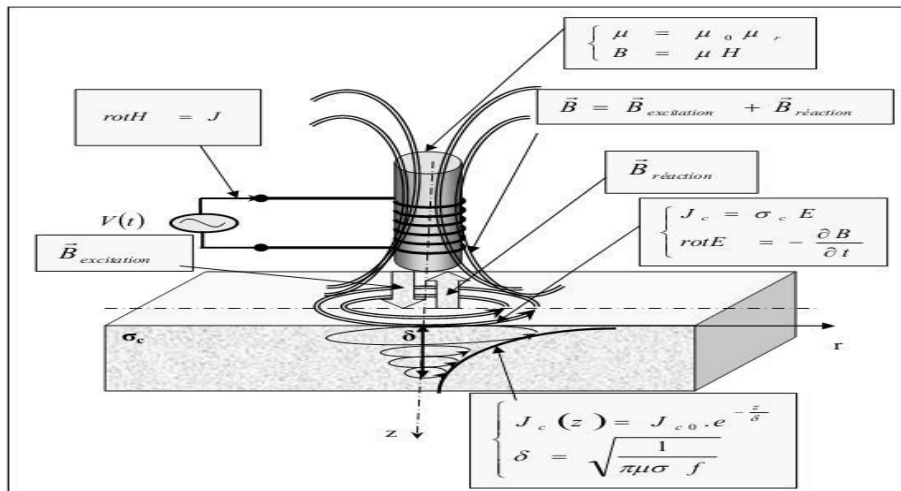


Figure 1. 9 Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault [4].

I.8.1 Objectifs de CND-CF :

Un capteur à courants de Foucault est capable de réaliser une variété de fonctions. En raison des différentes caractéristiques électromagnétiques et géométriques, l'impédance du système Capteur/Pièce varie. Parfois utilisé pour la caractérisation géométrique et électromagnétique, d'autre part pour le contrôle de l'état de santé en cherchant et pour la caractérisation des défauts. La figure (I.5) montre les diverses fonctions d'un capteur CF. [2] [3] [7]

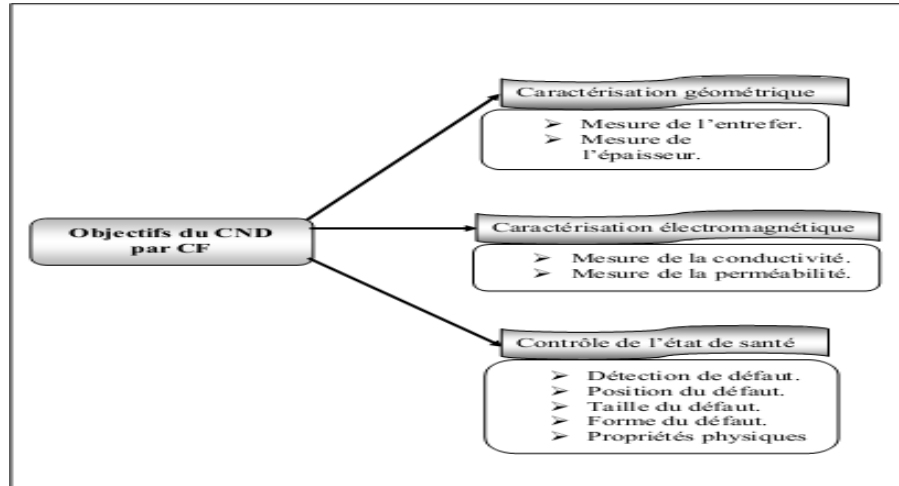


Figure I. 10 Nature du CND par CF [4].

I.8.2. Classification des capteurs :

Pendant la classification des capteurs, divers critères sont pris en compte. Les géométries, les fonctions et les modes de contrôle des capteurs déterminent leur configuration. Les trois critères mentionnés précédemment sont résumés dans la figure (I.13). [2] [4] [7]

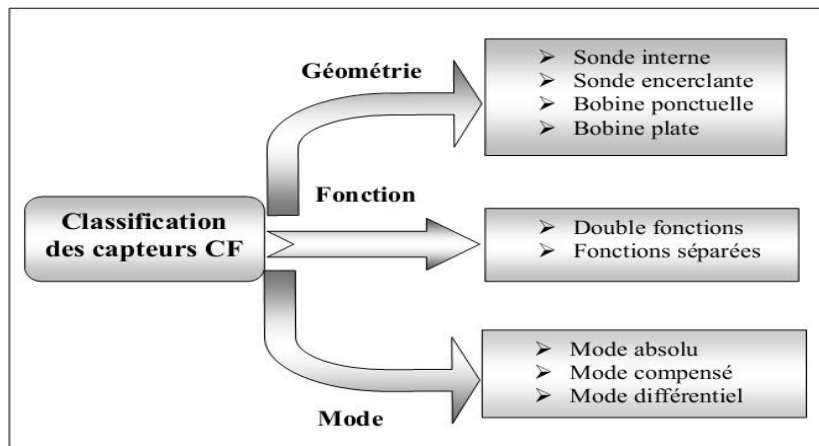


Figure I. 11 Critères de classification des capteurs [4].

I.8.3 Différents fonctions de capteurs :

Les bobines peuvent être utilisés pour effectuer un contrôle par courants de Foucault de diverses manières. Les configurations de base à partir desquelles d'autres montages peuvent être envisagés sont indiquées ici. [4]

I.8.3.A. Capteurs à double fonctions :

La sonde à double fonction avec une seule bobine est le montage le plus simple. La même bobine assure les fonctions d'émission et de réception. La mesure de l'impédance équivalente de la

bobine dans son environnement permet l'exploitation en régime sinusoïdal. [4] [5]

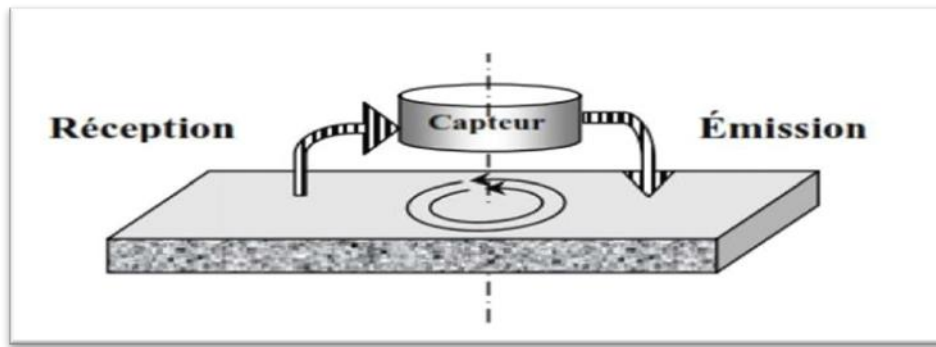


Figure I. 12 Capteur à fonction double [6].

I.8.3.B Capteurs à fonctions séparées :

Dans ce cas, le capteur contient au moins deux composants : 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. La force électromotrice (f.e.m) induite aux bornes d'une bobine est la grandeur mesurée. [3] [11]

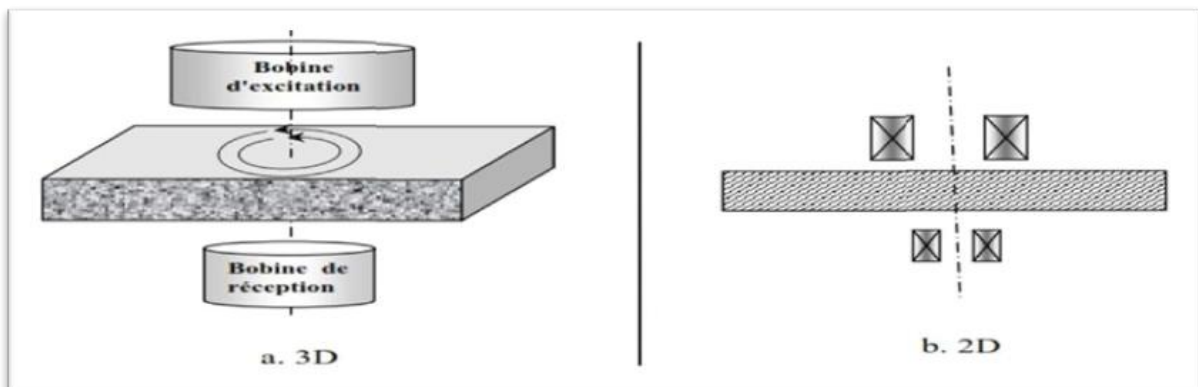


Figure I. 13 Capteur à fonctions séparées [6].

I.8.4. Différents types de mesures :

I.8.4.A. Capteur à mesure absolue :

Tous les paramètres électromagnétiques et géométriques de l'environnement sont sensibles à ce type de capteur. Le récepteur est généralement composé d'un seul élément. Une pièce de référence (maquette) peut être étalonnée avant le contrôle d'une pièce. [5]

I.8.4.B. Capteur à mesure différentielle :

Par opposition à un capteur à mesure absolue, ce mode de mesure est sensible uniquement aux variations locales de l'objet à examiner. En se débarrassant des perturbations lentes telles que la variation du lift-off, la conductivité, il permet de détecter les changements dus aux discontinuités lors

du déplacement du capteur le long du produit examiné. La plupart du temps, le récepteur est composé d'au moins deux composants proches. Cette méthode implique de prendre des mesures différentes sur les deux composants simultanément. Lorsque la pièce est saine, le signal d'un capteur différentiel est idéalement nul. [2] [5]

I.8.5. Différents types de bobines :

La bobine est un élément qui peut réaliser l'émission et/ou la réception. Il existe deux principales classes de bobine. [5] [6]

I.8.5.A. Bobines classiques :

L'enroulement hélicoïdal d'un conducteur (cuivre) émaillé autour d'un noyau forme la bobine. En règle générale, le noyau est diélectrique (isolant) ou magnétique (ferrite). Le champ magnétique autour de la bobine est focalisé grâce à l'utilisation d'un noyau magnétique. [5] [6]

I.8.5.B Bobines gravées :

Il existe deux types de bobines gravées :

- ✓ Bobines fabriquées à l'aide de technologies PCB conventionnelles.
- ✓ Micro bobines, qui ont une taille d'environ mm, ont été fabriquées en salle blanche à l'aide de micro technologies. La fabrication nécessite diverses étapes de dépôt et de gravure, comme illustré dans la figure. (1.16). [5] [6]

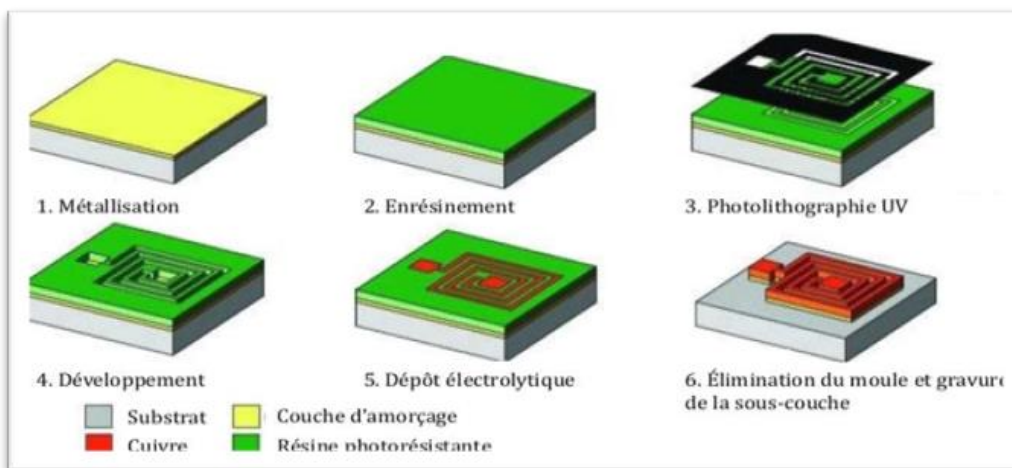


Figure I. 14 Etapes de réalisation des bobines micro moulées[5] .

I.8.5.C. Bobines souples :

Dans une application de CND par CF, l'utilisation de capteurs traditionnels est inadaptée pour l'examen d'objets dont la surface est de forme complexe (comme la variation du rayon de courbure). Le capteur n'épousera pas la forme de la pièce et n'aura pas un bon couplage magnétique avec elle. Les coûts de développement augmentent car des études particulières sont nécessaires. Un capteur flexible semble être la bonne solution pour surmonter ces problèmes et offrir aux utilisateurs des solutions efficaces. Le capteur peut s'adapter à la surface de la pièce testée en déplaçant sur une surface irrégulière, ce qui réduit les variations de déplacement pendant le scan de surfaces complexes. [5]

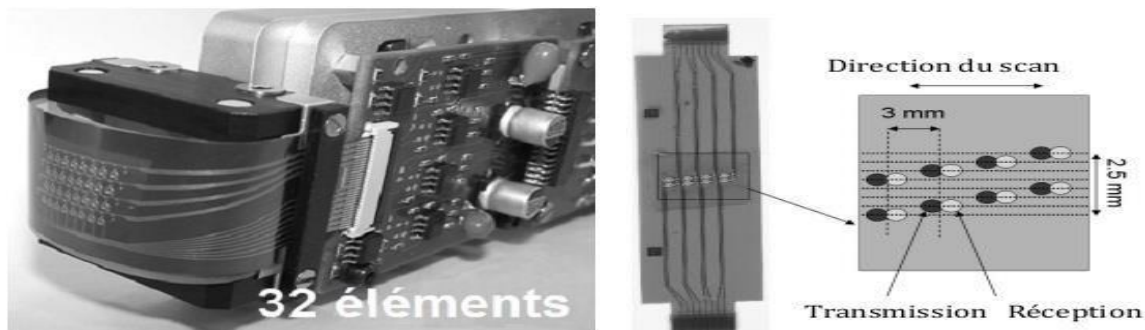


Figure 1.15 Capteur constitué de quatre couples de bobines sur un film de kapton souple[5].

Chaque couple est constitué d'une bobine émettrice et d'une bobine réceptrice.

La conception de capteurs souples a récemment été améliorée. Des capteurs utilisent des bobines souples petites ou grandes montées sur un support souple. Un capteur créé au CEA composé de plusieurs bobines gravées sur un support flexible, comme le montre la figure (1.17). [5]

I.8.6. Différents types des Sondes :

Selon la forme géométrique, on distingue cinq principales configurations [2] :

I.8.6.A. Sonde encerclant :

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Il est utilisé pour contrôler des objets de faibles sections, des tubes et des barres par l'extérieur. [2] [4] [7]

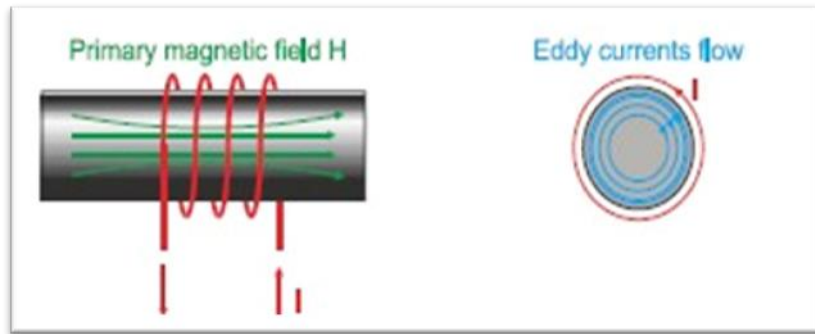


Figure I. 16 Bobine encerclant[2].

I.8.6.B. Sonde interne :

Il s'agit d'un capteur conçu pour examiner un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils fonctionnent avec ou sans noyau. (figure I.19), [2] [4] [7].

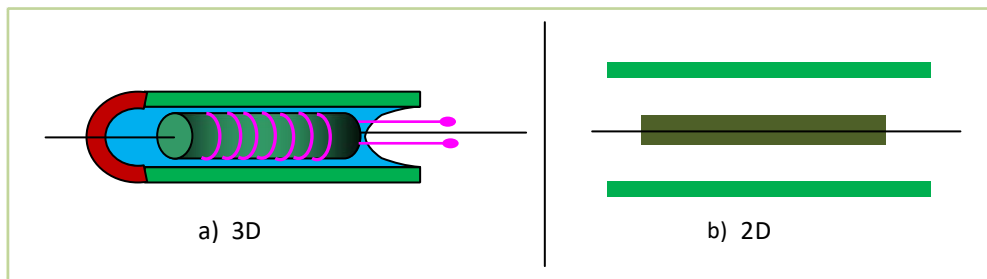


Figure I. 17 bobine interne avec noyau.

I.8.6.C. Sonde ponctuelle :

Elle est utilisée pour inspecter des objets à des endroits spécifiques. La surface de la pièce est perpendiculaire à l'axe du capteur. En effet, l'utilisation de ce palpeur permet de réaliser un examen local des pièces, y compris celles ayant une géométrie complexe. (Figure I.20). [2] [4] [7]

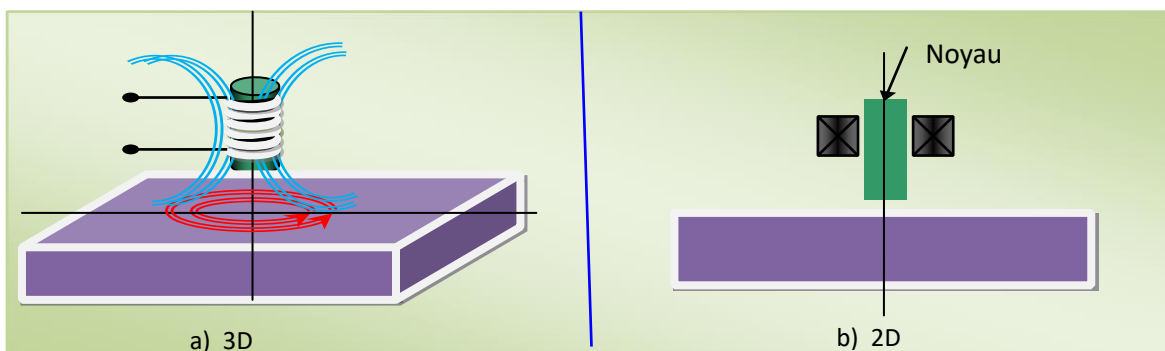


Figure I. 18 Bobine externe glissante avec noyau .

I.8.6.D. Sonde plate :

Ce capteur fonctionne sur les surfaces des pièces de la même manière que la bobine ponctuelle. En raison de sa géométrie, son champ d'action est plus large (figure I.20). [2] [4] [7].

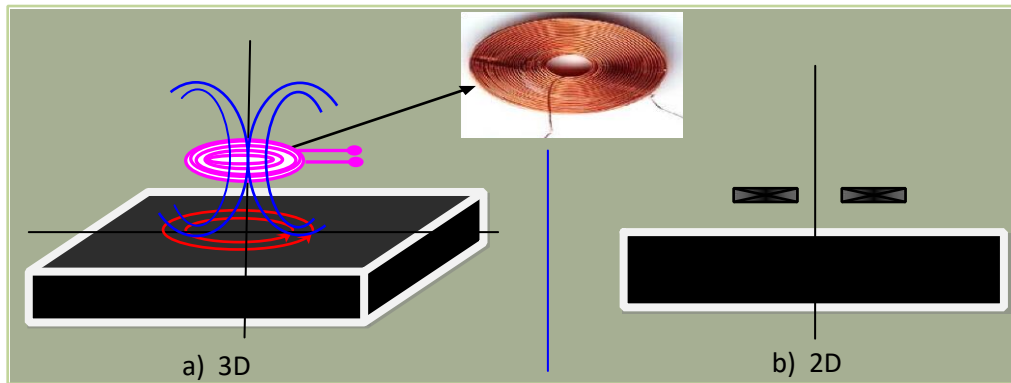


Figure I. 19 Bobine plate [2].

I.8.7. Différents types d'alimentations :

On distingue trois types d'alimentation pour les bobines des capteurs CF : [3]

I.8.7.A. Signal mono-fréquentiel :

Une excitation sinusoïdale de fréquence fixe est utilisée pour créer des courants induits. La fréquence choisie dépend principalement de l'application visée et de la sensibilité des paramètres recherchés. Néanmoins, elle devra se situer dans une gamme acceptable. En effet, :

L'amplitude des courants induits sera faible et la précision de mesure sera insuffisante pour une fréquence trop basse [4] [5]

Les phénomènes de capacité parasite causés par une fréquence excessive peuvent être causés par les capacités inter spires du capteur. [4] [5]

Cette méthode a des limites car elle est difficile à caractériser. [2] [4] [6] [5]

I.8.7.B. Signal multifréquences :

Le CND à courant de Foucault utilise principalement la méthode multifréquence. En effectuant des mesures à différentes fréquences d'excitation, il est possible d'atténuer considérablement l'impact des grandeurs perturbatrices. Il n'est possible de réduire ces grandeurs qu'avec des signaux contenant

suffisamment d'informations pour permettre une séparation des paramètres. En utilisant n paramètres, on peut obtenir $2n$ informations réelles et éliminer une perturbation de $2n-1$. Malgré la présence de grandeurs perturbatrices, cette méthode est très utilisée pour inverser les données fournies par le capteur pour déterminer les paramètres d'une cible. Il est possible de réaliser une excitation multifréquence soit : [3]

En séquence : utiliser un appareil de mesure classique (mono-fréquence). L'un des inconvénients de cette méthode est le long temps d'acquisition, ce qui ralentit la mesure. [2] [4]

Simultanément : Cette méthode génère simultanément des fréquences et nécessite un appareil de mesure complexe et coûteux. En pratique, le nombre de fréquences dépasse rarement quatre en raison de la complexité et des difficultés de réglage de tels appareils. [2] [4]

I.8.7.C. Signal pulse :

Une alternative à l'alimentation sinusoïdale multi-fréquences dans un problème de contrôle où il s'agit de discriminer plusieurs paramètres consiste à exciter la sonde avec un signal impulsionnel ou quasi-impulsionnel. Les signaux d'alimentation peuvent être rectangulaire, triangulaire ou semi-sinusoïdal, ce dernier étant le plus couramment utilisé en raison de sa simplicité d'utilisation. Ce type de contrôle utilise l'évolution temporelle des signaux. En principe, une telle méthode est plus riche en informations qu'un contrôle par courants sinusoïdal mono ou multifréquences de Foucault. Mais l'excitation pulsée nécessite une instrumentation spécifique : générateur d'impulsions à fort courant avec une bande passante élevée, système d'acquisition performant (les signaux à mesurer sont rapides et souvent de faibles amplitudes). [2] [4]

I.9. Plan d'impédance normalisée :

Un plan d'impédance normalisée peut être utilisé pour exploiter les résultats. Pour cela, on utilise les grandeurs X_0 (réactance de la bobine dans l'air), X (réactance de la bobine en présence de matériau), R_0 (résistance du fil de bobine à vide) et R . définit ; [5] [8]

- La résistance normalisée.
- La réactance normalisée.

Alors l'impédance normalisée est : [4] [8]

La figure 1 .12 illustre l'allure des trajectoires que décrit le point d'impédance de la sonde pour des variations de conductivité électrique σ et de distance de mesure (lift - off). [4]

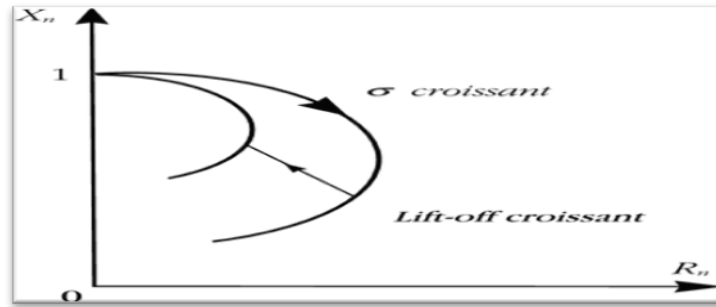


Figure 1. 20 Influence de σ ou du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée (cas d'une pièce amagnétique) [2].

En présence d'un défaut dans la pièce, une variation supplémentaire due à la modification du champ causée par la déviation des courants de Foucault affecte l'impédance de la bobine qui devient : [4] [6]

L'impédance qui crée par le défaut : Un changement de caractéristique physique de la pièce contrôlée fait varier le point de fonctionnement suivant une trajectoire que l'on appelle signature. [6] [24]

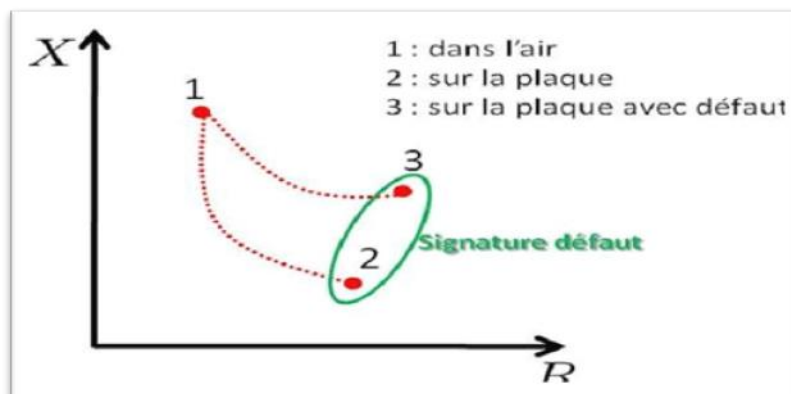


Figure 1. 21 Effet du défaut sur la valeur de l'impédance de la bobine [2].

I.10. Intérêt de la modélisation :

Les outils de modélisation permettent la conception des capteurs et la prédiction de leur comportement dans le contexte du CND par CF. [4] [7]

Ces outils ont un impact sur le développement des outils de production en réduisant le coût de la phase expérimentale. La modélisation se compose de deux étapes [12] : la première est la recherche et l'analyse du problème, et la deuxième est la mise en œuvre d'une solution au problème. La première étape conduit à la CND par CF à des équations aux dérivées partielles (EDP) basées sur les lois électromagnétiques. Le chapitre suivant présente les techniques utilisées pour résoudre ces dernières. [1] [5] [7]

I.11. Conclusion

Ce chapitre a rappelé rapidement la définition et l'objectif du contrôle non destructif, les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un défaut et les bases physiques qui régissent les procédés de contrôle.

Nous avons ensuite décrit les principes des techniques de contrôle non destructif les plus courantes dans le secteur industriel, telles que l'examen visuel, le ressuage, les tests ultrason, la radiographie, les tests de particules magnétiques et la technique des courants de Foucault. Nous avons mentionné les avantages et les inconvénients de chaque technique d'inspection. Il n'y a pas de technique CND qui fonctionne avec tous les matériaux et tous les défauts, et diverses méthodes doivent être considérées comme complémentaires et non compétitives. [12]

La modélisation d'une configuration réelle de CND-CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement (souvent utilisée pour l'étude des problèmes à géométrie simple, elles nécessitent des hypothèses simplificatrices) et elle fait appel à des méthodes numériques (elles sont basées sur une discrétisation du domaine d'étude (maillage) et l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque élément du maillage) à savoir la méthode des éléments finis (MEF). Cette méthode s'est imposée ces dernières années, comme un outil numérique efficace pour le traitement des problèmes électrotechniques.

Etant donné que la modélisation du problème électromagnétique par la méthode des éléments finis d'un capteur inductif à courant de Foucault est une étape primordiale pour la résolution d'un problème CND-CF, nous avons jugé utile de lui consacrer le chapitre suivant.

CHAPITRE II :

CAPTEUR ET MODÉLISATION POUR LE CND PAR COURANTS DE FOUCAULT

Chapitre II : Capteur et Modélisation pour le CND par Courants de Foucault.

II.1. Introduction :

Les phénomènes électromagnétiques sont la base du contrôle non destructif par courants de Foucault. Il est essentiel de comprendre ces phénomènes pour créer des modèles mathématiques précis afin de réaliser des simulations et des améliorations dans la conception des capteurs efficaces et de réduire les problèmes rencontrés dans le contrôle non destructif.

La mise en évidence des différentes technologies des capteurs inductifs et des signaux qui sont indispensables au le CND par courant de Foucault est présenté au début de ce chapitre. Après ça on va définir l'équation qui régit notre système qui est l'équation de la magnétodynamique en régime quasi stationnaire pour une formulation en potentiel vecteur magnétique et le potentiel électrique scalaire $A^{\vec{}}-V$.

En suite la résolution de cette équation qui est une équation différentielle aux dérivées partielles se fait avec des méthodes numériques en l'occurrence la méthode des éléments finis.

II.2. Principe des capteurs inductifs :

Un capteur inductif se compose principalement d'un circuit magnétique ouvert très perméable où un ou plusieurs enroulements sont bobinés et parcourus par un courant alternatif. La répartition des lignes de champ est modifiée par l'approche d'une cible conductrice et/ou magnétique dans l'entrefer du circuit. Cela entraîne une variation de la réluctance et des pertes électromagnétiques dues à la pénétration du champ à l'intérieur de la cible. [6]

Lorsque la cible est purement conductrice, le champ incident crée des courants surfaciques appelés courants de Foucault. Ces courants induisent ensuite un champ magnétique opposé au champ exciteur. Dans cette situation, on évoque les "Capteurs à courants de Foucault" ou "CCF".

L'effet produit par l'approche d'une cible magnétique non conductrice se traduit par une modification des lignes de champ, qui se trouvent attirées par le matériau en regard. Le dispositif fonctionne alors en "Capteur Magnétique" ou "CM".

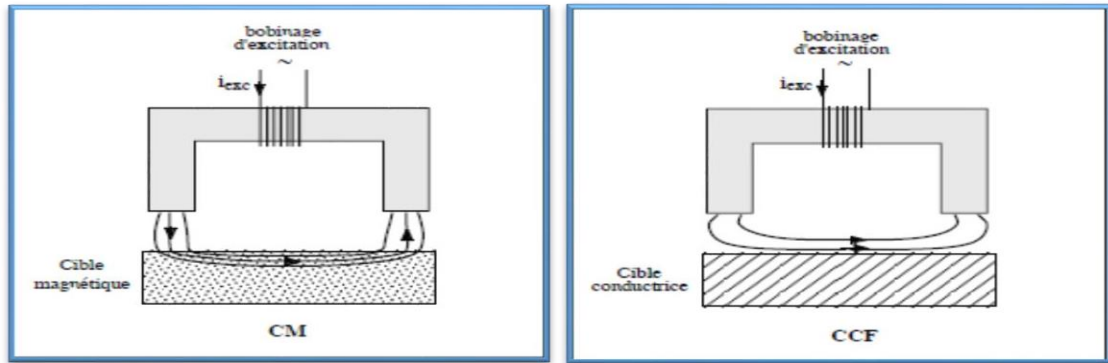


Figure II. 1 Capteur Magnétique ou CM.

II.3. Principes et caractéristiques de base des sondes à courants de Foucault :

Les principes des sondes à courants de Foucault sont relativement simples et consistent généralement en un ensemble de bobines disposées de manière appropriée. Pour créer une sonde spécifique adaptée à une application ou à une gamme d'applications spécifiques, des paramètres tels que la forme de la bobine, sa section transversale, sa taille et sa configuration doivent être pris en compte. Le champ magnétique alternatif est créé lorsque cette bobine est excitée par un courant alternatif de fréquence et d'amplitudes connues. Une tension induite est créée dans l'échantillon lorsque cette bobine est rapprochée d'un matériau de test conducteur.

Il existe deux méthodes pour détecter les changements dans les caractéristiques :

- La méthode d'impédance ou sondes à double fonction.
- La méthode "envoyer recevoir" ou sondes à fonction séparées.

II.3.1. Sondes à double fonction :

La méthode d'impédance surveille la bobine d'excitation. Il est possible d'utiliser cette méthode pour identifier tous les paramètres de matériau qui entraînent des changements d'impédance, car les changements de tension ou de courant de la bobine sont dus à des changements d'impédance dans la bobine. La somme de l'impédance de la bobine (dans l'air) et de l'impédance créée par les courants de Foucault dans le matériau de test constitue l'impédance résultante. La méthode d'impédance des tests par courants de Foucault consiste à observer la baisse de tension à travers une bobine de test. Les composants résistifs et inductifs composent l'impédance.

L'équation est utilisée pour calculer l'amplitude de l'impédance :

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Où Z , R , X_L est l'impédance, la résistance, la réactance inductive.[1]

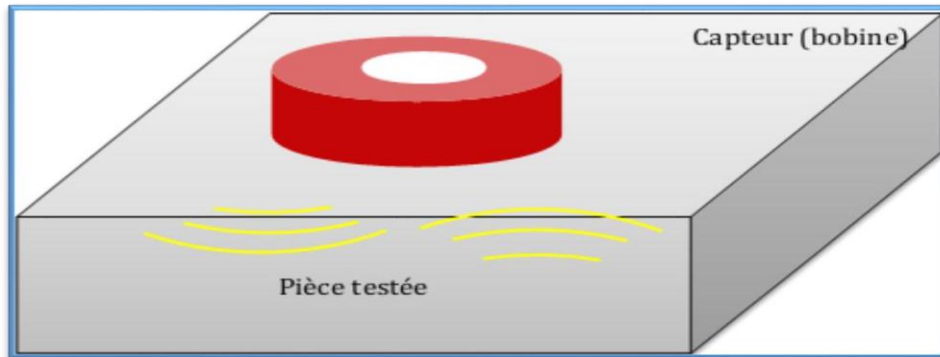


Figure II. 2 sonde à double fonction.

II.3.2. Sondes à fonction séparées

Cette technique nécessite une ou plusieurs bobines d'excitation distinctes et une bobine de réception. La tension induite aux bornes de la bobine de détection est mesurée dans ce cas. En observant l'impact de leurs champs électromagnétiques liés sur la tension induite dans une ou plusieurs bobines de réception indépendantes, le flux des courants de Foucault est surveillé.

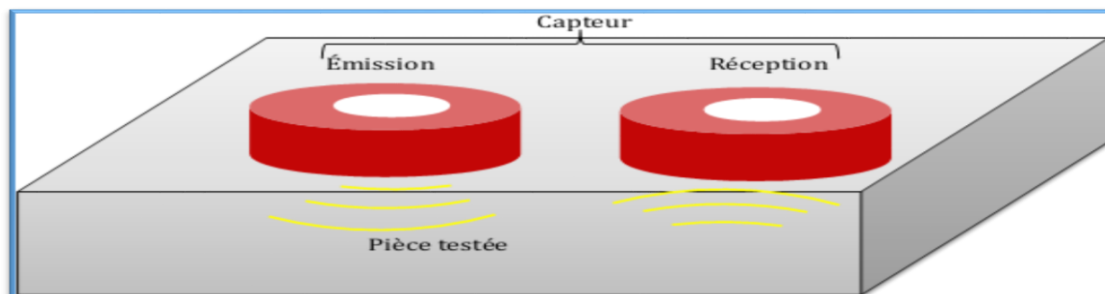


Figure II. 3 Sonde a fonction séparée.

II.4. Mesure absolue et différentielle :

II.4.1. Sondes absolues :

Les sondes à courants absolues de Foucault se composent d'une seule bobine ou de quelque chose de similaire. Un enroulement absolu est toujours considéré comme séparé en deux ou plusieurs parties.

Si c'est le cas. Ce type de sonde mesure directement l'impédance ou la tension induite dans la bobine plutôt que les changements d'impédance ou de tension induite.

II.4.2. Sondes différentielles :

Les sondes à courants différentiels de Foucault sont constituées d'une paire de bobines connectées en opposition, de sorte que lorsque les deux bobines subissent des conditions identiques, une impédance mesurée nette ou une tension induite est annulée. Les bobines ne peuvent détecter que les changements dans le matériau testé, donc des sondes à courants de Foucault différentiels sont utilisées pour répondre aux changements dans le matériau de test tout en éliminant le bruit et tout signal indésirable qui affecte les deux bobines.

II.5. Types de sonde :

Les sondes à courants de Foucault peuvent être utilisées de différentes manières. La situation de test détermine le type à choisir. Voici les trois types de sondes les plus couramment utilisés dans les tests de courants de Foucault.:

- Sonde interne (de type bobine).
- Sonde encerclant.
- Sonde surfacique.

II.5.1. Sonde interne:

Les sondes internes sont constituées de bobines circulaires qui sont utilisées pour examiner l'intérieur des tubes ou des trous circulaires. Un type de bobine qui peut être inséré dans un tube pour inspecter les discontinuités sur la circonférence interne du tube est illustré à la figure (II.4). La bobine interne, comme la bobine en cercle, induit des courants qui encerclent toute la circonférence du tube. Par conséquent, toute la section qui entoure la bobine est inspectée.

La bobine interne est plus sensible aux défauts sur ou à proximité de la surface interne du tube car les courants induits dans le matériau sont les plus forts près de la bobine.

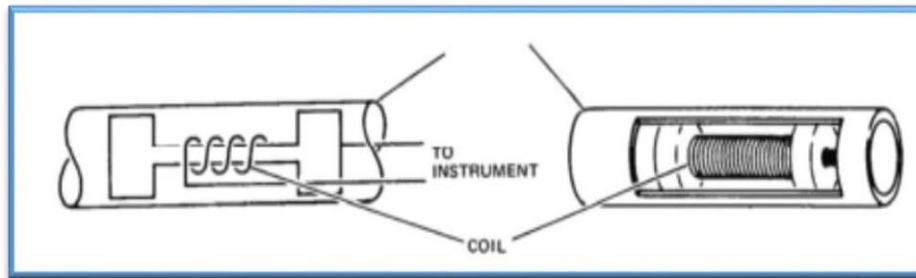


Figure II. 4 Sonde Interne.

II.5.2. Sondes encerclant :

Les sondes en cercle ont une structure similaire aux sondes internes, à l'exception du fait que le matériau de test passe à l'intérieur des bobines. Ils sont principalement utilisés pour inspecter la surface extérieure de matériaux ronds comme les tubes et les tiges. La figure (II.5) présente une bobine en cercle. Le champ magnétique induit des courants de Foucault dans la barre qui encerclent toute la circonférence du tube ou de la tige. Cela permet d'examiner à tout moment toute la section sous la bobine.

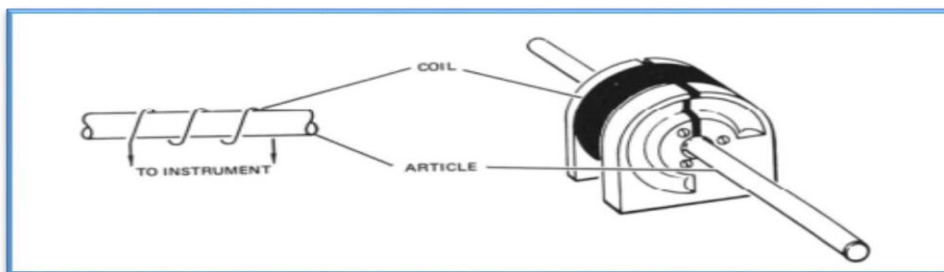


Figure II. 5 Sonde Encerclant.

II.5.3. Sondes surfacique :

L'une des sondes à courants de Foucault les plus courantes est la sonde de surface, qui est utilisée pour inspecter des surfaces plates ou profilées afin de détecter les défauts ou les propriétés des matériaux. Les défauts peuvent apparaître sur la surface ou sous la surface. Celles-ci sont également connues sous le nom de bobines de sonde. Une sonde de surface typique est illustrée dans la figure (2.6). La sonde de surface peut être montée dans un équipement de balayage automatisé ou être transportée. Pour servir de surface d'usure, la bobine montée à l'extrémité de la sonde est recouverte d'un revêtement protecteur en époxy. La taille d'une bobine détermine le champ

magnétique qu'elle produit. La sonde plate, la sonde "en fer à cheval", la sonde pancake et la sonde plate sont d'autres variantes de conception de sonde de surface.

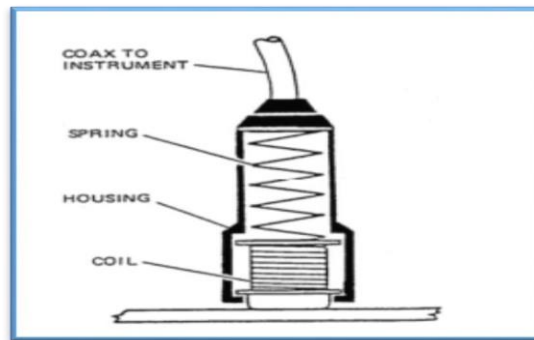


Figure II. 6 Sonde Surfaique.

II.6. Modes d'excitation :

L'une des rares variables contrôlées par l'opérateur dans les tests par courants de Foucault est la fréquence, qui détermine les modes d'excitation. La variation de fréquence est principalement utilisée pour contrôler la profondeur de pénétration, la densité et la phase des courants induits par Foucault. [1][7]

Les fréquences plus élevées sont généralement utilisées pour détecter les discontinuités de rupture de surface, tandis que les fréquences plus basses sont utilisées pour les tests sous la surface. Il existe trois niveaux d'excitation différents. :

- Excitation mono-fréquence.
- Excitation multi-fréquences.
- Excitation pulsée.

II.6.1. Contrôle mono-fréquence :

Une excitation sinusoïdale à fréquence fixe crée les courants de Foucault. La fréquence choisie dépend principalement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés. Néanmoins, elle devra se situer dans une gamme acceptable.

L'amplitude des courants de Foucault sera faible à une fréquence trop basse et la précision de mesure sera insuffisante en raison des bruits. [7]

Les phénomènes parasites capacitifs provoqués par une fréquence excessive peuvent être causés par les capacités inter-spires de la sonde.

Cependant, cette méthode simple et parfois suffisante a des limites car elle est difficile d'éliminer l'influence de toutes les grandeurs perturbatrices. [7]

II.6.2. Contrôle multi-fréquences :

Les courants multifréquences de Foucault utilisent simultanément des signaux de courant d'excitation à plusieurs fréquences.

Les courants de Foucault multifréquence peuvent d'une part obtenir des informations sur les défauts à plusieurs profondeurs et d'autre part améliorer la précision de la détection des tests de courants de Foucault en raison des différentes profondeurs de pénétration des signaux d'excitation à différentes fréquences dans le conducteur. L'analyse améliore considérablement la capacité de détection de la technologie de test par courants de Foucault en contribuant à l'élimination des facteurs d'interférence. Cependant, il est parfois difficile d'obtenir une mesure précise des défauts car les courants de Foucault multifréquences ne peuvent fournir que des informations de détection limitées. [8]

II.6.3. Contrôle par courants de Foucault pulsés :

Pour surmonter la faiblesse des données des signaux de courants de Foucault multifréquences, les tests de courants de Foucault pulsés ont été créés. Dans les tests de courants pulsés de Foucault, le signal d'excitation est sous la forme d'une impulsion, généralement une onde carrée avec un certain cycle de service, et le signal de réponse contient des composants de fréquence riches. Par conséquent, des informations de défaut plus profondes peuvent être trouvées dans l'échantillon conducteur. Les caractéristiques principales des tests de courants pulsés de Foucault sont les suivantes :

- Pas besoin de modifier les paramètres.
- Un balayage peut obtenir des informations de fréquence riches.
- Une grande quantité d'énergie peut être appliquée à la sonde d'excitation pour réaliser la détection de défauts profonds.
- Le coût des instruments est faible par rapport aux courants de Foucault multifréquences.

II.7. Plan d'impédance normalisée :

Les variations d'impédance de la bobine sont mesurées lors de l'inspection des matériaux. La méthode comparative est généralement utilisée pour déterminer la différence entre l'impédance Z de la bobine en présence de la pièce à examiner et l'impédance Z_0 de la bobine dans l'air. L'impédance Z_0 du capteur est : [9]

$$\overline{Z}_0 = R_0 + jX_0 \tag{II.1}$$

R_0 Et X_0 sont respectivement la résistance et la réactance à vide de la bobine du capteur.

En présence du matériau à contrôler, le champ réactif provoque une modification de l'impédance du capteur. L'impédance complexe en charge \overline{Z} est :

$$\overline{Z} = R + jX \tag{II.2}$$

R est la composante résistive qui englobe les pertes internes du bobinage d'excitation et les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans le matériau.

X est la composante inductive qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le capteur. [9].

Pour éliminer les composantes de l'impédance à vide R_0 et X_0 (pertes à vide, l'inductance propre du capteur) et garder uniquement la géométrie du capteur, sa position relative au matériau (lift-off) et les caractéristiques géométriques et physiques du matériau, on procède à la normalisation de l'impédance complexe du capteur en présence du matériau. Cette normalisation est donnée par :

$$Z = \sqrt{R + jx}$$

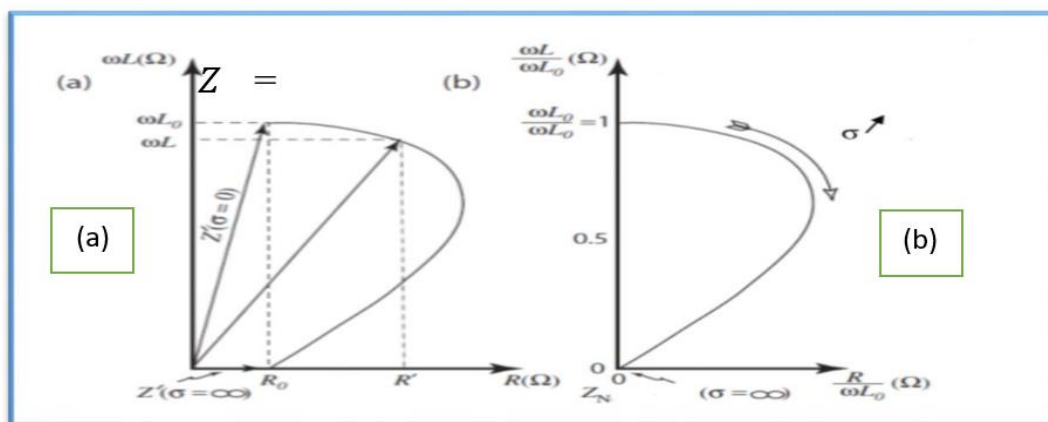


Figure II. 7 Plan d'impédance (a) Non-normalisé ; (b) Plan d'impédance normalisé.

II.8. Intérêt de la modélisation :

La CND par courants de Foucault est une technique courante d'inspection des matériaux électriquement conducteurs. Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier les interactions sonde-pièce et jouent un rôle croissant dans la conception et la démonstration des systèmes de contrôle.

La modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction sonde-pièce testée et de définir une structure de sonde adaptée à un problème spécifique. Il est possible de prévoir les effets de diverses options (comme la configuration géométrique, les matériaux...) sans avoir à créer de nombreux prototypes. La modélisation numérique dans le domaine du CND par courants de Foucault est devenue un acteur important dans la conception de sondes grâce aux performances du matériel informatique.

II.8.1. Modélisation mathématique du système :

Tous les phénomènes d'électromagnétisme variables dans le temps et dans l'espace dans nos études des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell suivantes. [10]

$$\checkmark \text{ Loi d'induction de Faraday } \vec{\text{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

$$\checkmark \text{ Loi d'Ampère } \text{rot}(\vec{t}) = \vec{j} + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

$$\checkmark \text{ Loi de Gauss } \text{div}(\vec{D}) = p \quad \rightarrow \quad (\text{II.5})$$

$$\checkmark \text{ Loi de Gauss pour le magnétisme } \quad \text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II.6})$$

Où :

- ✓ \vec{E} [V/m] : Champs électrique
- ✓ \vec{H} [A/m] champs magnétique respectivement.
- ✓ \vec{D} [A.s/m] : induction électrique.
- ✓ \vec{B} [T] : induction magnétique respectivement.
- ✓ \vec{J} [A/m²] : Densité de courant.
- ✓ ρ [A/m³] : et la densité de la charge volumique.

Où : $\vec{J} = \vec{J}_{ind} + \vec{J}_{exc}$

- ✓ \vec{J}_{ind} : Densité de courant induit

- ✓ J_{exc} : Densité de courant de l'excitation

Ces équations sont liées entre eux par les lois constitutives qui traduisent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considéré. [10]

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad , \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad (II.7)$$

- ✓ μ [H/m] : perméabilité magnétique.
- ✓ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] perméabilité magnétique du vide.
- ✓ μ_r Perméabilité magnétique relative du milieu.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad , \quad \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

- ✓ ϵ [F/m] : permittivité électrique.
- ✓ $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ [F/m] permittivité électrique du vide.
- ✓ ϵ_r Permittivité électrique relative du milieu.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (II.8)$$

- ✓ Ou σ [$S \cdot m^{-1}$] Conductivité électrique

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 :

Dans un milieu conducteur σ est de l'ordre de $10^6 S \cdot m^{-1}$, et ϵ_0 de l'ordre de $8.85 \times 10^{-12} F/m$ jusqu'à des fréquences qui avoisinent les Mégahertz nous avons $\omega \cdot \epsilon_0 \ll \sigma$ ce qui nous permet d'avoir : $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$

La densité volumique de charge est considérée comme nulle $\rho = 0$ les paramètres ϵ Sont considérés comme linéaires, donc ils ne dépendent pas de la solution du système. [10]

Le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale. Toutes ces hypothèses considérées, le système d'équation devient. [10]

$$\bullet \quad \overline{rot}(\vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II.9)$$

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

$$\bullet \quad \overline{rot}(\vec{H}) = \vec{j} \quad (II.11)$$

$$\bullet \quad \text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (II.12)$$

II.8.1.A. Formulation en potentiel vecteur A-V :

La résolution des équations de Maxwell est disponible dans deux variétés. L'une utilise le calcul du champ électrique et l'autre le champ magnétique. [11]

Cependant, la résolution directe des équations de Maxwell est difficile en raison des fortes discontinuités de certaines variables aux interfaces entre deux régions de propriété distinctes. Ces équations sont transformées en équations de potentiels pour faciliter la résolution. Cela conduit à la définition des formulations duales en potentiels combinés. La formulation en A–V est la plus répandue.

Le potentiel vecteur magnétique A, qui s'applique à tous les domaines, y compris les régions conductrices et non conductrices, est utilisé dans cette formulation, tandis que le potentiel scalaire électrique V est utilisé uniquement dans les régions conductrices. [9]

II.8.1.B. Relations de continuité et Conditions aux interfaces :

Lorsqu'une bobine à courants de Foucault est approchée d'une surface métallique, le champ électromagnétique produit par la bobine entre dans le conducteur et existe simultanément dans plusieurs matériaux (air et métal). La surface du conducteur sert d'interface ou de frontière entre deux milieux différents, où le champ électromagnétique est soumis à des conditions spécifiques. Ces conditions sont appelées conditions d'interface ou de limite. Nous devons connaître les conditions d'interface auxquelles les champs électromagnétiques doivent obéir afin de résoudre les équations gouvernantes et d'obtenir une description mathématique du champ électromagnétique dans une région de l'espace occupée par plus d'un milieu.

Lorsque l'inconnue recherchée aux nœuds est le potentiel vecteur magnétique $A^{\vec{}}$, la méthode des éléments finis impose la continuité à l'interface de deux milieux de natures différents. Si \vec{A}_1 et \vec{A}_2 sont respectivement les potentiels du milieu 1 et 2 à l'interface donc : $\vec{A}_1 = \vec{A}_2$

La continuité du potentiel assure la continuité de la composante normale de l'induction magnétique à l'interface. Compte tenu des équations de passage qu'on rappelle ci-après. [10]

$$\checkmark \quad \vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (\text{II.13})$$

$$\checkmark \quad \vec{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \quad (\text{II.14})$$

$$\checkmark \quad \vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s \quad (\text{II.15})$$

$$\checkmark \quad \vec{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K} \quad (\text{II.16})$$

Où :

\vec{n} : Le vecteur normal à la surface

\vec{K} : représente le composant de la densité de courant perpendiculaire à l'axe de plan

La forme de la loi de Gauss telle qu'écrite en (II.6) invite à la définition du potentiel vecteur magnétique A tel que

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II.7})$$

Pour assurer l'unicité de la solution on va imposer une condition de jauge ou condition de coulomb de telle sorte que :

$$\text{div}(\vec{A}) = 0$$

$$\text{En remplaçant (II.18) dans (II.14), on obtient : } \text{rot}(\vec{A}) = -\text{rot}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad (\text{II.18})$$

$$\text{L'opérateur vectoriel rotationnel étant associatif on aura } \text{rot}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad (\text{II.19})$$

On remarque que la quantité est $E + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ conservée donc c'est une dérivée d'un potentiel V alors :

$$E + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\text{grad}(v) \quad (\text{II.20})$$

On Remplace (II.21) dans la loi d'Ohm (II.13)

$$\vec{j} = \sigma \cdot \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \text{ grad}(v)\right) \quad (\text{II.21})$$

Cela nous permet de définir les deux densités de courant mentionnées précédemment :

$$\vec{J}_{ind} = -\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.22})$$

$$\vec{J}_{exc} = -\sigma \cdot \text{grad}(V) \quad (\text{II.23})$$

En remplaçant (II.6) dans (II.13) on obtient :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II.24})$$

En remplaçant (II.18) dans (II.19), et on tenant compte que l'excitation est sinusoïdale

$$\frac{\partial}{\partial t} = j\omega \text{ dont la forme est : } \text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A})\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = \vec{j}_s \quad (\text{II.25})$$

Où : ω : La pulsation électrique de l'excitation

- $j^2 = -1$: Nombre complexe.
- $\vec{J}_s = -\sigma \cdot \text{grad}(V)$

L'équation (II.20) représente l'équation de la magnétodynamique transitoire en termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A} avec un terme source.

Dans la plupart des problèmes de modélisation, les phénomènes électromagnétiques dans le domaine du contrôle non destructif réalisés jusqu'à présent, considèrent une bobine inductrice ou le courant est imposé, une région ferromagnétique ou conductrice qui représente la cible à contrôler et la troisième région qui représentera l'air environnant, [2] [3]

L'adaptation de l'équation (II.20) aux différentes régions constituera le dispositif d'étude et nous permet d'écrire :

:

Dans l'air : La région qui entoure le domaine d'étude est caractérisée par l'absence de source ainsi qu'une conductivité électrique nulle, l'équation qui lui sera associée s'écrit :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot}(\vec{A})\right) = 0 \tag{II.26}$$

Dans l'inducteur : Les inducteurs sont des fils fins de cuivre, l'équation (II.20) pourra alors s'écrire sur la forme suivante:

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A})\right) = \vec{J}_s \tag{II.28}$$

La pièce à contrôler est obligatoirement conductrice, l'équation électromagnétique dans cette région s'écrit alors $\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A})\right) = \vec{J}_c$ et $\text{div}(\text{grad}\vec{A}) = -\mu\vec{J}_c$ (II.29)

La pièce à contrôler est nécessairement conductrice, l'équation magnétodynamique dans ce domaine s'écrit alors : La figure (2.8) montre une configuration typique d'un CND par courants de Foucault qui illustre l'équation du vecteur potentiel dans des différentes régions dans le domaine d'étude.

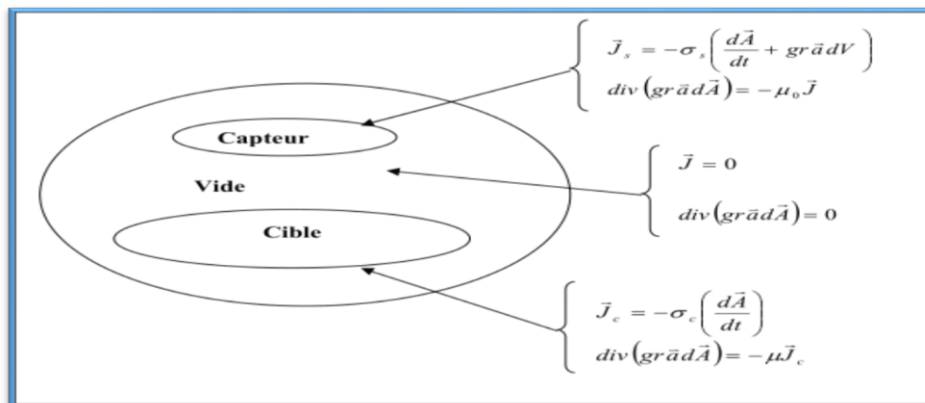


Figure II. 8 Equation de magnétodynamique dans des différentes régions.

II.8.1.B. Conditions aux limites :

Condition de Dirichlet ou condition du premier problème aux limites : on cherche une solution de l'équation qui prend des valeurs données sur le bord du domaine, on cherche donc à résoudre le système d'équation. [10]

On cherche une solution de l'équation qui prend des valeurs données sur le bord du domaine, on cherche donc à résoudre le système d'équation :

$$\Delta A = f, \quad x \in \Omega \quad (\text{II.30.a})$$

$$A = A_0, \quad x \in \partial\Omega \quad (\text{II.30.b})$$

Condition de Neumann : on cherche la solution de l'équation différentielle dont on connaît la valeur du gradient sur le bord du domaine de résolution, notant que n la normal unitaire dirigée vers l'extérieur de Ω , on cherche donc à résoudre le problème. [10]

$$\Delta A = f, \quad x \in \Omega$$

Condition de mixte (ou condition de Dirichlet Neumann) : on cherche une solution qui vérifie la troisième condition de bord qui est : $\Delta A = f \quad x \in \Omega$

$$\frac{\partial A}{\partial n} = c, \quad x \in \partial\Omega \quad (\text{II.30.c})$$

$$a \cdot A + b \cdot \frac{\partial A}{\partial n} = c, \quad x \in \partial\Omega \quad (\text{II.30.d})$$

Où : a , b et c sont des constantes et A est l'inconnu du problème et :

- Δ : est l'opérateur Laplacien
- f : est un terme source
- Ω : est le domaine d'étude
- $\partial\Omega$: est le bord de domaine d'étude.

II.9. Méthode des éléments finis :

L'équation qui régit notre système étant formulée, pour résoudre cette équation. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées, d'une manière tout à fait générale, on peut classer les méthodes de résolution des équations différentielles aux dérivées partielles, en deux grandes catégories, Les méthodes numériques et les méthodes analytiques.

Dans les méthodes de résolution des équations EDP numériques les plus utilisées sont : la méthode des différences finies qui consiste en l'approximation de l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences, ou chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de

l'inconnue à déterminer en un certain nombre de points du domaine de résolution.

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 est soit une formulation variationnelle ou une formulation résidus pondéré. Dans ce qui suit nous utiliserons la méthode des éléments finis pour la résolution de l'équation magnétodynamique. [10]

II.9.1. 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 Hamiltonienne qui stipule l'existence d'un fonctionnel type intégral défini par :

$$(A) = \int_{\Omega} f d\Omega \quad (\text{II.31})$$

- f : est la fonction de la grange résultant de la co-énergie du système de type cinétique et de son énergie potentielle.
- Ω : est le domaine d'étude.

La résolution du problème variationnelle défini par la fonction d'énergie $F(A)$ revient à minimiser cette fonctionnelle. [10]

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

$$\frac{\partial F}{\partial A_n} = 0$$

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

II.9.2. Principe de Formulation résidus pondérés :

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

$$R_i = (A) - f \quad (\text{II.32})$$

- R_i : est le résidu de l'approximation.
- $L(A)$: opérateur différentiel.
- f : fonction définie sur le domaine d'étude Ω
- A : l'inconnue à chercher.

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

$$\int_{\Omega} R_i \Phi_i \cdot \partial \Omega \quad (\text{II.33})$$

- Φ_i : Fonction de pondération ou de projection.

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

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 : La méthode de collocation par points, ou les fonctions 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.

- 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.
- La méthode de Galerkin 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. [10]

II.9.3. Organigramme de résolution des EDP's par la méthode des éléments finis :

Pour résoudre l'équation magnétodynamique on accomplira plusieurs étapes pour définir la solution du problème, ces étapes peuvent se résumer sous la forme de l'organigramme suivant, Figure(II.10).

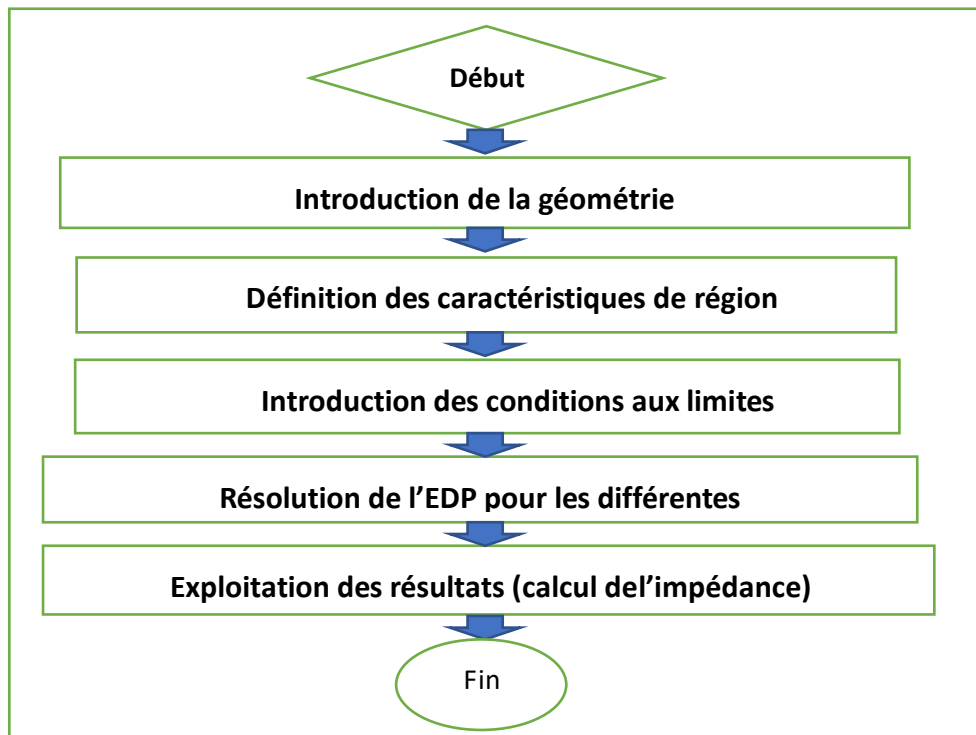


Figure II. 9 Organigramme de calcul par élément finis..

II.10. Conclusion :

Ce chapitre présente les différentes technologies des capteurs inductifs, les différents types de sondes et leur montage différentiel, absolu, à double fonction ou à fonction séparée, plate ou interne.

On a également présenté les principaux types d'excitation monofréquence et multifréquence, également appelée excitation pulsée. Ensuite, pour mieux comprendre la relation entre le signal d'impédance et la détection des défauts, on a présenté une formulation qui utilise le potentiel vecteur magnétique et le potentiel scalaire électrique A-V pour générer l'équation magnétodynamique en régime quasi stationnaire qui gouverne notre système.

Pour résoudre ces types des équations qui sont des équations à dérivées partielles on a recours à des méthodes de solution numérique notamment la méthode des éléments finis FEM qui est la méthode que nous utiliserons.

Le logiciel COMSOL Multiphysics est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire et un outil logiciel de simulation en ingénierie qui facilite le processus de modéliser à tous les niveaux - définition de la géométrie, maillage, spécification de la physique, optimisation, et visualisation des résultats c'est à dire de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel. C'est pour ces particularités qu'on a décidé d'utiliser ce logiciel comme outil de simulation pour le contrôle non destructif par capteurs à courants de Foucault avec bobine tangentielle pour le chapitre suivant.

Les sondes à courants de Foucault (Eddy Current Testing) ont toujours représenté la solution idéale. Cependant, les progrès récents dans la conception des bobines tangentielle (Tangential Eddy Current TEC) offre une solution adéquate à la détection de défauts dans les zones dont la surface n'est uniforme. Cette nouvelle topologie de bobine est appelé TEC, si elle combiné avec les progrès récents de la technologie multiéléments (Tangential Eddy Current Array TECA) elle offre un contrôle rapide et avec précisions. Une étude et simulation, sous COMSOL Multiphysics, de l'utilisation de cette nouvelle approche TEC et TECA) sera proposée dans le troisième chapitre.

CHAPITRE III :

RÉSULTATS DE SIMULATION

POUR UN CONTRÔLE CF

PAR BOBINE TANGENTIELLE

Chapitre III. Résultats de simulation pour un Contrôle par bobine tangentielle :

III.1. Introduction :

Le Contrôle par courants de Foucault présente l'avantage d'une méthode de test sans contact et rapide par rapport aux autres méthodes de test non destructif. Cependant, l'un des inconvénients des tests par courants de Foucault est qu'ils ont tendance à générer un bruit important engendré par des variations de nombreux facteurs tels que les variations du lift-off de la sonde et les caractéristiques électromagnétiques du matériau à tester. En conséquence, lorsque le contrôle par courants de Foucault conventionnel à l'aide d'une sonde plate est appliqué à l'inspection de maintenance de la zone de soudure, il est difficile de détecter des défauts dans la zone de soudure en raison du bruit généré par le changement de forme et le changement de caractéristique électromagnétique de la zone de soudure.

La sonde à courants de Foucault tangentielle ou à champs uniforme peut détecter à la fois des défauts parallèles et des défauts perpendiculaires à la ligne de soudure avec beaucoup moins de bruit que la sonde à courant de Foucault conventionnelle.

Dans cette partie, en utilisant la modélisation par éléments finis (MEF) sous COMSOL Multiphysics, nous présenterons les résultats de simulation dans un espace tridimensionnel (3D) pour un contrôle avec bobine tangentielle en mode absolu pour les deux topologies TEC et TECA et on terminera par les résultats de l'imagerie du CND-CF par bobine tangentielle.

III.2. Bobine plate et tangentielle

Les sondes à courants de Foucault traditionnelles ont leur bobine parallèle à la surface étudiée. Les bobines de petit diamètre atteignent une sensibilité élevée, mais une faible profondeur de pénétration, tandis que les grandes les bobines de diamètre ont une bonne profondeur de pénétration, mais ont une résolution faible et présentent également un problème d'utilisation et de conditionnement en raison de leur grande surface. Une autre caractéristique des bobines plates et leurs sensibilités aux variations du lift-off.

Pour minimiser l'effet du lift-off, on a recours à l'utilisation des bobine tangentielle dont les axes sont parallèles à la surface à contrôler.

La distribution des courants de Foucault est déterminée par l'orientation de la bobine par rapport au matériau à tester.

La figure (III.1) montre la distribution des courants de Foucault induits par une bobine cylindrique (plate).

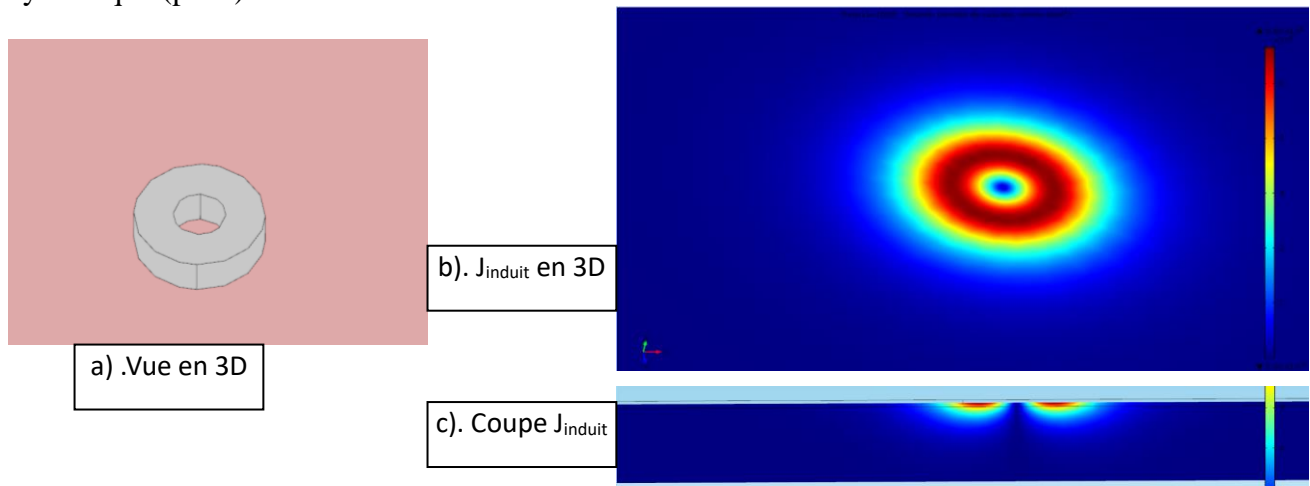


Figure III. 1 Bobine circulaire (plate).

Les lignes des courants de induits sont circulaires et parallèles aux spires de la bobine et perpendiculaires à la l'axe du champ de flux de la bobine. Dans la région centrale de la plaque conductrice, ce qui correspond au centre des courants de Foucault, on constate que la densité des courants induit décroît rapidement jusqu'à zéro. par contre elle est maximale dans la région qui se trouve directement en dessous de la bobine. Ainsi, il est claire que le défaut, qui est supérieure ou égale au diamètre d'une bobine cylindrique, peut être détectable .

Comme le montre la Figure (III.2), les courants de Foucault, produits par un bobine tangentielle, forment un flux uniforme sous la bobine et ont tendance à former un motif circulaire de chaque côté de la bobine.

Dans la région rectangulaire centrale du conducteur, la densité des courants de Foucault est approximativement uniforme et maximale. Ainsi, il est très avantageux d'utiliser une bobine tangentielle pour la détection de petits défauts. De plus, cette bobine tangentielle est moins sensible aux lift-off, elle sera plus utile pour le contrôle des soudures.

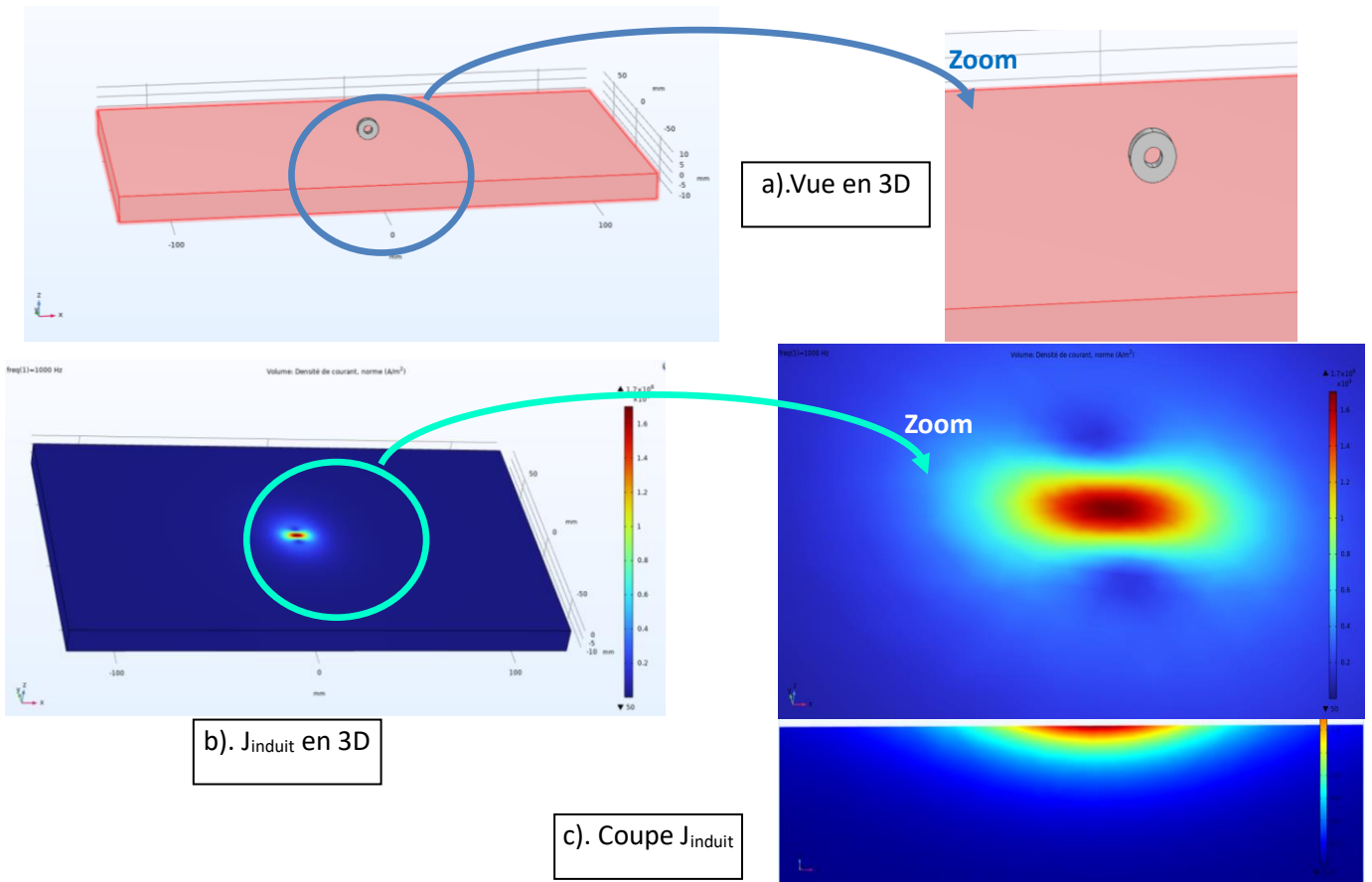


Figure III. 2 Bobine tangentielle

III.3. Résultats de simulation avec une bobine tangentielle TEC :

III.3.1. Modèle développé :

III.3.1.1. Domaine d'étude :

Ce modèle est constitué d'une plaque en aluminium munie d'un défaut surfacique, une bobine tangentielle en cuivre formant la source du champ et le tout entouré par un domaine d'air.

- L'air
- La plaque
- La bobine tangentielle.

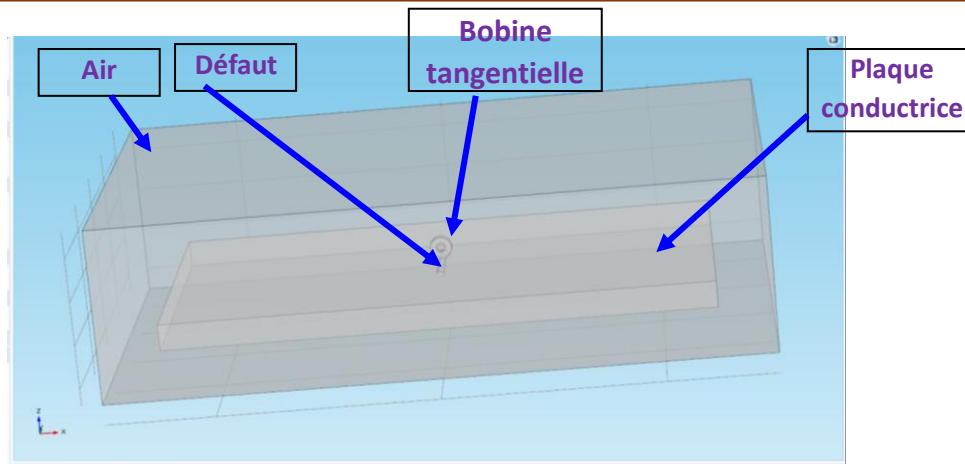


Figure III. 3 Vue 3D du système à étudier.

III.3.1.2. Caractéristiques géométriques du modèle :

Les caractéristiques géométriques et physiques du modèle proposé sont données par le tableau ci-dessous.

Tableau III-1 Caractéristique de dispositif

	Le capteur	La plaque	Le défaut
Caractéristique Physique	Courant d'excitation : 0.8 A Fréquence d'alimentation : 1000Hz Nombre de spire : 100 Spires Perméabilité relative : 1	Type de matériau : Aluminium de : Perméabilité relative : 1 Conductivité électrique : $3.774 \times 10^7 \text{ S/m}$	
Caractéristique Géométrique	Rayon interne : 2.0 mm Rayon externe : 4.0 mm Hauteur : 0.002m	Longueur : 0.5m Largeur : 150 mm Hauteur : 12 E-3m	Longueur : 0.02m Largeur : 0.04 m Hauteur : 7.5E-4 m

III.3.1.3. Maillage :

La première tâche à accomplir lors de la réalisation d'une simulation numérique consiste à définir le domaine de calcul avec l'ensemble des éléments qui le compose (caractéristiques géométriques et physiques), 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.

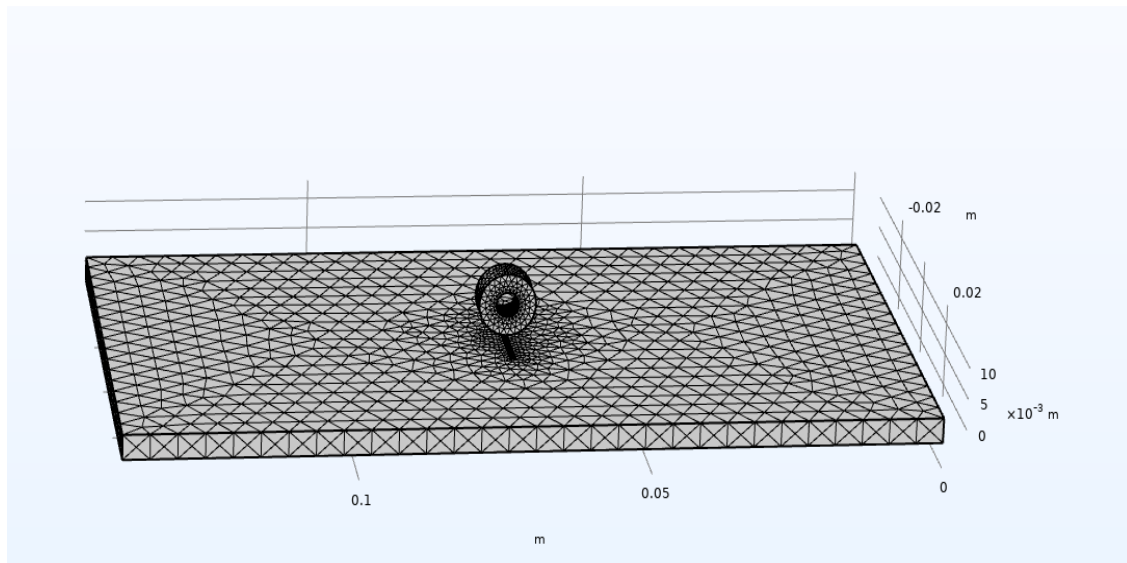


Figure III. 4 Maillage du dispositif en 3D.

III.3.2. Effet des paramètres géométriques et électriques sur les signaux de détection des défauts :

Dans cette partie, nous proposerons l'étude de l'effet des paramètres géométriques du défaut et de la variation de la fréquence sur la variation de l'impédance en fonction de la position de la sonde.

III.3.2.1. Effet des paramètres du défaut sur les variations d'impédance :

Après avoir implanté le modèle décrit précédemment sous COMSOL-multiphysics, nous procédons à l'étude de l'effet de la variation des paramètres d'un défaut parallélépipède sur la réponse du capteur.

III.2.2.1.a. Effet de la largeur du défaut sur les variations d'impédances :

En étudiant l'effet de la largeur de défaut sur la variation de l'impédance capteur-pièce, nous fixons la longueur de défaut à 40 mm et la profondeur à 2mm et on a 3 défauts qui sont espacés de 40 mm. Figure (III.5).

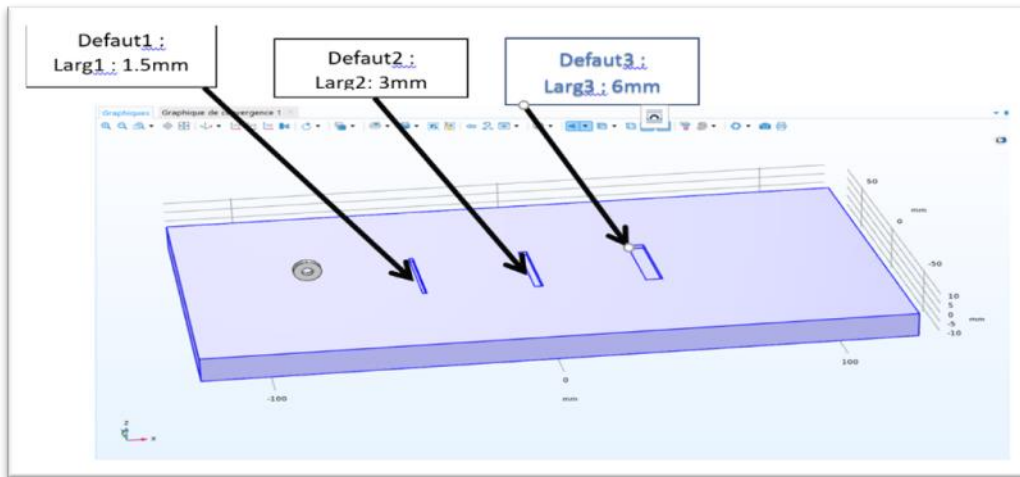


Figure III. 5 Vue de la position des 3 défaut de largeurs différentes.

Les figures (III.6 et III.7) montrent respectivement la variation de l'impédance imaginaire et réelle du capteur.

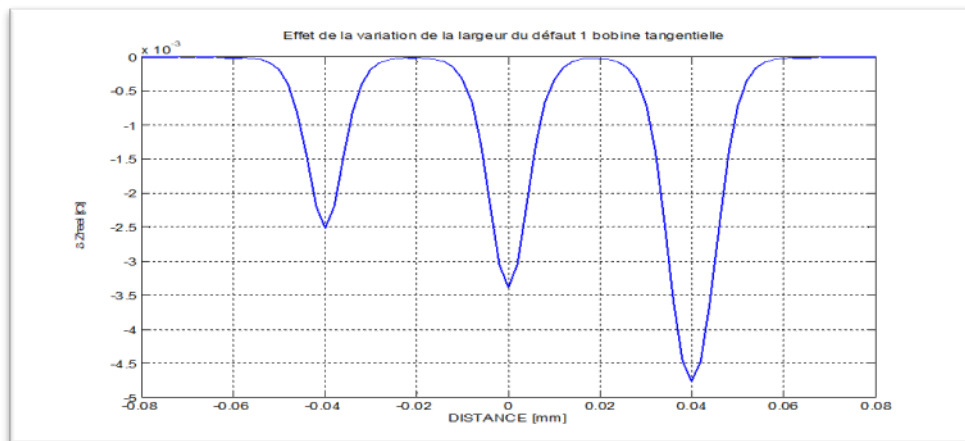


Figure III. 6 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.

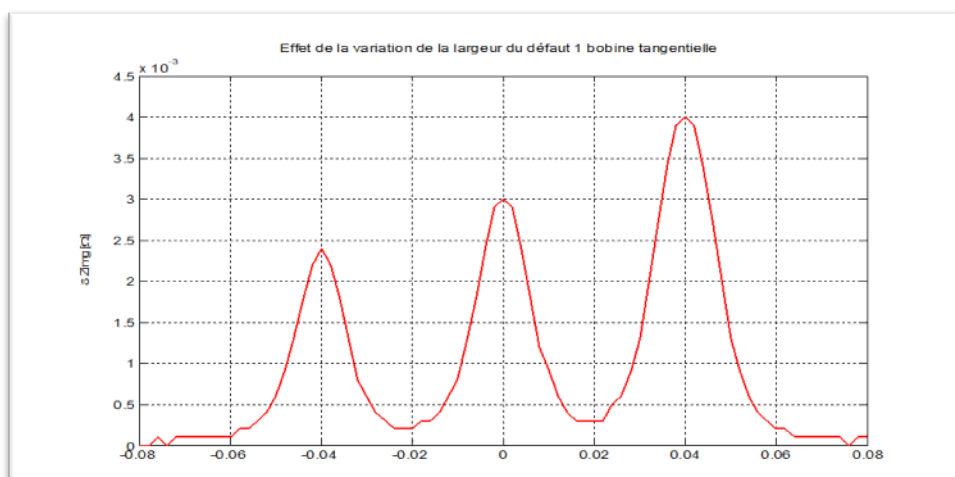
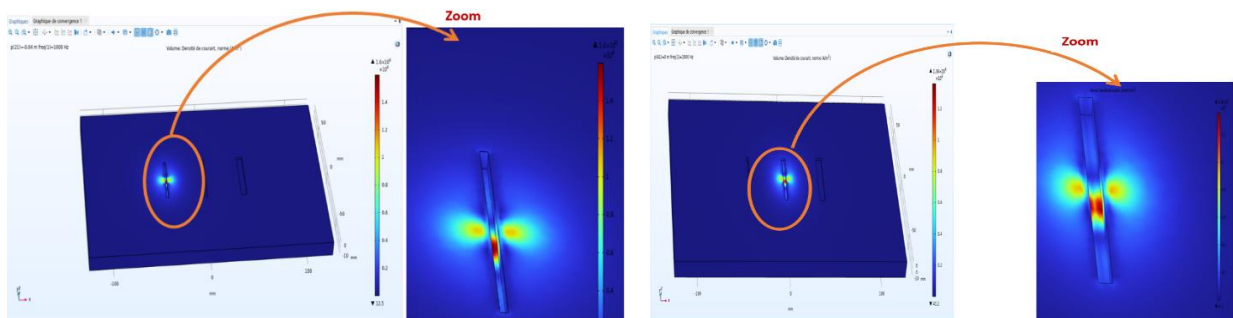


Figure III. 7 Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.

D'après les figures (III.6et III.7) on peut constater d'une part l'amplitude des signaux obtenus commence à au augmenter au voisinage des défauts et atteint son maximum au centre de ces derniers, et elle est nulle pour le reste de la zone contrôlée (où il n'y a pas de défaut). Et d'autre part cette variation est proportionnelle à l'augmentation de la largeur du défaut.

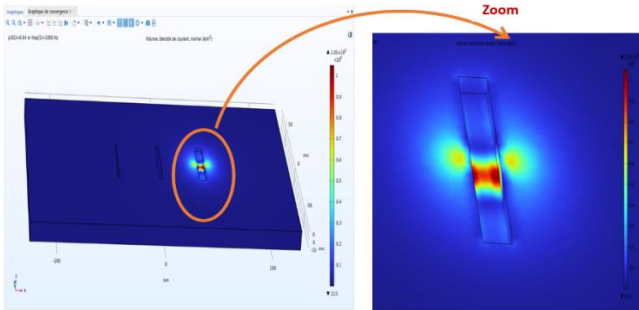
a. Courants induits :

Afin de vérifier le modèle de simulation, nous devons d'abord comparer les résultats obtenus à partir des courants induits dans la plaque d'aluminium à différentes positions du capteur, comme le montrent les figures suivantes :

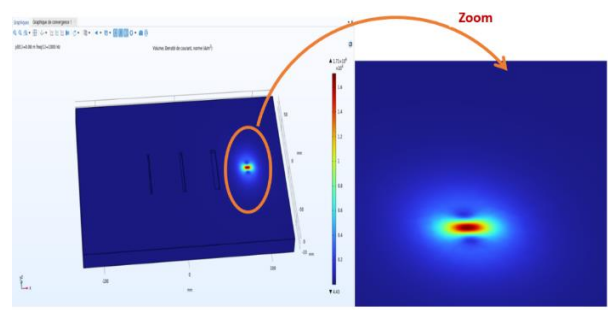


A). Position du capteur sur défaut 1

B). Position du capteur sur défaut 2



C). Position du capteur sur défaut 3



D). Position du capteur hors la zone des défauts.

Figure III. 8 Variation des courants induits en fonction de la position de la bobine.

D'après les résultats de la figure (III. 8), on peut constater que le maximum des courants induits diminue lors de la présence du défaut, il passe de $J_{ind}=1,71.10^6$ A/m² sans défaut à $J_{ind1}=1,6.10^6$ A/m² pour le défaut1 dont la largeur est de 1.5mm à la, et il est de $J_{ind2}=1,36.10^6$ A/m² pour la position 2, c'est dire pour le défaut2 plus large (3mm), et enfin il est de $J_{ind3}=1,05.10^6$ A/m² pour le défaut 3 le plus large (6mm). Ces résultats sont justifiés par l'existence du défaut qui provoque l'augmentation de la trajectoire d'où diminution de l'intensité de ces derniers.

III.4.2.1.b Effet de la longueur du défaut sur les variations d'impédances :

Pour étudier l'effet de la longueur de défaut différente impédance de la pièce de capteur, nous installons la largeur de défaut à 4mm et profondeur 3mm et nous avons 3 défauts distancés à 40mm.

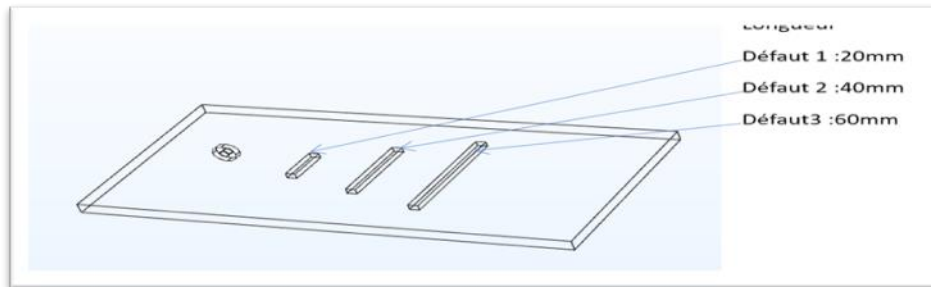


Figure III. 9 Vue de la position des 3 défauts de longueurs différentes.

Les figures (III.10 et III.11) montrent respectivement la variation de l'impédance imaginaire et réelle du capteur.

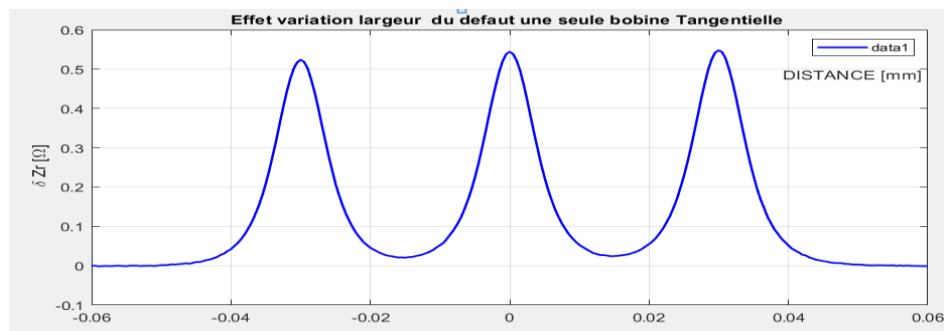


Figure III. 10 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.

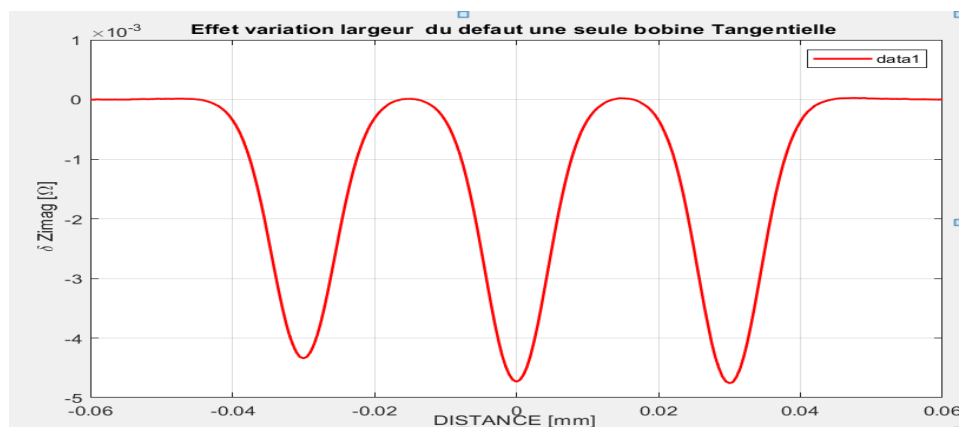


Figure III. 11 Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.

D'après les figures (III.10 et III.11), on constate que pratiquement il n'y a pas de variation, ce qui est normale car pour visualiser l'effet de la longueur il faut utiliser un balayage surfacique et non linéaire.

III.4.2.3.c. Effet de la profondeur du défaut sur les variations d'impédances :

Pour étudier l'effet de la profondeur de défaut différente impédance de la pièce de capteur, nous fixons la largeur de défaut à 3mm et longueur 40mm et nous prosons 3 défauts distancés à 40mm.

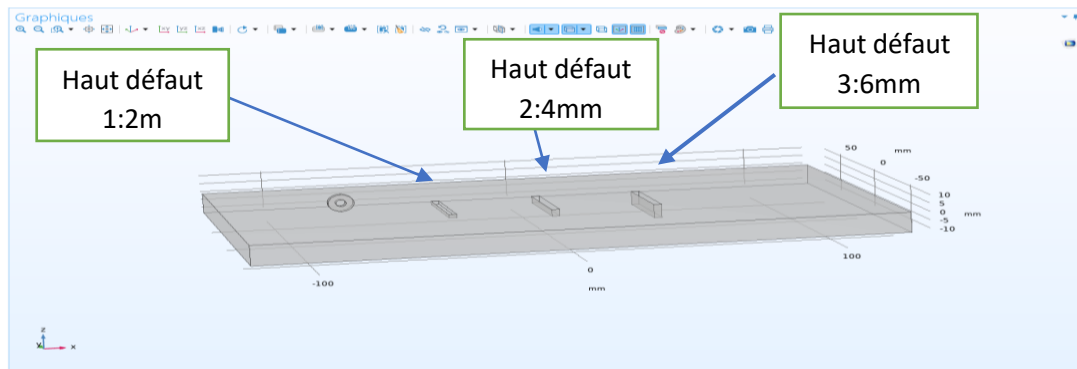


Figure III. 12 Vue de la position des 3 défauts de profondeurs différentes.

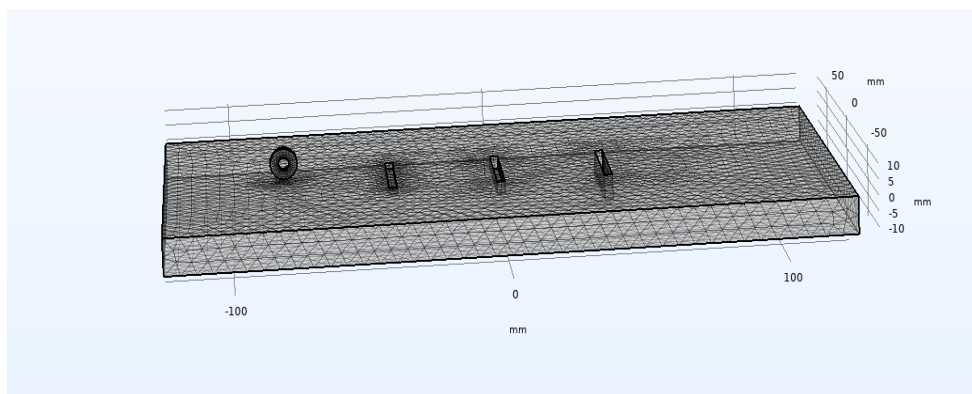


Figure III. 13 Maillage du dispositif en 3D.

La variation de l'impédance imaginaire et réelle du capteur est illustrée par les figures (III.14 et III.15).

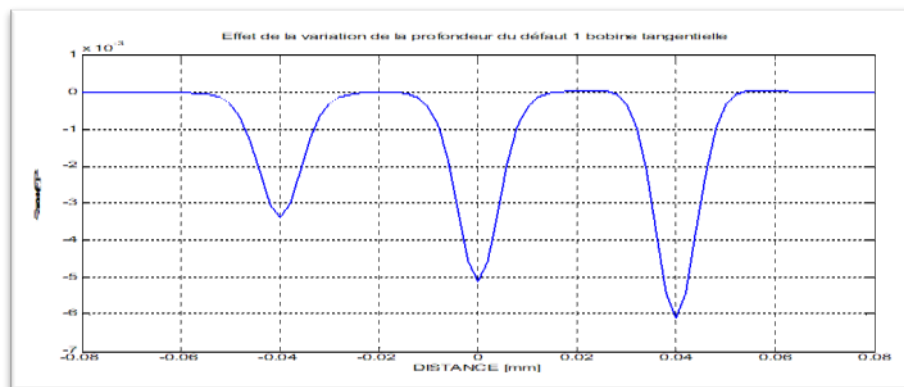


Figure III. 14 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.

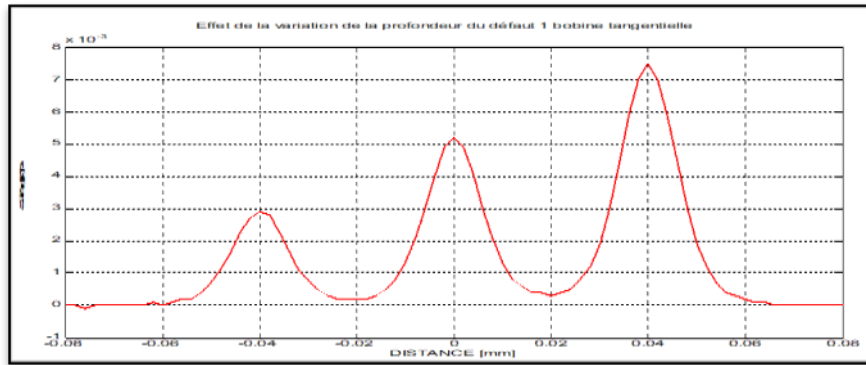
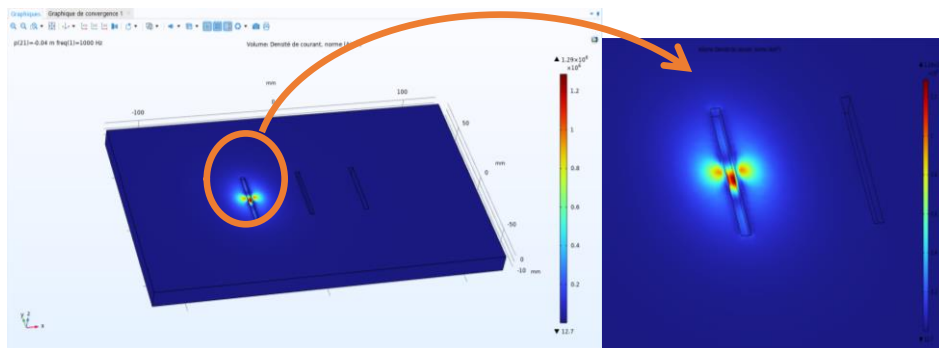


Figure III. 15 Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.

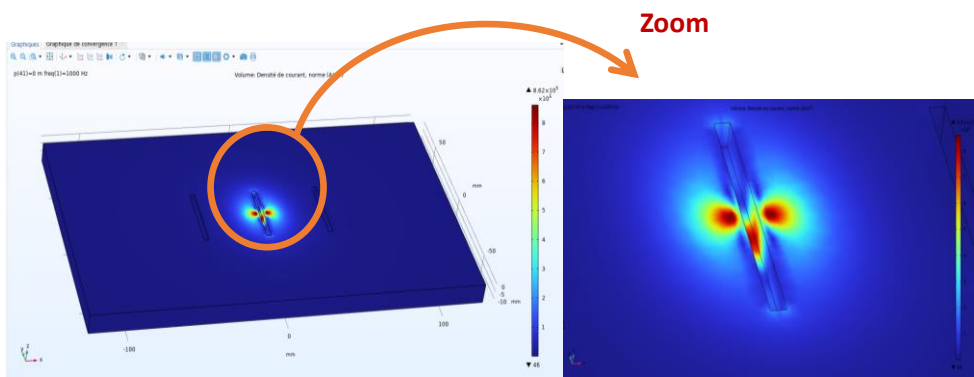
D'après les figures (III.14 et III.15) on peut voir que d'une part l'amplitude des signaux obtenus commence à augmenter à la proximité des défauts et atteint son maximum au centre de ces derniers, et elle est nulle pour le reste de la zone contrôlée (où il n'y a pas de défaut). Et d'autre part cette variation est proportionnelle à l'augmentation de la profondeur du défaut.

a. Courants induits

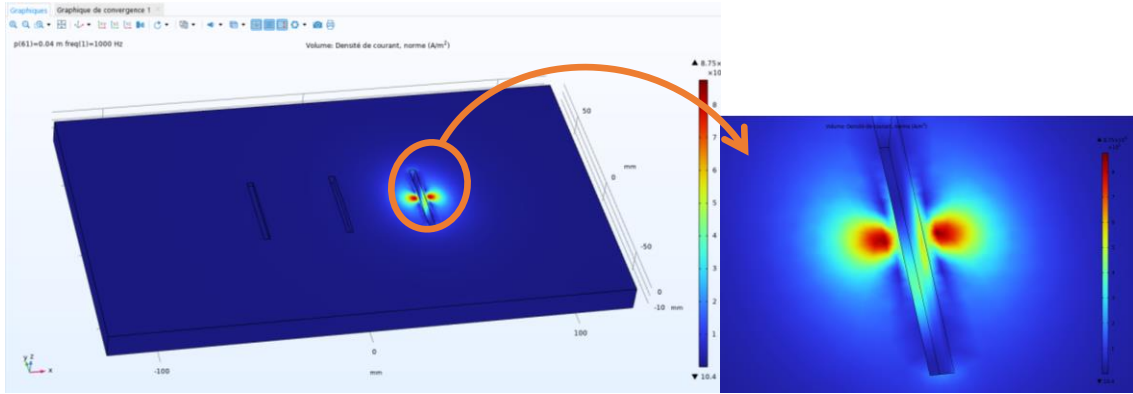
La figure (III.16) montre les résultats obtenus des courants induits dans la plaque d'aluminium pour différentes positions du capteur:



A). Position du capteur sur défaut 1



B). Position du capteur sur défaut 2.



C). Position du capteur sur défaut 3.

Figure III. 16 Variation des courants induits en fonction de la position de la bobine.

Selon les résultats de la figure (III.16) on peut noter que le courant maximal induit lors de la présence du premier défaut est $J_{ind1} = 1.29 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ qui a une profondeur de 2 mm et elle dans le second défaut $J_{ind2} = 0.862 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ où la profondeur de 4 mm et pour le troisième défaut dont la profondeur est de 6 mm elle atteint $J_{ind3} = 0.875 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ mais cette valeur on ne la retrouve pas dans le fon du défaut est donc on toujours une diminution de la valeur maximale des courants induits au fure et à mesure que le défaut augmente en profondeur

III.3.2.2. Effet de la fréquence du défaut sur les variations d'impédances :

Pour étudier l'effet de la fréquence sur impédances du capteur, le défaut est caractérisé par une longueur de 40mm, une profondeur de 4mm et une largeur de 3mm et nous avons 1 bobine Tangentielle figure (III.17).

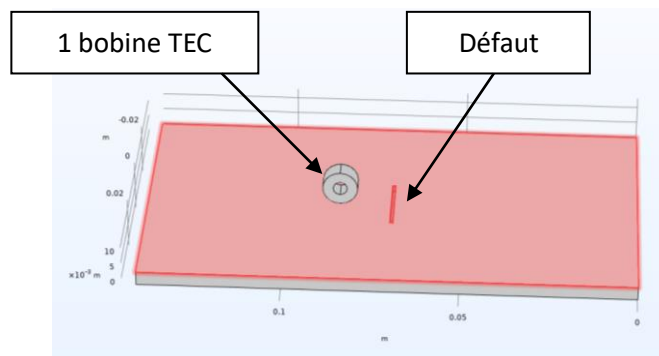


Figure III. 17 Vue de la position d'une bobine TEC avec un seul défaut.

La variation de l'impédance réelle et imaginaire du capteur sont montrés sur les figures (III.18 et III.19).

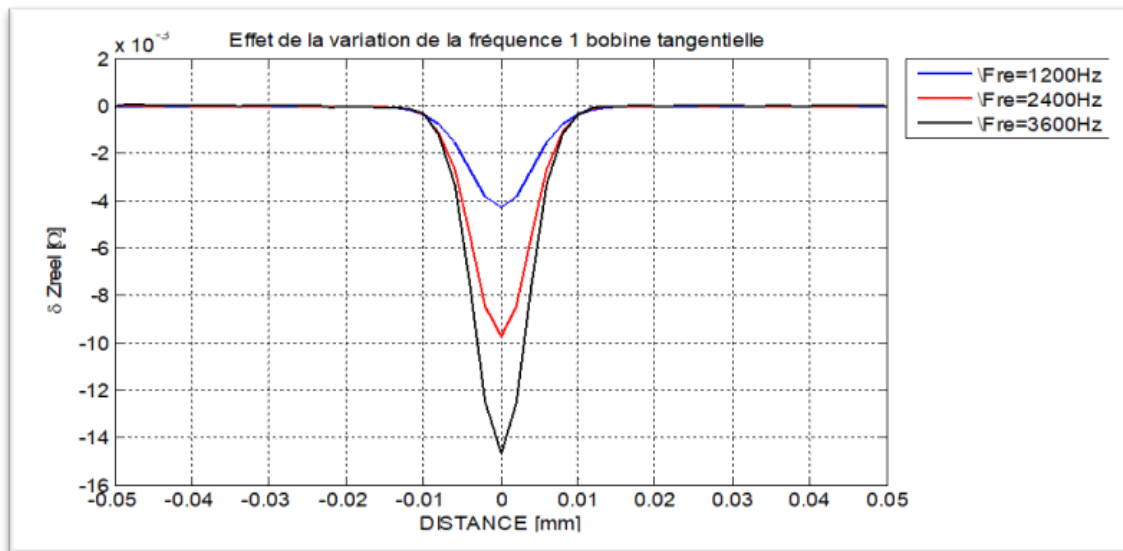


Figure III. 18 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.

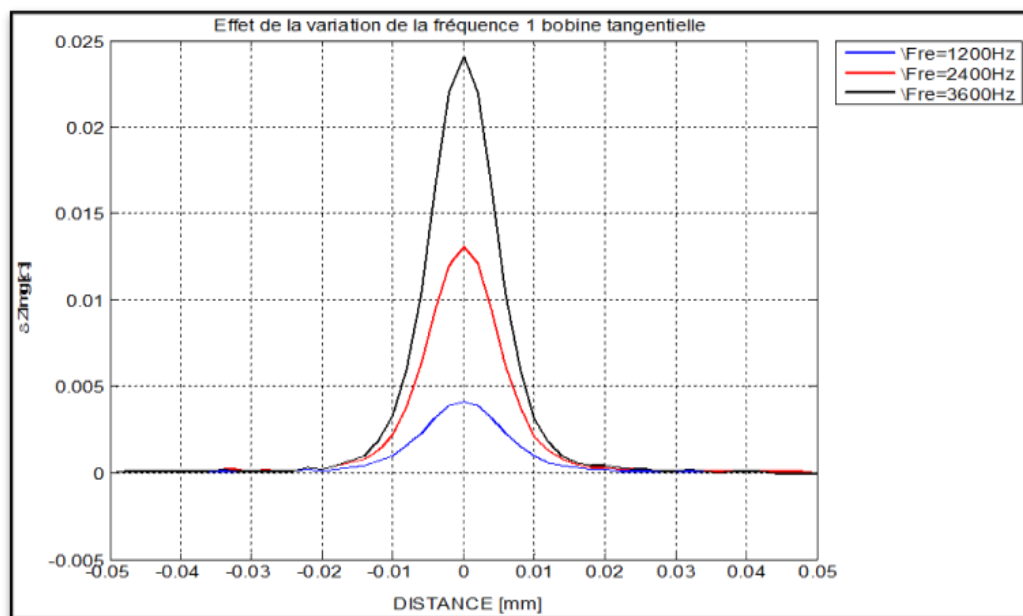


Figure III. 19 Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.

D'après les figures (III.18 et III.19) Nous pouvons voir que l'amplitude du signal est proportionnelle à la fréquence.

III.4.2.3. Effet du lift off sur les variations d'impédances :

Dans cette partie, nous faisons varier le Lift Off et nous conservons toutes les valeurs précédemment utilisées de l'expérience antérieure.

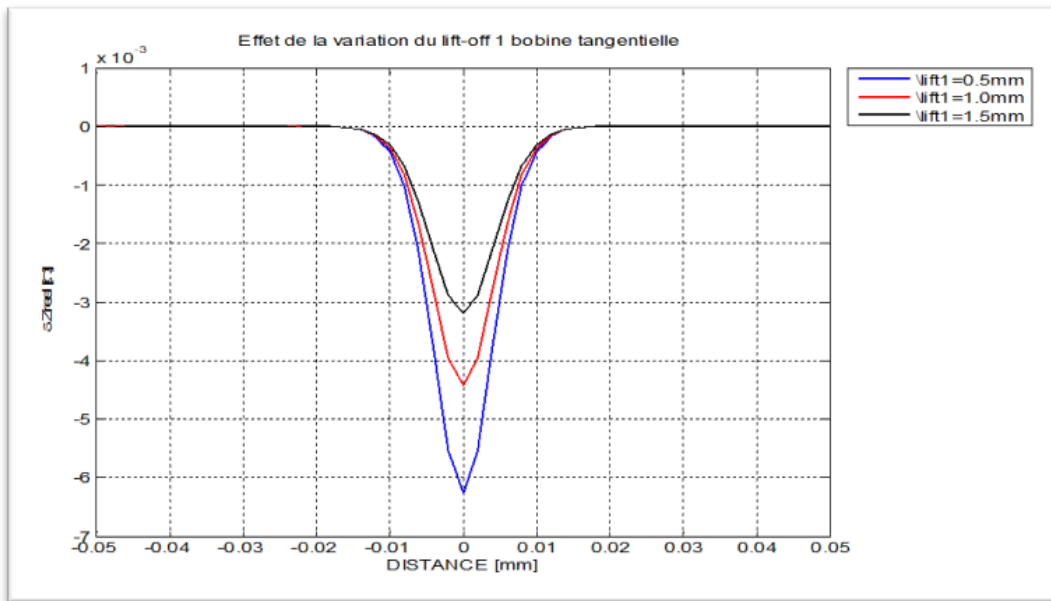


Figure III. 20 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.

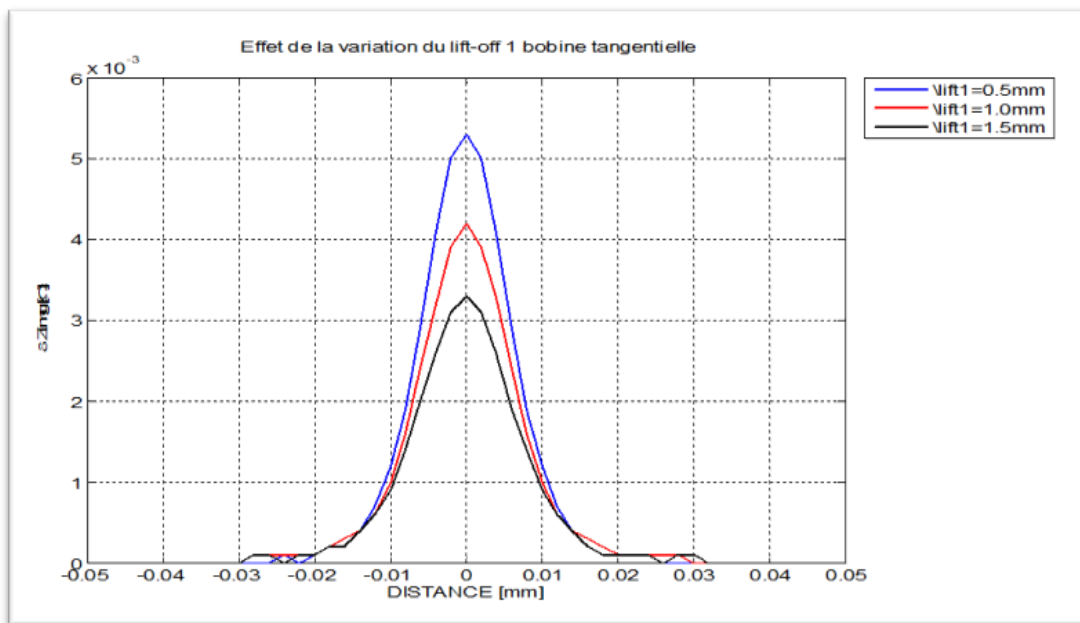
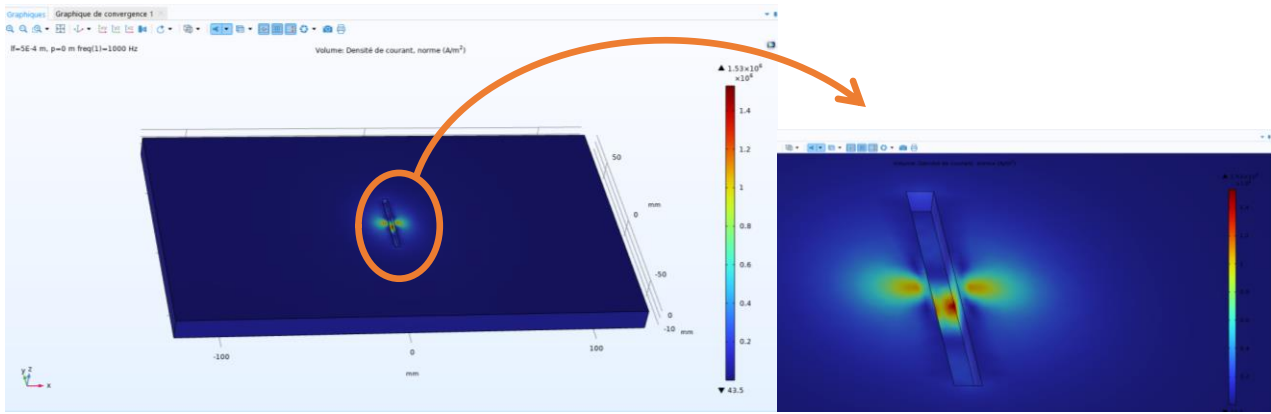


Figure III. 21 Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.

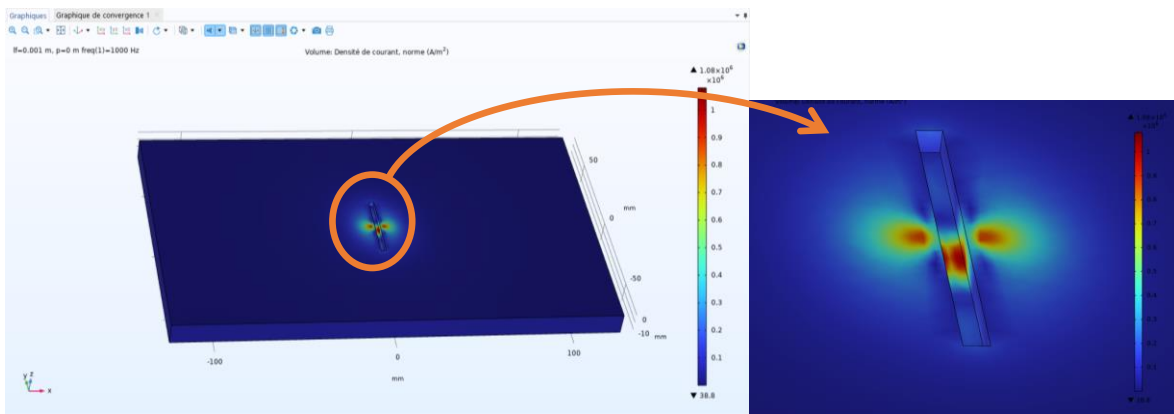
D'après les figures (III.20 et III.21) Nous pouvons voir clairement que l'amplitude des signaux obtenus augmente quand la valeur du Lift off diminue.

a. Courants induits

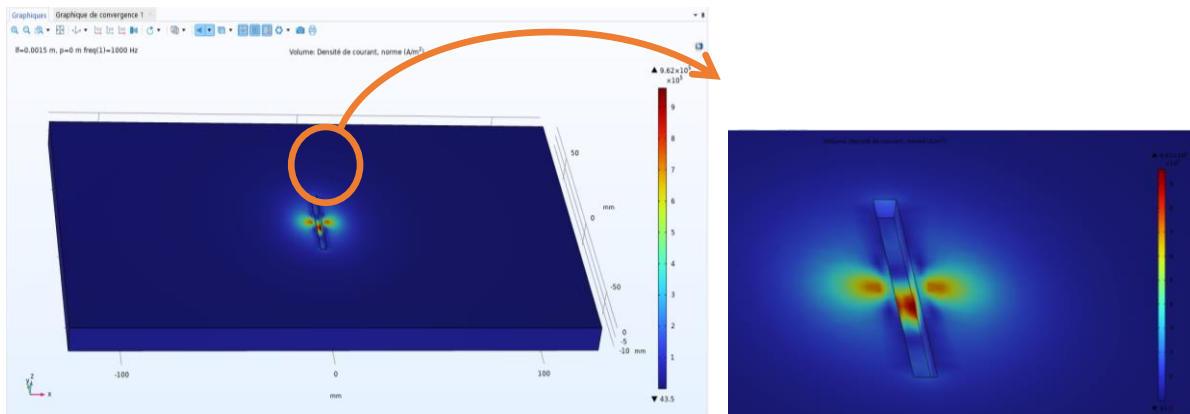
Afin de vérifier le modèle de simulation, nous devons d'abord comparer les résultats obtenus à partir des courants induits dans la plaque d'aluminium à différentes positions du capteur, comme le montrent les formes suivantes :



A : Lift off =0.5mm



B : Lift off =1.0mm



C : Lift off =1.5mm

Figure III. 22 Variation des courants induits en fonction de la position de la bobine.

La figure de résultats (III.22), on peut observer que le maximum des courants induits est de $J_{ind}=1.53 \cdot 10^6$ A/m² un lift off1 = 0,5m, $J_{ind}=1.08 \cdot 10^6$ A/m² un lift off2= 1,0m et $J_{ind}=0.962 \cdot 10^6$ A/m² un lift off3= 1,5m, ces résultats confirment que le modèle proposé est correct car plus le lift-off augmente plus les courants induits diminuent

III.4. Capteurs tangentiels multiéléments TECA:

III.4.1. Définition TECA :

TECA est un ensemble de capteurs tangentiels (en anglais Tangential Eddy Current Array TECA) , cette topologie avancée permet de numériser de grandes surfaces en un seul passage, réduisant considérablement le temps nécessaire pour effectuer des inspections, ce qui élimine le besoin d'analyses multiples ou raster. Les bobines tangentielles sont placées sur leurs côtés et leurs axes centraux sont parallèles à la surface. Le terme "tangentiel" fait référence au fait que les courants de Foucault s'écoulent parallèlement à la surface et "plongent" sous les fissures pour mesurer leur profondeur.

III.4. 2. Avantages du TECA :

- Elle réduit considérablement le temps d'inspection en augmentant la vitesse de balayage.
- Elle couvre une zone plus grande dans une seule passe tout en maintenant une haute résolution.
- Elle réduit la complexité des systèmes de balayage mécaniques et robotiques.
- Elle produit en temps réel une cartographie de la région inspectée, ce qui facilite l'interprétation des données.
- Elle convient bien aux pièces de forme complexe.
- Elle améliore la fiabilité et le taux de détection.
- La sonde peut être formée pour suivre la forme des pièces
- le TECA offre de meilleures performances globales que la magnétoscopie. L

Après implémentation du modèle sous COMSOL-multiphysics, nous entamons à l'étude de l'effet de la variation des paramètres géométrique du défaut parallélépipède sur la réponse du capteur.

III.4.3. TECA 5 bobines pièce longue munie de trois défauts :

Dans cette expérience, nous mélangeons les deux expériences précédentes d'abord nous mettons 3 différents défauts longueur, largeur et profondeur ainsi et ensuite nettoyer 5 bobines.

Pour la variable paramètre :

Def 1	<u>lad1=1,5mm</u>	<u>haut1=2mm</u>	<u>lod=40mm</u>	freq (Hz)= 1000HZ
Def 2	<u>lad1=3mm</u>	<u>haut2=4mm</u>	<u>lod=40mm</u>	lift-off=1 mm
Def 3	<u>lad3=6mm</u>	<u>haut3=6mm</u>	<u>lod=40mm</u>	dist_int_bob=0,5mm

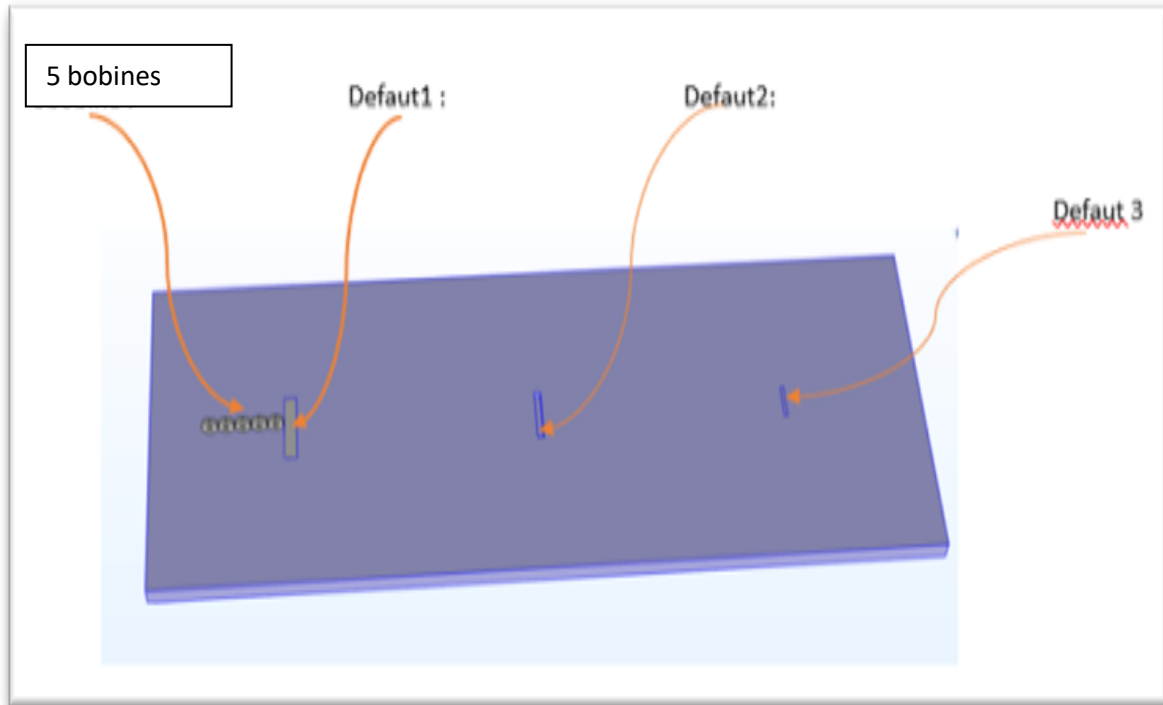


Figure III. 23 Vue de la position des TECA 5 bobines, pièce longue munie de trois défauts.

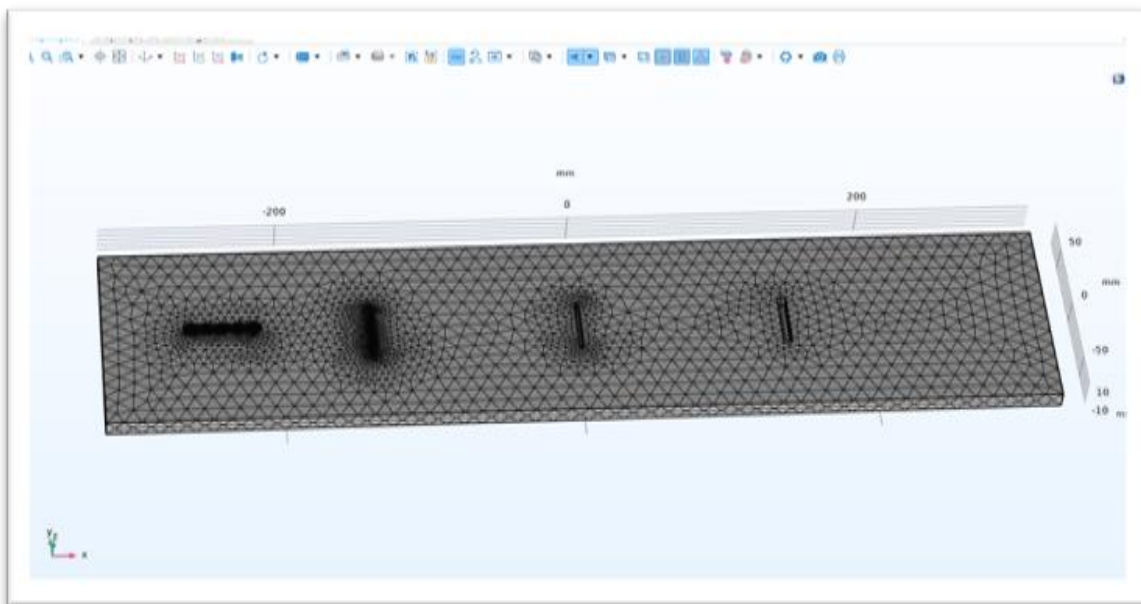


Figure III. 24 Vue la Maillage des TECA 5 bobines, pièce longue munie de trois défauts.

Nous travaillons sur une série d'expériences pour obtenir les résultats suivants :

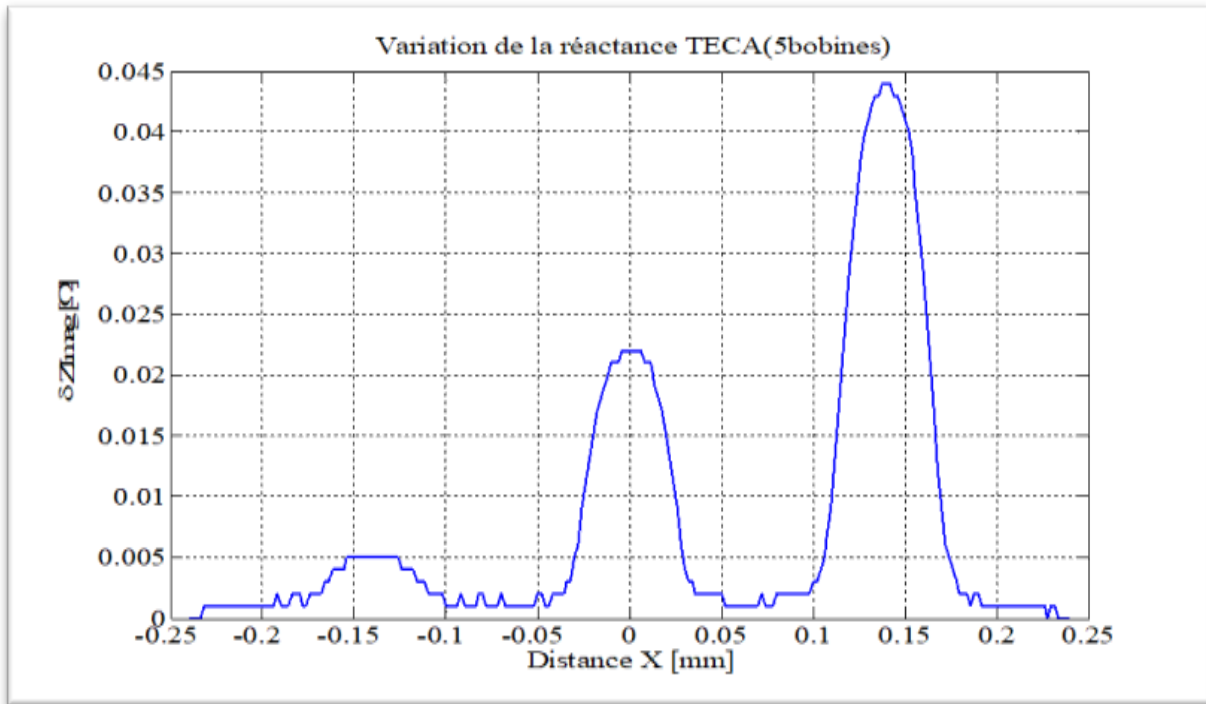


Figure III. 25 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.

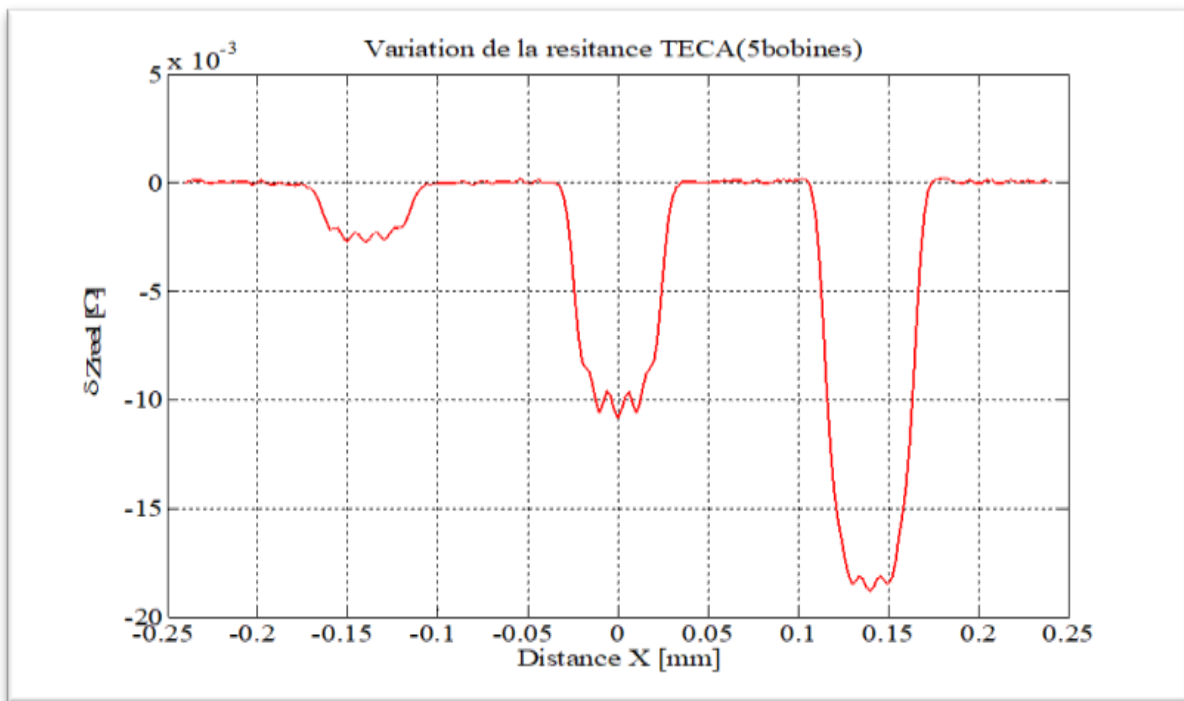
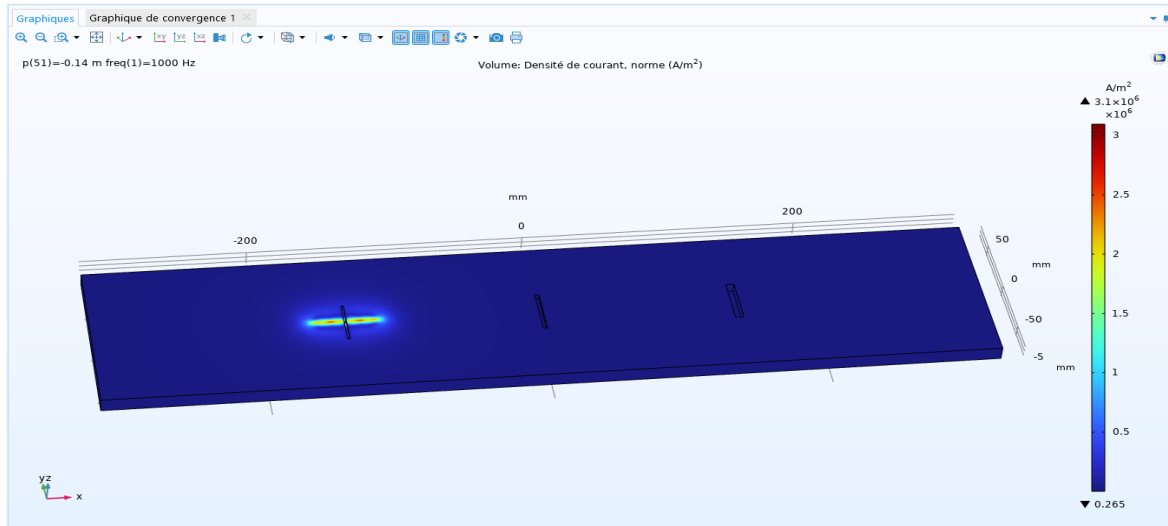


Figure III. 26 Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.

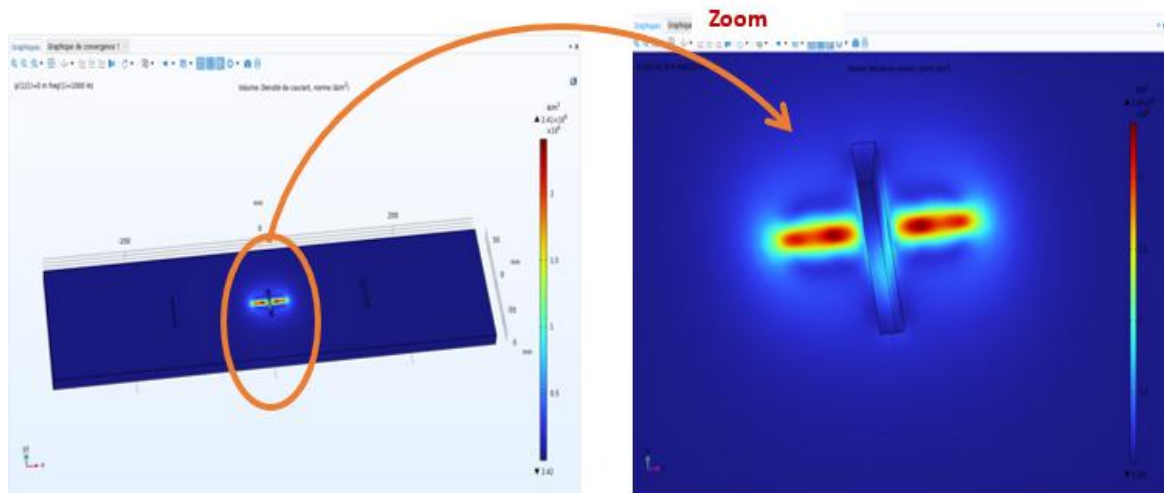
On note que d'après les figures (III.25 et III.26) la signature des trois défauts est très nette, et elle proportionnelle au volume des défauts.

III.4.5.B. Courants induits

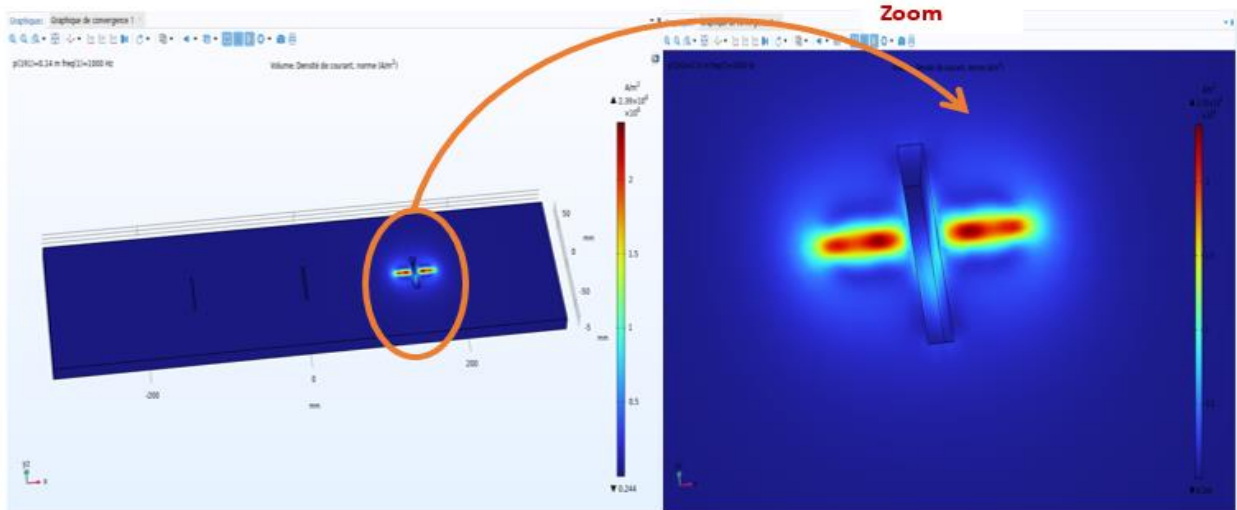
Afin de vérifier le modèle de simulation, nous devons d’abord comparer les résultats obtenus à partir des courants induits dans la plaque d’aluminium à différentes positions du capteur, comme le montrent les formes suivantes :



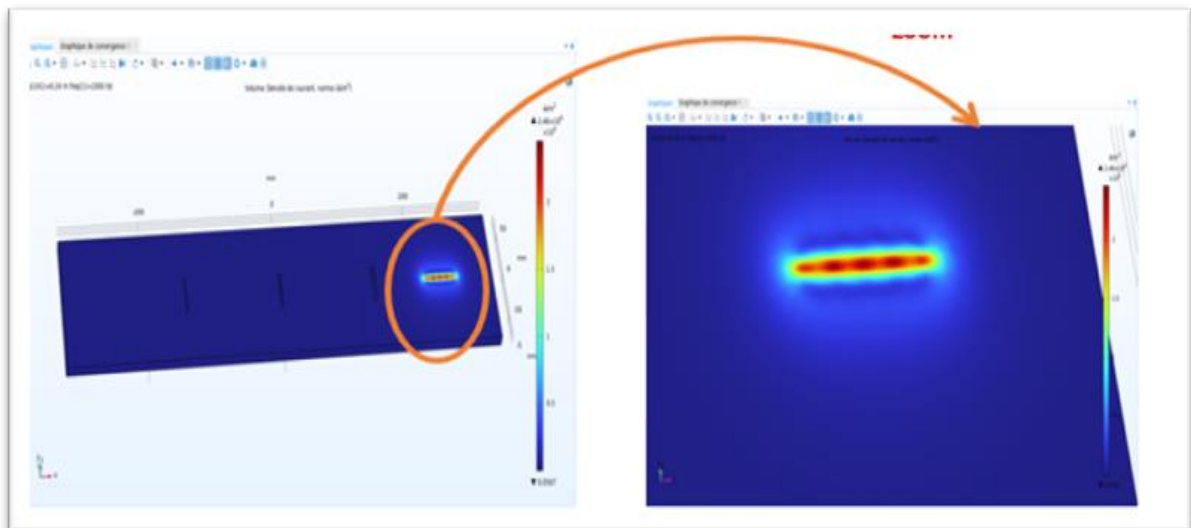
A. la densité des courants induit au premier défaut.



B. la densité des courants induit au deuxième défaut.



C. la densité des courants induit au troisième défaut.



D. la densité des courants induit hors défaut.

Figure III. 27 vue la variation de la densité de courant.

D’après les résultats de la figure (III. 27), on peut constater que le maximum des courants induits diminue lors de la présence du défaut, il passe de $J_{ind\ 1}=1,5 \cdot 10^6\ A/m^2$ sans défaut à $J_{ind1}=2 \cdot 10^6\ A/m^2$ pour le défaut1 dont la largeur est de 1.5mm et la profondeur 2mm à la, et il est de $J_{ind2}=2 \cdot 10^6\ A/m^2$ pour la position 2, c’est dire pour le defaut2 plus large (3mm) et plus profonde(4mm), et enfin il est de $J_{ind3}=2.4 \cdot 10^6\ A/m^2$ pour le défaut 3 le plus large (6mm) ainsi que la profonde(6mm). Ces résultats sont justifiés par l’existence du défaut qui provoque l’augmentation de la trajectoire d’où diminution de l’intensité de ces derniers.

III.4.6. Effet variations la profondeur des 5 défauts et TECA bobine :

III.4.6.1. Maillage du domaine d'étude :

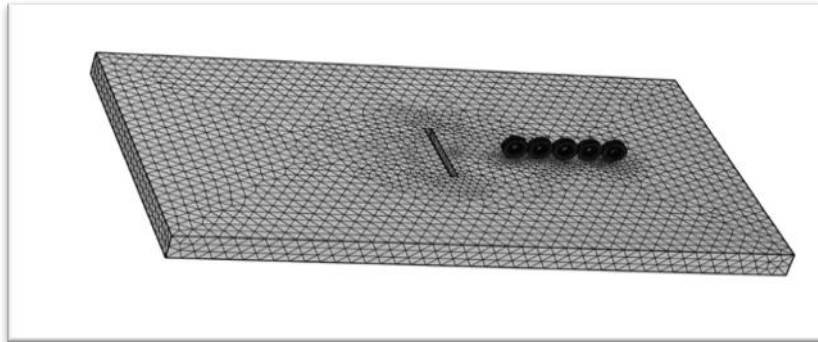


Figure III. 28 Maillage du domaine d'étude.

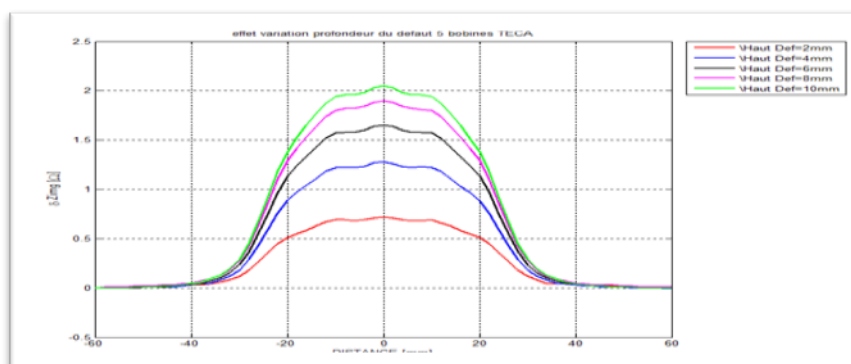


Figure III. 29 Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.

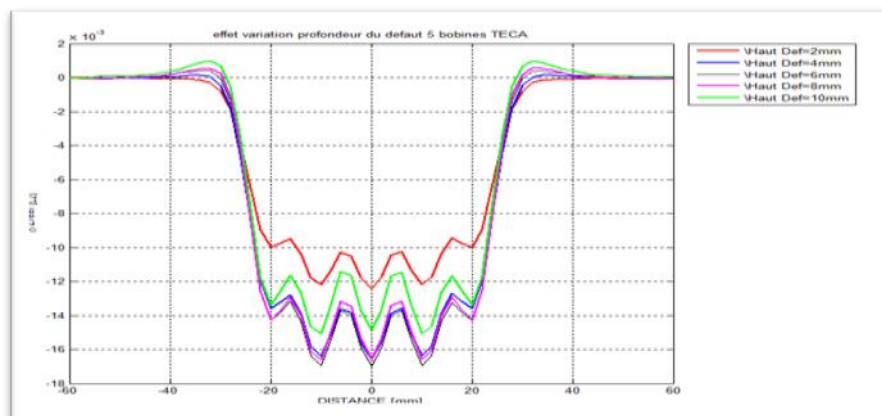
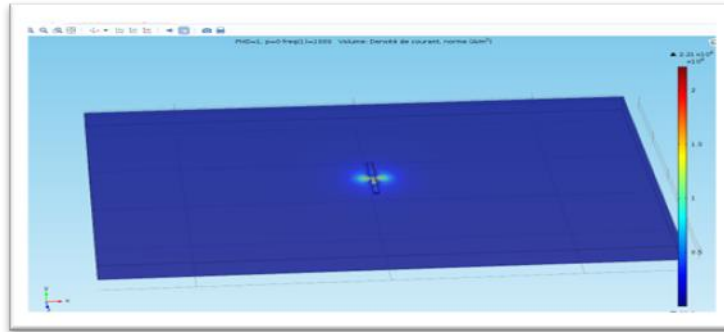


Figure III. 30 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.

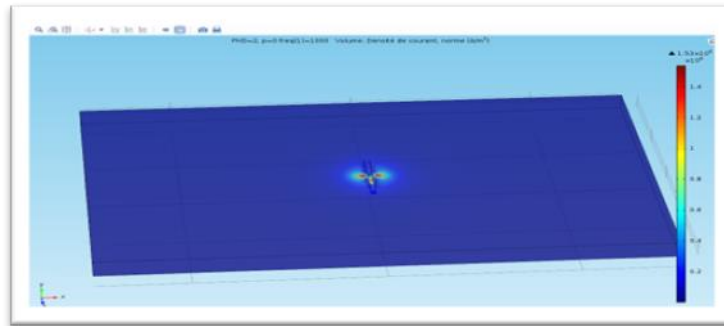
D'après les figures (III.29 et III.30) nous pouvons voir d'une part la capacité des signaux obtenus commencent à augmenter lorsque la valeur de profondeur augmente et reste zéro pour le reste de la zone contrôlée (où il n'y a pas de défaut) et d'autre part cette différence est proportionnelle à l'augmentation de la profondeur du défaut.

III.2.6.B Courants induits :

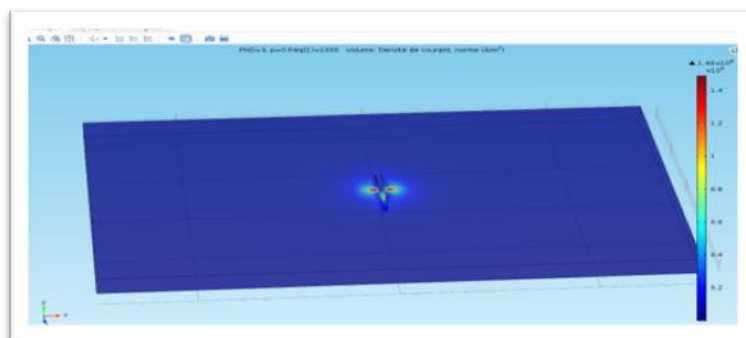
Afin de vérifier le modèle de simulation, nous devons d'abord comparer les résultats obtenus à partir des courants induits dans la plaque d'aluminium à différentes positions du capteur, comme le montrent les formes suivantes :



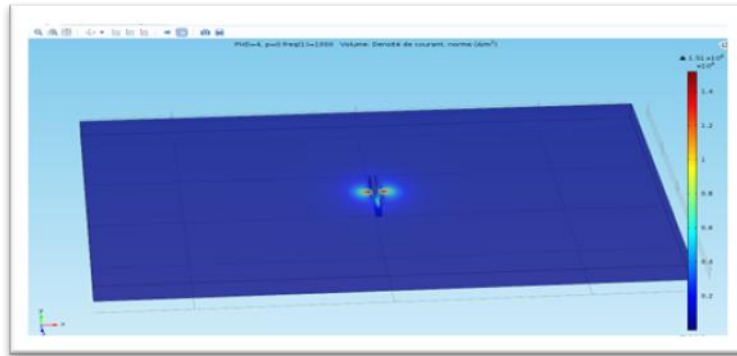
(a) Densité de courant Haut Défaut 2mm.



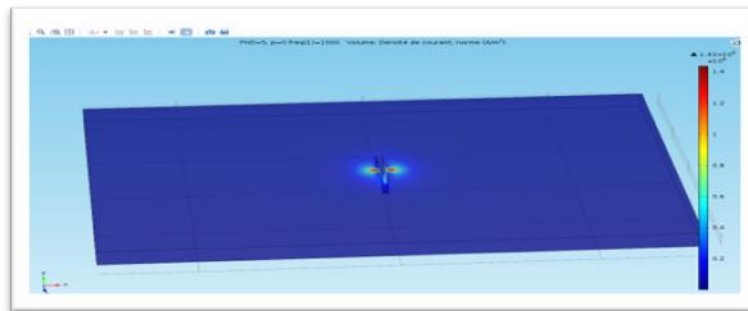
(b) Densité de courant Haut Défaut 4mm.



(c) Densité de courant Haut Défaut 6mm.



(d) Densité de courant Haut Défaut 8mm.



(e) Densité de courant Haut Défaut 10mm.

Figure III. 31 vue la variation de la densité de courant.

Les résultats montrent que les courants maximums diminuent lorsque la valeur de profondeur augmente. Ces résultats justifient l'existence d'un manque de matière (défaut) qui entraîne une augmentation de la course des courants induits ce qui se traduit par une diminution de la valeur des courants induit proportionnelle à l'augmentation de la profondeur du défaut.

III.5. Conclusion :

Après avoir implémenter le comportement électromagnétique du système de CND_CF par capteur tangentiel en topologie TEC et, TECA du système de CND-CF sous COMSOL Multiphasics, nous avons exploité le modèle pour détection des défauts et de même étudier l'effet de certain paramètre électrique, et mécanique sur les variations de la résistance et la résistance du capteur.

En effet les résultats sont montré que :

- Au fur et à mesure que la fréquence augmente, les signaux des défauts sont importants car le défaut est surfacique
- De même, lorsque le lift-off est réduit le capteur devient plus sensible et l'amplitude de signal est maximale.
- Mettre en relief l'aspect sur l'utilisation des multi capteurs ce qui permet de contrôler des pièces de surface importante avec un minimum de temps

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif visé par ce mémoire été de faire une étude, une simulation et modélisation tridimensionnelle de la détection de défauts externes par courants Foucault en utilisant des bobines tangentielle par la méthode des éléments finis(MEF) sous le logiciel COMSOL Multiphysics qui est justement basé sur la MEF

Avant d'aborder les objectifs de cette étude, nous avons jugé utile, à travers une recherche bibliographique, de rappeler et de synthétiser les éléments constituant les principales méthodes du CND, tout soulignant le principe de fonctionnement, les champs d'application, type de défauts recherché et les avantages et inconvénients de chaque technique.

De même, un bref rappel a été consacré au modèle mathématique et numérique que nous allons utiliser pour modéliser le dispositif, basé sur la méthode des éléments finis. Les équations de Maxwell, qui régissent le champ électromagnétique du dispositif électrique, ont été utilisées pour illustrer la méthode de calcul du champ par les éléments finis

Quant à la dernière partie elle a été dédiée à la modélisation et simulation en 3D sous COMSOL Multiphysics d'un système CND-CF d'une part pour une plaque conductrice munie de défauts surfaciques

Pour les topologies TEC et TECA , que ce soit en mode balayage linéaire ou surfacique multiplexé, nous avons pu:

- *Détecter les défauts externes de longueurs, largeurs et profondeurs différentes,*
- *Détecter les défauts surfaciques répartis sur des positions différentes*
- *Mettre en évidence l'effet de la fréquence, le lift-off sur le signal de détection,*

Comme perspectives de ce travail, on peut citer :

- *Utilisation de CND-CF pulsé pour la détection des défauts interne,*
- *Utilisation de CND-CF multiéléments pulsés pour un balayage surfacique,*
- *L'utilisation de défauts de formes aléatoires,*
- *Elaborer un modèle inverse permettant d'estimer les caractéristiques du défaut en connaissant les grandeurs mesurables,*
- *Réalisation d'un banc d'essai pratique.*

Bibliographie

- [1] A. Abdou, «Contrôle non Destructif (CND) :Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif à Courant de Foucault,» Université de Batna 2 , Batna, 2018.
- [2] IAEA, Eddy Current Testing at Level 2:, 2011.
- [3] B. Oussama, «Contrôle non destructif par courants de Foucault,» Université de Msila, 2012.
- [4] A. O. SAFER, «Etude et modélisation de capteur à courant de Foucault pour le controle non destructif,» Université de M'sila, 2014.
- [5] B. Delabre, «Développement de capteurs flexibles à courants de foucault : applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique,» Université Paris Saclay, 2016.
- [6] A. BENHALIMA et A. SAOUDI, «Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques),» Université de M'sila, 2018.
- [7] N. Bowler, «Eddy-Current Nondestructive Evaluation,» Springer Series in Measurement Science and Technology, 2019.
- [8] Y. Choua, «Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault,» Université Paris Sud Paris XI, 2010.
- [9] H. Meziane, «ETUDE ET CARACTERISATION DES FISSURES FINES EN EVALUATION NON DESTRUCTIVE,» UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.
- [10] K. MOHAMED, «Etude et Modélisation de Capteur à Courant de Foucault pour le Controle Non Destructifs CND,» Université de Constantine, 2007.
- [11] N. M. Nathan Ida, «Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation,» Springer International Publishing, 2019.
- [12] L. Oukhellou, «Paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif. Application à la reconnaissance des défauts de rails par courant de Foucault,» l'Université Paris XI Orsay, 2004.

- [13] B. RAMDANE, «Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de,» UNIVERSITE DE NANTES, 2009.
- [14] H. Zaidi, «Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courant de Foucault : application aux capteurs souples,» UNIVERSITE PARIS-SUD, 2013.
- [15] C. Zorni, «Contrôle non destructif par courants de Foucault de,» L'UNIVERSITÉ PARIS-SUD 11, 2012.
- [16] N. BENHADDA, «Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND),» Université de Batna 2 , Batna, 2015.

