

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



**FACULTE : TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT : GENIE ÉLECTRIQUE**

**DOMAINE : SCIENCE TECHNIQUE**  
**FILIERE : ÉLECTROTECHNIQUE**  
**OPTION : ÉLECTROMECHANIQUE**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**du diplôme de Master Académique**

**Par:**

- 1 BAKAI LAKHDAR**
- 2 LAYACHI AMEL**

**Proposé et encadré par :**

**Dr. ABDOU ABDELHAK**

**Contrôle Non Destructif par**  
**Courants de Foucault.**  
**(Application aux Pièces Cylindriques**  
**et Plaques Muni d'un Alésage)**

**Soutenu devant le jury composé de:**

<b>Dr: BELLKHIRI SALAH</b>	<b>Université de Mohamed Boudiaf – M'sila.</b>	<b>Président</b>
<b>Dr: ABDOU ABDELHAK</b>	<b>Université de Mohamed Boudiaf – M'sila.</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Dr: GHAALLAB MOHAMED</b>	<b>Université de Mohamed Boudiaf – M'sila.</b>	<b>Examineur</b>
<b>Dr: K. KHETTEB</b>	<b>Université de Mohamed Boudiaf – M'sila.</b>	<b>Examineur</b>

**Année universitaire : 2017 - 2018**

# Remerciements

*D'abord, on tient à remercier DIEU pour le peu de savoir qu'on a acquis. On profite aussi de cette occasion pour adresser nos sincères remerciements à notre **Dr. ABDOU Abedelhak** qui nous a fait bénéficier de ses conseils et de ses compétences, soulignant ainsi l'intérêt constant qu'il porte à nos travaux. On le remercie pour la confiance qu'il nous a témoignée, sa pédagogie, sa patience, sa disponibilité et son dévouement.*

*On tient à remercier l'ensemble du cadre administratif de **l'ÉLECTROMECHANIQUE**. Notre pensée va aussi à toutes les personnes que nous avons rencontrées durant ces derniers mois, pour leur sympathie et leur aide.*

*On tient à remercier tous les enseignants qui ont accepté de juger ce travail. On tient à remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, ainsi que toute la promotion **ÉLECTROMECHANIQUE 2017/2018**.*

# Dédicaces

*Au modèle de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral  
et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié  
pour me voir réussir, à toi mon père.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous  
mes frères et sœurs, je dédie ce travail dont le grand plaisir  
leurs revient en premier lieu pour leur conseils  
aides, et encouragements*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient  
toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant  
mon chemin d'études supérieur.*

*Dédicace spéciale*

*Pour mes amis **LOGRAB LAKHDAR** et **KHAIRE KHALIL**.*

*Je n'oublie pas ma chère sœur **BAKAI RAIHANA**.*

**BAKAI LAKHDAR**

# Dédicaces

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral  
et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié  
pour me voir réussir, à toi mon père.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme  
de mon cœur, ma vie et mon bonheur, ma maman que j'adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous  
frères et sœurs, mes nièces et mes neveux, je dédie ce travail dont  
le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leur conseils,  
aides, et encouragement*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient  
toujours à mes cotés, et qui m'ont accompagnés durant  
mon chemin des études supérieurs*

*Dédicace spéciale*

*Pour ma sœur et mon amie Chayma ABDELKEBIR*

*Et sans oublié mon ami Elkhier HACHI*

**LAYACHI AMEL**

# SOMMAIRE

## Sommaire

Remerciements .....	I
Dédicaces.....	II
Table des matières.....	IV
Tables des figures.....	VI
Notations Et Symboles.....	VIII
Abréviation .....	IX
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I Généralités sur le Contrôle non destructif à Courants de Foucault .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Différentes techniques de contrôle non destructif.....</b>	<b>3</b>
I.2.1 Procédés optiques .....	4
I.2.2 Ressuage .....	4
I.2.3 Flux de fuite magnétique .....	5
I.2.4 Radiographie.....	6
I.2.5 Thermographie.....	6
I.2.6 Ultrasons .....	7
I.2.7 CND par courants de Foucault .....	7
<b>I.3 Synthèse comparative des techniques utilisées en CND .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4 Capteurs inductifs pour CND à courants de Foucault .....</b>	<b>10</b>
I.4.1 Définition d'un capteur.....	10
I.4.2 Principe des capteurs inductifs .....	10
I.4.3 Classification des capteurs.....	10
I.4.4 Exemples de capteurs .....	15
<b>I.5 Conclusion.....</b>	<b>16</b>
<b>Chapitre I Modélisation De Contrôle Non Destructif Par CF .....</b>	<b>17</b>
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>17</b>
<b>I.2 Modélisation du dispositif de CND par CF.....</b>	<b>17</b>
<b>I.3 Mise en équations .....</b>	<b>19</b>
I.3.1 Equations de Maxwell .....	19
I.3.2 Lois constitutives .....	19
I.3.3 Conditions aux limites .....	20
I.3.4 Conditions de continuité.....	20
I.3.5 Conditions de Jauge.....	21

---

I.3.6	Hypothèses simplificatrices .....	21
I.3.7	Champs et potentiels.....	23
<b>I.4</b>	<b>Méthodes de résolution .....</b>	<b>23</b>
I.4.1	Méthodes analytiques .....	23
I.4.2	Méthodes semi analytiques.....	23
I.4.3	Méthodes numériques.....	24
<b>II.5</b>	<b>Modélisation mathématique du système .....</b>	<b>26</b>
<b>II.6</b>	<b>Méthode des éléments finis (MEF) .....</b>	<b>27</b>
<b>II.7</b>	<b>Calcul de l'impédance .....</b>	<b>28</b>
<b>II.8</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>30</b>
<b>Chapitre III</b>	<b>Résultats de simulation .....</b>	<b>31</b>
<b>III.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>31</b>
<b>III.2</b>	<b>Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.3 .....</b>	<b>31</b>
<b>III.3</b>	<b>Application du CND-CF sur plaque avec alésage .....</b>	<b>32</b>
III.3.1	Création du modèle de simulation .....	32
III.3.2	Vue 3D du modèle .....	33
III.3.3	Maillage de plaque.....	34
III.3.4	Résultats de simulations et interprétations .....	34
III.3.5	Vérifications des paramètres influant sur le CND-CF.....	36
<b>III.4</b>	<b>Application du CND-CF aux pièces cylindriques .....</b>	<b>45</b>
III.4.1	Caractéristiques géométriques du modèle .....	45
III.4.2	Vue en 3D du modèle avec cylindre.....	45
III.4.3	Maillage du modèle à cylindre .....	46
III.4.4	Simulations et interprétations des résultats (modèle à cylindre).....	46
<b>III.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>52</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>53</b>	
<b>Référence Bibliographiques .....</b>	<b>55</b>	

# Tables des figures

Figure I. 1-	Examen visuel.....	4
Figure I. 2-	Principe de la méthode de ressuage.....	5
Figure I. 3-	Contrôle par magnétoscopie. ....	5
Figure I. 4-	Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut.....	6
Figure I. 5-	Détection par thermographie. ....	7
Figure I. 6-	Principe des ultrasons. ....	7
Figure I. 7-	Principe du CND CF.....	8
Figure I. 8-	Capteur encerclant. ....	11
Figure I. 9-	Bobine interne glissante avec noyau . ....	11
Figure I. 10-	Bobine interne glissante avec noyau . ....	12
Figure I. 11 -	Bobine plate. ....	12
Figure I. 12-	Capteur interne tournant. ....	12
Figure I. 13 -	Capteur à double fonction.....	13
Figure I. 14-	Capteur à fonction séparée. ....	14
Figure I. 15-	Mode différentiel.....	15
Figure I. 16-	Quelques exemples de capteurs. ....	16
<hr/>		
Figure II. 1-	Système capteur-fissure. ....	18
Figure II. 2-	Cas général, d'un problème magnétodynamique. ....	18
Figure II. 3-	Interface entre deux milieux. ....	20
<hr/>		
Figure III. 1 -	Interface utilisateur de COMSOL 5.3.....	32
Figure III. 2 -	Création du modèle géométrique.....	33
Figure III. 3 –	Vue géométrique 3D de la plaque.....	34
Figure III.4 -	Zoom de Maillage de plaque. ....	34
Figure III.5 -	Variation de la Résistance en fonction du déplacement sans défaut. ....	34
Figure III.6 -	Variation de la Réactance en fonction du déplacement sans défaut. ....	35
Figure III.7	Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut. ....	35
Figure III.8 –	Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut.....	36
Figure III.9 -	Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de Fr).....	37
Figure III.10 –	Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de Fr).....	37
Figure III.11 -	Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut. ....	38
Figure III.12 -	Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut.....	38
Figure III.13	Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de Fr). ....	39
Figure III.14 –	Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de Fr).....	39
Figure III.15 -	Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de Ld). ....	40
Figure III.16 -	Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de Ld).....	40
Figure III.17 -	Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut. ....	41
Figure III.18 –	Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut.....	41
Figure III.19 -	Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet du lift off) ..	42
Figure III.20 –	Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet du lift off) ..	42

Figure III.21 - Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de l'inclinaison).	43
Figure III.22 - Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de l'inclinaison)..	43
Figure III.23 - Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de $\sigma_P$ ).	44
Figure III.24 - Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de $\sigma_P$ ).	44
Figure III.25 – Modèle géométrique 3D du modèle à cylindre.....	46
Figure III. 26 - Zoom de Maillage du modèle à cylindre. ....	46
Figure III.27 Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut au début du cylindre .	47
Figure III.28 - Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut au début du cylindre .	47
Figure III.29 – Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (bobine axiale). ....	48
Figure III.30 - Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (bobine axiale).....	48
Figure III.31 – Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut ( bobine radiale )...	49
Figure III.32 – Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut interne (bobine radiale)	49
Figure III.33 - Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 5[mm]	50
Figure III.34 - Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 5[mm]	50
Figure III.35 – Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 3[mm]	50
Figure III.36 - Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 3[mm]	51
Figure III.37 - Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 3[mm]	51
Figure III.38 - Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 1[mm]	52

### LISTE DES TABLEAU

Tableau I. 1 -Comparaison des procédés de CND les plus connus.....	9
<hr/>	
Tableau III. 1 Caractéristiques géométriques du modèle à plaque[35].....	33
Tableau III. 2 Caractéristiques géométriques du modèle à plaque .....	33
Tableau III. 2 Caractéristiques géométriques du modèle à cylindre[35]. ....	45
Tableau III. 2 Caractéristiques géométriques du modèle à cylindre. ....	45

# Notations et symboles

$\vec{B}$	: Induction magnétique [T].
$\vec{H}$	: Champ magnétique [A/m].
$\vec{E}$	: Champ électrique [V/m].
$\vec{D}$	: Induction électrique [C/m <sup>2</sup> ].
$\vec{A}$	: Potentiel vecteur magnétique [Wb/m].
V	: Potentiel électrique scalaire.
f	: Fréquence d'alimentation.
$\mu_r$	: Perméabilité magnétique relative du matériau.
$\mu_0$	: Perméabilité magnétique du vide.
Z	: Profondeur considérée à l'intérieur de la cible.
J(z)	: Module de la densité de courant en fonction de la profondeur.
$\delta$	: Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.
$\vec{J}$	: Densité de courant [A/m <sup>2</sup> ].
$\rho$	: Densité volumique des charges électriques [C/m <sup>3</sup> ].
$\mu$	: Perméabilité magnétique [H/m].
$\sigma$	: Conductivité électrique [S/m].
$\epsilon$	: Permittivité électrique [F/m].
$\vec{B}_r$	: Induction magnétique rémanente [T].
$\vec{T}$	: Potentiel vecteur électrique [A/m].
$\phi$	: Potentiel scalaire magnétique [A].
$\vec{J}_{ind}$	: Densité de courant induit.
$\vec{J}_{exc}$	: Densité de courant d'excitation.
$\vec{E}$ [v/m]	: Champ électrique.
$\vec{j}$ [A/m <sup>2</sup> ]	: Densité du courant.
$\rho$ [C/m <sup>3</sup> ]	: Charge volumique.
$\mu$ [H/m]	: Perméabilité magnétique.

# ABREVIATION

CND	: Contrôle Non Destructif,
CF	: Courants de Foucault,
CND-CF	: Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault,
MEF	: Méthode des Eléments Finis,
MIF	: Méthode des intégrales de frontières,
MVF	: Méthode des volumes finis ,
MDF	: Méthode des différences finis ,
3D	: Tridimensionnel.

## **Introduction Générale**

## Introduction Générale

*De nos jours, la qualité et la gestion des risques sont deux paramètres que ne peuvent négliger les industriels fabriquant, mettant en œuvre ou utilisant les matériaux, les produits ou les structures de toutes natures. Les Contrôles Non Destructifs (CND) sont donc devenus essentiels en quelques dizaine d'années ce qui explique que leur périmètre d'application ne cesse de s'accroître au-delà du domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique. où la défaillance des pièces pouvant entraîner des conséquences plus ou moins importantes. qui s'expriment souvent en termes de sécurité des personnes ou de dégâts environnementaux. L'enjeu du CND est aussi d'ordre économique : la rapidité et la fiabilité des techniques employées sont capitales pour la réduction des coûts de maintenance et l'optimisation de la durée de vie des installations,[1],[2].*

*Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité, ...etc.), soit pour détecter la présence de défauts et les caractériser. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault). Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui), les conditions de mise en œuvre ....etc,[4].*

*Le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre, il est facile de créer des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde, et complexe. En effet, pour un contrôle donné, comment peut-on créer une bonne répartition des courants de Foucault permettant d'avoir un 'signal de défaut' aussi important que possible .Il est nécessaire avant toute chose d'avoir une connaissance suffisamment complète du phénomène physique. Les courants de Foucault n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent,[16].*

*Les tubes et plaque peuvent être testés par courants de Foucault (CF), soit en cours de fabrication, soit lors des phases de maintenance. Le CND par capteurs à courants de Foucault est bien adapté à la détection de défauts dans les pièces métalliques. Cette technique est basée sur l'analyse des changements de l'impédance globale de la bobine dans les environs du défaut. La configuration du dispositif électromagnétique est constituée par capteur (bobine), plaque ou (placée à l'extérieur ou à l'intérieur d'un tube conducteur).*

*L'objectif de ce travail est l'étude d'un dispositif de contrôle par courants de Foucault à travers une simulation d'un capteur, en mode absolu, destiné pour la détection d'un défaut de forme cylindrique et plaque.*

*Pour ce faire, nous avons réparti notre travail en trois chapitres :*

*Ainsi le premier chapitre sera réservé à l'étude bibliographique qui a pour but d'expliquer le contrôle non destructif à partir des différentes techniques mises en œuvre, puis nous présenterons les notions de base concernant les capteurs inductifs à courants de Foucault, avec leurs principes, leurs classification.*

*Le deuxième chapitre sera consacré aux rappels des principales lois qui gouvernent chaque phénomène électromagnétique (équation de Maxwell) pour formuler les équations en régime de la magnétodynamique, ces équation sont des équations différentielles aux dérivées partielles dont la solution dépend entièrement des conditions aux limites que nous avons jugées utiles d'introduire dans ce chapitre.*

*Quant au troisième chapitre sera dédié, en premier à une recherche bibliographique sur la prise en main du logiciel COMSOL Multiphysics, a savoir ses fonctionnalités et ses performances, en second aux différentes applications et aux résultats de simulation en 3D sous COMSOL Multiphysics d'une part pour plaque munie d'un alésage plus un défaut qui peut apparaitre lors de contraintes mécaniques au voisinage d'un boulon et d'autre part pour cylindre avec défauts internes et externes d'où utilisation de capteurs internes et externes. L'élaboration de modèle 3D de plaque ou cylindre sera précédé par une validation par comparaison aux travaux internationaux dans ce domaine,[2],[35].*

*Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des résultats obtenus.*

**Chapitre I**  
**Généralités sur le Contrôle non Destructif par**  
**Courants de Foucault**

# Chapitre I Généralités sur le Contrôle non Destructif à Courants de Foucault

## I.1 Introduction

*Le contrôle non destructif est très répandu en milieu industriel en particulier, l'industrie pétrolière, nucléaire, et automobile, car on vu la gravité des conséquences d'une rupture d'une tige en cours de forage, ou d'un tube de cuvelage ou de production. Le contrôle non destructif (CND) a pour objectif de mettre en évidence les défauts, tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Cette définition est assez large. Pour être plus précis, le CND concerne exclusivement « la santé de la matière », en effet les techniques du CND sont utilisées en contrôle de qualité pour s'assurer de la qualité d'une production, puis de garantir la tenue en service des pièces et des ensembles fabriqués. Elles sont également très appréciées en maintenance. Elles permettent de vérifier la continuité de la matière, et donc de déceler le manque de matière, les fissures, etc.*

*Le système de contrôle par les courants de Foucault s'est développé très rapidement ces dernières années par l'avancement de la technologie apportée aux dispositifs des mesures.*

*Le développement important de l'informatique une grande sur dans le domaine du CND [2].*

*Les capteurs à courant de Foucault sont utilisés depuis plus d'un siècle pour le contrôle des pièces conductrices notamment métalliques*

*Dans ce premier chapitre, on présentera en premier lieu un bref rappel sur les méthodes électromagnétiques du CND. Ensuite on passera en revue les différentes techniques de contrôle non destructif par courants de Foucault, et ainsi les notions de base concernant les capteurs inductifs à courants de Foucault, avec leurs principes, leurs différentes géométries existantes ainsi que leurs différents circuits magnétiques au terminera par une conclusion.*

## I.2 Différentes techniques de contrôle non destructif

Les techniques de CND utilisées sont diverses : ( la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, les courants de Foucault) Elles dépendent de la nature même du contrôle envisagé. Ces méthodes exploitent des phénomènes différents et sont le plus souvent complémentaires. Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau,

forme,...), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué. Pour la plupart de ces méthodes, les moyens d'acquisition ont été automatisés, permettant ainsi le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données. Ce premier chapitre est consacré à la présentation des principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault qui sera l'objet d'étude de ce manuscrit,[9].

### I.2.1 Procédés optiques

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur, la Figure (I.1) montre le principe de contrôle visuel, [10].

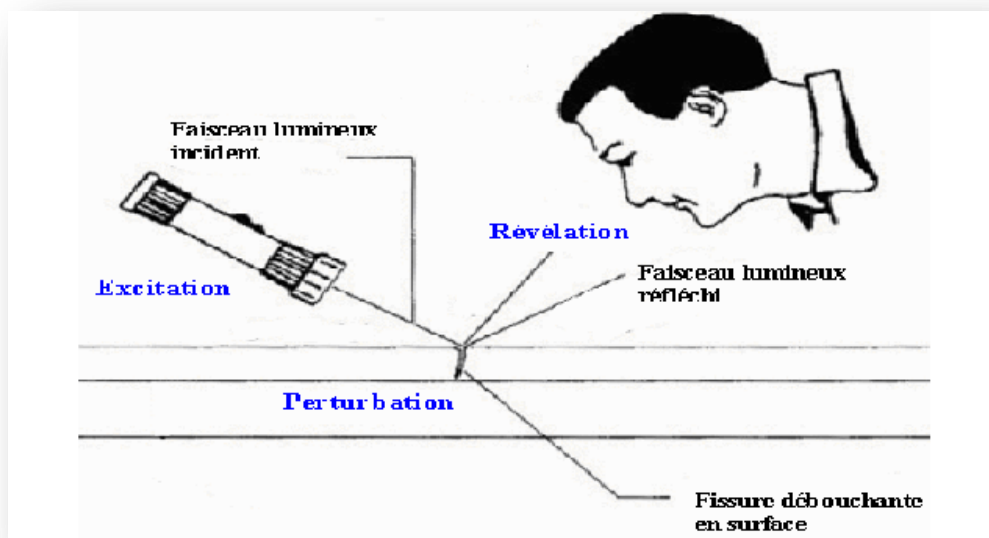


Figure I. 1 L'examen visuel, [10].

### I.2.2 Ressuage

Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchâtes, un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...) ; la pièce étant ensuite examinée visuellement, le principe de cette méthode présente dans la figure (I.2), [8].

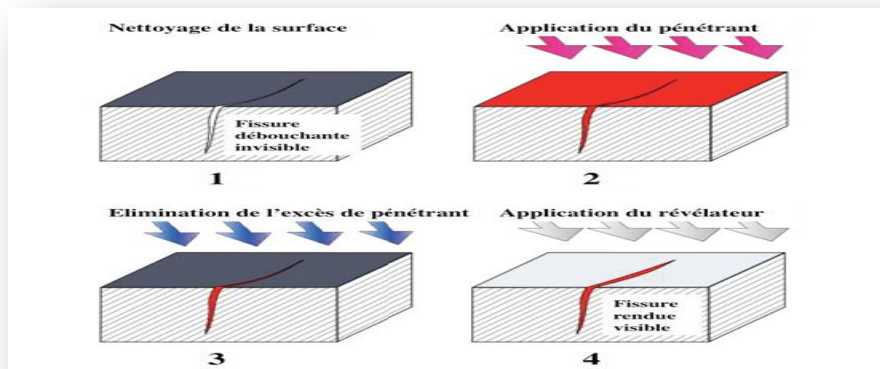


Figure I.2 Principe de la méthode de ressuage, [8].

### I.2.3 Flux de fuite magnétique

Le contrôle par flux de fuite magnétique consiste à soumettre la pièce ou une partie de celle-ci à un champ magnétique constant. Les défauts superficiels provoquent, par l'importante variation de réluctance qu'ils représentent, une déviation des lignes de champ. Des flux de fuite magnétique sont engendrés localement. Ils sont ensuite généralement visualisés soit à l'aide d'un produit indicateur porteur de limaille de fer (magnétoscopie), soit à l'aide d'un film magnétisable (Magnétographie), soit à l'aide d'appareils de mesure de champ magnétique, le principe de cette méthode présente dans la figure( I.3), [12].

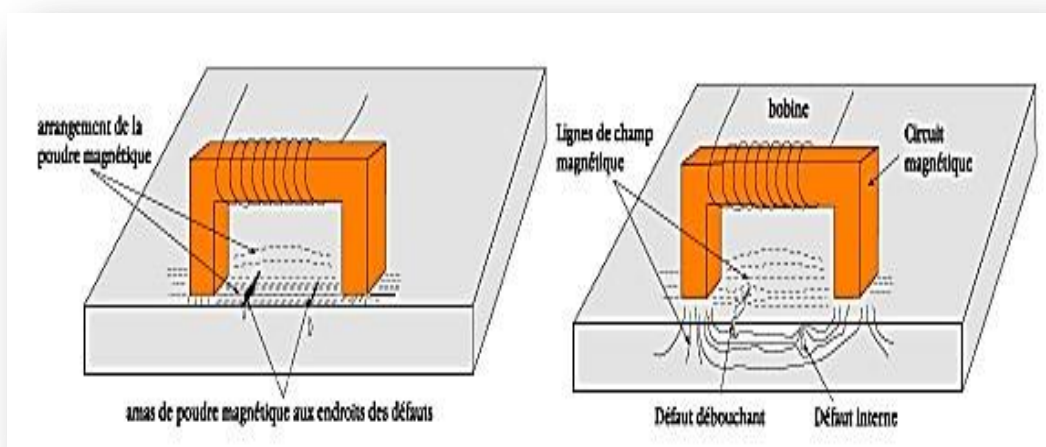


Figure I. 2 Contrôle par magnétoscopie, [12].

### I.2.4 Radiographie

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale : elle consiste à faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, comme les rayons X ou les rayons  $\gamma$ , la matière à inspecter. Lors de leur passage à l'intérieur de la pièce, les photons voient leur énergie absorbée totalement ou partiellement par la matière, selon sa densité. Un film placé derrière la pièce est irradié par les photons qui ont encore suffisamment d'énergie. Il récupère ainsi le radiogramme, où les zones avec des défauts sont représentées par une variation de la densité optique la Figure (I.4) montre le principe de la radiographie, [11].

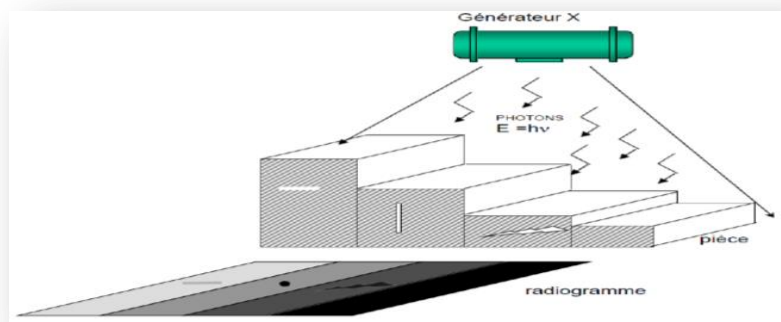
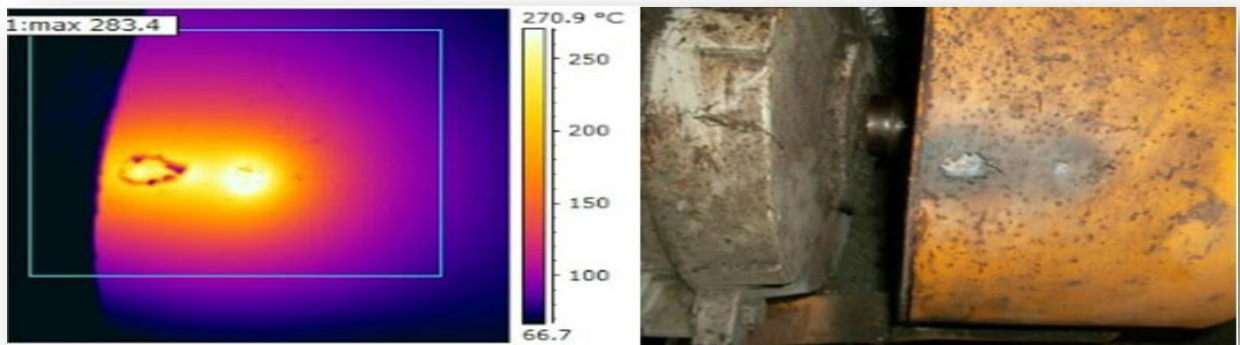


Figure I. 3-Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut, [11].

### I.2.5 Thermographie

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

Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple), la figure ci-dessous donne un aperçu du principe figure (I.5),[10].



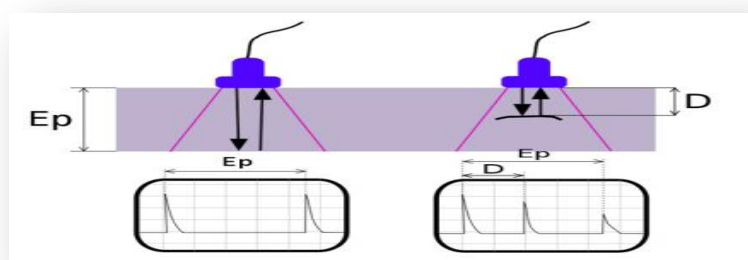
**Figure I. 4** -Détection par thermographie, [10].

Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique, [2].

### I.2.6 Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui 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 se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce) [13].

Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises, (figur I.6).



**Figure I. 5**-Principe des ultrasons, [13].

### I.2.7 CND par courants de Foucault

Ce type de contrôle s'effectue en excitant par un champ magnétique variable la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation par un défaut des courants induits dans la pièce va se traduire par une modification de l'impédance vue aux bornes du capteur. En agissant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobines, plusieurs contrôles peuvent être réalisés.

➤ *Principe de fonctionnement du CND par courants de Foucault*

Le contrôle par courant de Foucault est l'une des méthodes les plus privilégiées parmi les méthodes électromagnétiques de CND. Cette méthode ne s'applique qu'aux pièces électriquement conductrices et s'adapte très bien aux pièces cylindriques (barres, tubes,...), [15].

Le principe de cette méthode consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps à l'aide d'une bobine (excitatrice) parcourue par un courant électrique variable, ce qui va créer des courants induits dans la pièce à contrôler, la trajectoire de ces courants sera perturbée soit par la géométrie soit par les caractéristiques internes de la pièce.

Ces courants vont créer à leur tour un champ magnétique qui va s'opposer au champ initial d'excitation (loi de Lenz) et le champ résultant sera fonction des paramètres physiques et géométriques de la cible.

Une mesure directe de ce champ ou d'une de ces grandeurs dérivées (tension, impédance...etc.) permettra de caractériser la cible. La figure ci-dessous donne un aperçu du principe, (Figure I.7), [6],[7],[13],[15],[18].

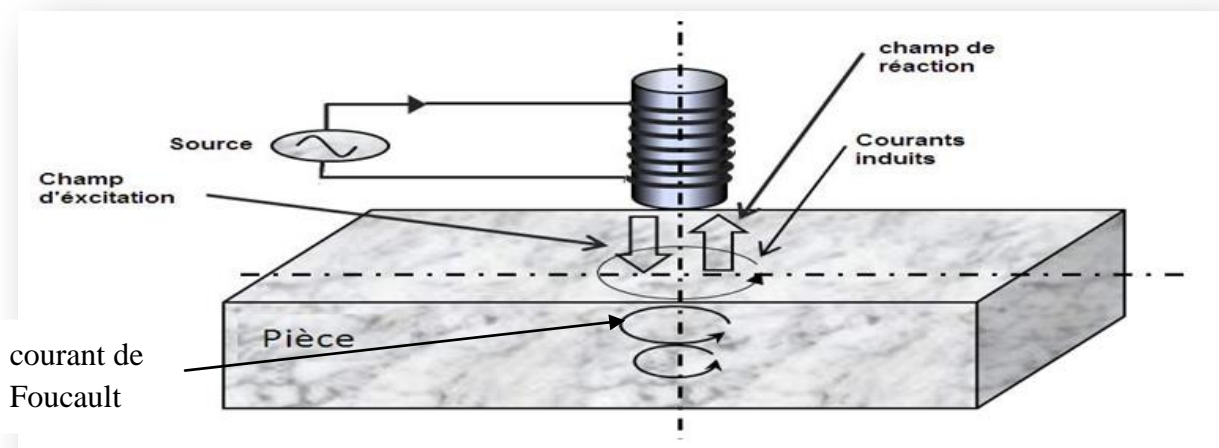


Figure I. 6- Principe du CND-CF, [15].

Les courants de Foucault se développent principalement sur la surface de la pièce à contrôler. Leur densité décroît rapidement à l'intérieur de la cible (effet de peau) , [9],[8],[21],[27].

### I.3 Synthèse comparative des techniques utilisées en CND

Le tableau I.1 donne un aperçu global des différents procédés les plus utilisés en CND, il englobe le principe physique, les défauts détectés, les domaines d'applications et enfin les principaux avantages et inconvénients:

**Tableau I. 1** -Comparaison des procédés de CND les plus connus.

<b>Procédé</b>	<b>Principe physique</b>	<b>Défauts détectés</b>	<b>Domaines d'application</b>	<b>Principale avantages</b>	<b>Principale inconvénients</b>
<b>Visuel</b>	Vision direct ou assistée des défauts	Détection des défauts superficiels et aspect	Contrôle industriel en ligne, bandes de tôle, verre, plastique ou produit en grande série	Simple et il peut être assisté par un réseau de caméra, point commun avec d'autre procédé	Limitation de la vision humaine, l'assistance des caméras pour les productions en grande série est obligatoire
<b>Ressuage</b>	Imprégnation, nettoyage de surface, application d'un révélateur	Détection de défauts superficiels	Applicable à tous les matériaux non poreux et ne présentant pas une trop grande rugosité	Simple à mettre en œuvre, application globale aux pièce, complète la détection visuelle	Examen lent, d'où coût élevé, précaution d'hygiène à l'emploi des produits émulsifs
<b>Flux de fuite magnétique</b>	Accumulation de poudre	Défauts débouchant fins	Matériaux ferromagnétiques (aciers)	Très sensible	Applicable uniquement aux matériaux ferromagnétiques
<b>Ultrasons</b>	Perturbation d'une onde Échographie	Défauts internes Défauts débouchant	Tous les matériaux, même en domaine médical	Inspection en profondeur, résultats immédiats	Coûteuse, difficile pour les très petites pièces
<b>Radiographie</b>	Atténuation d'un flux de rayons X ou $\gamma$	Défauts internes	Tous les matériaux	Fiabilité, profondeur importante d'examen, résultats archivables	Protection du personnel, coût élevé, interprétation difficile
<b>Courants de Foucault</b>	Perturbation des courants induits	Défauts débouchant ou sous cutanés	Applicable aux matériaux conducteurs et ferromagnétiques	Sensible, sans contact, automatisation aisée même à température élevée	Valable aux matériaux conducteurs, difficile à automatiser

## **I.4 Capteurs inductifs pour CND à courants de Foucault**

### **I.4.1 Définition d'un capteur**

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique (information entrante) une autre grandeur physique de nature différente (la plus part du temps, électrique). Cette grandeur, représentative de la grandeur prélevée, est utilisable à des fins de mesure ou de commande Description, [24].

### **I.4.2 Principe des capteurs inductifs**

Un capteur inductif est constitué d'une bobine parcourue par un courant variable dans le temps, génère des courants induits dans les objets métalliques apportés à proximité de ce capteur. Ces courants créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur modifient ainsi l'impédance du capteur. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour le contrôle. En effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques des objets considérés, et bien entendu des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage). On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants induits, puisse engendrer une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation,[2].

### **I.4.3 Classification des capteurs**

Le capteur est une bobine ou un ensemble de bobines, il sert à générer les courants de Foucault ainsi qu'à capter leurs effets. La grandeur mesurée est l'impédance ou une différence de potentiel représentant l'image des courants de Foucault. La forme du capteur, sa position relative au matériau, sa fonction et sa conception varient en fonction de son utilisation. Il peut être classé en fonction de trois caractéristiques : sa position, sa fonction et sa mode de contrôle, [19].

#### ***I.4.3.a Capteur caractérisé par sa position***

##### **➤ capteurs encerclant**

Cette disposition est destinée au contrôle au défilé des produits longs de forme simple et de diamètre modeste tels que les fils, barres et tubes Figure (I-8). Les bobines sont immobilisées et protégées dans une pièce moulée dont l'alésage doit être de diamètre très peu supérieur à celui du produit, afin d'obtenir un coefficient de remplissage le plus voisin possible de l'unité. Cette condition

est nécessaire pour avoir une bonne sensibilité de détection sans avoir à utiliser un taux d'amplification trop fort apportant une dégradation du rapport signal/bruit, [26].

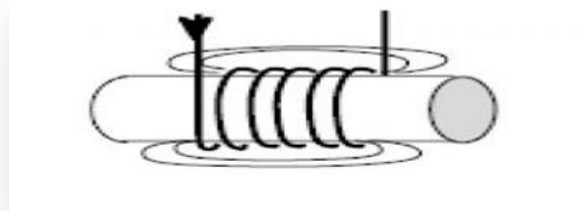


Figure I. 7- Capteur encerclant, [26].

#### ➤ Sonde interne

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau (Figure I-9) , [27].

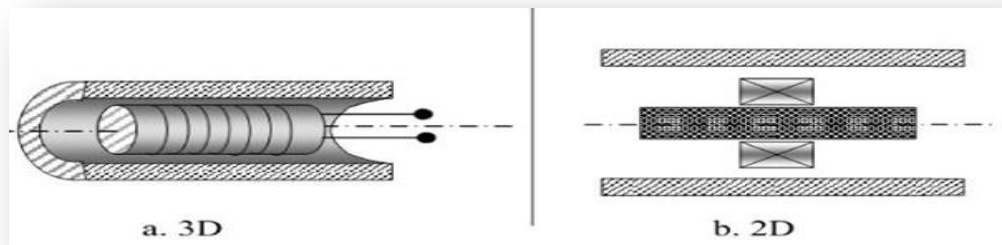


Figure I. 8- Bobine interne glissante avec noyau, [27].

#### ➤ Le palpeur ou la bobine ponctuelle

C'est un capteur destiné à l'examen local de la pièce à partir de Sa surface sur laquelle il peut se déplacer avec deux degrés de liberté. Il s'agit d'une petite bobine qui peut être placée sur, ou à proximité de la surface de la pièce. Elle analyse une zone quasiment égale à l'aire de Sa section transversale. Elle permet donc une inspection locale de la pièce et elle peut atteindre des régions d'accès réputées difficiles. Dans le cas d'examen d'une surface importante, elle nécessite un balayage méthodique de la surface de la pièce , (Figure I-10) , [28].

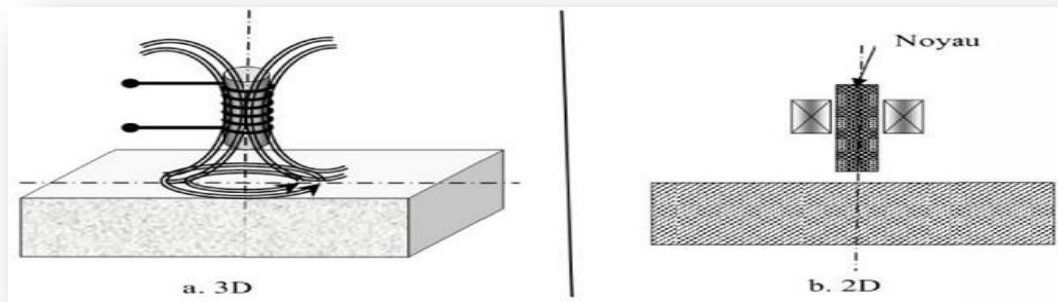


Figure I. 9-Bobine interne glissante avec noyau, [28].

### ➤ Sonde plate

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large (figure I-11) , [15].

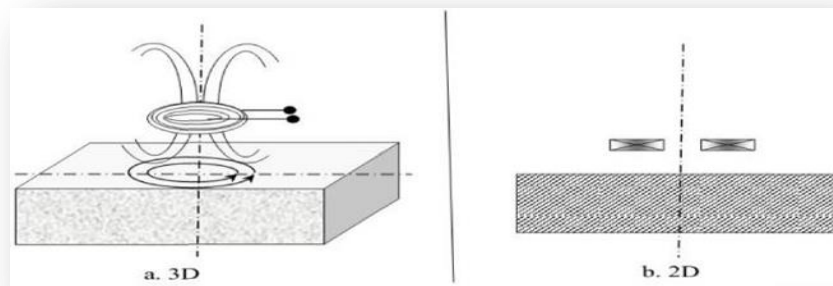


Figure I. 10 - Bobine plate. [15].

### ➤ Sonde interne tournante

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube (Figure I-12), [10] , [15].

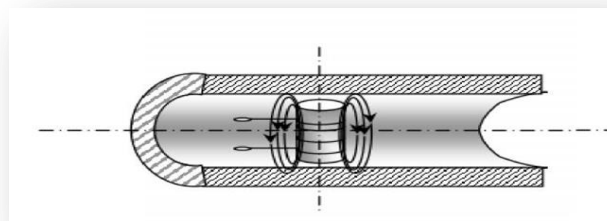


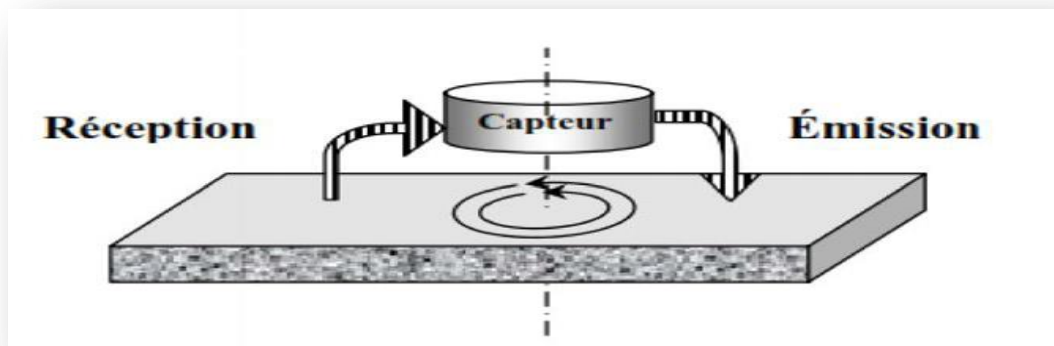
Figure I. 11-Capteur interne tournant, [15].

### ***I.4.3.b Capteur caractérisé par sa fonction***

Le capteur peut être caractérisé par sa fonction. On distingue deux types de capteurs : capteur à double fonction et capteur à fonction séparées.

#### **➤ Capteurs à double fonctions**

il est constitué d'une seule bobine émettrice-réceptrice qui crée le flux alternatif grâce au courant qui la parcourt et subit des variations d'impédance que l'on peut détecter en mesurant très finement sa signal de sortie (Figure I-13), [10],[30].



**Figure I. 12** -Capteur à double fonction, [30].

#### **➤ Capteurs à fonctions séparées**

Dans ce cas, le capteur contient au moins deux éléments, une bobine pour l'émission d'un champ alternatif et une autre bobine ou un capteur de champ magnétique pour la réception de la réponse de la pièce examinée. Dans le cas où le récepteur est une bobine la grandeur mesurée est la force électromotrice (f.e.m) induite aux bornes de celle-ci (Figure I-14) , [10],[30],[34].

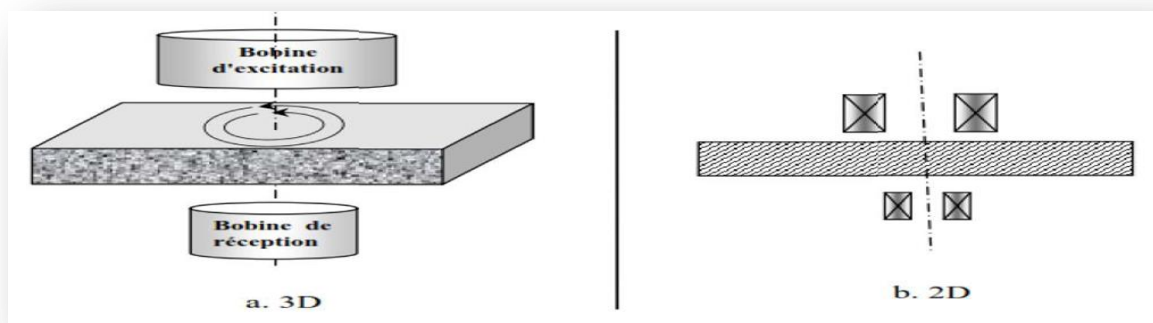


Figure I. 13- Capteur à fonction séparée, [30].

#### 1.4.3.c. Classification par mode de contrôle

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

##### ➤ Capteur en mode absolu

Un capteur absolu est destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit à examiner par rapport à une référence fixe. Le signal récupéré par la bobine est très faible en comparaison au signal émis. C'est pourquoi on utilise, en contrôle par courants de Foucault, une mesure comparative. La méthode absolue utilise un capteur à double fonction et la mesure se fait par comparaison du signal reçu à une référence artificielle électronique.

Ce mode de mesure permet d'accéder simultanément aux grandeurs utiles et perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau à tester) , [10][30][34].

##### ➤ Capteur en mode différentielle

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

Le schéma de la figure (I.15) montre la mesure par un pont d'impédance, [8].

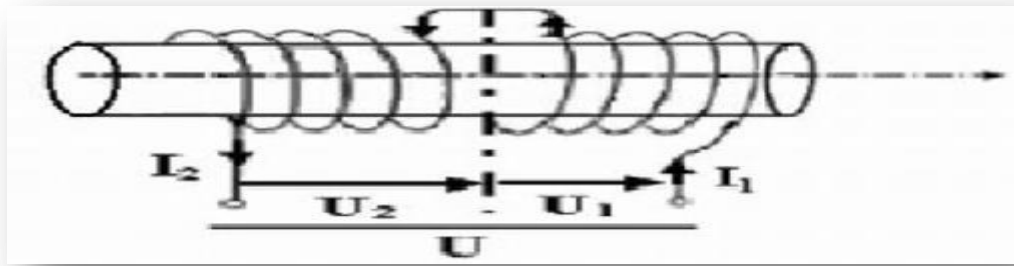


Figure I. 14- Mode différentiel.

#### I.4.4 Exemples de capteurs

Selon les besoins, il existe plusieurs types de capteurs, on cite à titre d'exemple : capteur de lumière, de sons, de température, de pression, de débit, de niveau,...etc. La figure (I.16), présente quelques exemples de capteurs, [5],[25]:

- a : capteur de fin de course,
- b : capteur de niveau de liquide,
- c : capteur d'humidité,
- d : détecteur de choc,
- e : capteur de proximité à ultrasons,
- f : détecteur de gaz.



Figure I. 15- Quelques exemples de capteurs, [25].

## I.5 Conclusion

*Dans ce chapitre nous avons décrit les principes des techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie et enfin le procédé des courants de Foucault.*

*Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients. Il n'y a pas de technique de CND qui soit valable pour tous les matériaux et tous les défauts , le choix d'une technique dépend de plusieurs facteurs, nature (conducteur ou isolant), dimensions et état de surface du matériau à contrôler, type de défaut débouchant, sous cutané ou interne, le but du « CND» soit recherche de défaut ou caractérisation des pièces à contrôlées, mesure d'épaisseur....*

*Le capteur inductif est l'élément de base du CND -CF pour la détection des défauts sur des matériaux conducteurs, nous avons consacré la dernière partie à ces capteurs.*

*Comme la résolution des problèmes directs de l'électromagnétisme en CND-CF se fait par les méthodes analytiques ou numériques fera l'objectif du prochain chapitre systèmes CND-CF.*

*Chapitre II*  
*Modélisation du Contrôle non Destructif par*  
**Courants de Foucault**

## Chapitre I Modélisation du Contrôle Non Destructif par CF

### I.1 Introduction

*Dans le domaine du CND par CF, la modélisation numérique est devenue, grâce à la performance du matériel informatique, un outil majeur dans la conception des sondes et dans l'étude des performances de détection des systèmes. De manière générale*

*La modélisation du CND par CF est basée sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la complexité de la configuration à simuler, la résolution peut être analytique ou numérique. La résolution analytique des équations de Maxwell présente l'avantage d'être rapide et permet d'obtenir des résultats très précis.. Cependant, la complexité des configurations de CND par CF fait qu'une solution analytique est souvent impossible à obtenir. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques permettant d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées, comprenant des géométries quelconques de pièces, de défauts et de capteurs. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer la méthode des différences finies, la méthode des éléments de frontières, la méthode des intégrales de volume. La plus répandue des approches numériques est celle des Éléments Finis (EF).*

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

*Nous commencerons ce chapitre par décrire brièvement le problème à résoudre et les équations de Maxwell ainsi que les conditions aux limites associées. Ensuite, nous présenterons les différentes formulations magnétiques utilisables pour un tel problème, puis la formulation utilisée pour réaliser notre modèle 3-D,[31].*

### I.2 Modélisation du dispositif de CND par CF

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le système représenté sur la figure (II.1) . Un matériau, constituant la pièce critique et contenant la fissure, est soumis à l'action d'un champ électromagnétique produit par une bobine représentant un capteur CF où une densité de courant variable dans le temps est imposée (Figure II. 1) ,[3],[10],[16],[25] .

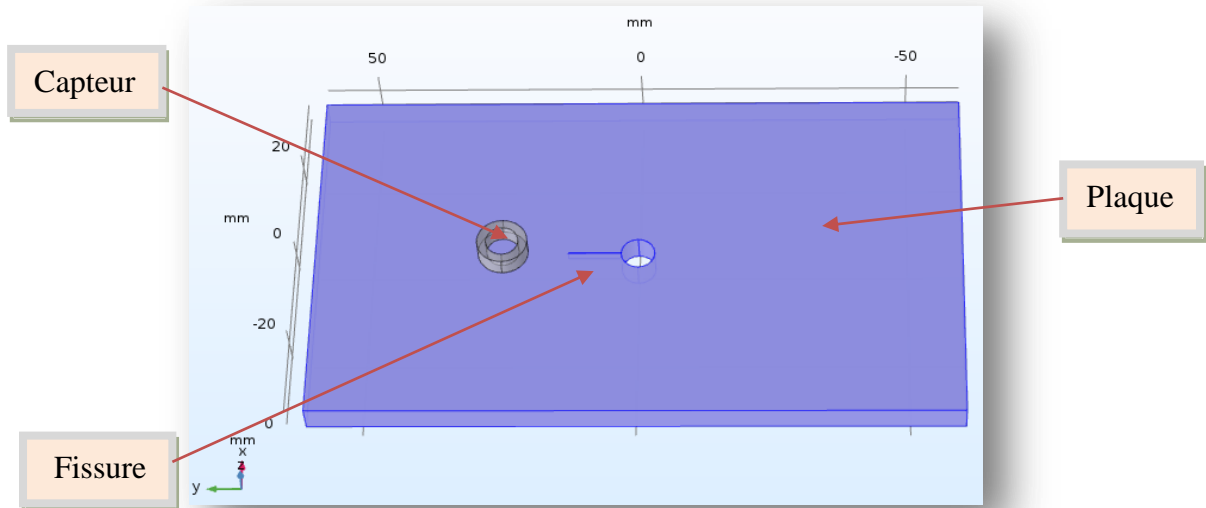


Figure II. 2-Système capteur-fissure.

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

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

La modélisation de ces dispositifs peut être ramenée, dans le cas général, à un problème magnétodynamique type comme indiqué sur la **figure (II.2)**. L'ensemble de ce système forme le domaine de calcul  $\Omega$  de frontière  $\Gamma$ , [1],[10],[16],[25].

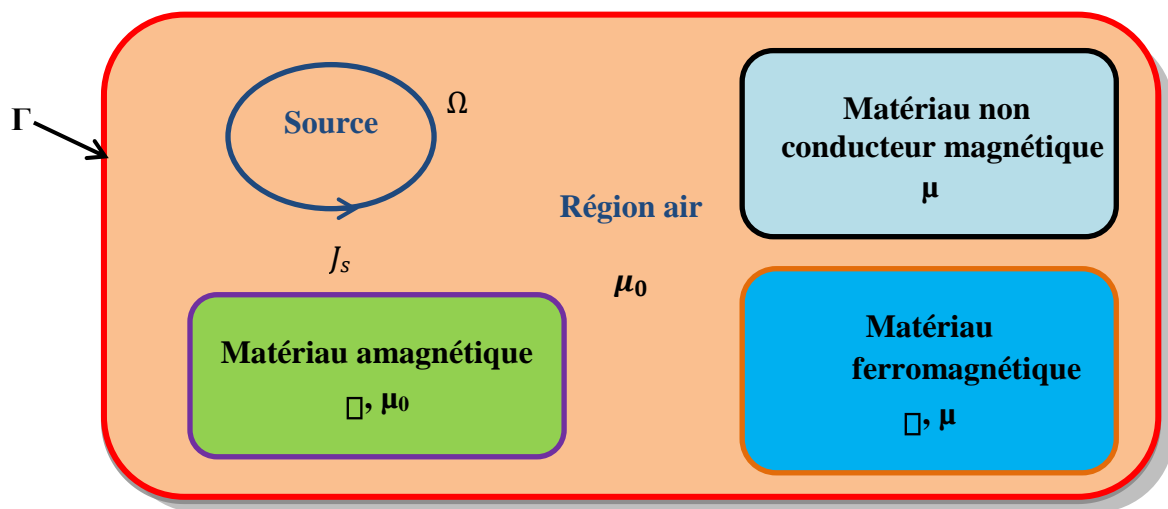


Figure II. 3- Cas général, d'un problème magnétodynamique, [1].

## I.3 Mise en équations

### I.3.1 Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont l'expression la plus généralisée des lois de l'électromagnétisme classique. Elles constituent le modèle général de description du comportement et des interactions des champs électriques et magnétiques, et les équations s'écrivent ,[3],[10],[16],[25] ,[32],[33] :

La Loi de Faraday :

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

La loi de Maxwell-Faraday :

$$rot \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

Loi de conservation du flux :

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

Les lois de Gauss :

$$\text{div } (\vec{D}) = \rho \quad (\text{II.4})$$

$\vec{E}$  : Champ électrique [V/m].

$\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m].

$\rho$  : Densité volumique des charges électriques [C/m<sup>3</sup>].

$\vec{B}$  : Induction magnétique [T].

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

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

### I.3.2 Lois constitutives

Les équations précédentes sont associées aux relations constitutives (lois de comportement) des matériaux.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.6})$$

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

$\mu$  : Perméabilité magnétique [H/m].

$\sigma$  : Conductivité électrique [S/m].

$\varepsilon$  : Permittivité électrique [F/m].

$\vec{B}_r$ : Induction magnétique rémanente [T] .

### I.3.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites (spatiales) s'énoncent de façon générale pour un domaine  $\Omega$  de frontière  $\Gamma$  avec  $\vec{n}$  un vecteur normal (unitaire) à  $\Gamma$  pour la variable  $u$ .

- Conditions de Dirichlet homogène  $\mu \cdot \vec{n} = 0$ ,
- Conditions de Neumann homogène  $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ .

### I.3.4 Conditions de continuité

Lors du passage d'un milieu 1 à un milieu 2 figure (II.3), les grandeurs de champs subissent des discontinuités aux interfaces et, ne sont pas différentiables,[3],[10],[16],[25].

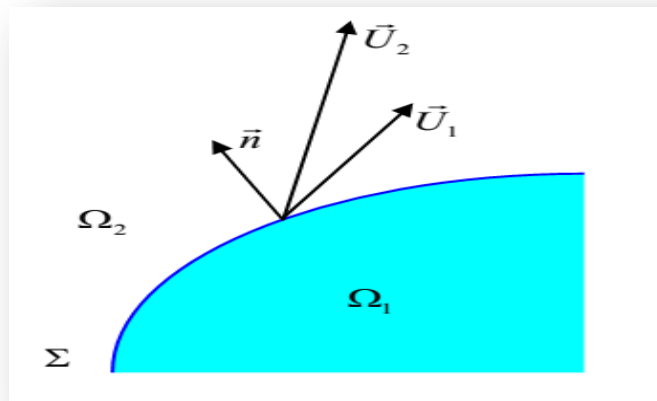


Figure II. 4- Interface entre deux milieux, [3].

Les relations entre les grandeurs électromagnétiques à l'interface, dites relations de transmission, s'écrivent alors ,[3],[10],[16],[25]:

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_{sur} \quad (\text{II-8})$$

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II-9})$$

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{J}_{sur} \quad (\text{II-10})$$

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = \vec{0} \quad (\text{II-11})$$

Où

$\rho_{sur}$  est la densité surfacique de charge,  $\vec{J}_{sur}$  la densité surfacique de courant et  $\vec{n}$  le vecteur

### I.3.5 Conditions de Jauge

La milieu 1 Dans les équations de Maxwell, les champs s'expriment soit à un gradient près (champ rotationnel), soit au rotationnel près (champ à divergence) ce qui justifie l'utilisation des jauges dans certaines formulations pour assurer l'unicité de la solution. Soient  $\vec{U}$  et  $\vec{W}$  deux champs de vecteurs, les conditions de jauge s'écrivent de façon générale par,[3],[10],[16],[25] :

$$div \vec{U} = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb} \quad (\text{II-12})$$

$$div \vec{U} + K \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz} \quad (\text{II-13})$$

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \quad \text{Jauge adapté pour les éléments d'arêtes} \quad (\text{II-14})$$

Par exemple, lorsqu'on utilise une formulation en potentiel vecteur, la solution est obtenue à un gradient près. La jauge de Coulomb s'écrit donc :  $div \vec{A} = 0$  normal à la surface de séparation des deux milieux  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  et dirigé vers l'extérieur.

### I.3.6 Hypothèses simplificatrices

La plupart des travaux accomplis jusqu'à présent dans le domaine de calcul des champs et des courants de Foucault pour les systèmes électromagnétiques, sont fondés sur les hypothèses suivantes,[3],[10],[16],[25]:

Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$  Approximation des Régimes Quasi Stationnaires (ARQS).

Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité  $\sigma \vec{E}$  peut être décomposée en une partie imposée  $\vec{J}_s$  (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit, pour laquelle on gardera la notation  $\sigma \vec{E}$  qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II-15})$$

la densité volumique de charge est considérée comme nulle.

généralement, le courant n'existe qu'en volume ( $\vec{J}_{sur} = \vec{0}$ ), c'est-à-dire que la conductivité est finie et que la fréquence d'excitation n'excède pas quelques MHz (basses fréquences). Par conséquent, la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique aux interfaces où la perméabilité subit une discontinuité est assurée:

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{0} \quad (\text{II-16})$$

l'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ( $\vec{B}_r = \vec{0}$ ) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanente  $\vec{E}$  nt.

Avec ces hypothèses, les équations à résoudre sont :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II-17})$$

$$\text{rot} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-18})$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II-19})$$

Avec les relations constitutives qui deviennent :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II-20})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II-21})$$

### I.3.7 Champs et potentiels

Les champs de vecteurs  $\vec{E}, \vec{B}$ ,  $\vec{H}, \vec{J}$  peuvent eux-mêmes s'écrire en fonction de potentiels vecteurs ou scalaires, [3], [10],[16],[25]:

$$\vec{H} = \vec{T} - \text{grad}\phi \quad (\text{II-22})$$

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (\text{II-23})$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad}v \quad (\text{II-24})$$

$$\vec{J} = \text{rot}\vec{T} \quad (\text{II-25})$$

Avec :

$\vec{T}$ : Potentiel vecteur électrique [A/m],

$\vec{A}$ : Potentiel vecteur magnétique [Wb/m],

$v$ : Potentiel scalaire électrique [V],

$\phi$ : Potentiel scalaire magnétique [A].

## I.4 Méthodes de résolution

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles, décrites précédemment.

### I.4.1 Méthodes analytiques

Les premiers travaux se sont basés sur des méthodes de résolution analytiques des équations issues des modèles à une seule dimension. Pour les modèles bidimensionnels, la solution analytique peut s'avérer très complexe même si pour des géométries simples, on peut trouver des solutions exactes à partir de la méthode de séparation des variables. Dans des cas particuliers, ces méthodes sont des références de validation pour le reste des autres méthodes,[9],[20],[21],[22].

### I.4.2 Méthodes semi analytiques

Ce sont des méthodes mixtes, qui sont une combinaison de méthodes analytiques couplées à des méthodes numériques. Ces méthodes ne sont appliquées que pour résoudre certains types

de problèmes. Cette approche nous permet d'obtenir des expressions analytiques faciles à résoudre et de réduire le temps de simulation tout en ayant des résultats assez proches de la réalité.

Pour la simulation du contrôle non destructif, nous avons choisi d'utiliser la méthode des grandeurs électromagnétiques couplées. Le modèle développé sur la base de circuits couplés est proposé dans le domaine du chauffage par induction par Delage et Ernest . L'inducteur et la charge sont discrétisés en spires concentriques à l'intérieur desquelles la densité de courant **est** supposée constante. L'ensemble ainsi défini forme un réseau de résistances, d'inductances et de mutuelles couplées qui est représenté par un système d'équations analytiques. La résolution numérique de ce système permet de donner la valeur de la différence de potentiel aux bornes de la bobine ainsi que la répartition de la densité de courant dans l'ensemble du système. On peut ainsi connaître la valeur de l'impédance de la bobine, puis évaluer la valeur de la puissance injectée dans la charge. Cette méthode a été appliquée pour la première fois dans le domaine du contrôle non destructif par courant de Foucault par Mouche . Le modèle est ensuite étendu au cas d'un inducteur muni d'un pot en ferrite en introduisant le principe des courants fictifs sur le contour du noyau, [14],[23].

### **I.4.3 Méthodes numériques**

Avec l'évolution de l'outil informatique, l'utilisation des méthodes numériques pour la résolution de cette catégorie d'équations se généralise de plus en plus. Les méthodes numériques les plus connues sont,[16],[17],[18]:

#### *II.4.3.a. Méthode des différences finies (MDF)*

La méthode des différences finies est relativement simple de mise en œuvre, mais présente l'inconvénient d'avoir une faible qualité d'approximation des variables et l'incapacité de modéliser des géométries de forme complexe. Par ailleurs, elle exige un schéma de maillage très fin, qui peut ainsi se traduire par un coût de calcul prohibitif. La méthode est basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences. Le domaine d'études est découpé au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrite pour chaque nœud du maillage. La méthode est difficilement applicable aux domaines à géométrie complexe, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières régulières tels que les carrés et les rectangles. Modélisation du problème électromagnétique, [16], [17], [18].

#### *II.4.3.b. Méthode des éléments finis (MEF)*

Sans doute ce sont les éléments finis qui occupent une grande place dans la modélisation. Contrairement à la MDF, les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes, ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul par la prise en compte de différents types de fonctions d'interpolations des variables. La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. La méthode conduit à des systèmes algébriques de grande taille, et par conséquent nécessite une mémoire importante des calculateurs. L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important, [16],[17],[18].

#### *II.4.3.c. Méthode des intégrales de frontières (MIF)*

Lorsqu'on utilise la MDF ou la MEF, on calcule les variables inconnues dans tout le domaine. La MIF permet de ramener le maillage à la frontière du domaine, elle ne nécessite pas un maillage volumique ni des matériaux ni de l'espace. Ainsi, le calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. Pour ramener le problème sur les frontières, la MIF utilise le théorème d'Ostrogradski-Green. Cette méthode peut être intéressante pour l'étude des structures tridimensionnelles ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. Cependant, cette méthode a l'inconvénient de conduire à un système algébrique à matrice pleine sans termes nuls. Ceci augmente le temps utilisateur, donc le coût de calcul, [16],[17],[18].

#### *II.4.3.d. Méthode des volumes finis (MVF)*

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation utilisée en particulier en mécanique des fluides. La méthode des volumes finis a connu un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie : transfert thermique, électromagnétisme ...etc. La méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude  $\Omega$  en volumes élémentaires (tétraèdres, hexaèdres, prismes...etc.) de telle manière que chaque volume entoure un nœud. L'équation EDP du problème est intégrée sur un volume

élémentaire. Afin de calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, ...etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Par rapport aux éléments finis,[16],[17],[18].

## II.5 Modélisation mathématique du système

Tous les phénomènes d'électromagnétismes variables dans le temps et dans l'espace dans nos études des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell suivantes ,[3],[10], [16], [25]:

Loi de Maxwell Faraday (induction)

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-26})$$

26)

Loi de Maxwell Gauss (électrique)

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho \quad (\text{II-27})$$

Loi de Maxwell Ampère

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II-28})$$

Loi de Maxwell Gauss (magnétique)

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

$\vec{E}$ [V/m] et  $\vec{H}$ [A/m]: Champ électrique et magnétique.

$\vec{D}$ [A.s/m] et  $\vec{B}$ [T]: Induction électrique et magnétique.

$\vec{j}$ [A/m<sup>2</sup>] et  $\rho$ [C/m<sup>3</sup>]: Densité du courant et la charge volumique.

Tel que :

$$\vec{j} = \overrightarrow{J_{ind}} + \overrightarrow{J_{exi}} \quad (\text{II-29})$$

$\overrightarrow{J_{ind}}$ : La densité de courant induit.

$\overrightarrow{J_{exi}}$ : La densité de courant d'excitation.

Ces équations sont liées entre eux par les lois constitutives qui traduisent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considéré sont,[3],[10], [16], [25]:

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad (\text{II-30})$$

$\mu$ [H/m]: Perméabilité magnétique.

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

$\mu_r$  : Perméabilité magnétique relative du milieu.

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \end{cases} \quad (\text{II-31})$$

$\varepsilon$ [F/m]: Permittivité diélectrique.

$\varepsilon_0 = 8.85.10^{-12}$ [F/m] : Constante diélectrique du vide.

$\varepsilon_r$ : Permittivité électrique relative du milieu.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II-32})$$

Ou  $\sigma$  [S.m<sup>-1</sup>] : Conductivité électrique.

Suivant les dispositifs que l'on étudie certains phénomènes deviennent négligeables, 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  $\sigma$  est de l'ordre de  $10^6 \text{ S.m}^{-1}$ , et  $\varepsilon_0$  de l'ordre de  $8.85.10^{-32} \text{ F/m}$  jusqu'à des fréquences qui avoisinent les MHz nous avons  $\omega. \varepsilon_0 \ll \sigma$  ce qui nous permet d'avoir [3],[10],[16], [25]:

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II-33})$$

La densité volumique de charge est considérée comme nulle ( $\rho = 0$ ).

Les paramètres  $\sigma, \mu, \varepsilon$  sont considérés linéaires, donc ils ne dépendent pas de la solution du système. Le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale. Toutes ces hypothèses considérées, le système d'équation devient, [3],[10],[16], [25]:

$$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-34})$$

$$div(\vec{D}) = 0 \quad (\text{II-35})$$

$$\overrightarrow{rot}(\vec{H}) = \vec{j} \quad (\text{II-36})$$

$$div(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II-37})$$

## II.6 Méthode des éléments finis (MEF)

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:

$$F(A) = \int_{\Omega} L. d\Omega \quad (\text{II-38})$$

L : est la fonction de Lagrange résultant de la convergence du système de type cinétique et de son énergie potentielle.

$$L = W_c - W_p \quad (\text{II-39})$$

$\Omega$  : est le domaine d'étude.

La résolution du problème variation défini par la fonction d'énergie revient à minimiser cette fonctionnelle. La minimisation s'effectue en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F}{\partial A_n} = 0 \quad (\text{II-40})$$

40)

$n$  : nombre de nœud dans le domaine d'étude.

$A$  : inconnue au nœud  $n$  du domaine.

## II.7 Calcul de l'impédance

Une fois les valeurs du potentiel vecteur magnétique tout nœud de la région maillé sont déterminées, l'impédance de la bobine qui est notre paramètre d'intérêt peut être calculée. Deux différentes approches couramment utilisées pour l'estimation de cette valeur, sont considérées : la méthode directe et la méthode de l'énergie,[2]:

### ➤ Méthode directe

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

$$Z = \frac{V}{I_s} \quad (\text{II-41})$$

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

$$V = - \iiint_C E \cdot dt \quad (\text{II-42})$$

A partir de l'équation :

$$E = -grad(V) - \frac{\partial A}{\partial x} \quad (\text{II-43})$$

En régime harmonique

$$\frac{\partial}{\partial t} = j \cdot \omega \quad (\text{II-44})$$

Nous avons :

$$E = -j\omega \cdot A - grad(V) \quad (\text{II-45})$$

De plus la tension induite est indépendante du potentiel scalaire ( $grad(V)=0$ ), en remplaçant (II.44) dans (II.41), nous aurons:

$$V = j\omega \iiint_C A dt \quad (\text{II-46})$$

A partir de l'équation (III.40) l'impédance de la bobine est donnée par:

$$z = \frac{jw}{I_S} \iiint_C A dt \quad (\text{II-47})$$

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

$$z = j \frac{2\pi.w.r.A}{I_S} \quad (\text{II-48})$$

L'impédance du capteur est composée de deux parties, partie réel qui est la résistance et une partie imaginaire, la réactance. L'impédance de la bobine est toutefois calculée de façon approximative en utilisant la méthode des éléments finis. Considérons l'échantillon de la bobine, discrétisé par éléments triangulaires. Si les dimensions de ces éléments sont petits alors le potentiel vecteur magnétique de toutes les spires couvertes par l'élément ( i ) peut être approximé par la valeur centrale  $c_i$  A et similaire les rayons de toutes les spires de l'élément, peuvent être approchés par la valeur centrale  $c_i$  r . A partir de l'équation (III.47) l'impédance pour chaque spire à l'intérieur de l'élément i est donnée par :

$$z = j \frac{2\pi.w.r.A}{I} \quad (\text{II-49})$$

Si  $N_s$  est le nombre total de spire de la bobine dans l'échantillon,  $N_t$  tours/m<sup>2</sup>, est la densité de spire de l'élément, et  $a_i$  la surface de l'élément, l'impédance totale de l'ensemble des spires dans l'élément (i) est donnée par

$$z = j \frac{2\pi w r c_i A c_i a_i N_t}{I_S} \quad (\text{II-50})$$

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

Donnée par:

$$z = j \frac{2\pi.w.N_t}{I} \sum_{i=1}^{N_S} a_i r c_i A c_i \quad (\text{II-51})$$

### ➤ Méthode de l'énergie

L'impédance d'une bobine peut être calculée à partir de l'énergie du système, puisque l'inductance et la résistance sont respectivement associées à l'énergie stockée et l'énergie dissipée dans le système. L'énergie stockée W dans le système peut être donnée par, [1]:

$$W = \frac{1}{2} \iiint_V B H . dv \quad (\text{II-52})$$

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

$$w = \frac{1}{2} V ( B_{ri}^2 + B_{zi}^2 ) V_i \quad (\text{II-53})$$

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

$$w = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} V ( B_{ri}^2 + B_{zi}^2 ) V_i \quad (\text{II-54})$$

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

$$L = 2 \frac{W}{I_s^2} \quad (\text{II-55})$$

Où  $I_s$  est le courant dans la bobine de la source.

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

$$P_i = \frac{J_i^2 V_i}{\sigma} \quad (\text{II-56})$$

Où  $J_i$  est la densité du courant induit définie par :

$$J_i = -jw\sigma A_i \quad (\text{II-57})$$

Où  $A_{ci}$  est la valeur du potentiel vecteur magnétique central pour l'élément (  $i$  ). Remplaçons l'équation (III.56) dans (III.54) et additionnons sur tous les éléments de la région du maillage, l'énergie dissipée total est donnée par:

$$P = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N V_{iw^2\sigma A_{ci}^2} \quad (\text{II-58})$$

La résistance de la bobine est donnée par:

$$R = \frac{P}{I_s^2} \quad (\text{II-59})$$

L'impédance de la bobine est défini par:

$$Z = R + jwL \quad (\text{II-60})$$

## II.8 Conclusion

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

*Dans ce chapitre, la modélisation des problèmes électromagnétiques liés aux équations de Maxwell dans le domaine CND-CF a été présentée, les différentes formulations en champ électrique et magnétique ont été illustrées, ainsi que les méthodes de résolution des problèmes direct ont été abordée. Il apparait que la méthode des éléments finis est la plus populaire pour la résolution des problèmes CND-CF. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du CND-CF dans le cas de pièce cylindrique et plate sous COMSOL multiphysics qui basé sur la méthode des éléments finis.*

**Chapitre III**  
**Résultats de Simulations**

## Chapitre III Résultats de Simulations

### III.1 Introduction

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

*La méthode par éléments finis est implémentée dans le logiciel COMSOL multiphysics. Ce logiciel est un outil de conception et de modélisation dont l'avantage principal est de ne pas être dédié à un domaine d'application particulier. Il rassemble un ensemble d'outils et une bibliothèque de modèles prédéfinis permettant la simulation de tout processus physique pouvant être décrit par des équations aux dérivées partielles (EDP), y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF.*

*Dans notre travail, nous nous intéresserons au CND-CF appliqué, en premier lieu, au cas de pièce plate conductrice d'électricité mais avec un alésage (emplacement pour un boulons) et un défaut débouchant à la surface de cette pièce*

*En second lieu nous étudierons aux pièces cylindriques conductrice, cette détection englobe les défauts internes d'où utilisation de capteurs internes (sondes) et défauts externes ce qui se traduit par l'utilisation de capteurs encerclant.. Nous terminerons avec une conclusion.*

### III.2 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.3

L'interface de COMSOL peut être séparée en quatre parties. A gauche, on retrouve le Model où il est possible de définir des variables et autres paramètres du problème (Parameters), le modèle (Model) où se retrouvent la géométrie (Geometry), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles de physique s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh). Le Modèle comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur (Study) et les options d'affichage et de post traitement des données (Results). La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans le Modèle, par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans Geometry. C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc. Les options



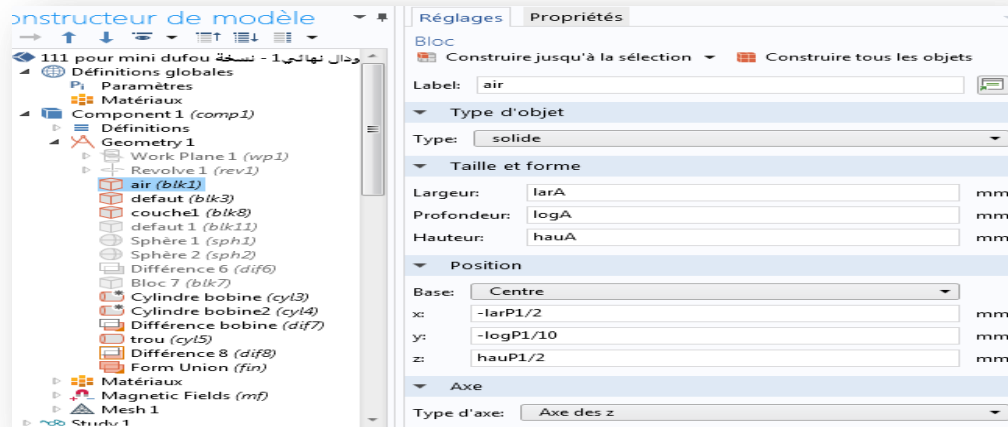


Figure III. 2 -Création du modèle géométrique..

Les caractéristiques géométriques du modèle de la plaque [35] sont donnés par les Tableau III.1,2 :

Tableau III. 1 Caractéristiques géométriques du modèle à plaque, [35]

	Coil		Halfspace		Crack
Inner diameter	6 mm	Conductivity	10 MS/m	Length	9.8 mm
Outer diameter	9.3 mm	Hole diameter	6.25 mm	Depth	2 mm
Length	4 mm			Opening	0.1 mm
Turns	336				
Lift-off	0.5 mm				

Tableau III. 2 Caractéristiques géométriques du modèle à plaque, [35]

	Plaque	Défaut	Domaine	Bobine
Hauteur	10 mm	2 mm	200 mm	4mm
Largeur	120 mm	9.8 mm	300 mm	
Profondeur	70 mm	0.1 mm	400 mm	
Rayon de bobine externe				4.65 mm
Rayon de bobine interne				3 mm
Conductivité	10[Ms/m]		45[s/m]	30e <sup>6</sup> [s/m]

### III.3.2 Vue 3D du modèle

La vue 3D est donnée par la figure suivante :

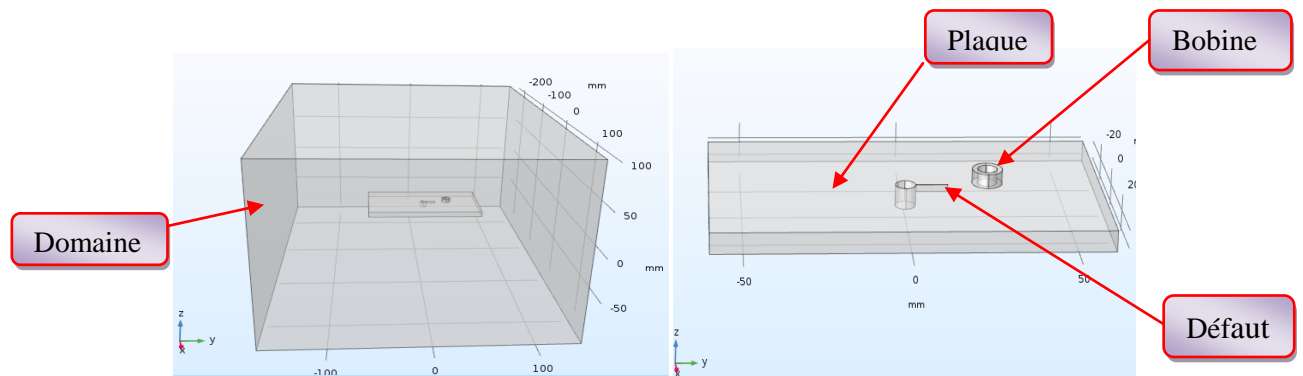


Figure III. 3 – Vue géométrique 3D de la plaque.

### III.3.3 Maillage de plaque

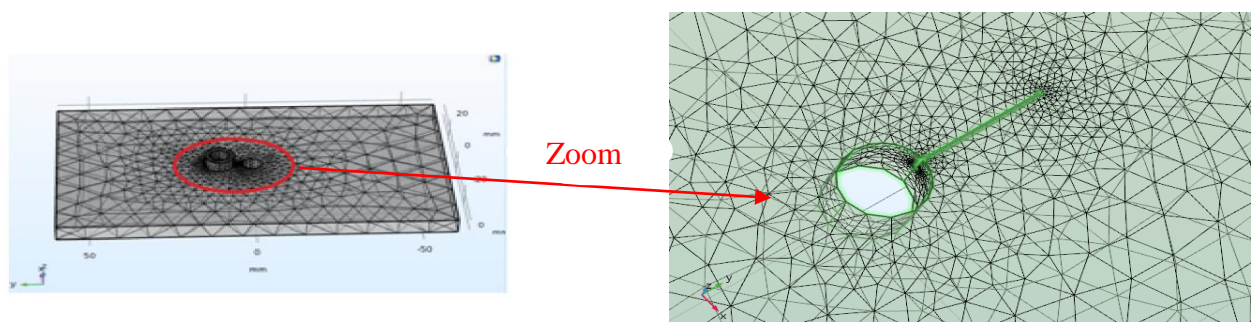


Figure III.4 -Zoom de Maillage de plaque.

### III.3.4 Résultats de simulation et interprétations

Afin de valider le modèle proposé, nous comparons nos résultats à ceux d’une référence dans ce domaine, à savoir une thèse de doctorat 2015, de Mr **Konstantinos Pipis** [35].

La fréquence utilisée set 470 Hz.

#### III.3.4.a Plaque à hauteur 10[mm] sans défaut

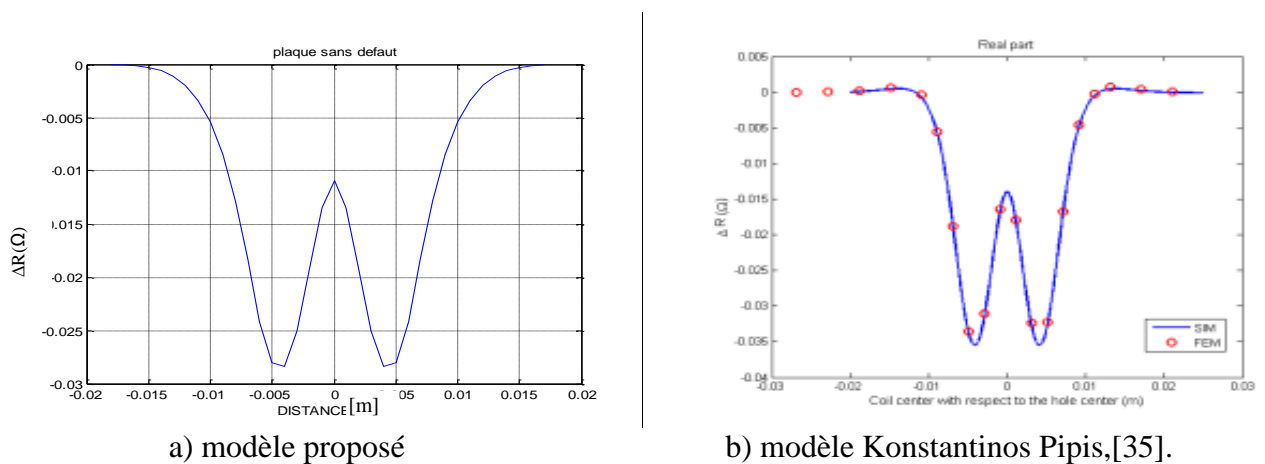
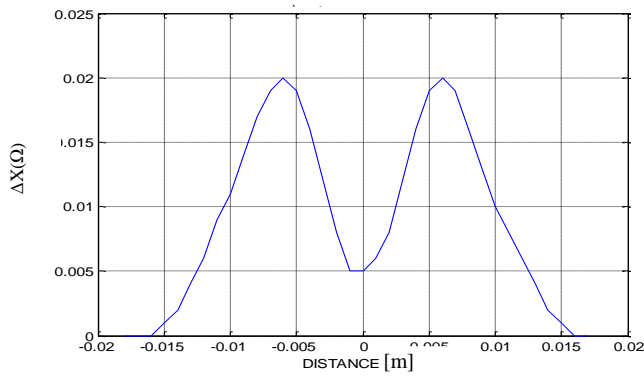
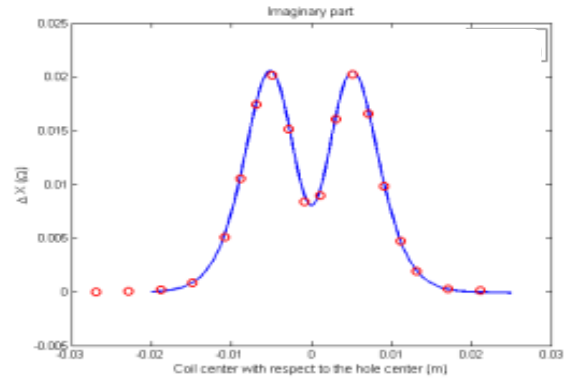


Figure III.5 -Variation de la Résistance en fonction du déplacement sans défaut.



a) modèle proposé



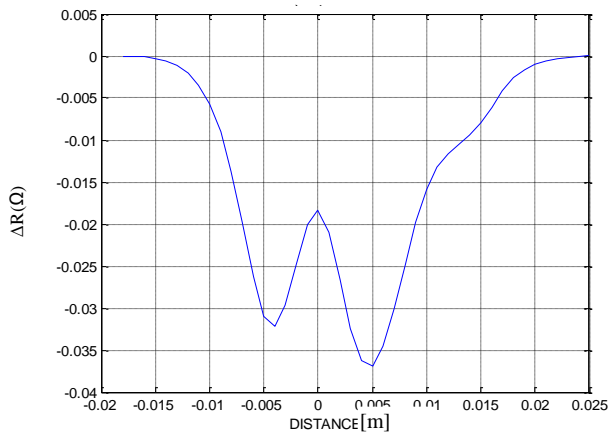
b) modèle Konstantinos Pipis,[35].

**Figure III.6** -Variation de la Réactance en fonction du déplacement sans défaut.

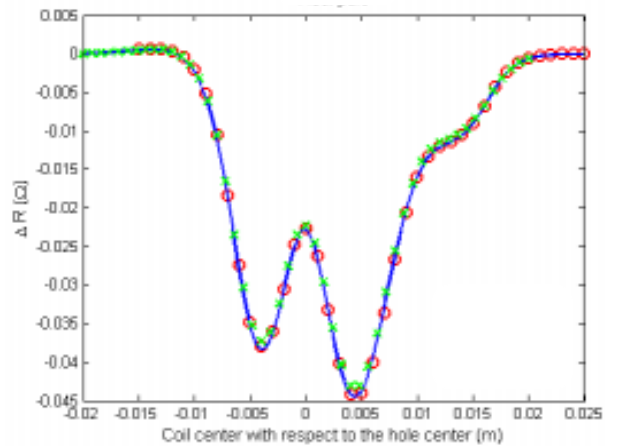
Les figures (III.5 et III.6) représentent la variation de l'impédance, de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance en fonction du déplacement de plaque à hauteur 10[mm] **sans défaut**.

On remarque les valeurs de résultats l'impédances de **simulation** (a) , sont presque les mêmes par rapport à ceux de **Konstantinos Pipis** (b), [35].

*III.3.4.b Plaque - hauteur 10[mm] - avec défaut*

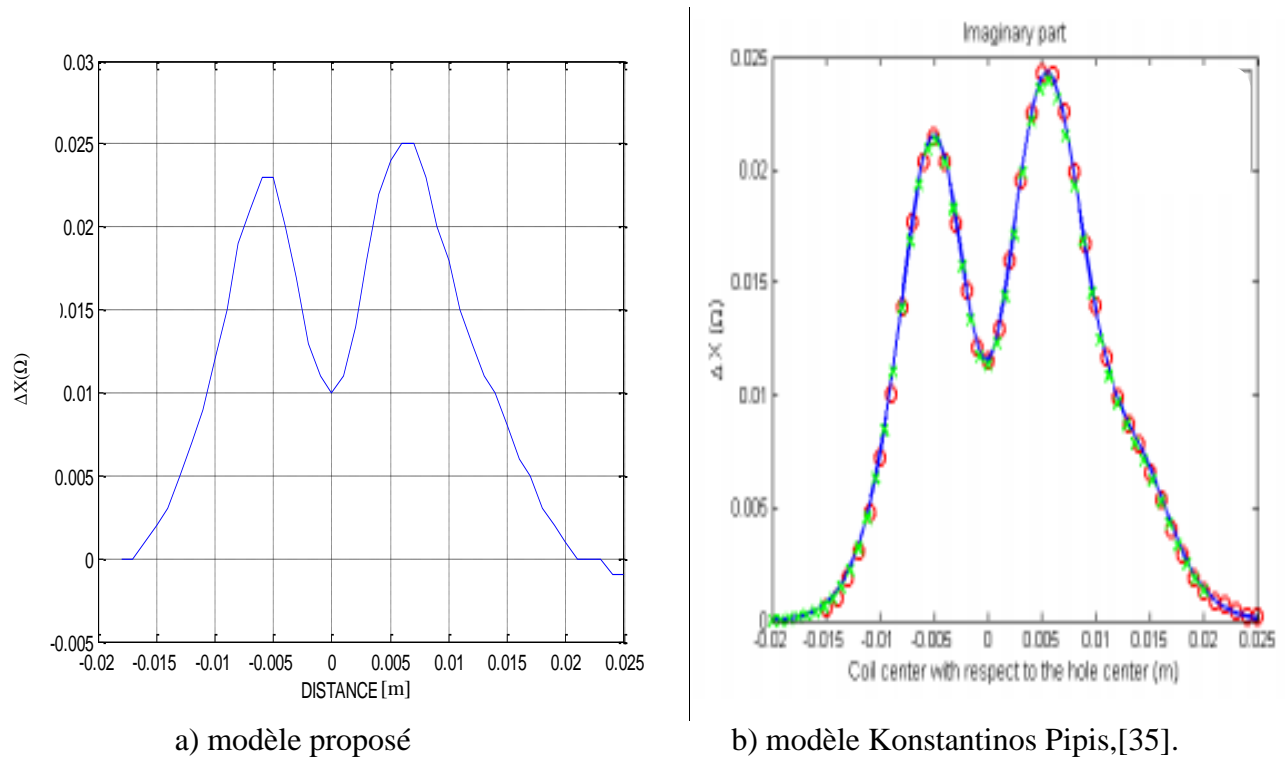


a) modèle proposé



b) modèle Konstantinos Pipis,[35].

**Figure III.7** Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut.



**Figure III.8** –Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut.

Les figures (III.7 et III.8) représentent la variation de l'impédance, de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance en fonction du déplacement de plaque à hauteur 10[mm] **avec défaut**.

On remarque qu'il y a similitude des résultats obtenus avec ceux de **Konstantinos Pipis** (b). **Donc on peut conclure qu'il y a validation du modèle, d'où possibilité d'entamer le reste des cas à simuler sur une base solide.**

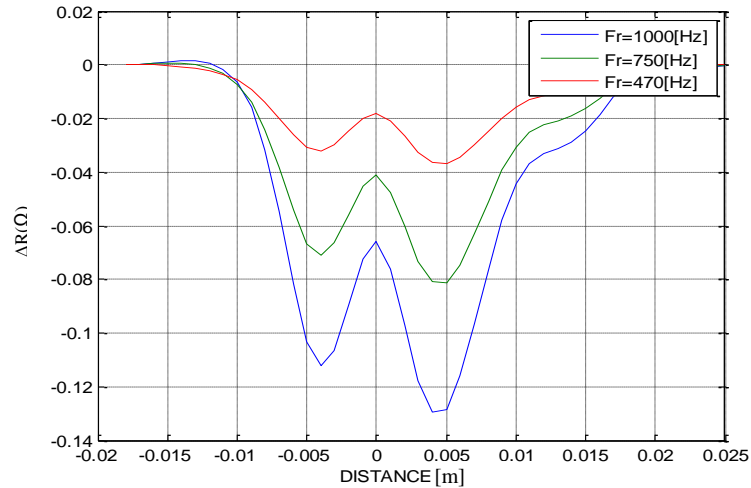
#### III.4.1 Vérifications des paramètres influant sur le CND-CF

Les paramètres influant sur le CND-Cf sont :

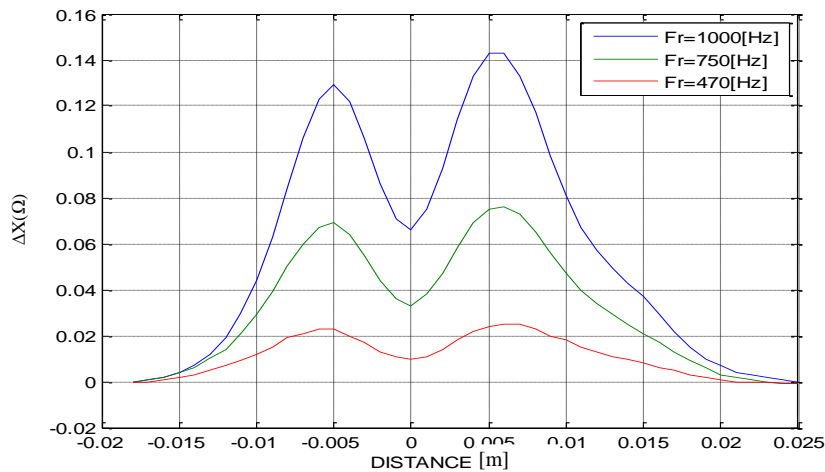
- la fréquence,
- les dimensions géométriques du défaut,
- le lift-off,
- la conductivité de plaque.

##### ➤ *Effet de la fréquence avec plaque de 10 mm d'hauteur*

Pour plaque à hauteur 10[mm] on fait varier la fréquence de : 470 ; 750 et 1000 Hz, Figure (III.9).



**Figure III.9** -Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de  $F_r$ ).



**Figure III.10** –Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de  $F_r$ ).

Les figures (III9 et III10) représentent la variation de l'impédance pour différentes valeurs de la fréquence  $F_r$ , de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance en fonction du déplacement de plaque à hauteur 10[mm] **avec défaut**.

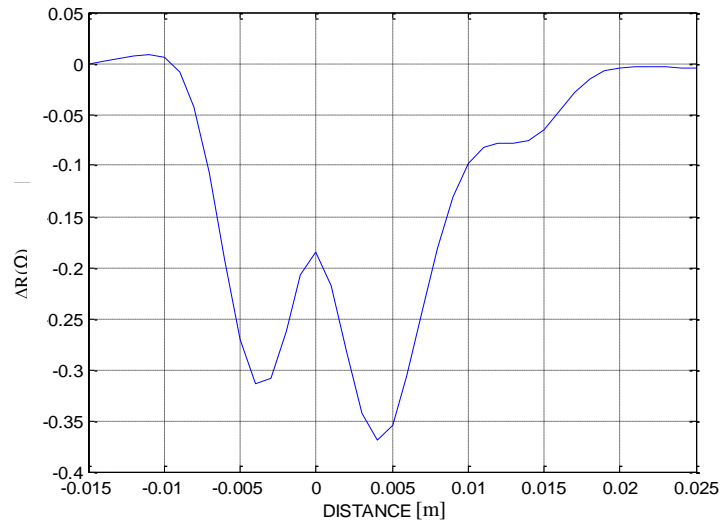
On remarque que plus la valeur de  $F_r$  augmente, plus la valeur de la **Réactance** augmente, c'est-à-dire variation proportionnelle à la fréquence.

On remarque que la valeur de  $F_r$  diminue, la valeur de la **Résistance** diminue, c'est-à-dire variation proportionnelle à la fréquence.

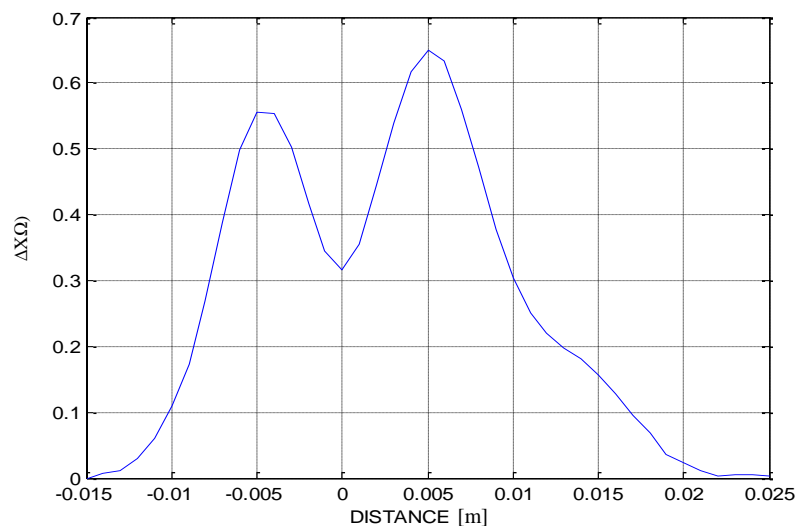
L'augmentation de la fréquence permet de concentrer les courants induits sur une petite surface possible (minimisation de l'effet de peau) d'où variation de l'impédance proportionnelle à la fréquence.

➤ *Variation de la fréquence pour une plaque de 6[mm] d'hauteur et avec défaut.*

Les figures (III11 et III12) représentent la variation de l'impédance, de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance en fonction du déplacement pour une plaque 6[mm] d'hauteur avec défaut.



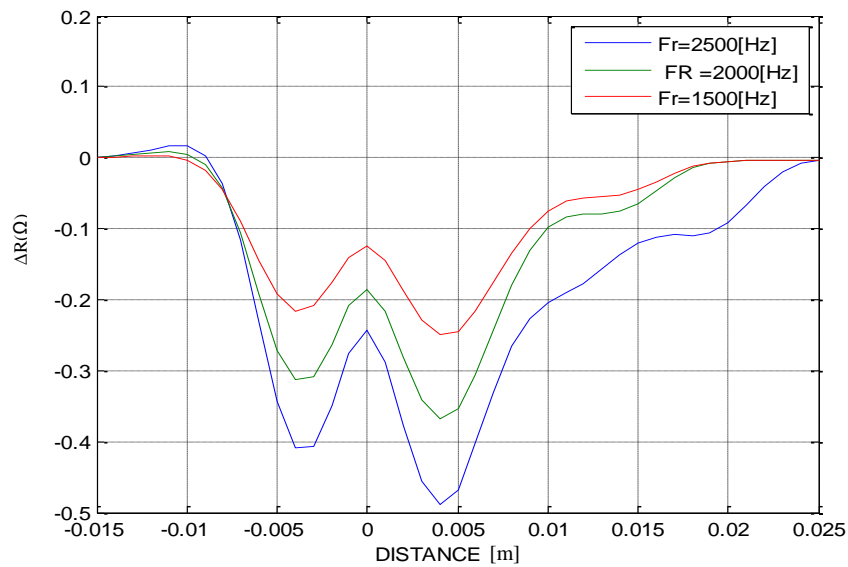
**Figure III.11** -Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut.



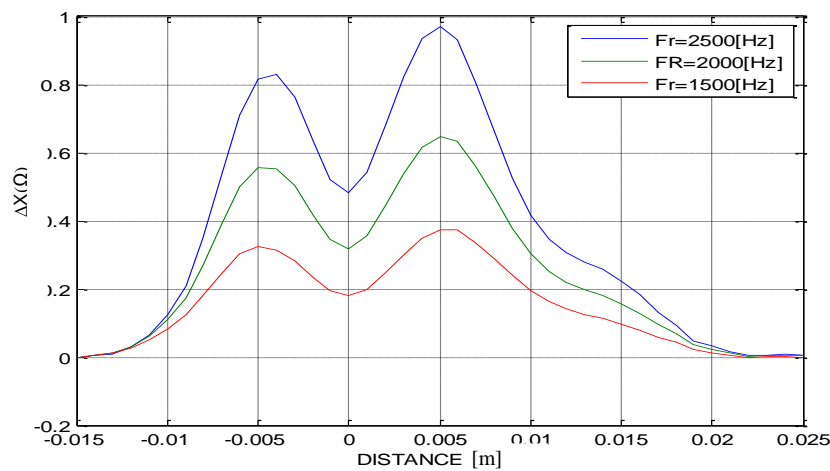
**Figure III.12** -Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut.

On remarque le signal de l'impédance comporte deux valeurs de crêtes différentes car il y a présence de défaut uniquement du côté droit de l'alésage.

- Pour une plaque de 6[mm] d'hauteur, on fait varier la fréquence de : 1500, 2000 et 2500 [Hz], (Figure III.13).



**Figure III.13** Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de Fr).



**Figure III.14** –Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de Fr).

Les figures (III13 et III14) représentent la variation de l'impédance pour différentes valeurs de la fréquence  $F_r$ , de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance en fonction du déplacement, pour une plaque dont la hauteur est de 10 [mm] et **avec défaut**.

On remarque qu'il y a toujours variation de l'impédance en fonction de la fréquence.

### ➤ Variation de la longueur du défaut

Pour plaque de 6[mm] d'hauteur, on fait varier la longueur du défaut 9.8, 15 et 20 [mm]. Les figures (III15 et III16) représentent, pour différentes valeur du  $L_d$  (Longueur de défaut), la variation de l'impédance, de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance en fonction du déplacement est cela défaut de référence.

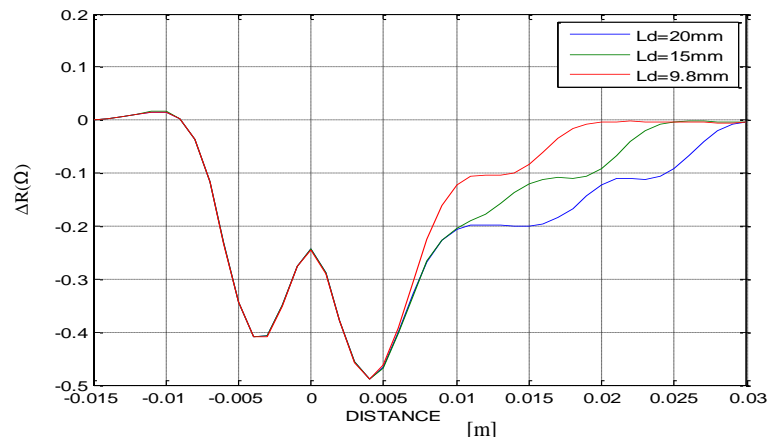


Figure III.15 -Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de  $L_d$ ).

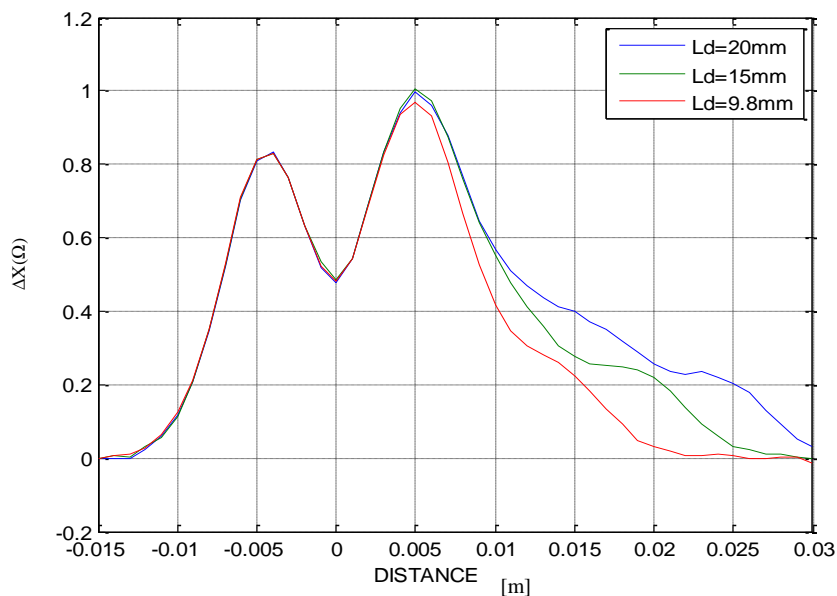


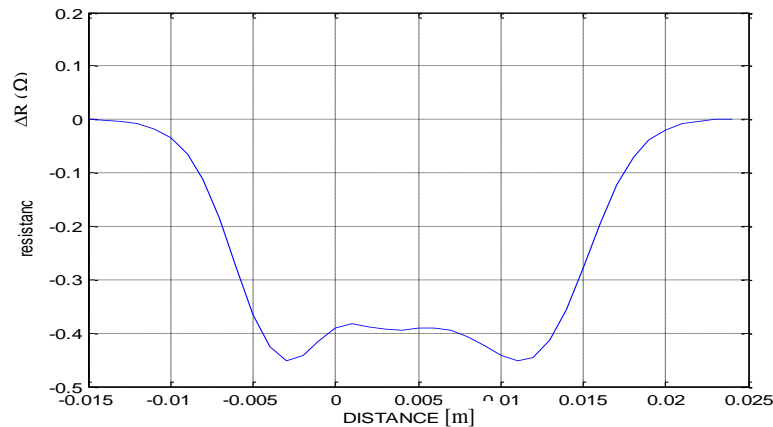
Figure III.16 -Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de  $L_d$ ).

On remarque que plus la longueur ( $L_d$ ) augmente, plus la valeur de **la Réactance** et de **la Résistance** augmentent, c'est-à-dire variation proportionnelle à Longueur de défaut

Pour le coté droit, on doit passer par un petit zoom pour faire la différence de crête.

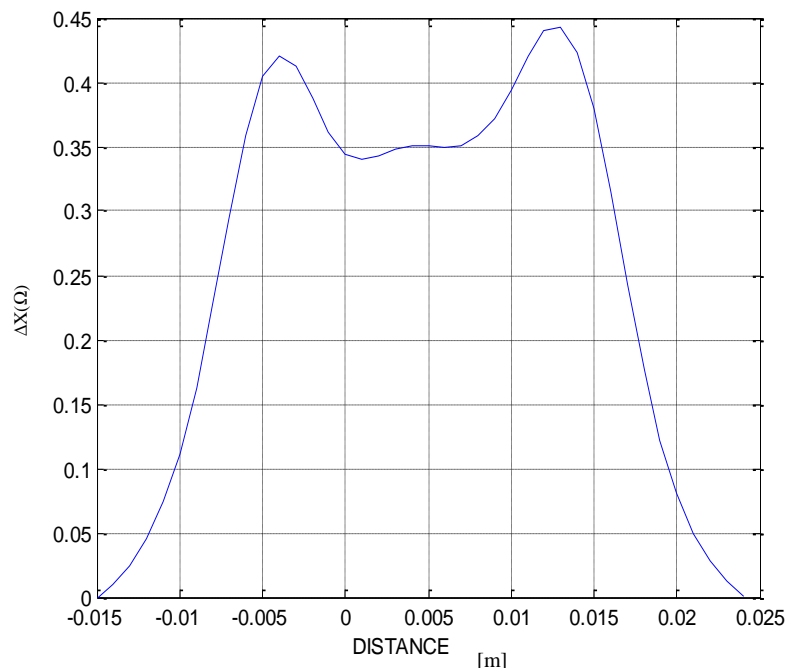
### ➤ Variation de la hauteur de la plaque

Les figures (III17 et III18) représentent la variation de l'impédance, de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance en fonction du déplacement de plaque pour une hauteur de défaut de 2



[mm]. Pour varier de hauteur de plaque = hauteur de défaut = 2 [mm]

**Figure III.17** -Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut.



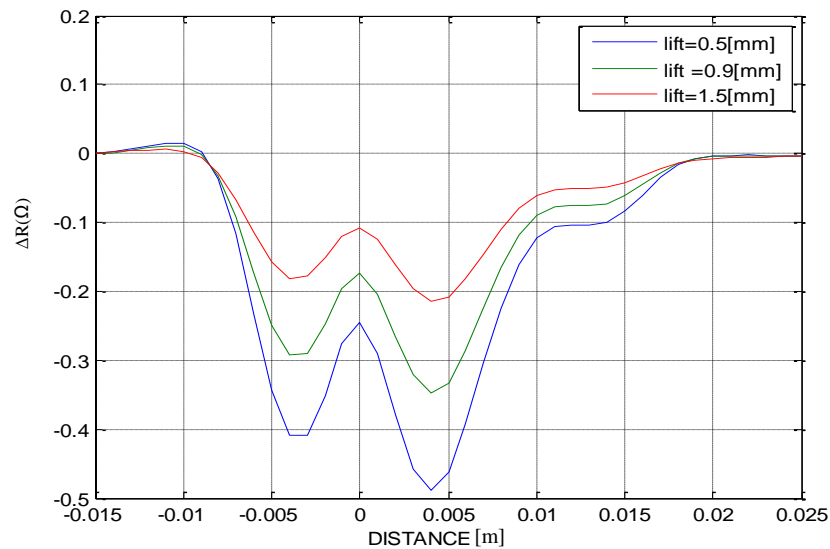
**Figure III.18** -Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut.

On remarque le signal de l'impédance comporte deux sommets divergent par rapport en défaut supérieure à hauteur 2[mm].

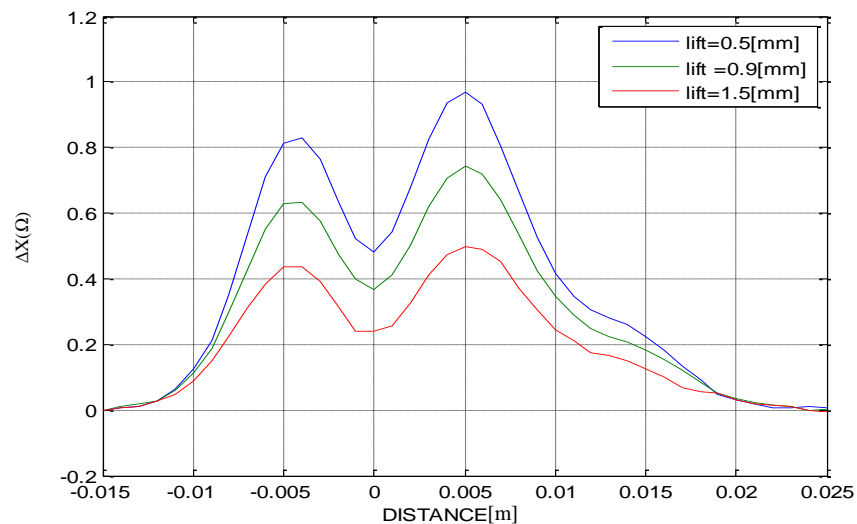
C'est-à-dire variation proportionnelle à hauteur de défaut.

### ➤ Variation du lift-off

Pour une plaque dont l' hauteur est de 6[mm], nous faisons varier le lift-off de 0.5, 0.9 et 1.5 [mm]:



**Figure III.19** -Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet du lift off).



**Figure III.20** –Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet du lift off).

Les figures (III19 à III20) montrent, pour différentes valeur du lift-off (distance bobine-plaque).

On remarque que plus le du lift-off augmente, plus la valeur de l'impédance est minimale, c'est-à-dire variation inversement proportionnelle, chose qui est logique étant donné que l'effet des courants de Foucault est réduit.

➤ **Cas particulier : effet de l'inclinaison de la bobine sur les signaux**

Nous faisons varier l'inclinaison de la bobine de 0.05, 0.1 et 0.2 [deg] :

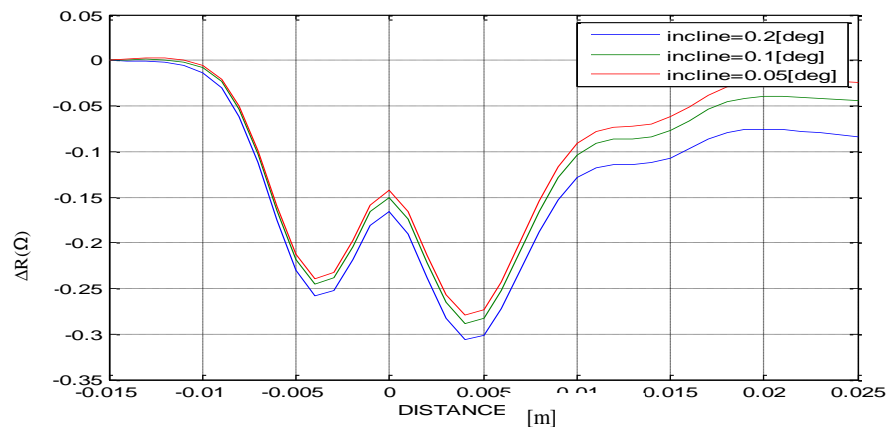


Figure III.21 -Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de l'inclinaison).

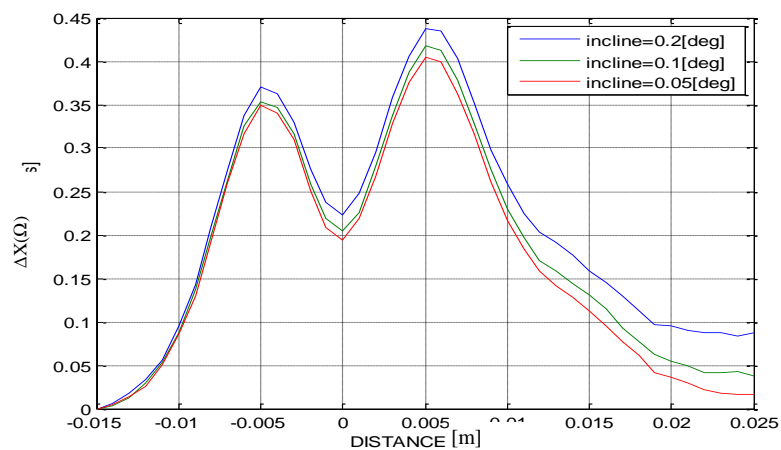
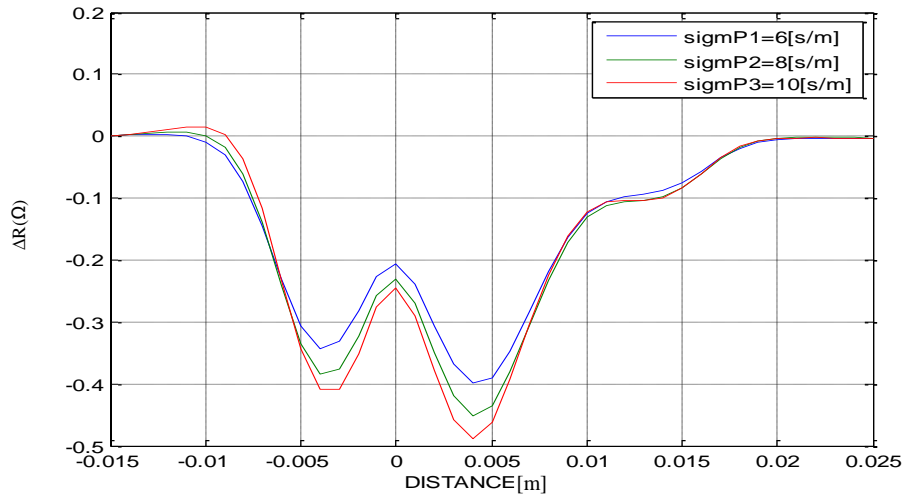


Figure III.22 -Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de l'inclinaison).

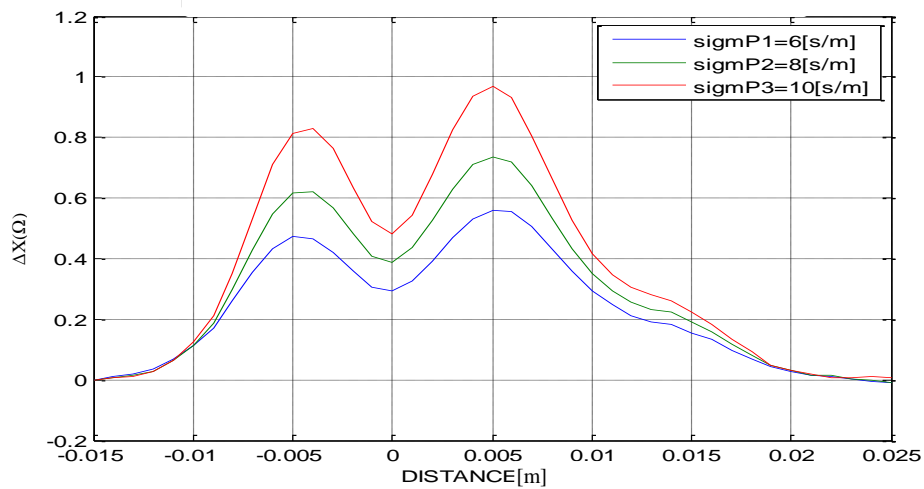
D'après les figures (III.21 et III.22), on remarque que plus l'inclinaison de bobine, plus la valeur de l'impédance augmente, c'est-à-dire variation proportionnelle.

➤ **Variation de la conductivité de la plaque**

Pour une hauteur de plaque de 6[mm], on fait varier la conductivité de la plaque à tester de 1, 2 et 3 [ $10^6$  S/m];



**Figure III.23** -Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de sigma P).



**Figure III.24** -Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (Effet de sigma P).

On se référant aux figures (III23 et III24) , on déduit qu'il y a proportionnalité entre l'augmentation du signal et l'augmentation de la conductivité de la plaque.

### III.4 Application du CND-CF aux pièces cylindriques

Le deuxième volet de nos simulations, c'est une application du CND-CF pour des cylindres conducteurs d'électricité.

#### III.4.1 Caractéristiques géométriques du modèle

Tableau III. 3 Caractéristiques géométriques du modèle à cylindre[35]

Coil		Piece		Crack	
Inner diameter	3 mm	Conductivity	10 MS/m	Length	3 mm
Outer diameter	5 mm	Thickness	5 mm	Depth	4 mm
Length	4 mm	Hole diameter	6.2 mm	Opening	0.1 mm
Turns	336				
Offset	0.0 mm				

Les caractéristiques géométriques du modèle proposé sont données par le tableau suivant :

Tableau III.4 Caractéristiques géométriques du modèle à cylindre.

Cylindre		Bobine		Défaut		Domaine	
Rayon externe	8.1 mm	Rayon externe	2.5 mm	Hauteur	3 mm	Hauteur	200 mm
Rayon interne	3.1 mm	Rayon interne	1.5 mm	Longueur	4 mm	Longueur	120 mm
Hauteur	51 mm	Hauteur	4 mm	Largeur	0.1 mm	Largeur	100 mm

#### III.4.2 Vue en 3D du modèle avec cylindre

La vue 3D du modèle proposé est donnée par la figure (III.25) :

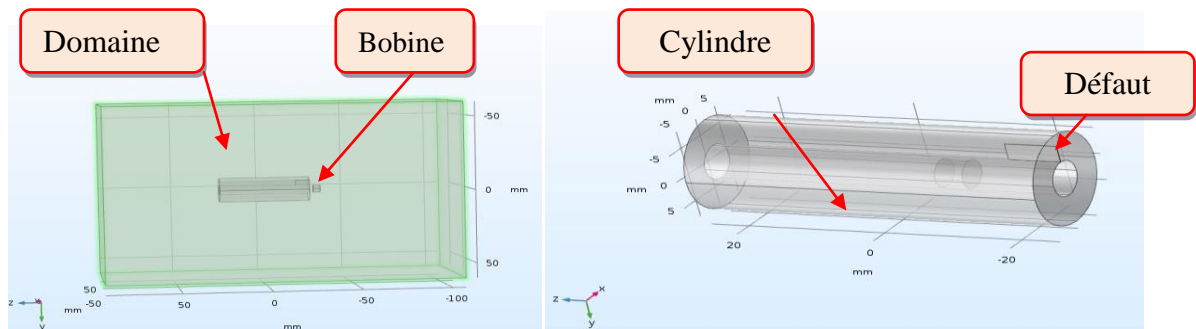


Figure III.25 – Modèle géométrique 3D du modèle à cylindre.

### III.4.3 Maillage du modèle à cylindre

Le maillage ainsi que son zoom sont présentés sur la Figure (III.26).

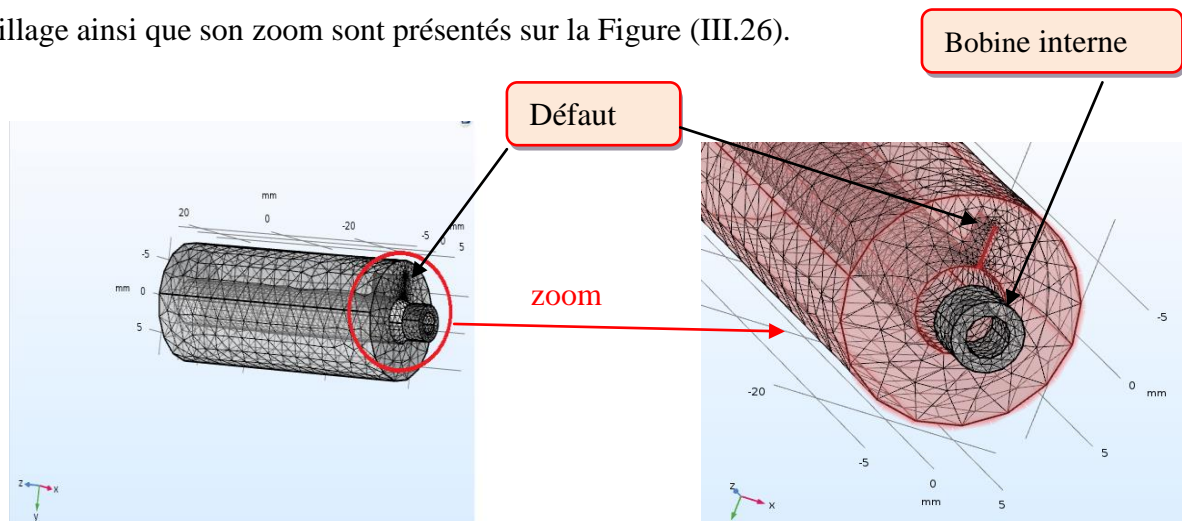
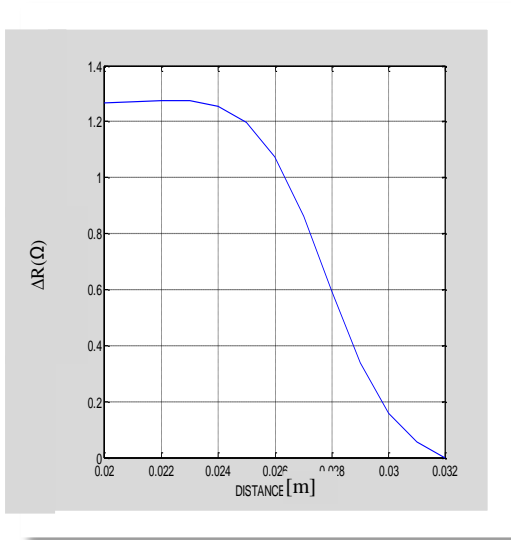


Figure III. 26 - Zoom du Maillage du modèle à cylindre.

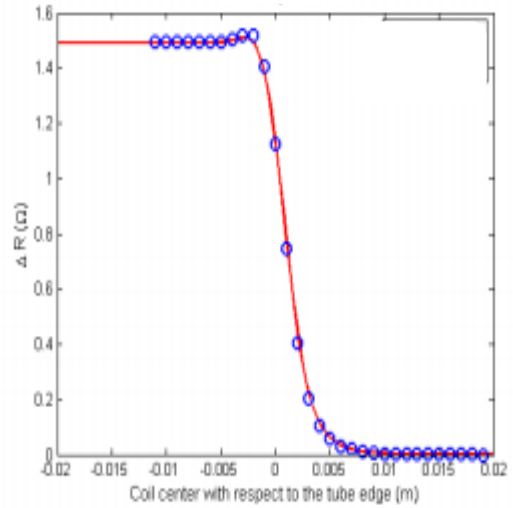
### III.4.4 Simulations et interprétations des résultats (modèle à cylindre)

#### III.4.4.a Validation du modèle à cylindre

La validation se fait par comparaison aux travaux Mr Konstantinos Pipis (Thèse doctorat 2015, [35]) concernant un cylindre creux et avec défaut au début du diamètre intérieur. Les résultats de simulations sont donnés par les figures suivantes :

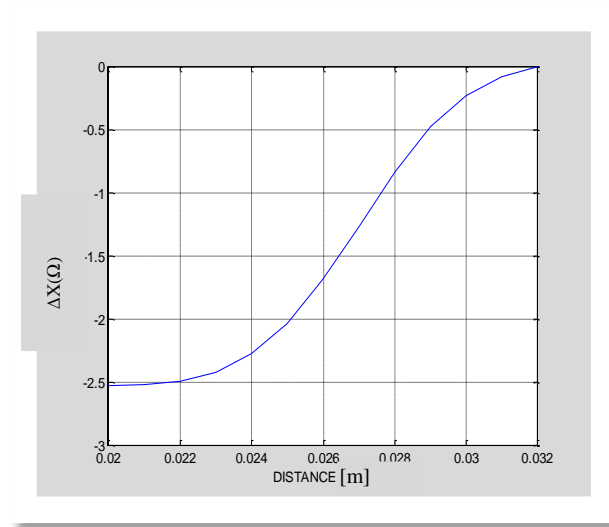


a) modèle proposé

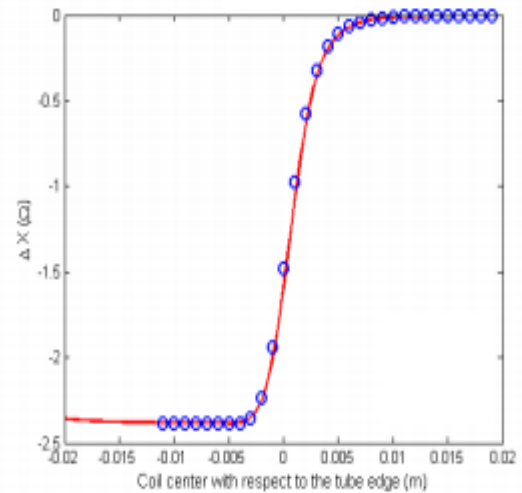


b) modèle Konstantinos Pipis,[35].

**Figure III.27** Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut au début du cylindre.



a) modèle proposé



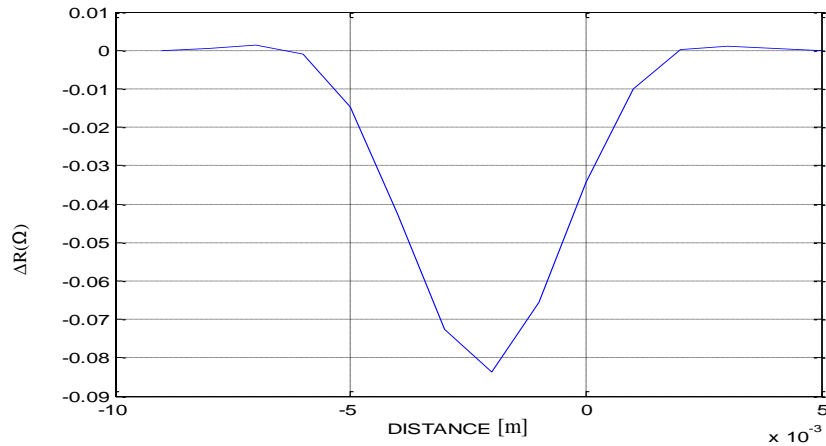
b) modèle Konstantinos Pipis,[35].

**Figure III.28** -Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut au début du cylindre.

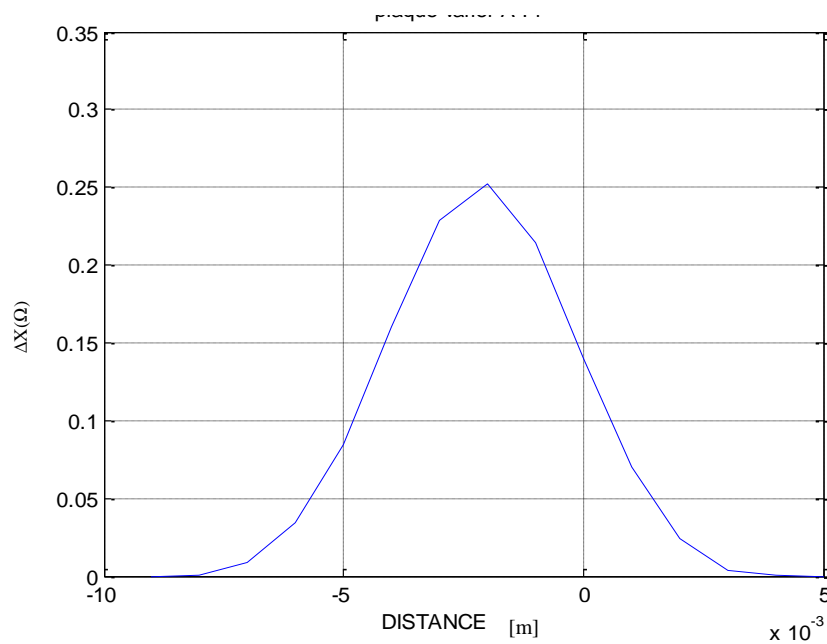
Après comparaison, on remarque que les valeurs des résultats obtenus sont très proche du point de valeurs minimale et maximale mais avec une légère différence du point de vue allure mais qui reste acceptable, d'où possibilité d'entamer les étapes suivante avec cette validation.

### III.4.4.b *Cylindre avec défaut interne (bobine position axiale)*

On utilise le même défaut mais avec un changement de position de ce dernier, c'est-à-dire en position interne et avec bobine dont le diamètre externe est égale au diamètre interne du cylindre (position axiale), les résultats de simulation obtenus sont :



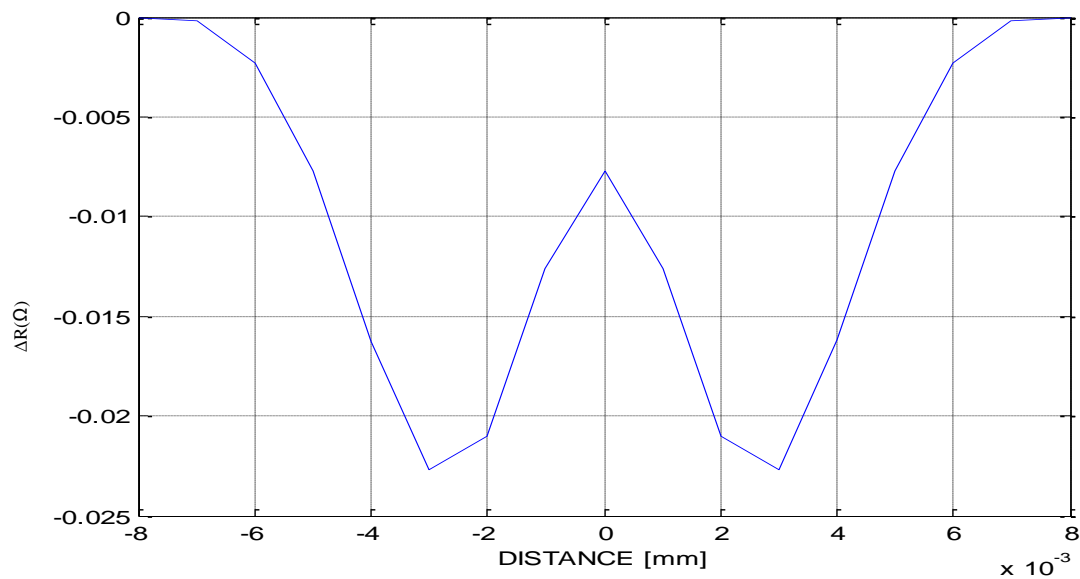
**Figure III. 29** –Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut (bobine axiale).



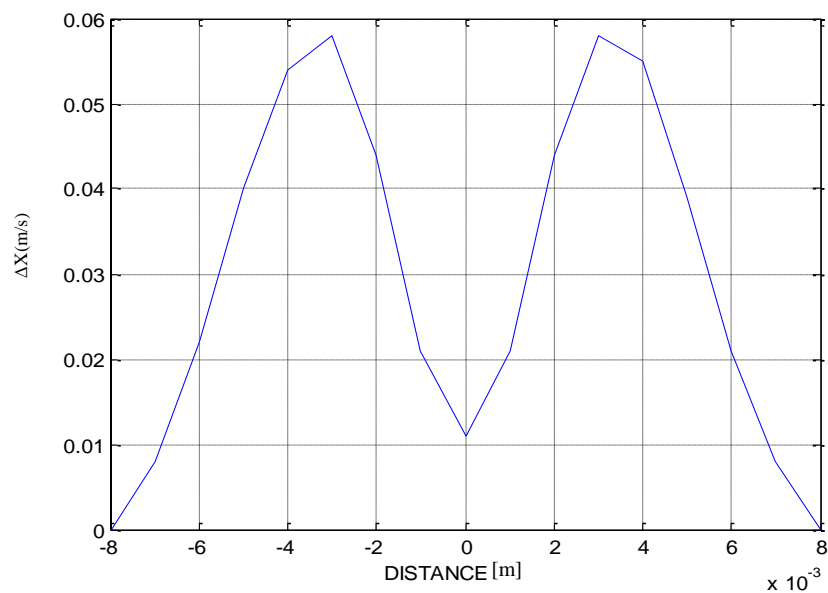
**Figure III.30** -Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut (bobine axiale).

### III.4.4.c *Cylindre avec défaut interne (bobine position radiale)*

Lorsqu'on fait pivoter la bobine de  $90^\circ$ , les résultats de simulation sont :



**Figure III.31** –Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut ( bobine radiale ).



**Figure III.32** –Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut interne ( bobine radiale ).

D'après les résultats de simulation dans le cas où la bobine est axiale ou radiale, il y a un changement de l'allure des signaux, cela est dû au fait du rapport dimension de la bobine par rapport à la dimension du défaut. mais dans les deux cas la variation n'est pas nulle, c'est-à-dire qu'il y a une détection de la présence du défaut.

III.4.4.c Défauts externes avec bobine encerclante

Pour le cas de défauts externes et avec bobine encerclant, on utilise des trous percés sur le diamètres extérieur du cylindre, leurs hauteurs sont respectivement : 1, 3 et 5 [mm].

➤ Pour 5 [mm]:

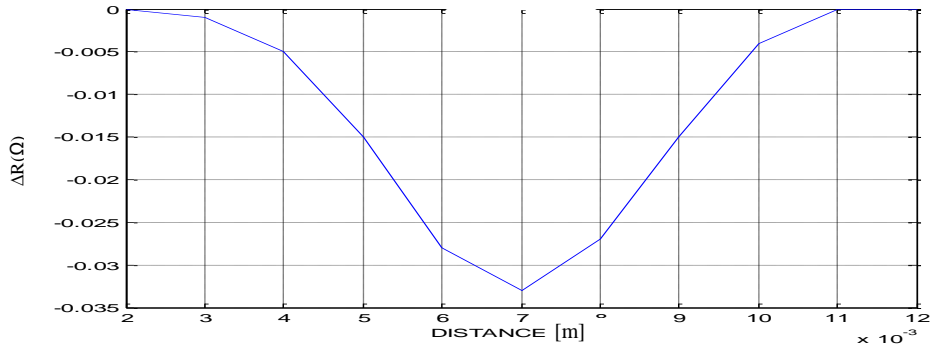


Figure III.33 -Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 5[mm]

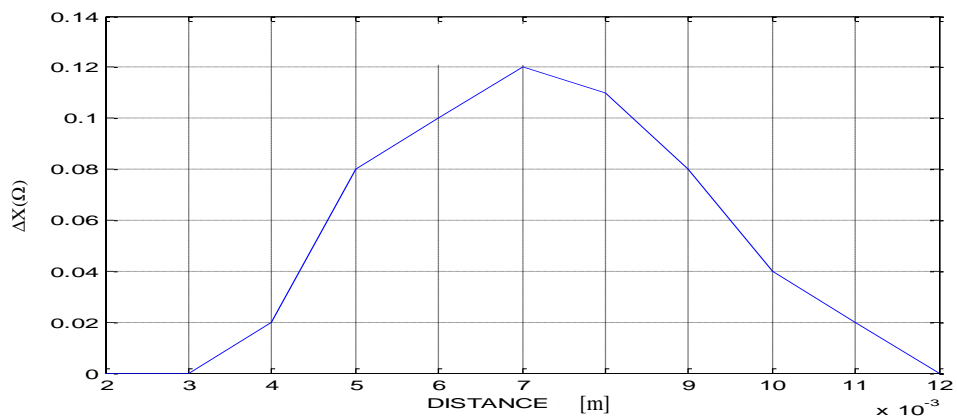


Figure III.34 -Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 5[mm].

➤ Pour 3 [mm]:

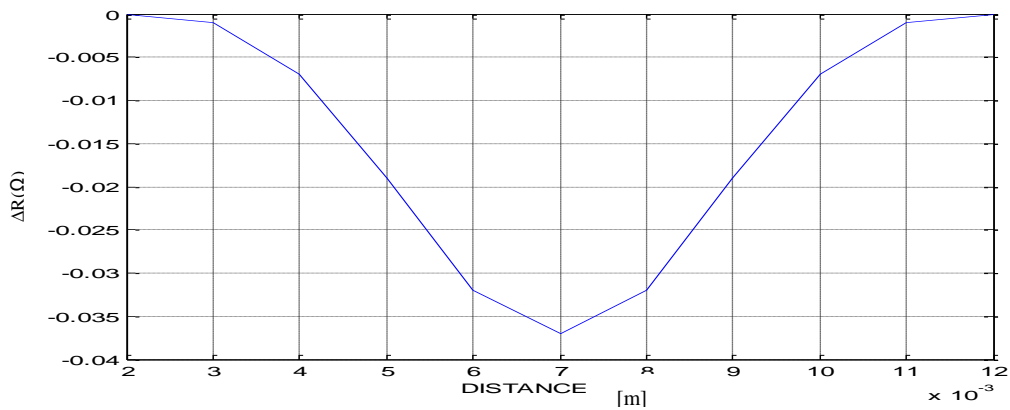


Figure III.35 –Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 3[mm].

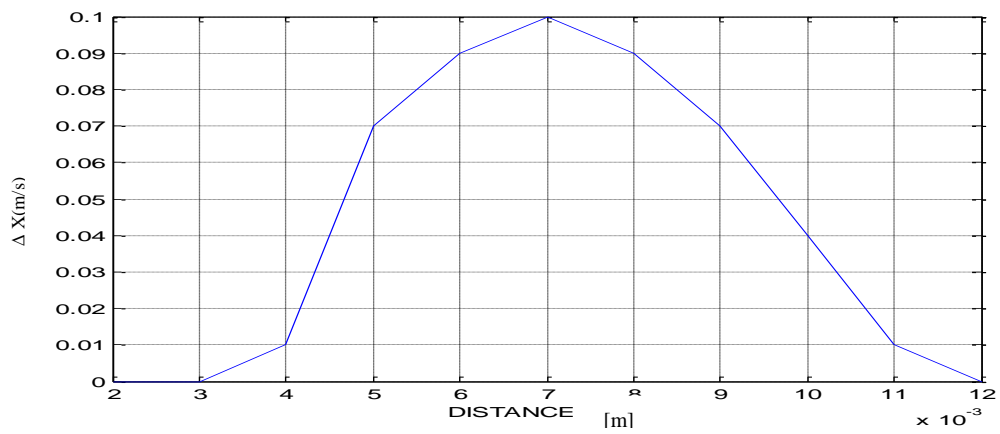


Figure III.36 -Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 3[mm].

➤ Pour 1[mm]:

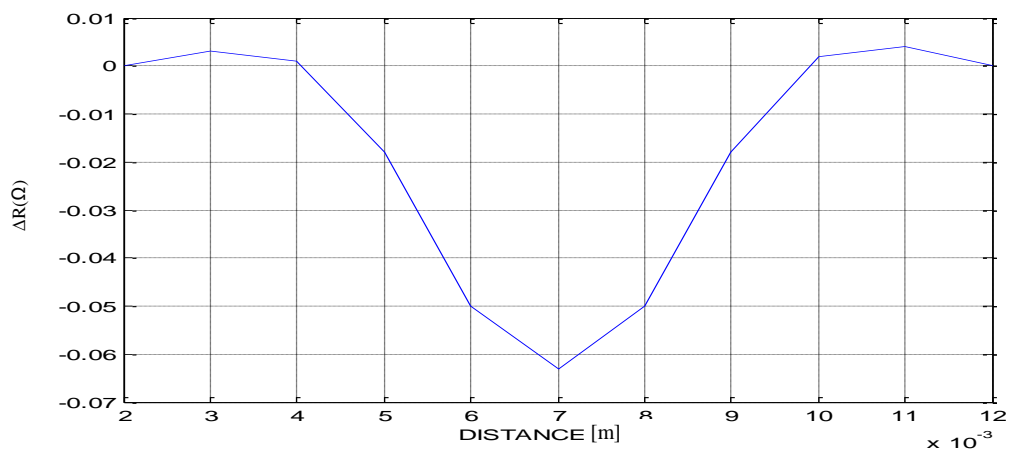
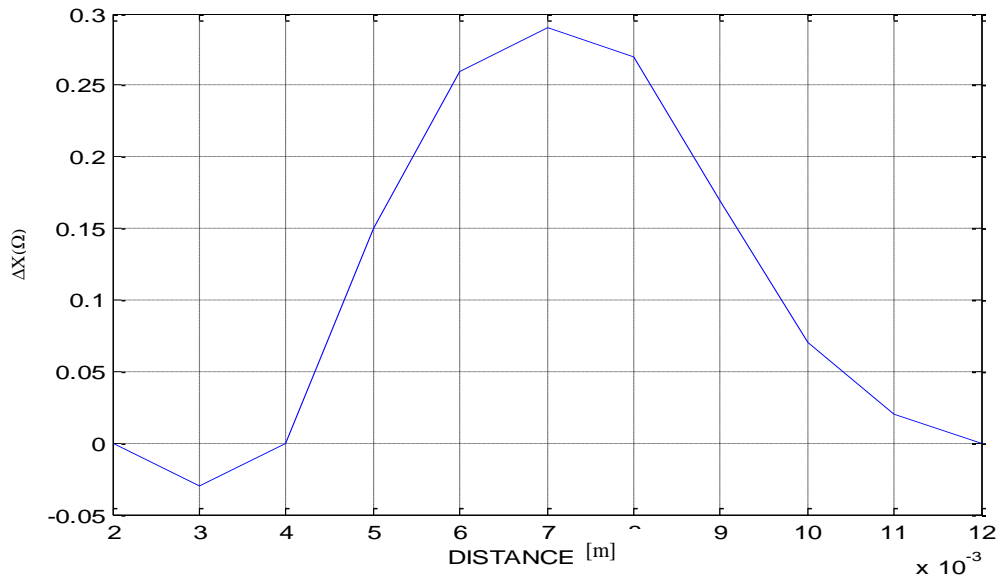


Figure III.37 -Variation de la Résistance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 1[mm].



**Figure III.38** -Variation de la Réactance en fonction du déplacement avec défaut externe hauteur 1[mm].

On remarque que l'amplitude varie inversement par rapport à la hauteur des trous de surface.

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé COMSOL-Multiphysics comme plate forme de simulation, il basé sur la MEF. avant d'entamé la simulation des modèles, soit de plaque muni d'alésage ( trou pour boulon de serrage ) ou soit de pièce cylindrique creuse nous avant tout d'abord validé nôtre modèle par comparaison aux résultats de Mr Konstantinos Pipis (Thèse de doctorat 2015[35]).

Par la suite nous présente en premier lieu, les résultats obtenus pour une plaque conductrice muni d'alésage, nous avons constaté que le signal n'est pas symétrique à cause de la présence du défaut à droite de l'alésage, puis nous pu mettre en évidence l'effet de paramètres influant sur le signal d'impédance du capteur, à savoir ; la fréquence, le lift-off, la conductivité de la plaque et les dimensions géométriques du défaut.

En second lieu, nous avons obtenu les résultats de simulation pour les pièce cylindrique pour des défauts internes et externes en utilisant des bobine interne et encerclante .

On remarque que :

- la variation de l'impédance augmente lorsque **la longueur (Ld)** de défaut augmente,

- la variation de l'impédance augmente lorsque **la fréquence (Fr)** de bobine augmente,
- la variation de l'impédance diminution lorsque **lift-off** de bobine augmente,
- la variation de l'impédance augmente lorsque **l'inclinations** de bobine augmente,
- la variation de l'impédance augmente lorsque **la conductivité de plaque (sigmP)** de plaque augmente.

## Conclusion Générale

## Conclusion Générale

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

*En CND par CF, l'utilisation d'outils de modélisation permet d'améliorer les procédés de contrôle. La méthode des éléments finis (MEF), grâce à sa souplesse et à sa possibilité de traiter des géométries complexes, occupe une place importante dans le cadre des techniques de modélisation utilisées dans le CND par CF.*

*Les travaux présentés dans ce mémoire traitent de la modélisation par la méthode des éléments finis sous le logiciel COMSOL Multiphysics 5.3, qui est justement basé sur la MEF. Ce logiciel est un outil de conception et de modélisation dont l'avantage principal, d'une part, est de ne pas être dédié à un domaine d'application particulier, il rassemble un ensemble d'outils et une bibliothèque de modèles prédéfinis permettant la simulation de tout processus physique pouvant être décrit par des équations différentielles, y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF, et d'autre part, il permet de travailler en 2D ou 3D part d'économiser des ressources informatiques en particulier en ce qui concerne le temps de calcul et la mémoire requise pour les simulations, [3].*

*Avant d'aborder les objectifs de cette étude, nous avons jugé utile de commencer par une recherche bibliographique des différentes techniques de CND les plus utilisées ainsi que sur les capteurs à courants de Foucault utilisés en CND-CF. puis nous avons présentés un bref rappel sur les équations de Maxwell régissant le CND, leurs simplifications relatives aux CF, ainsi que les différentes techniques de calcul d'impédance.*

*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 d'alésage et d'autre part pour cylindre avec défaut internes et défauts externes. Avant de procéder à cette simulation nous avons validé les modèles proposés en les comparant aux travaux internationaux dans ce domaine.*

*Nous avons pu*

- *détecter d'une part les défauts qui apparaissent au voisinage des alésage sous l'effet de contraintes mécaniques,*
- *mettre en évidence l'effet des paramètres qui influent sur le signal d'impédance comme : la fréquence, le lift-off, la conductivité de la pièce et caractéristiques géométriques du défaut,*
- *détecter les défauts interne à une pièce cylindrique de forme rectangulaire avec capteur interne en position axiale ou radiale,*
- *mettre en évidence l'effet de l'inclinaison du capteur sur le signal de l'impédance,*
- *détecter les défauts externes à une pièce cylindrique de forme cylindriques (trous), ayant des profondeurs différentes, avec capteur encerclant,*

## **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- [1]- **HAMIA, Rimond**, « Performances et apports des capteurs magnétiques à très haute sensibilité aux systèmes de Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault », université de caen/ basse normandi , doctorat Electronique, Microélectronique et Nanoélectronique: s.n., 2011.
- [2]-**Oussama, BENSALAH**, «Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentiel», Université de m'sila, master en genie électrique : s.n., 2012.
- [3]-**Adib, SAFER Omar**, « Etude et Modélisation de Capteur à courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND) », UNIVERSITE DE M'SILA : master en genie électrique s.n., 2014.
- [4]-**AISSANI Nacereddine**, «contrôle non destructif (cnd) par courants de Foucault (cf) , utilisation des capteurs magnétiques a très haute sensibilité » ,Université de m'sila master Ingénierie des Systèmes Électromécaniques : s.n., 2015..
- [5] -**F. Mehmai, M. Ghoul**, « Etude générale d'un processus industriel "trifileuse" commandée par PLC Siemens S7-300 à travers le bus de terrain "Profibus" », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du brevet de technicien supérieur en Maintenance des machines automatisée, Batna, : s.n., 2007.
- [6]-**ZAIDI, Houda**, «Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples», Paris : s.n., 2012.
- [7]-**I.Dufour, M. Busawon, D. Premel**, «General analysis of inductive sensor based systems». France: J, phy. III : s.n., 1994.
- [8]-**BOUCHALA Tarek**, «Application de la method des elements finis», Orray : s.n, 2009.
- [9] **Yahya, CHOUA**, «Application de la méthode des éléments finis», Orsay : s.n., 2009. 9535.
- [10]-**TALEB M'HAMMED Mustapha et GHEDAMSI Elhachmi** , «Modélisation semi-analytique d'un système de CND-CF pour la caractérisation d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur »,Mémoire Master, université kasdi merbah – ouargla: s.n., 2012 /2013.
- [11] -**G.-R. TILLACK, C. NOCKEMANN et C. BELLON** , «X-ray modeling for industrial applications. NDT & E International »,33(7):481–488, octobre 2000.
- [12]- **J. HAUEISEN, R. UNGER, T. BEUKER et M.E. BELLEMANN** , «Evaluation of inverse algorithms in the analysis of magnetic fluxleakage data. IEEE Transactions on Magnetics»,38(3):1481–1488, mai 2002.

- [13]-**J. Dumont-Fillon**, «Contrôle non destructif (CND) », Technique de l'ingénieur: s.n., 1994.
- [14]-**B.Maouche, R.Alkama et N.Khenfer**, «Modélisation Semi-Analytique du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault à capteur Absolu»,3rd conference on Electrical Engineering, pp 149-152 octobre 2004.
- [15] -**WANIN, Maurice**, «Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (*Partie 2*) », Nancy ,M 4 131 – 16.
- [16] -**Ala-Eddine Lakhdari** ,« Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de foucault :application a la détection des fissures », , mémoire de magister, Electricité industrielle A: s.n,2011.
- [17] -**Yamina Belkhiri**, « Modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécaniques couples par la méthode des volumes finis (CVM) »,mémoire de magister, Spécialité électrotechnique, Université de Batna: s.n., 2003.
- [18] -**Mohamed Lotfi KHENE**, « Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les structures a géométries complexes par adaptation de la méthode des volumes finis »,mémoire de magister, Spécialité électrotechnique, Université de Batna: s.n., 2006.
- [19] -**Salma, CHRIF**, «modélisation électromagnétique de systèmes multicapteurs-pièce à défauts complexe pour le CND par CF», TIZI-OUZOU: s.n., 2011.
- [20] -**C.V.Dodd,W.E.Deeds**, «Analytical solution to Eddy-current Prob e-Coil Problems», Journal of Applied Physics, Vol.39, number 6, May1968.
- [21] -**H. Gie, J.P**, «Sarmant Electromagnétisme 2», Lavoisier Paris 1982.
- [22] -**M. Ivanès, R. Perret**, « Eléments de génie électrique - Connaissances de bases et machines statiques», Edition Hermès, Paris, 1994.
- [23]-**B.Maouche** ,«Elaboration de modèles couplés basés sur la méthode des moments pour la modélisation de structures électromagnétiques- application à l'étude du contrôle non destructif par induction" Thèse de Doctorat université de Setif: s.n., 2007.
- [24]-**ZORNI, Chiara**,«Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction», de l'université paris-sud 11 ,2012.
- [25] -**SLIMANE, Wissem**, « Conception d'un Système Multi-capteurs à Courants de Foucault pour le Controle Non Destructif (CND) », universite el hadj lakhdar batna: s.n., 2008
- [26]-**BENHADDA, NABIL**, «Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault »,Université El Hadj Lakhdar Batna ,Mémoire de Magistère En Electrotechnique: s.n., 2006.
- [27]- **Samir, BENSAID**, «Cours théorie de champ. M'sila», : Université de M'sila: s.n., 2010.

- [28]-**Thierry, KOUADIO**, «Thermographie infrarouge de champs ultrasonores en vue de l'évaluation et du contrôle non destructifs de matériaux composites», l'université bordeaux 1 : s.n., 2013.
- [29] -**Cyril Ravat**, «Conception de multicateurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif», Thèse Docteur,université parise
- [30] -**Charles J. Hellier** ,« Handbook of nondestructive testing », mcgraw-hill professional; 1 edition (march 14, 2001).
- [31]-**MILOUD, BENGUESMI**, « tribution à L'étude théorique de l'effet de la magnétoimpédance géante (GMI) », université el hadj lakhdar batna, mémoire de magister, Spécialité électrotechnique : s.n., 2010.
- [32]- **M.Bertin, J.P.Faroux, J.Renault** Electromagnétisme 4, milieu diélectriques et aimantés", 1984.
- [33] -**D.Cordier**. «Electromagnétisme1, électrostatique et magnétostatique», 2004.
- [34] -**M. Mephane** , « Modélisation de contrôle ultrasonore de tube d'acier présente des défauts de type », direction de l'information scientifique et technique, gif-sur-yvert frane: s.n., 1998.
- [35]-**Konstantinos Pipis** ,«Eddy-current testing modeling of axisymmetric pieces with discontinuities along the axis by means of an integral equation approach»,Electromagnetism. université ParisSaclay, thèse de doctorat 2015. English.
- [36]- **AISSANI Nacreddine**, «contrôle non destructif (cnd) par courants de Foucault (cf) , utilisation des capteurs magnétiques a très haute sensibilité » ,Université de m'sila : s.n., 2015.

## Résumé

Le contrôle non destructif par courants de Foucault est très important il est utilisé pour des pièces conductrices et il est basé sur la variation de l'impédance apparente capteur-pièce à tester.

Dans par ce travail, en premier lieu, nous avons présentés les principales méthodes de CND et en particulier celle des courants de Foucault, ensuite nous avons donné une description rapide des capteurs à courants de Foucault, en second lieu, nous avons énuméré les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par courants de Foucault, on donné un bref aperçu du logiciel utilisé, le COMSOL multiphysics ainsi qu'un résultat de simulation de ce contrôle. et dernier c'est de procédé à un modélisation et une simulation 3D sous COMSOL multiphysics pour, une plaque munie d'alésage et avec défaut d'une part et d'autre part pour pièce cylindrique avec défauts internes et externes.

**Mots clés:** Contrôle non destructif (CND), courants de Foucault, capteur inductif, capteur interne, capteur encerclant, équations de Maxwell.

## Abstract

Eddy current non-destructive testing is very important it is used for conductive parts and it is based on the variation of the apparent impedance sensor-piece to test.

In this work, in the first place, we presented the main methods of CND and in particular that of eddy currents, then we gave a quick description of eddy current sensors, second, we enumerate the Maxwell equations that govern the phenomenon of current detection .from Foucault, we gave a brief overview of the software used, the COMSOL multiphysics and a simulation result of this control. and last is from process to modeling and a 3D simulation under COMSOL multiphysics for, a plate provided with bore and defect on the one hand and secondly for cylindrical part with internal and external defects.

**Index Terms:** Non Destructive Testing (NDT), eddy currents, inductive sensor, internal sensor, encircling sensor, Maxwell equations.

## ملخص

المراقبة غير الهدامة للتيارات الدوامة اختبار مهم جدا يتم استخدامه في قطع الموصل كهربائيا ويستند الى تباين في قيمة ممانعة بين القطعة و اللاقط المختبرة.

في هذا العمل ، في المقام الأول ، قدمنا الطرق الرئيسية، من المراقبة غير المهدمة، وعلى وجه الخصوص التيارات الدوامة، ثم قدمنا وصف سريع عن اجهزة استشعار التيارات الدوامة، وثانيا بإعداد معادلات ماكسويل التي تحكم ظاهرة الكشف الحالي التيارات الدوامة، قدمنا لمحة موجزة عن البرمجيات المستخدمة، كامسول، ونتائج محاكاة لهذه السيطرة ، والأخير من عملية إلى النمذجة ، ومحاكاة ثلاثية الأبعاد تحت مركبات الكامسول المتعددة ، وهي لوحة مزودة بالثقب والعيوب من ناحية ، وثانياً للجزء الاسطواني بعيوب داخلية وخارجية.

## فهرس المصطلحات

اختبار غير مدمر تيارات الدوامة ، جهاز استشعار حثي ، جهاز استشعار داخلي ، جهاز استشعار محاصر ، معادلات ماكسويل.