

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

# Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électromécanique

Option : Maintenance Industrielle

Thème

---

## Application du contrôle non destructif sous COMSOL multiphysics pour la détection de défauts

---

Réalisé par :

M. BELABBAS OUASSIM

Encadré par :

M. KASDI Ahmed  
Mme. MEDJAHED Sakina

2022/2023

# Remerciement

---

## Remerciements

*Je remercie « Allah », le Tout-Puissant, qui m'a donné la force, la patience, la volonté et surtout le courage pour élaborer ce travail. Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mes encadreurs, **M. KASDI Ahmed** et **Mme MEDJAHED Sakina** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour la disponibilité et la patience dont ils ont fait preuve et les précieux conseils et les remarques pertinentes et pour leur suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire.*

*Je suis aussi redevable envers tous les enseignants et personnel administratif du département de Génie Électrique de l'Université A. MIRA de Béjaïa, qui ont instauré un environnement d'entraide et de soutien tant au plan scientifique qu'au plan humain.*

*Je tiens aussi à remercier l'ensemble des membres du jury qui m'ont fait honneur d'accepter de juger ce travail.*

# *Dédicaces*

---

## *Dédicaces*

*Je dédie cet humble travail*

*À mes très chers parents pour leur grand  
amour et leurs sacrifices*

*À toute ma famille*

*À tous mes amis*

*À tous ceux qui m'ont aidé*

# Table des matières

---

Introduction générale.....	1
Chapitre I. Généralités sur le contrôle non destructif.....	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Différentes techniques de contrôle non destructif .....	4
I.3. CND par courants de Foucault.....	5
I.3.1. Principe physique de CND-CF.....	5
I.3.2. Effet de peau.....	7
I.3.3. Domaine d'application .....	8
I.3.4. Avantages et Inconvénient .....	8
I.3.4.1. Avantages.....	8
I.3.4.2. Inconvénients.....	8
I.3.5. Limites du CND par courants de Foucault .....	9
I.4. Différents types de sondes .....	9
I.4.1. Selon la position .....	9
I.4.1.1. Sonde interne .....	9
I.4.1.2. Sonde encerclant .....	10
I.4.1.3. Sonde ponctuelle.....	10
I.4.1.4. Capteur à double fonction .....	11
I.4.1.5. Capteur à fonctions séparées .....	12
I.4.3. Selon le mode de contrôle .....	12
I.4.3.1. Mode absolu .....	12
I.4.3.2. Mode différentiel.....	13
I.4.4. Modes d'excitation .....	13
I.4.4.1. Signal mono-fréquentiel.....	13
I.4.4.2. Signaux multifréquences.....	14
I.4.4.3. Excitation pulsée.....	14
I.5. Conclusion .....	14
Chapitre II. Modélisation du Système Contrôle Non Destructif par CF.....	15
I.1. Introduction.....	15
II.2. Modélisation du dispositif de CND par CF.....	15
II.3. Mise en équations.....	16
II.3.1. Équations de Maxwell.....	17
II.3.1.1. Ferme différentielle .....	18

# Table des matières

---

II.3.2. Lois de comportement des milieux .....	19
II.3.3. Relations constitutives du milieu .....	19
II.3.3.1. Dans un milieu magnétique .....	19
II.3.3.2. Dans un milieu diélectrique.....	19
II.3.4. Loi d'ohm.....	20
II.3.5. Equation de continuité .....	20
II.3.6. Relations de passage .....	20
II.3.6.1. Champ E.....	21
II.3.6.2. Champ B.....	21
II.3.7. Hypothèses simplificatrices .....	22
II.4. Méthodes de résolution.....	23
II.4.1. Méthodes analytiques.....	23
II.4.2. Méthodes numériques .....	23
II.4.2.1. Méthode des éléments finis .....	23
II.5. Conclusion .....	24
Chapitre III : Résultats de simulation.....	25
III.1. Introduction .....	25
III.2. Description de logiciel « COMSOL-Multiphysics ».....	25
III.3. Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5.....	25
III.3.1. Création du modèle de simulation .....	26
III.4. Description de la configuration simulée.....	27
III.4.1. Création de la géométrie.....	27
III.5. Simulation et traitement des résultats.....	30
III.5.1. Effet de variation de la fréquence .....	30
III.5.2. Effet du déplacement « X » du défaut .....	34
III.5.3. Effet de variation de la position « Z » du défaut .....	36
III.5.4. Effet du lift-off.....	38
III.5.5 Effet de la largeur du défaut .....	41
III.5.6. Effet de la hauteur du défaut.....	44
III.6. Conclusions.....	46
Conclusion générale.....	47
Bibliographie.....	48

# *Table des matières*

---

# Abréviations, notations et symboles

---

## Abréviations, notations et symboles

### Abréviations :

CND : Contrôle Non Destructif.

CF : Courants de Foucault.

CND-CF : Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.

MEF : Méthode des éléments finis.

3D : Tri-dimensional.

2D : Two-dimensional

EF : éléments finis

### Notations et Symboles :

$\Omega$  : Domaine d'étude.

$J_s$  : Densité de courant électrique dans la source.

$\Gamma$  : Les frontières qui enveloppent le domaine d'étude.

$\sigma$  : Conductivité électrique.

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique absolue du vide.

$\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m].

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

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

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

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

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

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

$\mu_r$  : Perméabilité magnétique relative du milieu [H/m].

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

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

$\epsilon_0$  : Constante diélectrique du vide =  $8.85 \cdot 10^{-12}$  [F/m].

$\epsilon_r$  : Permittivité électrique relative du milieu [F/m].

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

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

$\mathbf{v}$  : le vecteur de la vitesse.

$\sigma \mathbf{E}$  : courant de conduction résultant du champ électrique  $\mathbf{E}$ .

$\mathbf{n}$  : la normale à l'interface séparant les deux milieux.

$\mathbf{K}$  : Densité de courant portée par la surface de séparation.

$\rho_s$  : Densité de charge électrique portée par la surface.

# *Abréviations, notations et symboles*

---

**A** : le potentiel vecteur magnétique.

**v= 1/  $\mu$**  désigne la réductivité magnétique.

**vp** : Terme de pénalité ayant la dimension d'une réductivité magnétique.

**Ni** : Fonction de projection vectorielles  $\alpha_i$ .

**$\alpha_i$**  : Fonction de projection scalaire.

**Hs** : le champ magnétique qui serait créé par l'inducteur.

**Hr** : le champ magnétique créé par la réaction des parties conductrices.

**PJ** : les pertes Joule.

**rm** : l'énergie magnétique emmagasinée.

**R** : la résistance.

**X** : la réactance.

**I** : le courant d'excitation parcourant la bobine.

$\omega$  : la pulsation.

**B<sub>0</sub>** : l'induction pour la pièce de référence (sans défaut).

**B** : l'induction pour la pièce à tester (avec défaut).

**J<sub>0</sub>** : densité des courants induits sans défaut.

**J** : densité des courant induits avec défaut.

**E** : champ électrique en présence de la fissure.

**E<sub>0</sub>** : champ électrique en absence de la fissure.

**W<sub>0</sub>** : représente le volume occupé par la bobine.

**I** : l'intensité du courant parcourant.

**A** : potentiel vecteur magnétique en présence du défaut.

**A<sub>0</sub>** : Potentiel vecteur magnétiques en l'absence du défaut.



# *Liste tableaux*

---

## *Liste tableaux*

<b>Tableau II-1</b> Comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF.....	30
<b>Tableau III.1</b> Dimension et caractéristique de la géométrie.....	36

# Liste des figures

---

## Liste des figures :

Figure I.1:Principe du CND par courant de Foucault .....	6
Figure I.2:Répartition des courants de Foucault dans une pièce .....	7
Figure I.3:Sonde interne .....	10
FigureI.4:Bobine encerclant .....	10
FigureI.5:Bobine ponctuelle (Palpeur) .....	10
Figure I.6:Bobine plate .....	11
FigureI.7: Capteur à fonction séparée .....	11
FigureI.8:Capteur absolu .....	12
Figure I.9:Sonde différentielle .....	13
Figure II.1:Principe du capteur à courants de Foucault Intérêt de la modélisation.....	17
FigureII.2 :Domaine d'étude d'un problème de CND-CF. ....	17
FigureIII.1 :Interface utilisateur de COMSOL 5.5 .....	35
Figure III.2. : représenter la géométrie d'étude.....	38
Figure III.3 :représente la géométrie d'étude en 3D .....	38
Figure III.4: Géométrie étudiée et son maillage.....	39
Figure III.5 :Densité de flux magnétique .....	40
Figure III.6: Impédances $Z_0$ , $Z_1$ et $Z_2$ en fonction de la fréquence $F$ en $\Omega$ .....	40
Figure III.7: Résistances $R_0$ , $R_1$ et $R_2$ en fonction de la fréquence $F$ en $\Omega$ .....	41
Figure III.8: Réactance $X_0$ , $X_1$ et $X_2$ en fonction de la fréquence $F$ en $\Omega$ .....	41
Figure III.9: Différence d'impédance $\Delta Z_{10}$ en fonction de la fréquence $F$ en $\Omega$ .....	41
Figure III.10: Différence d'impédance $\Delta Z_{21}$ en fonction de la fréquence $F$ .....	42
Figure III.11: Différence de la résistance $\Delta R_{10}$ en fonction de la fréquence $F$ en $\Omega$ .....	42
Figure III.12: Différence de la résistance $\Delta R_{21}$ en fonction de la fréquence $F$ en $\Omega$ .....	42
Figure III.13 : Différence de la réactance $\Delta X_{10}$ en fonction de la fréquence $F$ en $\Omega$ .....	43
FigureIII.14: Différence de la réactance $\Delta X_{21}$ en fonction de la fréquence $F$ en $\Omega$ .....	43
FigureIII.15: Variations de l'impédance $\Delta Z_{21}$ pour la position « X » en fonction de la fréquence .....	44
FigureIII.16 :Variations de l'impédance $\Delta Z_{21}$ en fonction du changement de position « X » pour la fréquence 1khz .....	44
FigureIII.17: Variations de l'impédance $\Delta Z_{21}$ en fonction du changement de position « X » pour la fréquence 50khz et 200khz .....	45

# Liste figure

---

Figure III.18: Variations de l'impédance $\Delta Z_{21}$ en fonction du changement de position « Z » pour la fréquence 1khz .....	46
Figure III.19: Variations de l'impédance $\Delta Z_{21}$ en fonction du changement de position « Z » pour la fréquence 50khz et 200khz .....	46
Figure III.20: Variations de l'impédance $\Delta Z_{21}$ pour la position « Z » en fonction de la fréquence .....	47
Figure III.21: Variation de l'impédance $Z_2$ en présence du défaut pour différents lif-off (0.5,1,3,5,10mm) en fonction de la fréquence.....	48
Figure III.22: Variation de l'impédance $\Delta Z_{21}$ en présence du défaut pour différents lit-of (0.5,1,3,5,10mm) en fonction de la fréquence.....	48
Figure III.23 : Variations de l'impédance $Z_2$ en fonction de lif-off pour 1khz.....	49
Figure III.24: Variations de l'impédance $Z_2$ en fonction de lif-off pour 200khz.....	49
Figure III.25: Variations de l'impédance $\Delta Z_{21}$ en fonction de lif-off pour : 1khz et 200khz ...	50
Figure III.26: variation de l'impédance $Z_2$ pour différente valeurs de la largeur du défaut en fonction de la fréquence. ....	51
Figure III.27: Zoom de la figure (III.26) .....	51
Figure III.28 : variation de l'impédance $\Delta Z_2$ pour différente valeurs de la largeur du défaut en fonction de la fréquence.....	52
Figure III.29 : variation de l'impédance $\Delta Z_{21}$ en fonction des déférente valeur de la largeur de défaut pour les fréquences : 50khz et 200khz.....	52
Figure III.30: variation de l'impédance $Z_2$ pour différente valeurs de la hauteur du défaut en fonction de la fréquence .....	53
Figure III.31: Zoom de figure (III.30).....	54
Figure III.32 variation de l'impédance $\Delta Z_2$ pour différente valeurs de la hauteur du défaut en fonction de la fréquence .....	54
Figure III.33: variation de l'impédance $\Delta Z_{21}$ en fonction des déférente valeur de la hauteur de défaut pour les fréquences : 1khz .....	55
Figure III.34 variation de l'impédance $\Delta Z_{21}$ en fonction des déférente valeur de la hauteur de défaut pour les fréquences : 200khz.....	55

# **Introduction générale**

# *Introduction générale*

---

## *Introduction générale*

La problématique du Contrôle Non Destructif (CND) est en effet cruciale pour garantir la sécurité et la fiabilité des systèmes industriels, ainsi que la protection des personnes. Le CND vise à détecter les défauts ou les hétérogénéités présents dans les matériaux sans les endommager, permettant ainsi d'éviter les coûts et les risques associés à la destruction des pièces. Dans les secteurs nucléaire et aéronautique, où des composants critiques sont utilisés. L'optimisation des cycles de maintenance et le développement durable sont des aspects essentiels du Contrôle Non Destructif (CND). En comprenant précisément l'état d'intégrité d'une structure, il est possible de prolonger sa durée de vie au-delà des attentes initiales tout en maintenant un niveau élevé de fiabilité.

Effectivement, le Contrôle Non Destructif (CND) a atteint un stade de maturité industrielle grâce aux avancées et à la perfection des logiciels de simulation numérique. Cette évolution est largement stimulée par les exigences des différents secteurs tels que l'aéronautique, le nucléaire et la métallurgie, qui ont été confrontés à la nécessité de disposer des techniques les plus sophistiquées pour obtenir des informations sur l'état de santé, les caractéristiques physiques et géométriques des différents matériaux sans les endommager.

Parmi les techniques de Contrôle Non Destructif (CND) les plus utilisées, on retrouve l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, les ultrasons et les courants de Foucault. Le choix d'une technique particulière pour une application donnée dépend de plusieurs paramètres, tels que la nature des matériaux à contrôler, le type d'information recherchée (détection ou mesure, localisation et forme du défaut), l'environnement du contrôle et le contexte économique (coût, disponibilité des équipements, etc.). Dans ce travail, nous nous intéressons au CND par courants de Foucault (CF).

La technique des Courants de Foucault (CF) est largement utilisée dans le domaine du Contrôle Non Destructif (CND), surtout pour l'inspection de matériaux électriquement conducteurs. Les courants de Foucault sont des courants induits dans un matériau conducteur lorsqu'il est soumis à un champ magnétique variable.

Le contrôle par CF est considéré comme une méthode relativement simple à mettre en œuvre. En effet, pour un contrôle donné, il suffit de choisir une source de courants de Foucault adéquate pour créer une "bonne" répartition des CF permettant d'avoir un "signal de défaut" aussi important que possible. Il est effectivement essentiel d'avoir une connaissance approfondie du phénomène physique des courants de Foucault pour pouvoir les exploiter dans

# *Introduction générale*

---

le cadre du Contrôle Non Destructif (CND). Les courants de Foucault ne sont pas directement mesurables, mais ils agissent sur d'autres grandeurs qui peuvent être mesurées, permettant d'observer d'une manière indirecte, leur présence et leurs effets.

Cette méthode de contrôle est sensible aux défauts géométriques et électromagnétiques d'une pièce. Les inclusions, les fissures et les effets de la corrosion sont des exemples de défauts qui peuvent être détectés. La technique est donc capable de fournir des informations précieuses sur l'état d'intégrité d'un matériau ou d'une pièce.

L'avantage de la méthode du CND-CF est sa facilité de mise en œuvre, sa robustesse dans le contexte des applications industrielles et son coût relativement faible par rapport à d'autres techniques de contrôle non destructif. Les outils de simulation jouent un rôle de plus en plus important dans la conception des systèmes de contrôle et la démonstration de leurs performances. La modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction entre la sonde (source de courant de Foucault) et la pièce à tester, ce qui permet de définir une structure de sonde adaptée à un problème spécifique.

La modélisation des phénomènes du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (CND-CF) repose sur les équations de Maxwell, complétées par les relations constitutives, les conditions aux limites et les conditions de continuité. La résolution de ces équations se fait généralement à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF), qui permet de prendre en compte des géométries complexes. La prise en compte du déplacement du capteur le long de la pièce nécessite l'introduction d'une technique de simulation de mouvement qui est dans notre cas la méthode d'affectation de propriétés.

Pour une étude scientifique simple et claire, nous avons réalisé un mémoire dont la structure est organisée comme suit :

Le premier chapitre présente des généralités sur le CND. Les principales méthodes de CND sont rappelées. Le contrôle basé sur les courants de Foucault est particulièrement détaillé.

Le deuxième chapitre sera dédié à la modélisation du dispositif de CND par CF et aux équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électriques et magnétiques dans le domaine étudié.

Enfin, dans le chapitre trois nous avons intéressé à décrire en détail la modélisation et la simulation de fissures de longueurs variables dans une structure multicouche tridimensionnelle en utilisant la méthode à éléments finis avec COMSOL Multiphysics. Cela inclura probablement des aspects tels que la définition de la géométrie de la structure, les propriétés

# *Introduction générale*

---

matérielles, les conditions aux limites, la génération du maillage, la résolution numérique et l'analyse des résultats obtenus.

Nous terminons par une conclusion générale.

## **Chapitre I :**

# **GENERALITES SUR LE CONTROLE NON DESTRUCTIF (CND)**



## Chapitre I : GENERALITES SUR LE CONTROLE NON DESTRUCTIF (CND)

### I.1. Introduction

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de techniques et de procédés qui permettent d'obtenir des informations sur l'état de santé d'une pièce ou d'une structure sans avoir besoin de la dégrader ou de l'endommager, ce qui garantit son utilisation ultérieure sans dommage. [1]

L'histoire du contrôle non destructif remonte à la fin du XIX siècle, avec le développement de la physique moderne. Cependant, c'est à partir de la Seconde Guerre mondiale que la technologie du CND a pris son essor dans l'industrie, en particulier dans le domaine de la métallurgie. Dans les années 1960 et 1970, avec l'accélération de la construction de centrales nucléaires et le développement de l'aviation, le CND a connu des progrès spectaculaires, avec le développement de différentes méthodes pour répondre aux contraintes liées à la nature du défaut recherché, à la forme complexe de la pièce testée (rivetée, soudée, bobinée, etc.) et aux conditions dans lesquelles l'inspection doit être effectuée (en cours de fabrication, en réception, en service). [2]

Effectivement, parmi les méthodes de CND les plus couramment utilisées, on trouve les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (comme la radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (telles que la magnétoscopie et les courants de Foucault). Le choix de la méthode dépend de plusieurs facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (comme les défauts débouchant ou enfouis), les conditions de mise en œuvre (par exemple, en cours de fabrication, en service, ou en phase de maintenance). [3]

Dans ce premier chapitre, on présentera les principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault.

### I.2. Différentes techniques de contrôle non destructif

Il est impossible pour une méthode de Contrôle Non Destructif (CND) d'être universelle en raison de la diversité des pièces à inspecter, de leurs géométries, de leurs matériaux et des conditions d'inspection. Pour répondre à ces diverses exigences, plusieurs techniques de CND ont été développées, chacune présentant certains avantages et inconvénients. Bien qu'il ne soit pas possible de dresser une liste exhaustive de toutes les techniques utilisées dans le domaine du CND, nous pouvons donner un aperçu global des techniques les plus couramment utilisées dans l'industrie. [3]

On distingue : [4]

- Examen visuel
- Ressuage
- Radiographie
- Magnétoscopie
- Ultrasons
- Courant de Foucault

### **I.3. CND par courant de Foucault**

Le contrôle par courant de Foucault (CF) est une méthode largement utilisée parmi les techniques électromagnétiques de Contrôle Non Destructif (CND). Cette méthode est spécifiquement conçue pour les pièces électriquement conductrices et s'adapte particulièrement bien aux pièces cylindriques telles que les barres et les tubes pour détecter les défauts de surface ou sous-cutanés, ainsi que toute variation des paramètres physiques du matériau à contrôler tels que la conductivité électrique ( $\sigma$ ) et la perméabilité magnétique ( $\mu$ ).

La particularité du contrôle par courant de Foucault réside dans sa capacité à injecter de l'énergie électromagnétique dans un dispositif sans qu'il y ait de contact avec l'inducteur.

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons étudier et résoudre un problème de Contrôle Non Destructif à l'aide de la méthode CF. Nous allons donc approfondir cette technique dans les sections suivantes pour mieux comprendre son fonctionnement et son utilisation pratique. [5]

#### **I.3.1. Principe physique de CND-CF**

Le principe du contrôle par courant de Foucault consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique variable, créé à l'aide d'une bobine excitatrice parcourue par un courant électrique variable. Ce champ magnétique variable induit des courants électriques dans la pièce à contrôler, appelés courants de Foucault, dont la trajectoire peut être perturbée soit par la géométrie, soit par les caractéristiques internes de la pièce.

Le contrôle par courant de Foucault repose sur la création de courants de Foucault dans la pièce à contrôler, qui vont à leur tour créer un champ magnétique de réaction s'opposant au champ initial d'excitation, conformément à la loi de Lenz. Ces courants sont plus importants à la surface de la pièce et s'affaiblissent en allant vers la profondeur. Pour détecter les défauts profonds, l'utilisation de fréquences basses est souvent privilégiée.

En pratique, cette technique repose sur la mesure de la variation de l'impédance, qui dépend de plusieurs paramètres physiques de la pièce à contrôler, tels que la conductivité électrique et

la perméabilité magnétique. Une variation de l'un de ces paramètres va entraîner une modification de l'impédance aux bornes du capteur de mesure. En mesurant cette impédance, il est possible d'évaluer qualitativement et quantitativement les propriétés physiques de la pièce à contrôler, et de détecter d'éventuelles anomalies ou défauts, tels que des fissures, des porosités ou des variations de propriétés du matériau. [5]

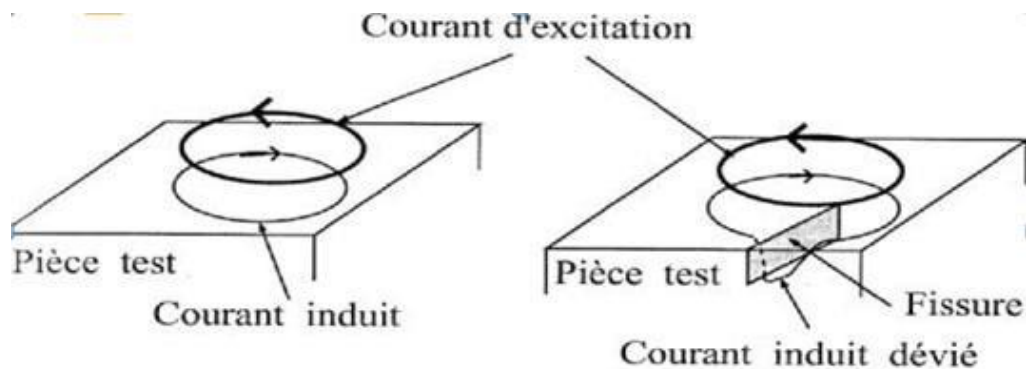


Figure I.1: Principe du CND par courant de Foucault

La technique des courants de Foucault permet d'effectuer les contrôles suivants :

- Le contrôle dimensionnel (caractérisation géométrique) s'applique à des mesures d'épaisseur de revêtement (ex : peinture, dépôt électrolytique) et la détermination des caractéristiques géométriques du matériau (ex : l'épaisseur de tubes ou de plaque).
- Le contrôle métallographique (caractérisation électromagnétique) est destiné à discriminer les matériaux, de dureté, de composition chimique ou de structure métallographique différente.
- Le contrôle de l'état de santé et recherche de défauts (fissure, inclusions,).

### I.3.2. Effet de peau

Le phénomène décrit ici est l'induction électromagnétique. Il se produit lorsque des courants électriques sont induits dans un matériau conducteur en présence d'un champ électromagnétique variable dans le temps. La grandeur caractéristique de ce phénomène est la profondeur de pénétration, qui est la distance à partir de la surface du matériau à laquelle les courants induits décroissent de manière exponentielle.

La profondeur de pénétration est donnée par l'équation

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\mu_r\sigma f}} \quad \text{I.1}$$

$\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide.

$\mu_r$  est la perméabilité relative du matériau.

$\sigma$  est la conductivité électrique du matériau.

$f$  est la fréquence du champ électromagnétique.

Si l'on considère une pièce plane infinie excitée par une nappe de courants extérieure, de fréquence  $f$ , parallèle au plan, le module de la densité de courant dans la pièce peut être exprimé par la relation suivante :

$$J(z) = J_0 e^{-z/\delta} \quad \text{I.2}$$

On peut constater que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur. [3] (figure I.7)

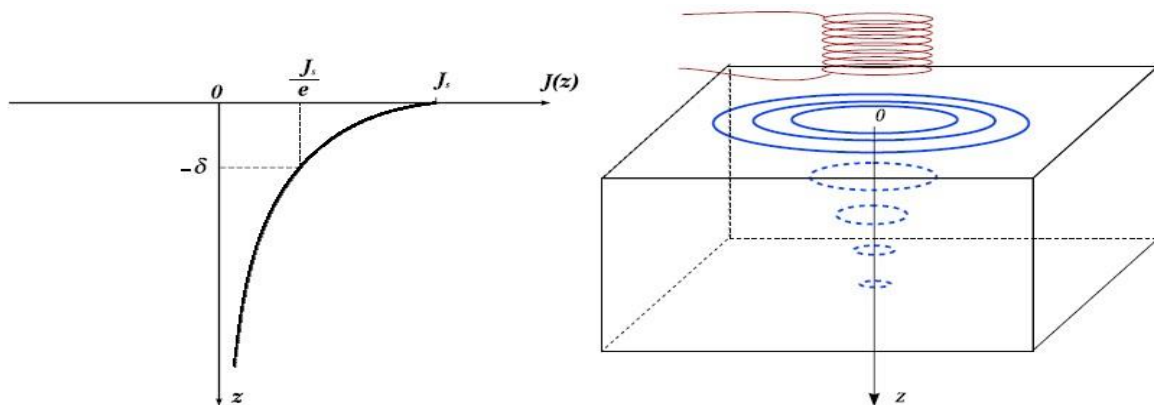


Figure I.2: Répartition des courants de Foucault dans une pièce

### I.3.3. Domaine d'application

On présente ci-dessous certaines applications de la méthode de contrôle par courants de Foucault :

- Contrôle de filetage.
- Contrôles de tôles (d'épaisseur de revêtement/matériaux, recherche de défauts).
- Contrôles de nuances (composition, structure...).
- Contrôles de traitements thermiques de surface (dureté...).
- Contrôles de matériaux composites comportant des fibres conductrices.
- Contrôles de soudures qui ne présentent pas de vagues de solidification de soudage trop marquées. [6]

### **I.3.4. Avantages et Inconvénient**

Les Avantages et Inconvénients des courants de Foucault sont :

#### **I.3.4.1. Avantages**

- Les instruments de diagnostic sont portables.
- Les composants à inspecter ne nécessitent pas une préparation préalable avant de procéder aux tests.
- Permet l'inspection des composants de forme et de taille complexes.
- Permet la détection de défauts de surface.
- Les résultats de l'inspection sont immédiats.
- Le contact entre la sonde et la pièce à inspecter n'est pas nécessaire.
- Sensible aux défauts et aux fissures de petite taille. [7]

#### **I.3.4.2. Inconvénients**

- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs.
- La position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts.
- La détection des défauts se fait d'une manière locale.
- La profondeur d'inspection dépend de la fréquence d'excitation.
- La compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection. [4]

### **I.3.5. Limites du CND par courants de Foucault**

- La surface à inspecter doit être accessible à la sonde.
- Seuls les matériaux conducteurs de courant peuvent être inspectés.
- La finition et la rugosité de la surface peuvent mener à de fausses indications. [7]

## **I.4. Différents types de sondes**

Le capteur utilise une bobine ou un ensemble de bobines pour produire et détecter les courants de Foucault. La mesure est réalisée en évaluant l'impédance ou la différence de potentiel qui représente l'image des courants de Foucault. Il existe une variété de méthodes pour implémenter des bobinages afin de permettre le contrôle par courants de Foucault.

Un capteur à CF peut accomplir diverses tâches, du fait que la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent essentiellement de :

- La conductivité électrique  $\sigma$ .
- La perméabilité magnétique  $\mu$ .
- La fréquence d'excitation  $f$ .
- La géométrie du matériau à contrôler.
- La distance entre le capteur et la pièce, elle s'appelle aussi l'entrefer ou bien Lift-off. Eventuellement, le défaut dans la pièce.

Selon leur utilisation, les capteurs de courants de Foucault peuvent avoir différentes formes, positions par rapport au matériau, fonctions et conceptions. Ils peuvent être catégorisés en fonction de trois critères principaux : leur positionnement, leur fonction et leur mode de contrôle. [8]

#### I.4.1. Selon la position

##### I.4.1.1. 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. [9]

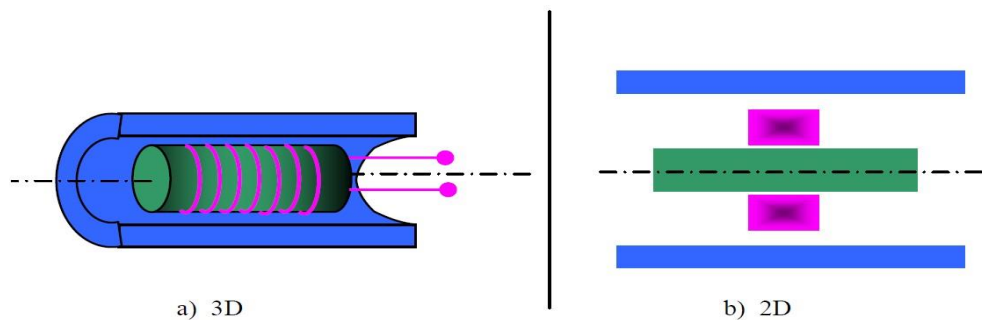


Figure I.3: Sonde interne [10]

##### I.4.1.2. Sonde encerclant

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner (Figure I.9). Dans la majorité des cas, il s'agit de bobines à section circulaire. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, les barres. [10]

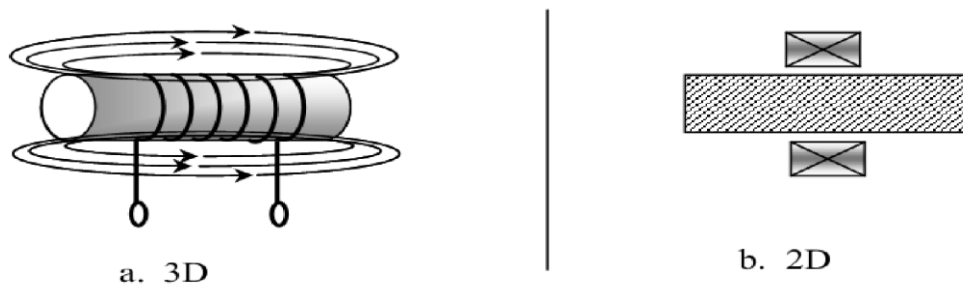


Figure I.4: Bobine encerclant

### I.4.1.3. Sonde ponctuelle

Les enroulements d'une petite bobine peuvent être disposés sur la surface ou à proximité de celle-ci d'une pièce, ce qui permet un contrôle local du produit à partir de sa surface. La bobine peut être déplacée avec deux degrés de liberté, ce qui lui permet d'analyser une zone de taille équivalente à celle de sa section transversale. Cette méthode offre ainsi la possibilité d'inspecter localement la pièce, même dans les régions difficiles d'accès. [9]

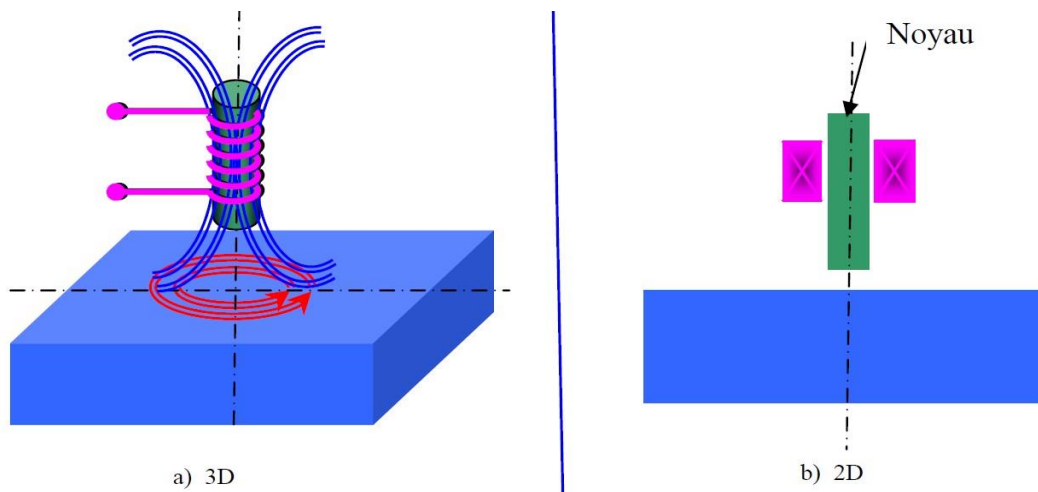


Figure I.5: Bobine ponctuelle (Palpeur) [10]

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

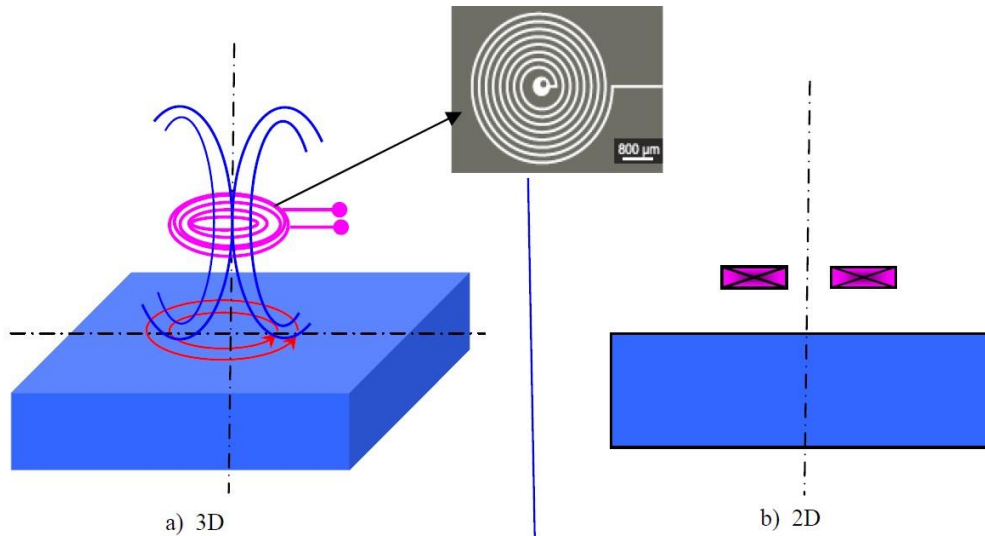


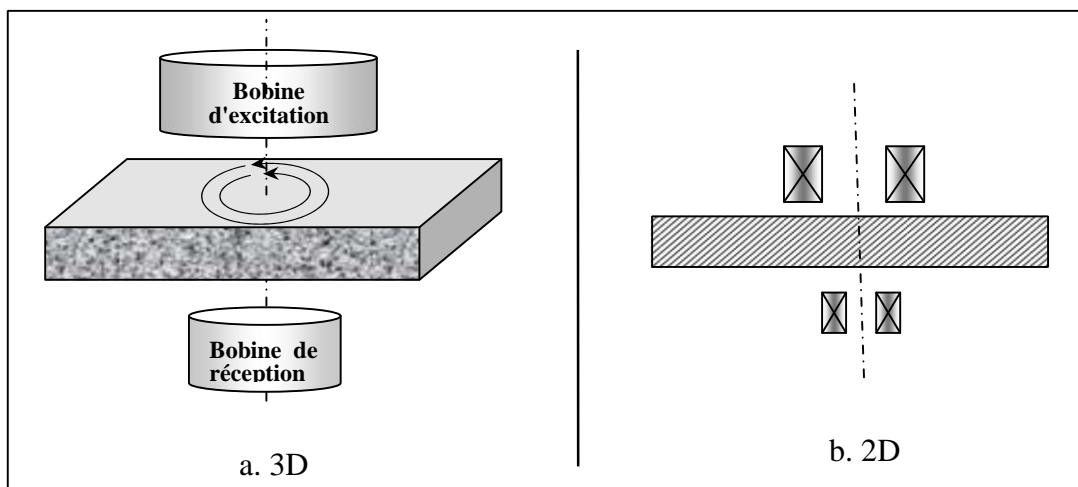
Figure I.6:Bobine plate [10]

**I.4.1.4. Capteur à double fonction**

Ce capteur assure les deux fonctions (figure I.12) d’excitation et de réception. L’extraction d’informations s’effectue par la mesure de l’impédance équivalente ou de sa variation, qui est provoquée par la présence du matériau à proximité du capteur ou par la présence d’une anomalie dans ses matériaux. [4]

**I.4.1.5. Capteur à fonctions séparées**

Le capteur est muni d’un second enroulement qui servira uniquement pour la mesure (figure I.13). On parle alors de mesure par Trans-impédance ou de capteur à fonctions séparé.



FigureI.7: Capteur à fonction séparée



### I.4.3. Selon le mode de contrôle

Le mode de contrôle peut se faire en mode absolu ou différentiel :

#### I.4.3.1. Mode absolu

Un capteur absolu est utilisé pour mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit à examiner par rapport à une référence fixe. Dans le contrôle par courants de Foucault, le signal récupéré par la bobine est très faible par rapport au signal émis. C'est pourquoi une mesure comparative est utilisée. La méthode absolue, quant à elle, utilise un capteur à double fonction, et la mesure est réalisée en comparant le 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), (Figure (I. 14)). [11]

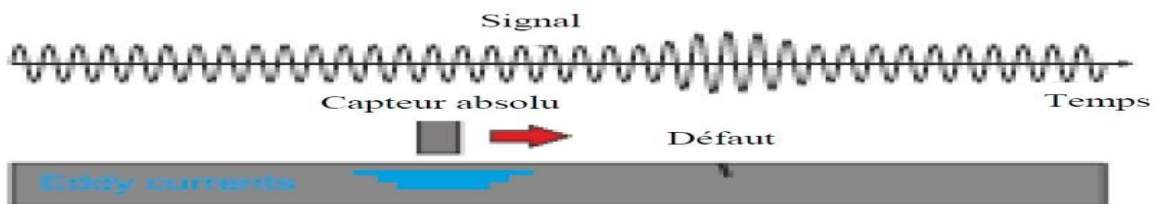


Figure I.8: Capteur absolu

#### I.4.3.2. Mode différentiel

Ils sont constitués d'au moins deux éléments de mesure rigidement liés dans le capteur. Dans le cas d'un capteur à deux éléments, la mesure différentielle équivaut à comparer deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins (figure I.15). [5]

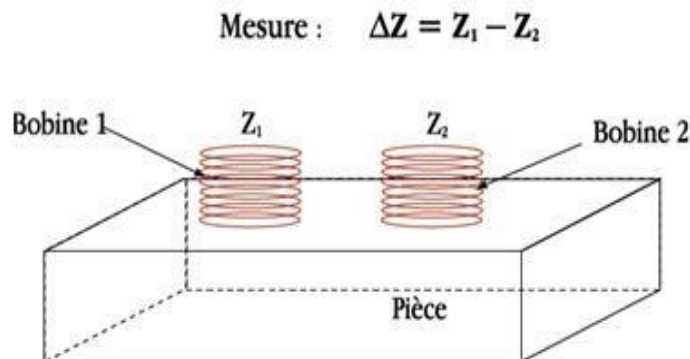


Figure I.9: Sonde différentielle

#### I.4.4. Modes d'excitation

On peut distinguer trois modes d'excitation :

- Excitation mono-fréquence.
- Excitation multifréquences.
- Excitation pulsée

##### I.4.4.1. Signal mono-fréquentiel

Les courants induits sont générés par une excitation sinusoïdale de fréquence fixe. Le choix de la fréquence dépend principalement de l'application envisagée et de la sensibilité des paramètres recherchés. Cependant, la fréquence doit être choisie dans une plage raisonnable. En effet :

Pour une fréquence trop basse, l'amplitude des courants induits sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause du bruit. Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés notamment par les capacités inter spires du capteur. Cette méthode présente des limitations car elle permet difficilement de caractériser le défaut. [12]

##### I.4.4.2. Signaux multifréquences

La méthode multifréquence est probablement la plus couramment utilisée dans le contrôle non destructif par courants de Foucault. En effectuant des mesures à plusieurs fréquences d'excitation, il est possible de réduire considérablement l'effet des grandeurs perturbatrices.

L'utilisation de  $n$  paramètre permet d'avoir  $2n$  informations réelles et d'éliminer  $2n-1$  perturbation.

##### I.4.4.3. Excitation pulsée

L'analyse des signaux en courants de Foucault pulsés diffère considérablement de celle utilisée en courants sinusoïdaux. Dans le cas des courants pulsés, on utilise généralement la réponse temporelle fournie directement par une ou plusieurs bobines réceptrices. L'analyse se fait alors en étudiant l'évolution d'un ou plusieurs points particuliers du signal de réception. Les caractéristiques des signaux transitoires couramment utilisées dans le domaine du CND par CF pulsés sont la valeur crête de l'amplitude « peak value » et l'abscisse temporelle de cette valeur crête « peak time ». La forme des signaux d'alimentation peut être rectangulaire, triangulaire

ou semi -sinusoïdale, cette dernière étant la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

Le contrôle non destructif par courants de Foucault pulsés présente l'avantage, par rapport aux courants de Foucault à fréquence unique, de permettre l'inspection de structures électriquement conductrices jusqu'à une certaine profondeur, grâce à un large spectre de fréquences, notamment des basses fréquences. Toutefois, cette méthode requiert un temps d'inspection considérablement plus long, en particulier si l'on utilise des techniques d'analyse spectrale. [13]

## **I.5. Conclusion**

Ce chapitre a fourni une vue d'ensemble générale sur les techniques de contrôle non destructif en présentant les différents principes physiques qui les régissent. Nous avons particulièrement mis l'accent sur la technique des courants de Foucault appliquée au CND, en présentant ses objectifs, ses domaines d'application, les différents types de capteurs, les modes d'excitation et les grandeurs influençant l'effet de peau, étroitement liées aux CF.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons la modélisation mathématique qui permettra d'étudier les phénomènes physiques afin de prédire la réponse du capteur en interaction avec la cible.

**CHAPITRE II :**  
**MODELISATION DU CONTROLE**  
**NON DESTRUCTIF PAR CF**

## **Chapitre II : Modélisation du Contrôle Non Destructif par CF**

### **I.1. Introduction**

Dans le domaine du Contrôle Non Destructif (CND) par (CF), la modélisation numérique est devenue l'outil principal pour la conception des sondes, grâce aux avancées des performances du matériel informatique.

Une étude des performances de détection du système est généralement réalisée lors de la modélisation des Contrôles Non Destructifs (CND) par la méthode des éléments finis (CF). Cette modélisation repose principalement sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la complexité de la configuration à simuler, la résolution peut être effectuée de manière analytique ou numérique.

La résolution analytique des équations de Maxwell présente l'avantage d'être rapide et de fournir des résultats précis. Cependant, dans le contexte de la modélisation des Contrôles Non Destructifs (CND) par (CF), la complexité de la configuration rend souvent impossible l'obtention de solutions analytiques. Une autre approche consiste à mettre en œuvre des méthodes numériques qui permettent l'étude de configurations de pièces de sonde plus différentes, y compris toute géométrie de la pièce, les défauts et les capteurs. Parmi ces méthodes, nous pouvons nous référer à 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).

Ce chapitre sera divisé en deux grandes parties. La première partie portera sur le problème CND des CF, l'évolution des équations de Maxwell pour l'obtention des champs électriques et magnétiques, les conditions aux limites du domaine, les hypothèses de continuité et de simplification.

### **II.2. Modélisation du dispositif de CND par CF**

Le système représenté sur la figure II.2 est utilisé pour modéliser un dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault. Ce dispositif est utilisé pour évaluer la présence de défauts dans un matériau en utilisant des courants induits.

Dans ce système, une bobine représente le capteur des courants de Foucault, qui génère un champ électromagnétique. Cette bobine est alimentée par une densité de courant variable dans le temps. Lorsque ce champ électromagnétique interagit avec la pièce à tester, des courants de Foucault sont induits dans la pièce. [9] [14]

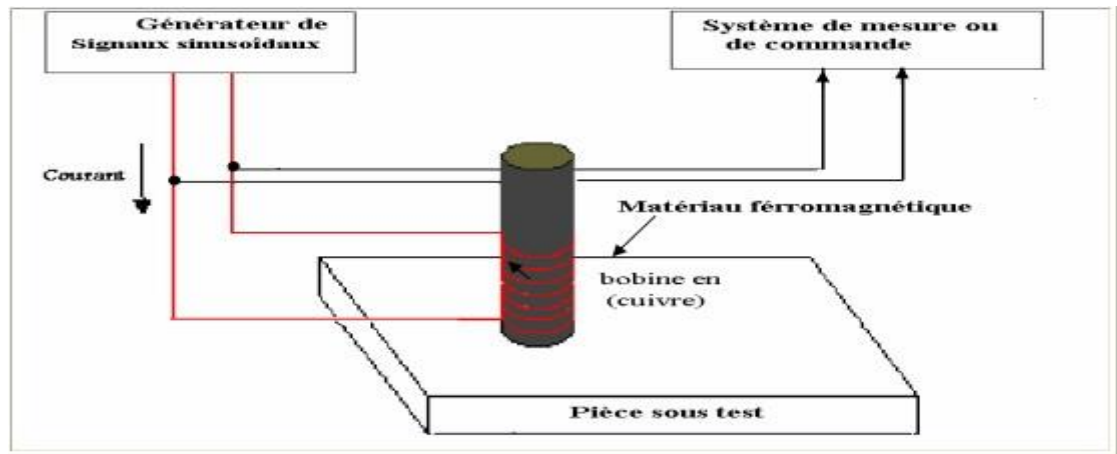


Figure II.1 Principe du capteur à courants de Foucault Intérêt de la modélisation.

### II.3. Mise en équations

Les problèmes liés au calcul des courants de Foucault peuvent être représentés par un modèle simplifié composé de trois domaines : l'air, le matériau conducteur à tester et une source de courant. Ce modèle est représenté sur la figure II.3.

Le domaine de calcul est noté  $\Omega$  et il est délimité par la frontière  $\Gamma$ . Dans ce cas, le domaine de calcul représente l'espace où se déroule le problème et comprend à la fois l'air et le matériau conducteur. La frontière  $\Gamma$  est la surface qui entoure le domaine de calcul et sépare l'air du matériau conducteur. [15]

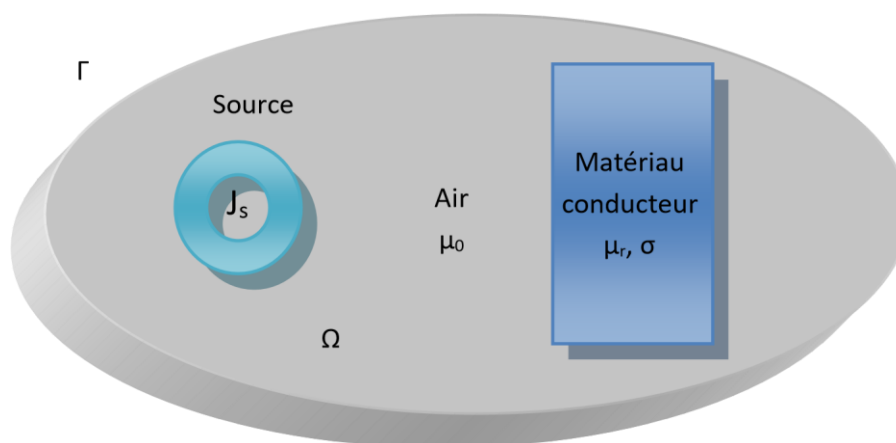


Figure II.2 : Domaine d'étude d'un problème de CND-CF.

$\Omega$  : Domaine d'étude

$J_s$  : Densité de courant électrique dans la source.

$\Gamma$  : Les frontières qui enveloppent le domaine d'étude.

$\sigma$  Conductivité électrique.

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique absolue du vide.

### II.3.1. Équations de Maxwell

Tout phénomène électromagnétique peut être décrit par une formulation couplée des équations de Maxwell. Ces équations, formulées par James Clark Maxwell, rassemblent les découvertes de ses prédécesseurs et établissent une relation entre les grandeurs électriques et magnétiques. [16]

#### II.3.1.1. Forme différentielle

$$\text{Maxwell-faraday.} \quad \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{II.1}$$

$$\text{Maxwell-Ampère.} \quad \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{II.2}$$

$$\text{Conservation du flux magnétique.} \quad \text{div} \vec{B} = 0 \quad \text{II.3}$$

$$\text{Maxwell-Gauss.} \quad \text{div} \vec{D} = \rho \quad \text{II.4}$$

$E$  [V/m] et  $H$  [A/m] : Champs électrique et magnétique.

$D$  [A.s/m] et  $B$  [T] : Inductions électrique et magnétique.

$J$  [A/m<sup>2</sup>] et  $\rho$  [C/m<sup>3</sup>] : Densités de courant de conduction et de charge électrique.

L'équation (II.2) mentionnée est une généralisation de la loi d'Ampère dans le contexte du couplage électromagnétique. Elle forme, avec l'équation (II.1), les équations de couplage électromagnétique. D'autre part, les équations (II.3) et (II.4) constituent l'équation de conservation, les lois de comportement, qui décrivent les caractéristiques des milieux. Sans eux, le système (II.1 à II.4) serait indéterminé.

Elles sont données sous les formes suivantes :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{II.5}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad \text{II.6}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{II.7}$$

$\sigma$  et  $\mu$  : peuvent être soit des scalaires, modélisant le comportement de matériaux isotrope, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie. [17]

### II.3.2. Lois de comportement des milieux

Pour décrire pleinement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, il est nécessaire d'ajouter aux équations précédentes des relations connues sous le nom de lois constitutives du milieu. Ces lois incluent la loi d'Ohm, l'équation de continuité et la relation de passage. [18]

### II.3.3. Relations constitutives du milieu [5]

#### II.3.3.1. Dans un milieu magnétique

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{II.8}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad \text{II.9}$$

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

$\mu_0$  [4 $\pi$ .10<sup>-7</sup>] : Perméabilité magnétique du vide.

$\mu_r$  Perméabilité magnétique relative du milieu.

#### II.3.3.2. Dans un milieu diélectrique

Nous avons la relation entre le vecteur induction électrique  $\vec{D}$  et le champ électrique  $\vec{E}$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{II.10}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad \text{II.11}$$

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

$\epsilon_r$  ; Permittivité électrique relative du milieu considéré .

$\epsilon_0$  [F/m] : Permittivité électrique à vide.

$C$  [m/s] : Vitesse de la lumière.



**II.3.4. Loi d'ohm**

La loi d'ohm exprime la relation liant la densité de courant  $J$  au champ électrique  $E$  à travers la conductivité électrique  $\sigma$  [ $\Omega.m$ ]<sup>-1</sup> [19]. Cette loi est donnée par :

$$J = J_s + J_{ind} \quad \text{II.12}$$

$$J = \sigma(E + v \wedge B) \quad \text{II.13}$$

$v$  est le vecteur de la vitesse,  $J_s$  est la densité du courant imposé dans l'inducteur et  $J_{ind}$  est la densité des courants induits. Le terme  $\sigma E$  représente le courant de conduction résultant du champ électrique  $E$ , et  $\sigma (v \wedge B)$  exprime le courant résultant du mouvement.

Dans le cas d'un milieu en mouvement, cette loi s'écrira :

$$J = \sigma (\vec{E} + \vec{E}') \quad \text{II.14}$$

Avec :

$$E' = v \wedge B$$

**II.3.5. Equation de continuité**

L'équation de continuité, appelée aussi équation de la conservation de la charge électrique est donnée : [20]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{II.15}$$

$\rho$  : Densité de la charge électrique.

**II.3.6. Relations de passage**

Les propriétés électriques et magnétiques de deux milieux voisins séparés par une surface, sont différentes nous définissons les conditions de passage en intégrant les équations de Maxwell entre deux points très proches de part et d'autre de cette surface ; on conclut aux résultats suivants. [21]

**II.3.6.1. Champ E**

Continuité de la composante tangentielle :  $\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial B}{\partial t}$  II.16

On a  $\oint \vec{E} dl^{\rightarrow} = \iint \vec{\nabla} \wedge \vec{E} \cdot dS = - \iint \partial \vec{B} / \partial t \cdot dS = - d dt \iint \vec{B} \cdot \vec{ds}$  II.17

Lorsque l'épaisseur se rapproche de zéro, la surface devient de plus en plus petite et le champ tend vers zéro aussi

Ainsi :

$$\vec{E}_{t2} - \vec{E}_{t1} = 0 \quad \text{II.18}$$

### II.3.6.2. Champ B

Continuité de la composante normale. On a toujours ici :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0, \text{ donc } \vec{B}_{n2} - \vec{B}_{n1} = \vec{0} \quad \text{II.19}$$

La discontinuité de la composante normale de l'induction électrique  $\mathbf{D}$  due aux charges surfaciques  $q_s$  si elles existent :

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = \overline{\rho}_s \quad \text{II.20}$$

La discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique si les courants surfaciques existent.

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \cdot \vec{n} = \vec{K} \quad \text{II.21}$$

$\mathbf{n}$  : étant la normale à l'interface séparant les deux milieux.  $\mathbf{K}$  : Densité de courant portée par la surface de séparation.  $\rho_s$  : Densité de charge électrique portée par la surface.

### II.3.7. Hypothèses simplificatrices

Suivant les dispositifs étudiés, il est souvent possible de négliger certains phénomènes et de considérer des régimes quasi-stationnaires, ce qui conduit à des équations découplées plus simples à résoudre. De plus, certaines hypothèses simplificatrices peuvent être introduites pour simplifier la modélisation du système. Dans notre cas d'étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes : [23]

- La densité volumique de charge est considérée comme nulle
- Le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale.
- La densité surfacique de courant entre les deux milieux est nulle ( $J_s=0$ )
- 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 ;  $\partial \vec{D} / \partial t = 0$

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

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{II.25.a}$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0 \quad \text{II.25.b}$$

$$\operatorname{rot} \vec{U} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{II.25.c}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad \text{II.25.d}$$

Avec les relations constitutives suivantes :

$$\vec{U} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad \text{II.26}$$

$$\vec{U} = \mu \vec{H} \quad \text{II.27}$$

Si le système ne contient pas d'aimants permanents ou de matériaux ferromagnétiques, l'induction magnétique résiduelle peut être considérée comme nulle ( $B_r = 0$ ).

#### II.4. Méthodes de résolution

La résolution des équations de Maxwell qui régissent le CND par CF peut être analytique ou numérique.

##### II.4.1. Méthodes analytiques

Les premières méthodes de résolution des équations de Maxwell pour le CND par CF se sont basées sur des méthodes analytiques, issues de modèles à une seule dimension. Bien que ces méthodes soient simples et permettent d'obtenir une solution mathématique exacte du problème, elles deviennent rapidement impraticables lorsque l'on étudie des problèmes présentant des formes complexes, tels que les problèmes bidimensionnels ou tridimensionnels. C'est pourquoi les méthodes numériques ont été développées pour résoudre ces problèmes complexes de manière efficace. [3]

##### II.4.2. Méthodes numériques

Les méthodes numériques permettent d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées. Parmi ces méthodes on a :

**II.4.2.1. Méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles, elle repose sur la subdivision du domaine d'étude en des sous-domaines élémentaires et à donner une approximation de la solution de l'équation différentielle qui est construite à partir d'une formulation équivalente du problème en un système d'équations algébriques, elle peut être soit une « formulation variationnelle » ou en « résidus pondéré ».

La résolution des équations intégrales implique l'obtention des fonctions de Green qui correspondent à la géométrie spécifique de l'étude. Les fonctions de Green sont des solutions particulières des équations intégrales qui décrivent la réponse du système à une source ponctuelle. Elles capturent l'influence des conditions aux limites et de la géométrie du système sur les champs électriques ou magnétiques.

**II.5. Conclusion**

Ce chapitre est consacré à la modélisation du Contrôle Non Destructif (CND) par le (CF). Nous avons présenté les différentes équations utilisées dans le CND, ainsi que les méthodes de résolution des équations de Maxwell ainsi que les intérêts de la modélisation. Enfin, nous avons illustré les différentes formulations en termes de champs électrique et magnétique

## Chapitre III Résultats de simulation

## Chapitre III : Résultats de simulation

### III.1. Introduction

La méthode des éléments finis est implémentée dans le logiciel COMSOL Multiphysics. Le logiciel est un outil de conception et de modélisation dont le principal avantage est de ne pas être dédié sur un domaine d'application spécifique. Il regroupe un ensemble d'outils et une bibliothèque des modèles prédéfinis permettant de simuler tout processus physique pouvant être décrit par des équations aux dérivées partielles (EDP), y compris les équations de Maxwell et le problème CND par CF.

Dans notre travail, nous nous intéresserons au CND-CF appliqué au cas de pièces plates conductrices avec défauts (à la surface de la pièce et en profondeur). Nous terminerons avec une conclusion.

### III.2. Description de logiciel « COMSOL-Multiphysics »

Le logiciel COMSOL-Multiphysics (anciennement FEMLAB) était avant tout un outil pour résoudre des équations aux dérivées partielles via des éléments finis. Développé à l'origine comme un TOOLBOX de MATLAB, il a maintenant son propre environnement graphique permettant de dessiner la géométrie et d'afficher les résultats en post-traitement.

Il a été choisi pour les raisons suivantes :

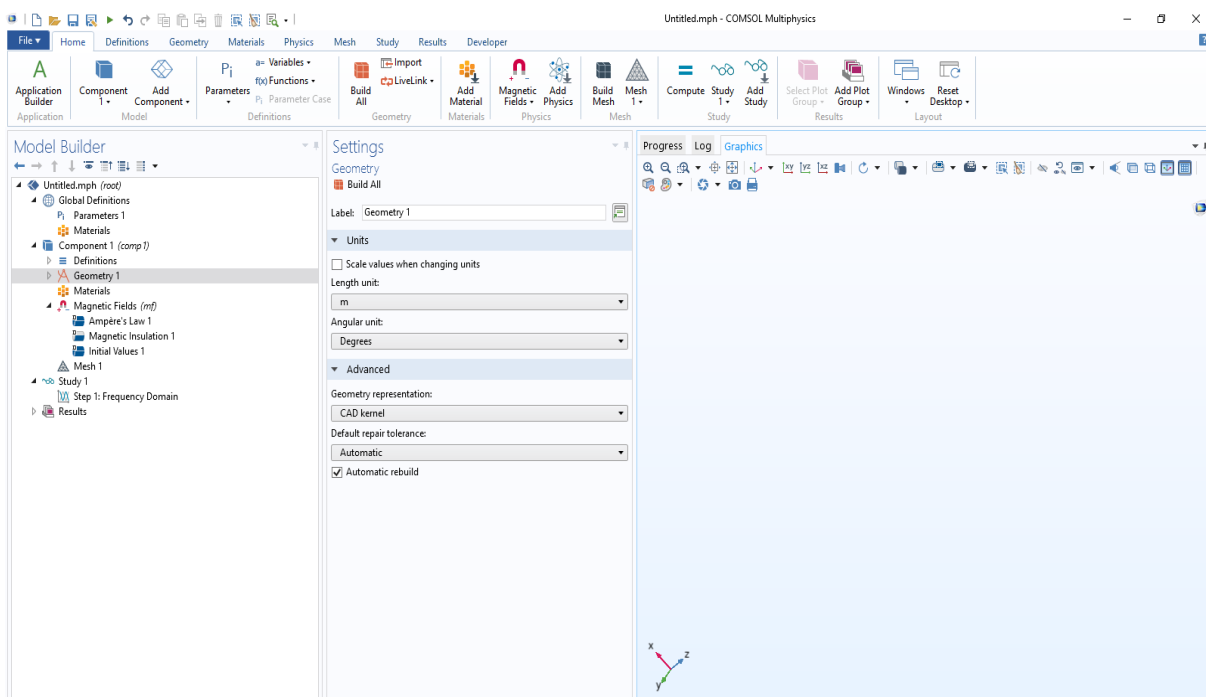
- Il est doué pour résoudre les problèmes électromagnétiques.
- Il peut prendre en compte l'existence de divers diélectriques.
- Il peut simuler des surfaces conductrices minces.
- Il permet de travailler en mode statique ou dynamique. [24]

### III.3. Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5

L'interface COMSOL peut être divisée en quatre parties. Sur la gauche, on trouve le Modèle (Paramètres) qui peut définir les variables et autres paramètres du problème, 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 problème 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 paramètres physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de visualiser la géométrie, le

maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer le grossissement de l’affichage, l’orientation d’un objet tridimensionnel, etc. Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre. Finalement, au-dessous de la fenêtre d’affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d’erreurs, le progrès des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée.

Les différents éléments de l’interface utilisateur de COMSOL 5.5 sont présentés à la figure ci-dessous :



FigureIII.1 : Interface utilisateur de COMSOL 5.5

### III.3.1. Création du modèle de simulation

La première chose à faire pour initialiser la modélisation est de choisir l’espace de travail. Cette démarche consiste à choisir l’option « model wizard », puis on opte pour le model 3D. Ensuite, dans la fenêtre « Select AC/DC », cliquer sur « champs électromagnétique » puis sur « Champs magnétique (mf) » puis sur l’option « Add » et « study ». Une fois la sélection du modèle établie, nous devons sélectionner le type d’étude désirée. Dans la fenêtre « Select study », choisir le cas d’étude en domaine fréquentiel, puis naviguer sur « Done ». L’étape suivante c’est l’affectation des propriétés physiques de chaque domaine, on termine par la simulation et l’exploitation des résultats.

### III.4. Description de la configuration simulée

Il s'agit d'une bobine qui contrôle une plaque en aluminium. Nous avons effectué des simulations afin d'estimer les valeurs de l'impédance, résistance et de la réactance de la bobine pour différents paramètres du système tels que : Les dimensions et les positions des fissures, la fréquence d'excitation de l'alimentation de la bobine, le lift-off... etc.

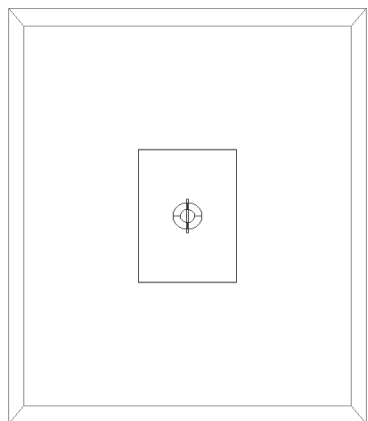
#### III.4.1. Création de la géométrie

Cette étape consiste à créer un modèle numérique 3D. La géométrie est la combinaison de quatre géométries (plaque, domaine, bobine et défaut). Le tableau ci-dessous les dimensions de la géométrie.

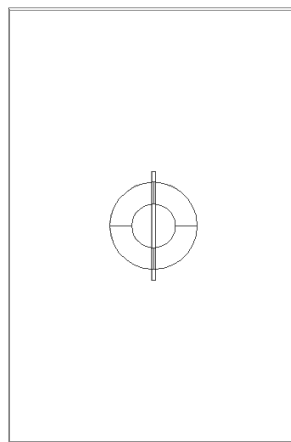
Tableau III.1 Dimension et caractéristique de la géométrie

Paramètre	Valeur
<b>Capteur (la bobine )</b>	
Rayon	6mm
Hauteur	3mm
<b>Plaque</b>	
Largeur	40mm
Profondeur	60mm
Hauteur	15mm
Nature	Aluminium
<b>Défaut</b>	
Largeur	0.5mm
Profondeur	15mm
Hauteur	5mm

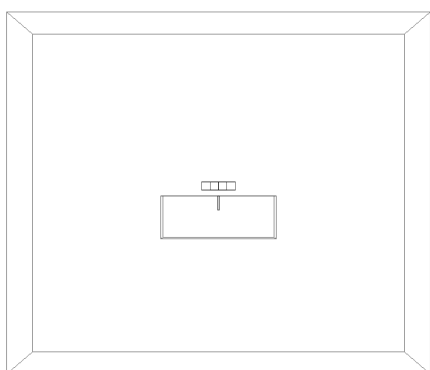




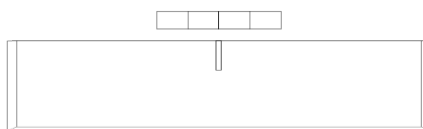
a) L'axe 'xy'



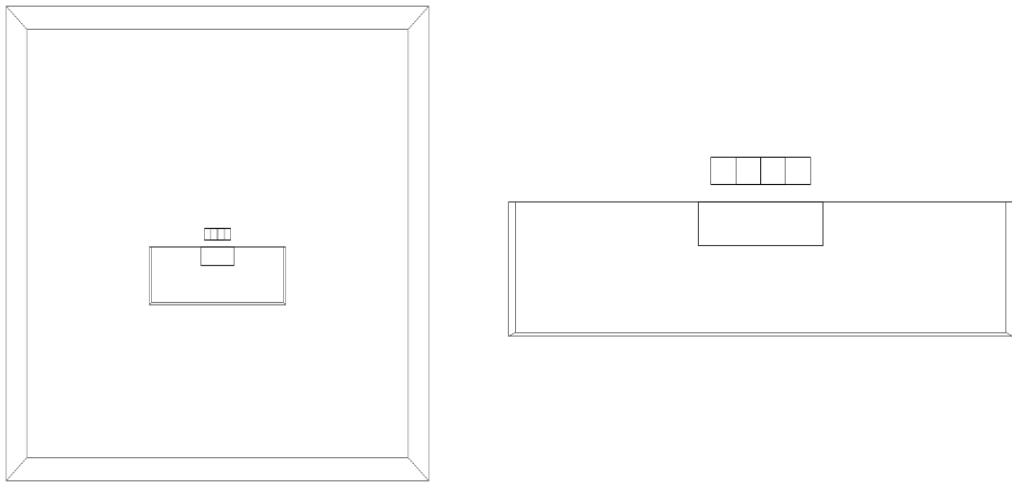
zoom



b) l'axe 'yz'



zoom



c) l'axe 'xz'

zoom

La figure III.2 représente la géométrie d'étude en 2D : a) l'axe 'xz', b) l'axe 'yz'. C) l'axe 'xz'

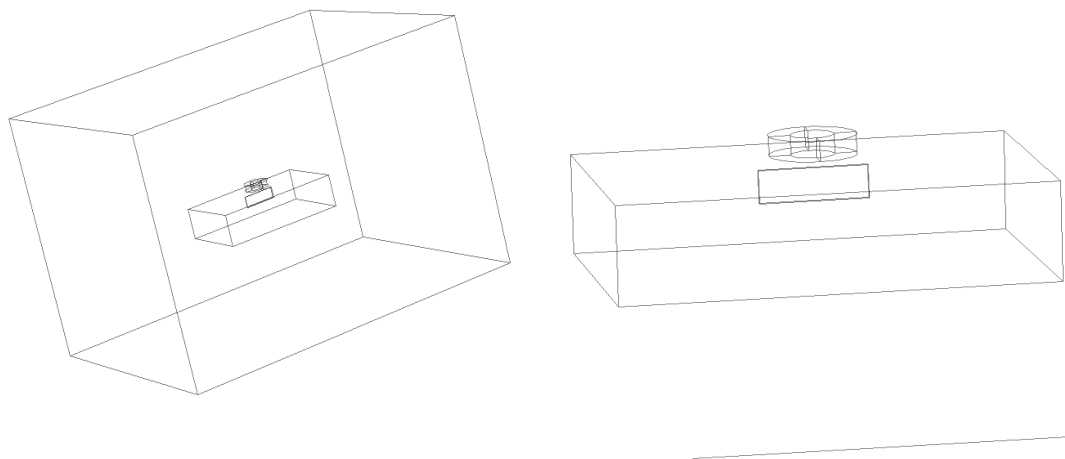


Figure III.3 Représentation de la géométrie d'étude en 3D

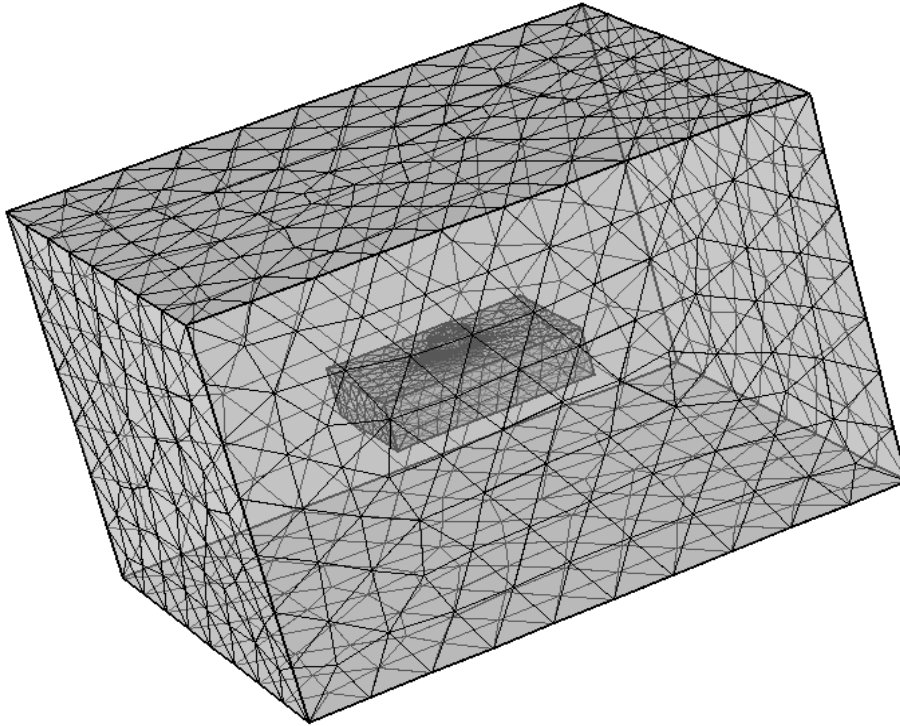


Figure III.4 : Maillage de la géométrie étudiée

### III.5. Simulation et traitement des résultats

Pour effectuer la simulation, on clique sur *Study* dans le Model Builder puis sur *Frequency Domain*. On choisit une fréquence variable de 50Hz à 50 kHz, puis on clique sur *Compute*.

La variation de l'impédance est donnée par :  $\Delta Z_{21} = Z_2 - Z_1$  Où  $Z_2$  et  $Z_1$  représentent respectivement l'impédance du capteur en présence et en l'absence de la fissure (défaut).  $Z_0$  représente l'impédance de la bobine à vide.

#### III.5.1. Effet de variation de la fréquence

Pour différentes valeurs de fréquence, la figure III.5 représente la densité de flux magnétique. Les figures (III.6-14) présentent les résultats de l'impédance, de la résistance et de la réactance de la bobine sans et avec la présence de la plaque et du défaut en fonction de la fréquence. Il est évident que l'augmentation de la fréquence fait augmenter les valeurs de la réactance et de l'impédance de la bobine ( $X=L\omega$ ).

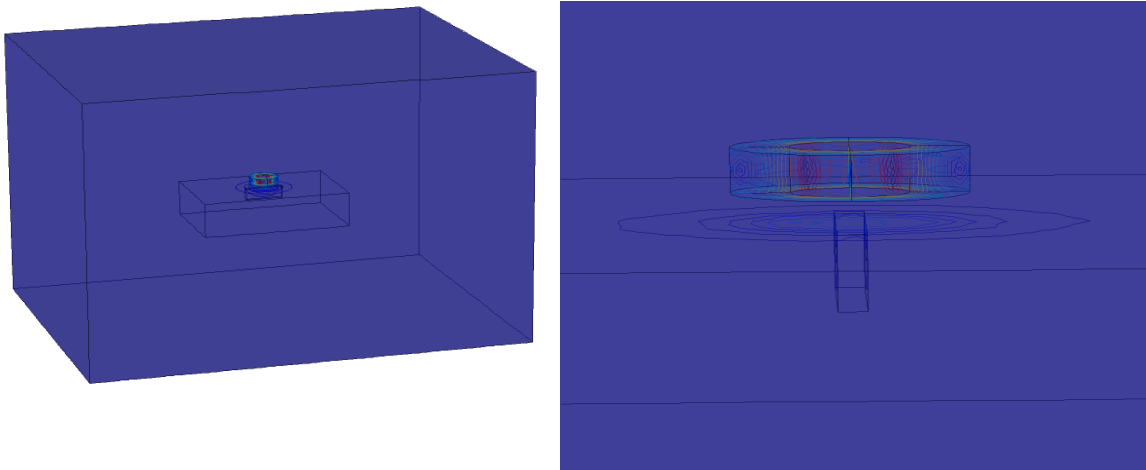


Figure III.5 : Densité de flux magnétique

Zoom

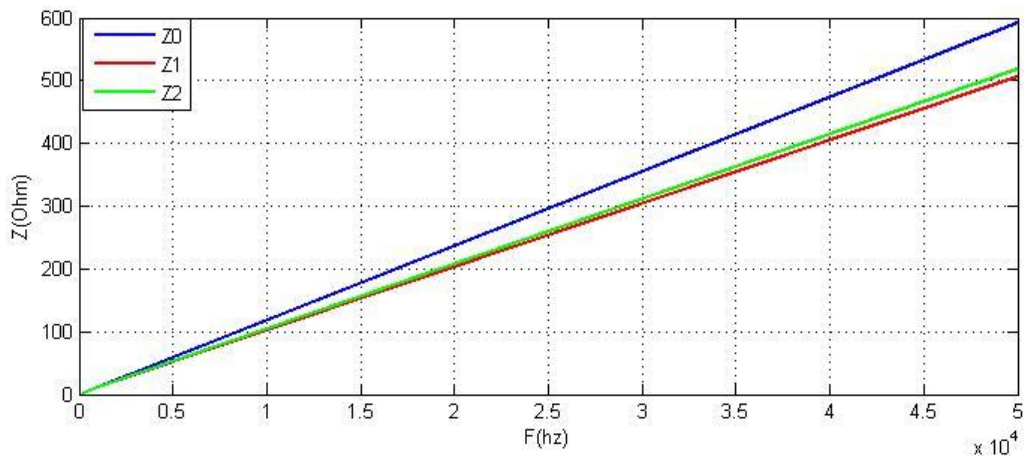


Figure III.6 : Impédances  $Z_0$ ,  $Z_1$  et  $Z_2$  en fonction de la fréquence  $F$

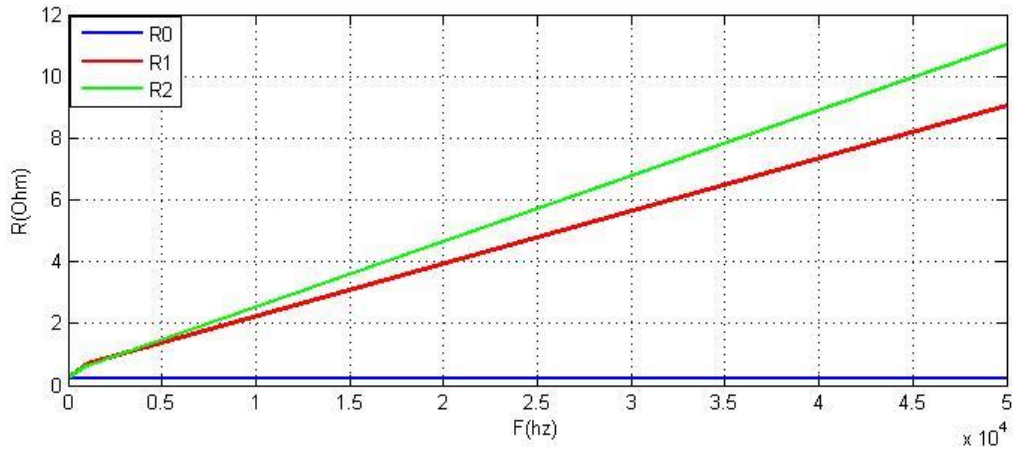


Figure III.7 : Résistances  $R_0$ ,  $R_1$  et  $R_2$  en fonction de la fréquence  $F$

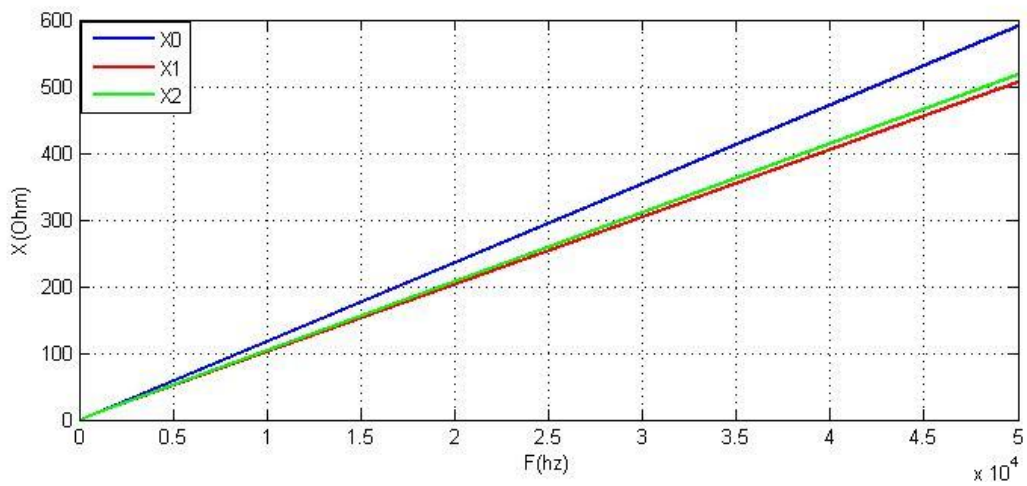


Figure III.8 : Réactance  $X_0$ ,  $X_1$  et  $X_2$  en fonction de la fréquence  $F$

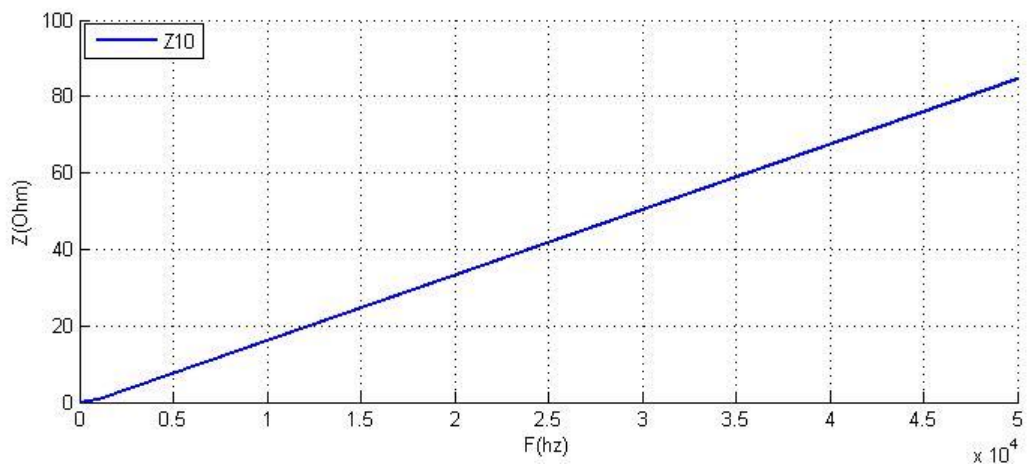


Figure III.9 : Différence d'impédance  $\Delta Z_{10}$  en fonction de la fréquence  $F$

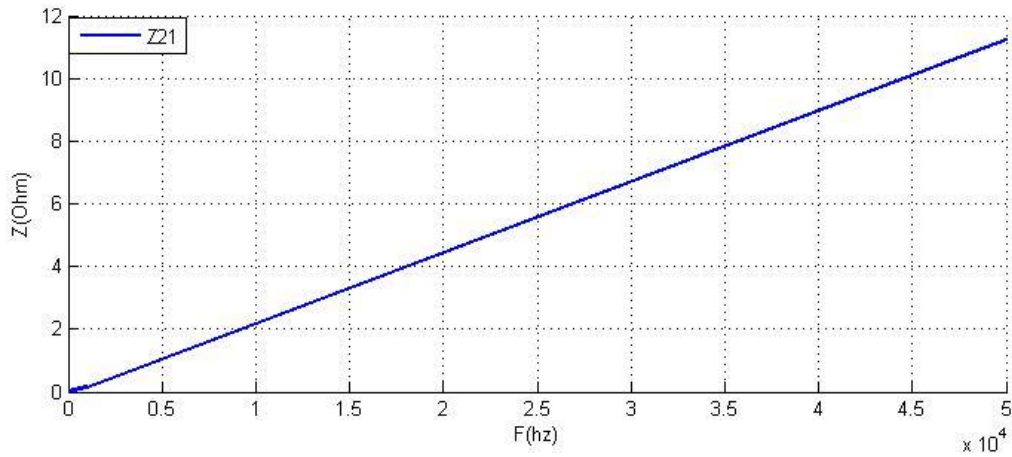


Figure III.10: Différence d'impédance  $\Delta Z_{21}$  en fonction de la fréquence  $F$

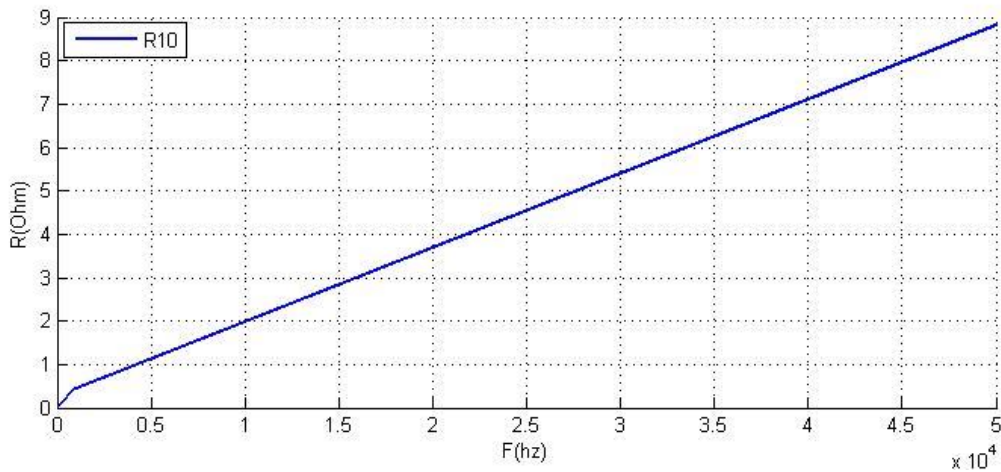


Figure III.11 : Différence de la résistance  $\Delta R_{10}$  en fonction de la fréquence  $F$

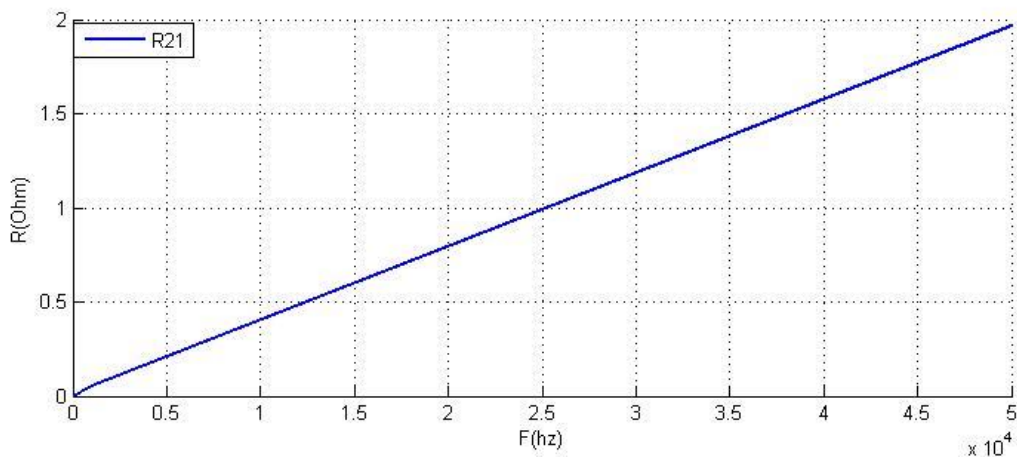
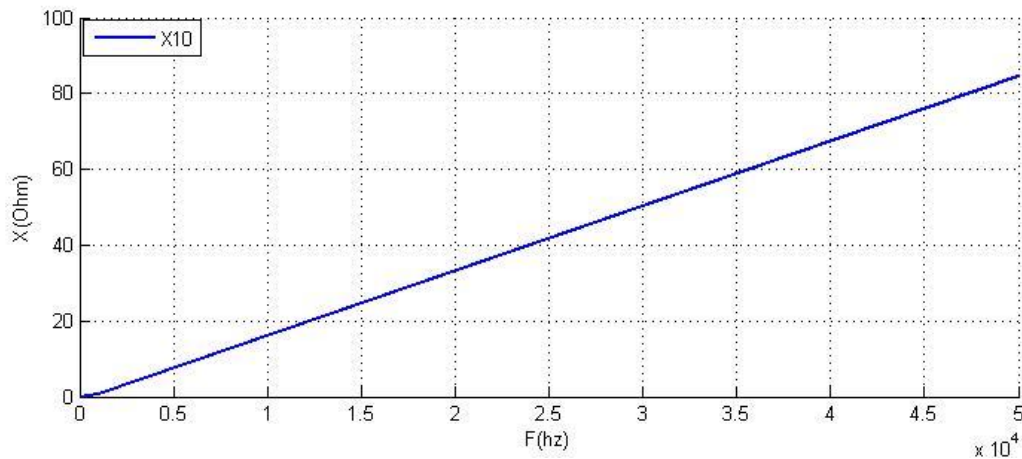
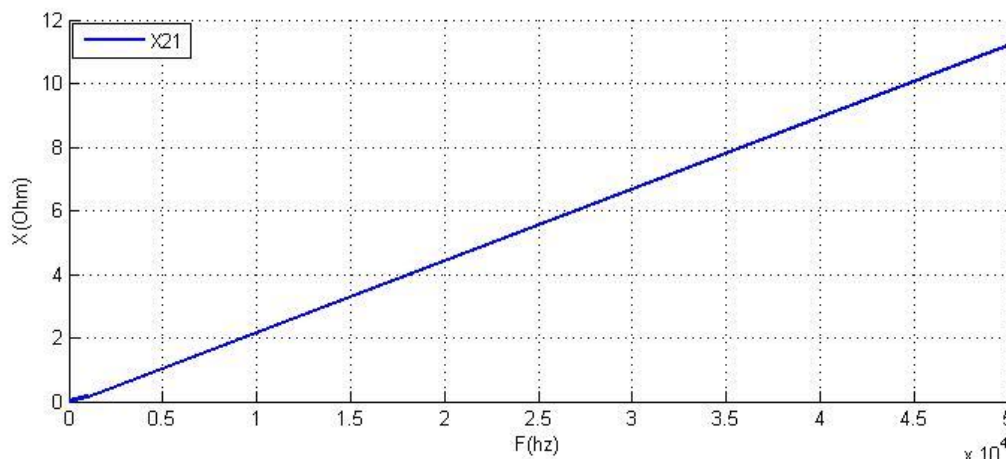


Figure III.12 : Différence de la résistance  $\Delta R_{21}$  en fonction de la fréquence  $F$

Figure III.13 Différence de la réactance  $\Delta X_{10}$  en fonction de la fréquence FFigure III.14 Différence de la réactance  $\Delta X_{21}$  en fonction de la fréquence F

### III.5.2. Effet du déplacement « X » du défaut

On fait varier la position horizontale « X » du défaut pour différentes valeurs de la fréquence de 50Hz à 200 kHz, figures (III.15-17).

On remarque que l'impédance  $\Delta Z_{21}$  augmente lorsque le défaut se rapproche plus de l'axe de la bobine. On voit bien aussi que les résultats obtenus sont symétriques, c'est-à-dire qu'on enregistre les mêmes impédances lors du déplacement du défaut à gauche ou à droite de la bobine. De plus, chaque fois qu'on augmente la fréquence, l'impédance  $\Delta Z_{21}$  augmente.

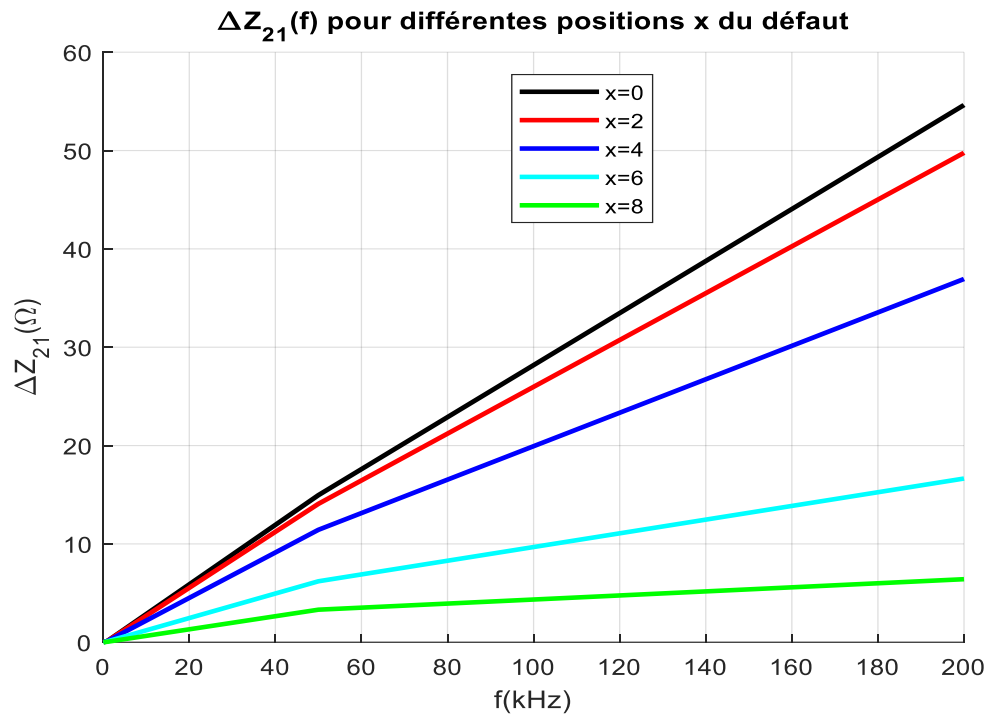


Figure III.15 : Variations de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  pour la position « X » en fonction de la fréquence

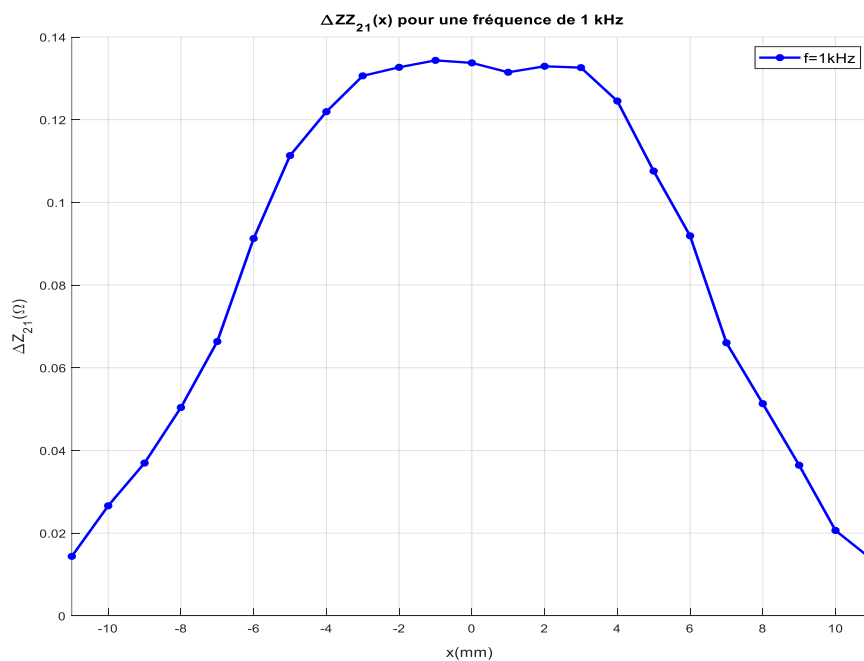


Figure III.16 : Variations de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  en fonction du changement de position « X » pour la fréquence 1kHz



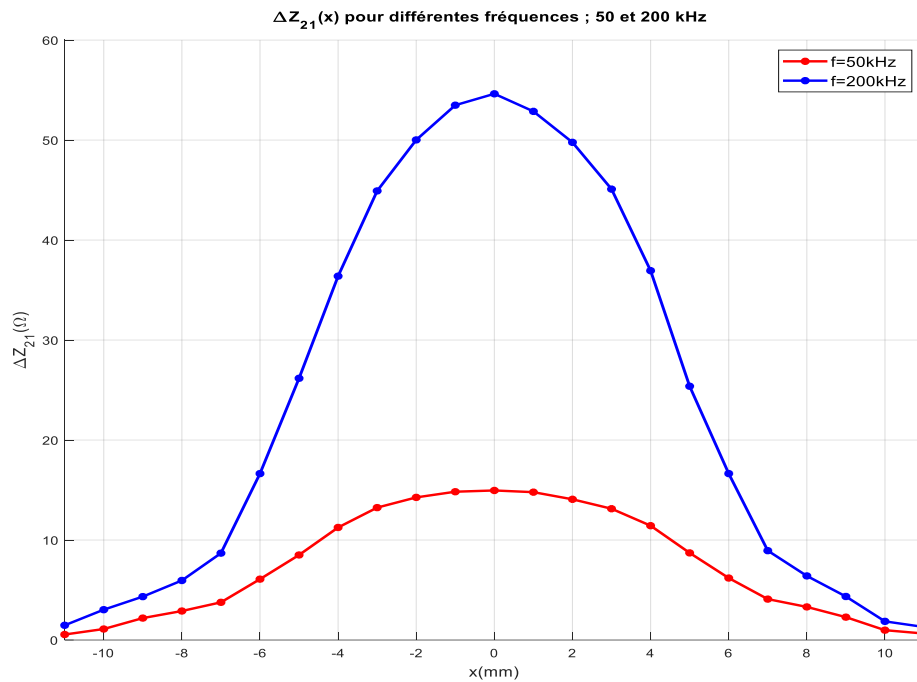


Figure III.17 : Variations de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  en fonction du changement de position « X » pour la fréquence 50kHz et 200kHz

### III.5.3. Effet de variation de la position « Z » du défaut

On fait varier la position verticale « Z » du défaut pour différentes valeurs de la fréquence de 50Hz à 200 kHz, figures (III.18-20).

On remarque que plus le défaut est enfoui dans la pièce plus l'impédance  $\Delta Z_{21}$  diminue. C'est-à-dire que le défaut devient insensible au capteur.

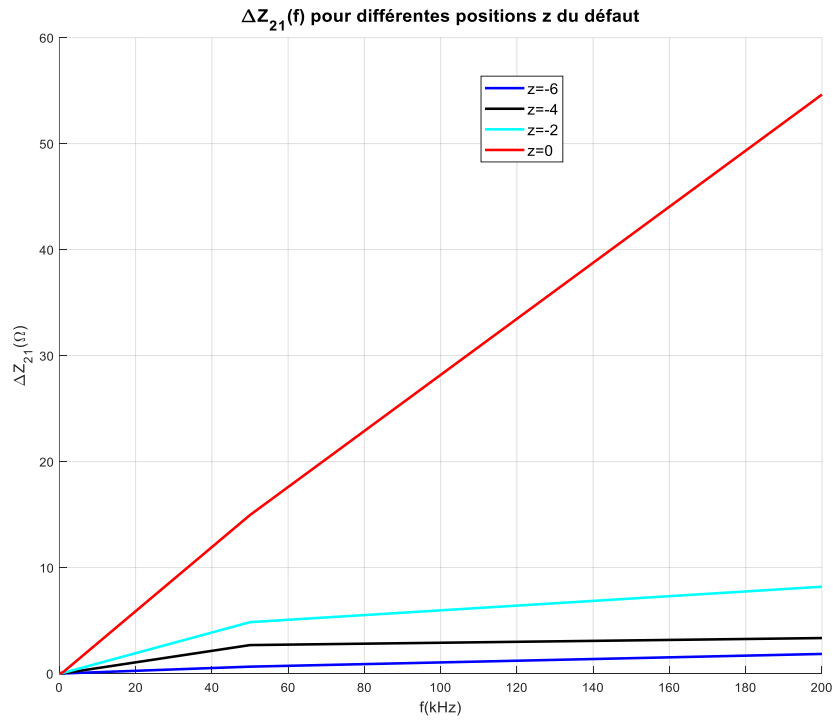


Figure III.18 : Variations de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  pour la position « Z » en fonction de la fréquence

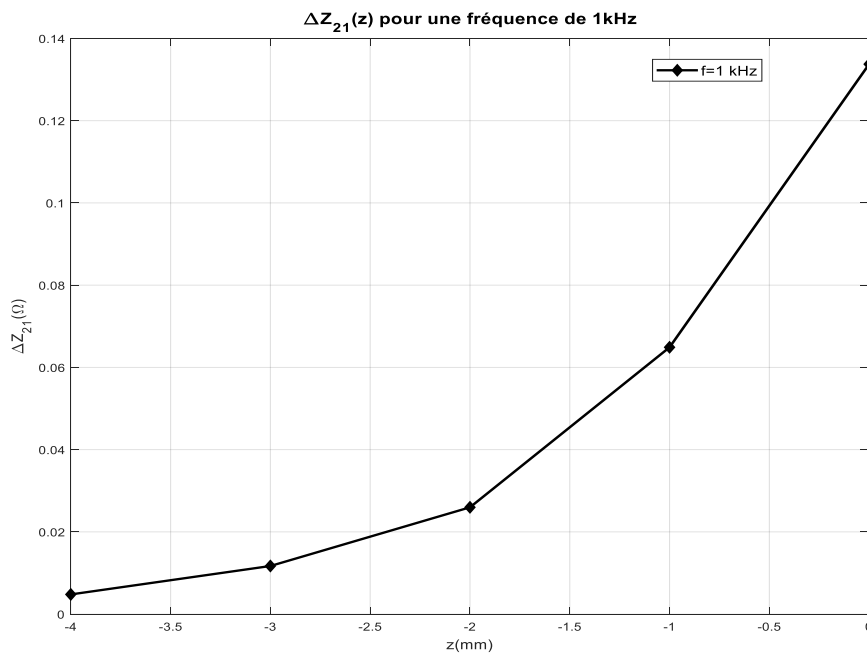


Figure III-19 : Variations de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  en fonction du changement de position « Z » pour la fréquence 1kHz

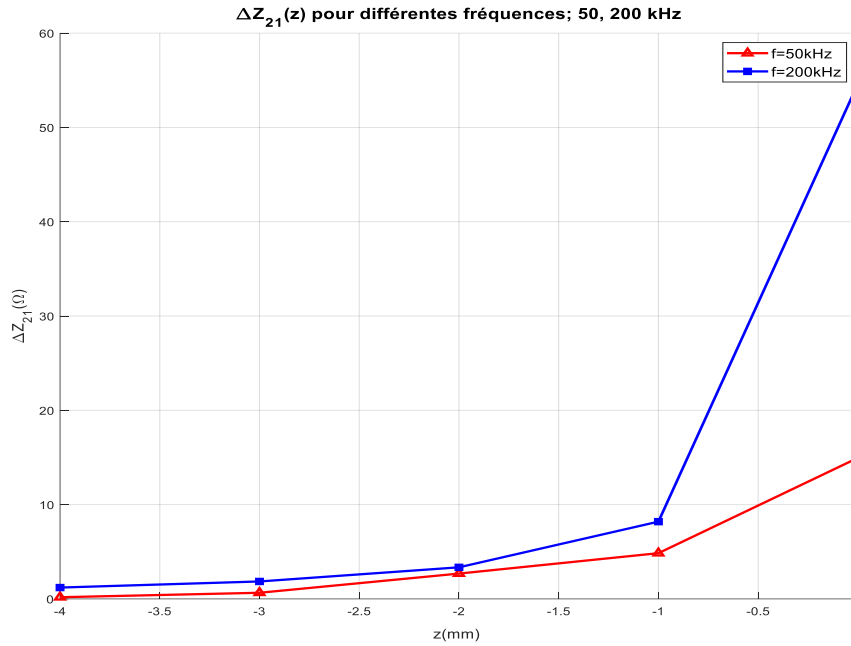


Figure III.20 : Variations de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  en fonction du changement de position « Z » pour la fréquence 50kHz et 200kHz

#### III.5.4. Effet du lift-off

Les figures (III.21-23) représente la variation de l'impédance  $Z_2$  de la bobine pour différentes valeurs du lift-off : 0.5mm, 1mm, 3mm, 5mm et 10mm en fonction de la fréquence.

On remarque que l'impédance de la bobine augmente lorsque le capteur s'éloigne de la pièce (lift-off augmente). Cela revient au fait que le flux créé par les courants de Foucault, et qui s'oppose au flux de la bobine, diminue de plus en plus lorsque la bobine s'éloigne de la pièce, ce qui engendre l'augmentation de  $Z_2$ .

Les figures (III.24-25) représentent la variation de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  pour les mêmes valeurs en fonction de la fréquence.

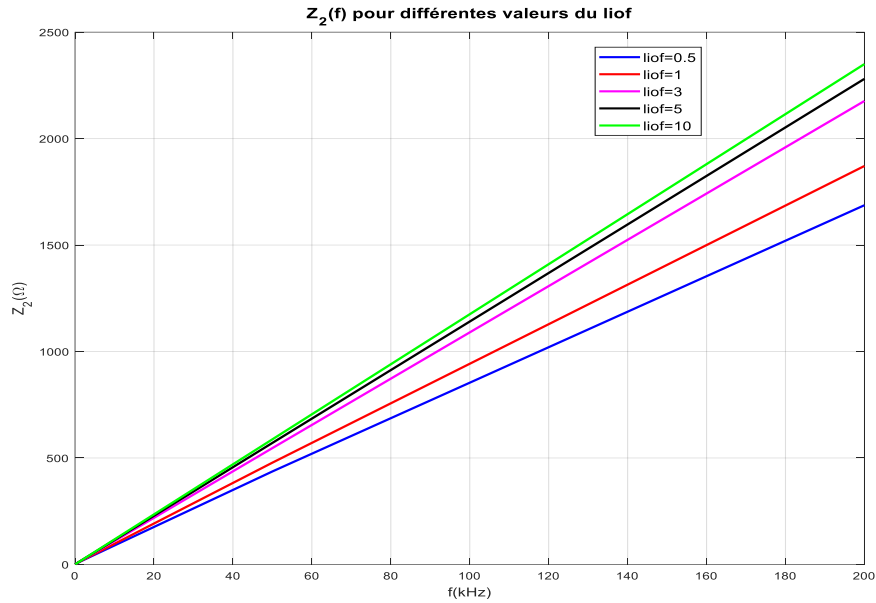


Figure III-21 : Variation de l'impédance  $Z_2$  en présence du défaut pour différents lift-off (0.5,1,3,5,10mm) en fonction de la fréquence.

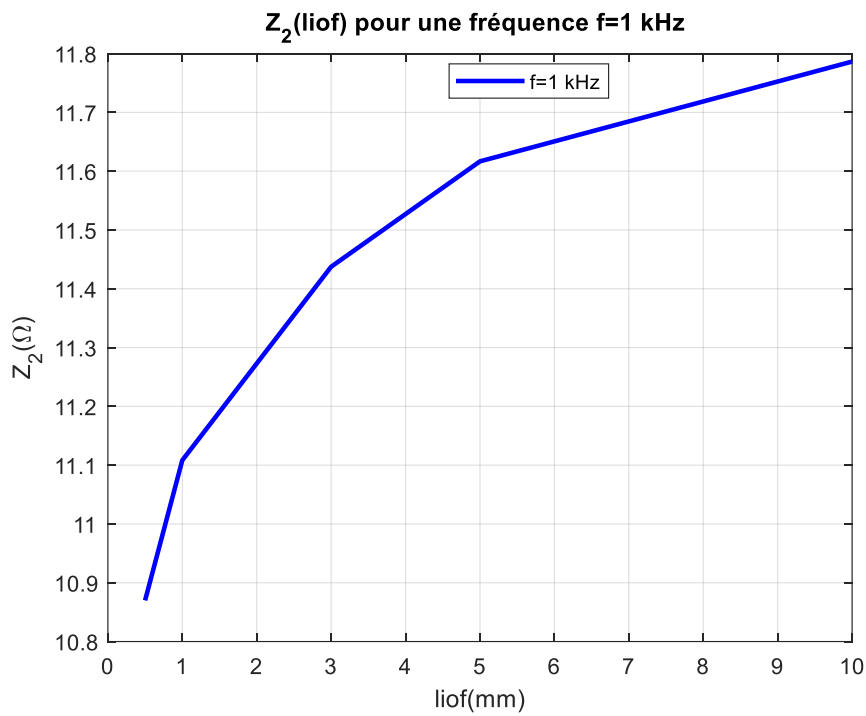


Figure III.22 : Variations de l'impédance  $Z_2$  en fonction de lif-off pour 1kHz

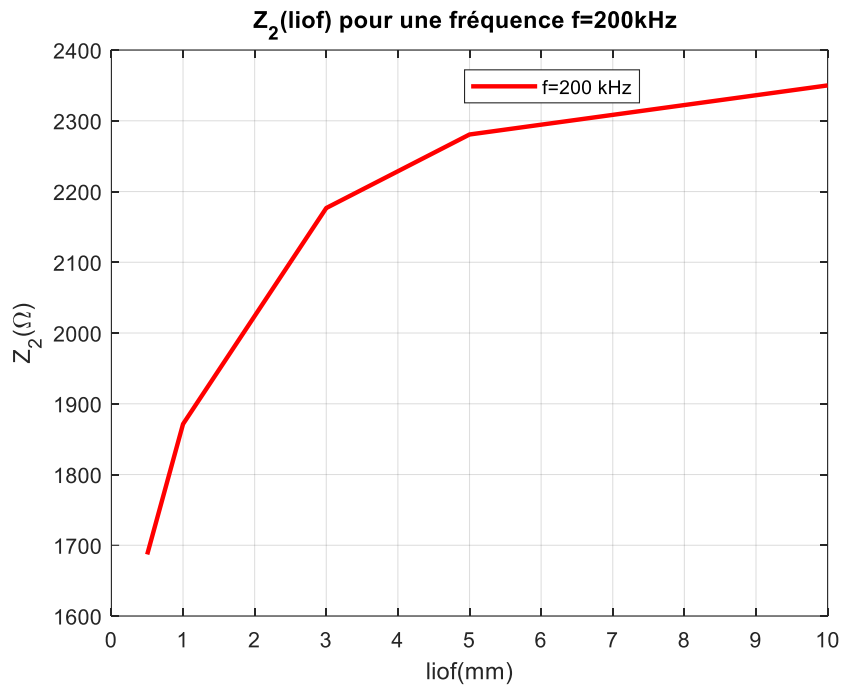


Figure III.23 : Variations de l'impédance  $Z_2$  en fonction de lift-off pour 200khz

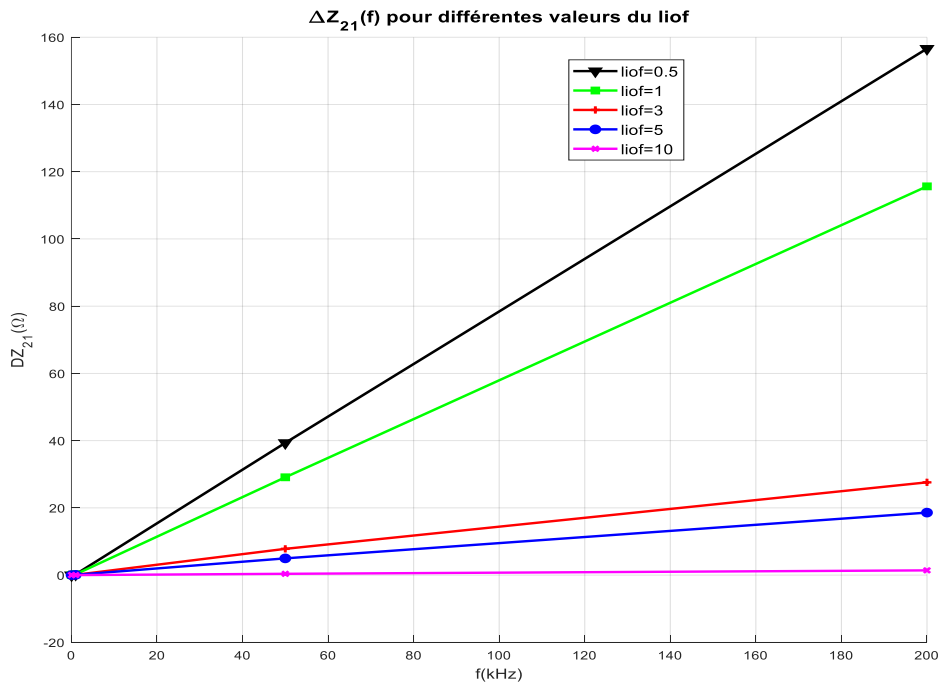


Figure III-24 : Variation de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  en présence du défaut pour différents lift-of (0.5,1,3,5,10mm) en fonction de la fréquence.

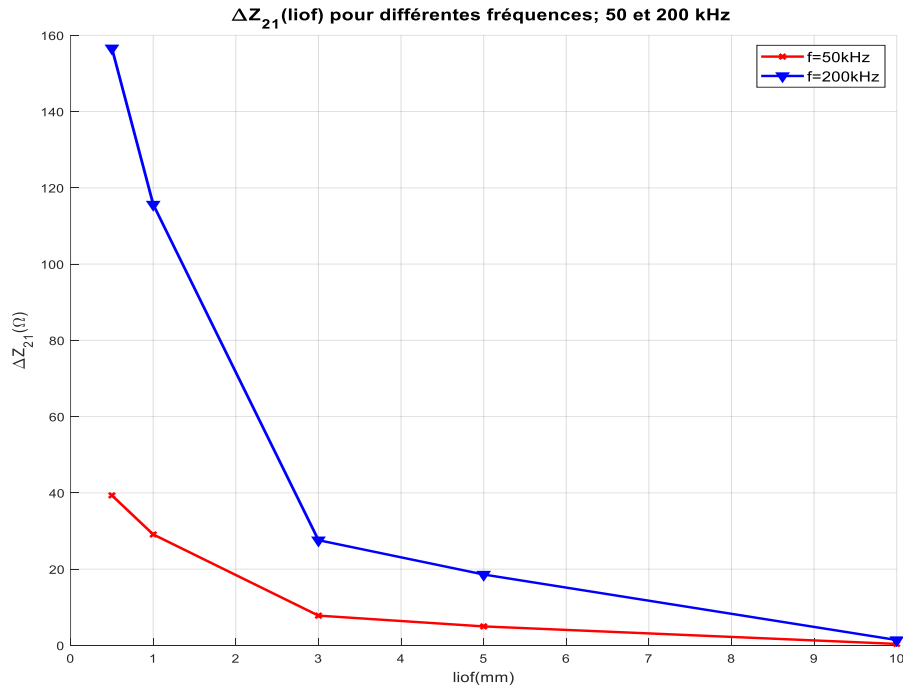


Figure III.25 : Variations de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  en fonction de lift-off pour :50kHz et 200kHz

On remarque que lorsque la distance capteur-pièce augmente, la variation de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  diminue (variation inversement proportionnelle).

### III.5.5 Effet de la largeur du défaut

On fait varier la valeur de la largeur du défaut  $L_d$  : 1, 3, 5, 7, 9mm en fonction de la fréquence, figures (III. 26-29).

D'après les figures, on constate que lorsque la largeur du défaut augmente l'impédance ( $\Delta Z_{21}$  ou  $Z_2$ ) de la bobine augmente aussi. Ceci est dû à la diminution des courants de Foucault causée par la réduction du volume de la plaque (la fissure prend plus de volume).

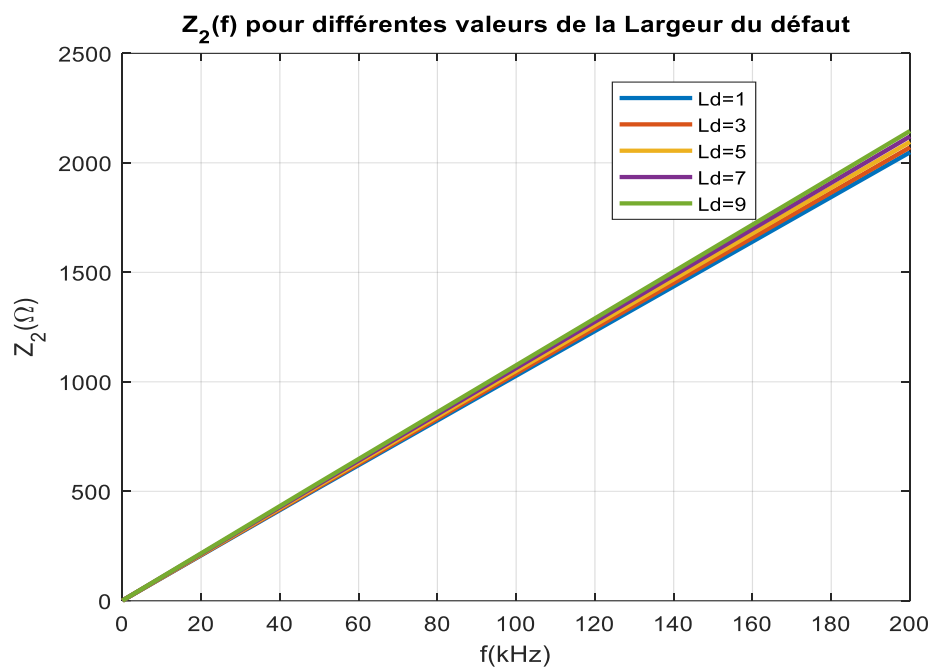


Figure III.26 : variation de l'impédance  $Z_2$  pour différente valeurs de la largeur du défaut en fonction de la fréquence.

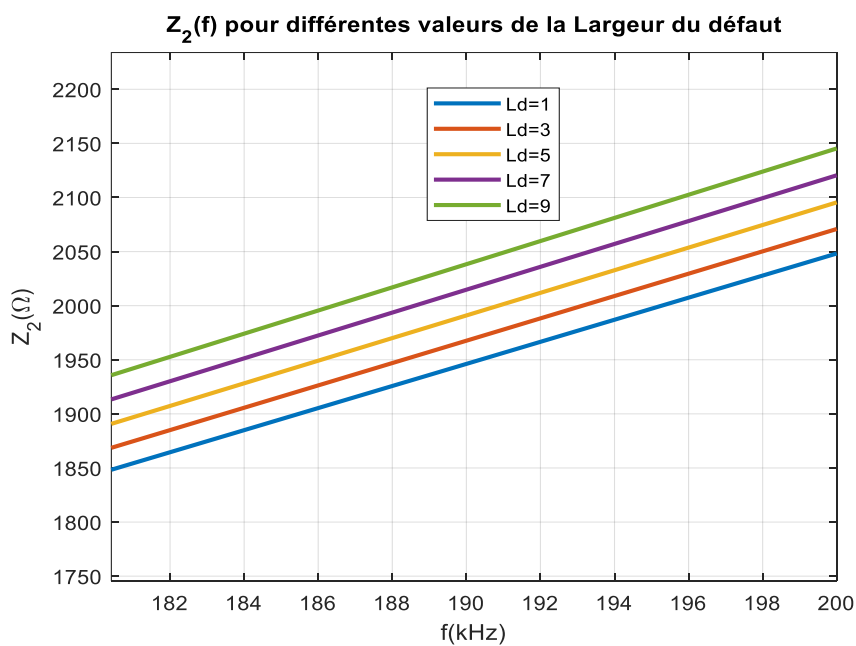


Figure III.27 : Zoom de la figure (III.26)

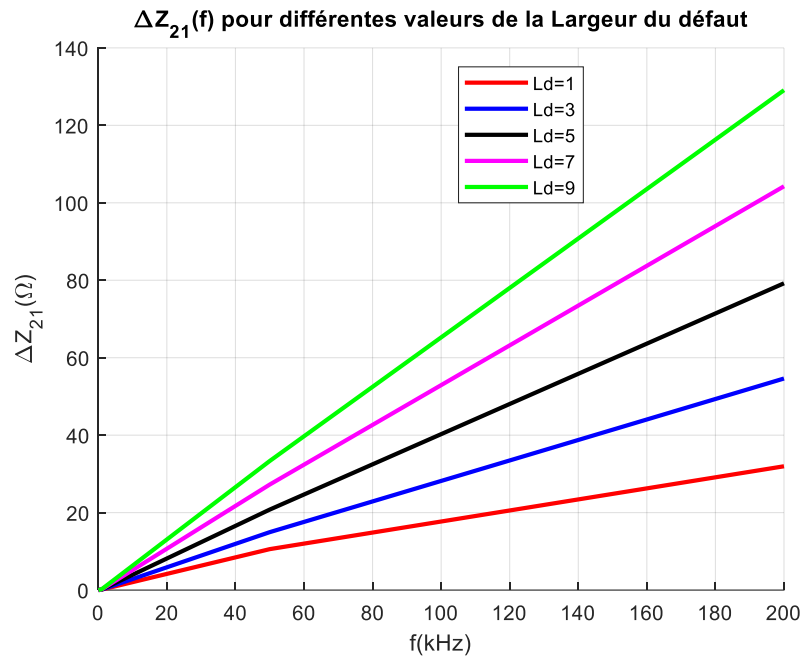


Figure III.28 : variation de l'impédance  $\Delta Z_2$  pour différente valeurs de la largeur du défaut en fonction de la fréquence.

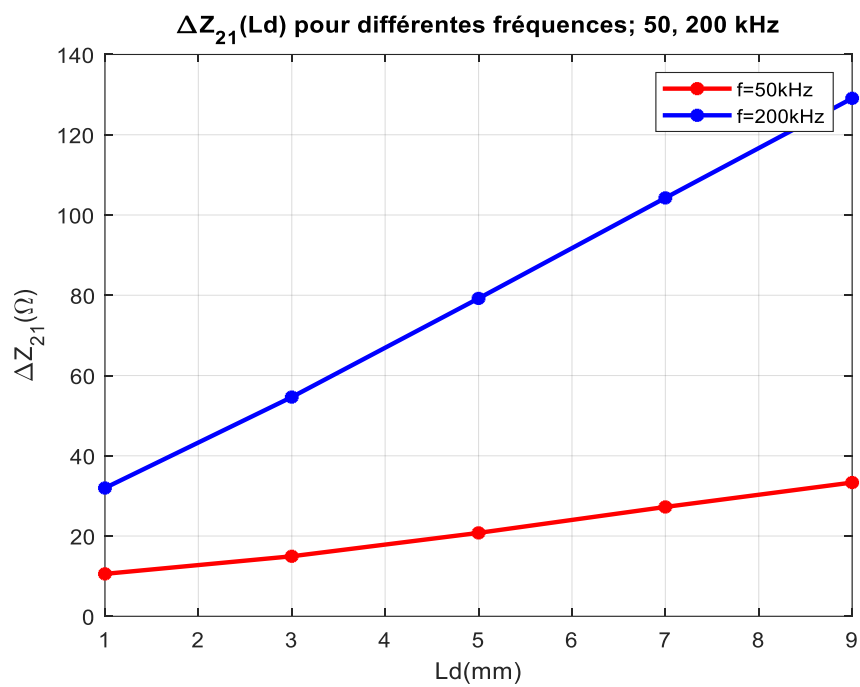


Figure III.29 : variation de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  en fonction des déférente valeur de la largeur de défaut pour les fréquences : 50khz et 200khz.



**III.5.6. Effet de la hauteur du défaut**

On fait varier la valeur de la hauteur du défaut ; 2, 4, 6, 8, 10 mm en fonction de la fréquence, figures (III.30-34).

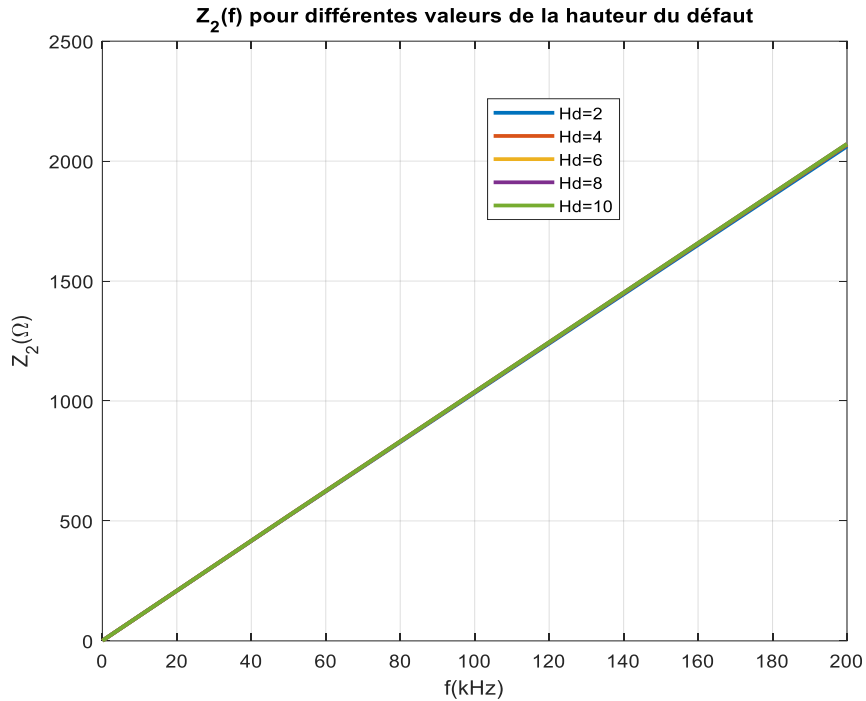


Figure III.30 : variation de l'impédance  $Z_2$  pour différentes valeurs de la hauteur du défaut en fonction de la fréquence

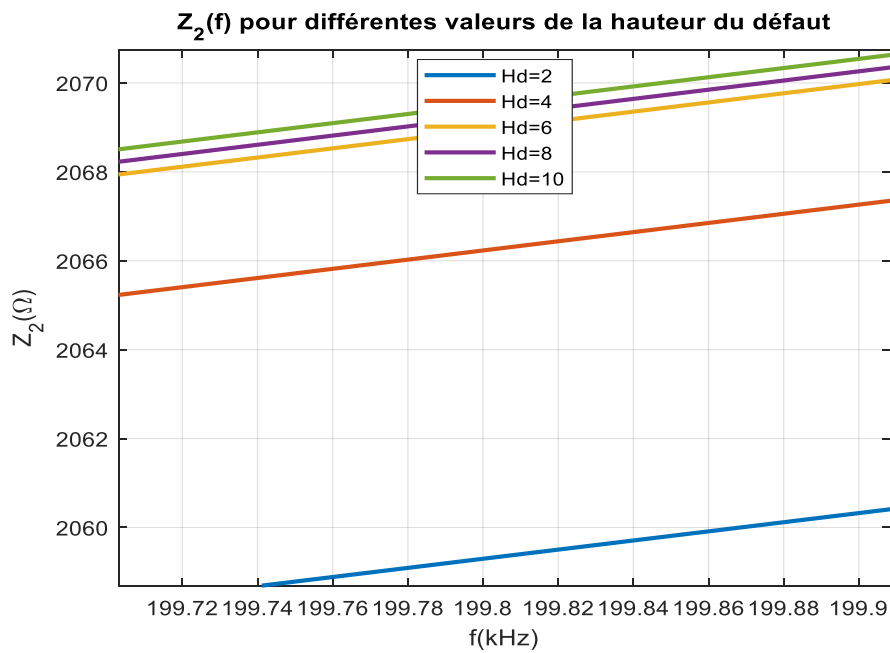


Figure III.31 : Zoom de figure (III.30)

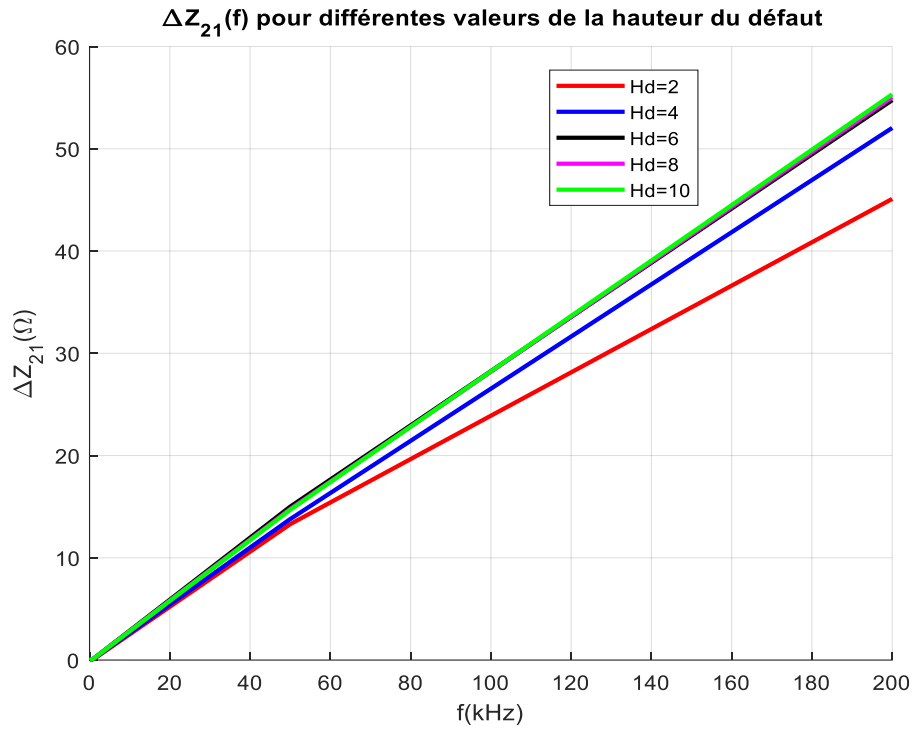


Figure III.32 : variation de l'impédance  $\Delta Z_2$  pour différentes valeurs de la hauteur du défaut en fonction de la fréquence

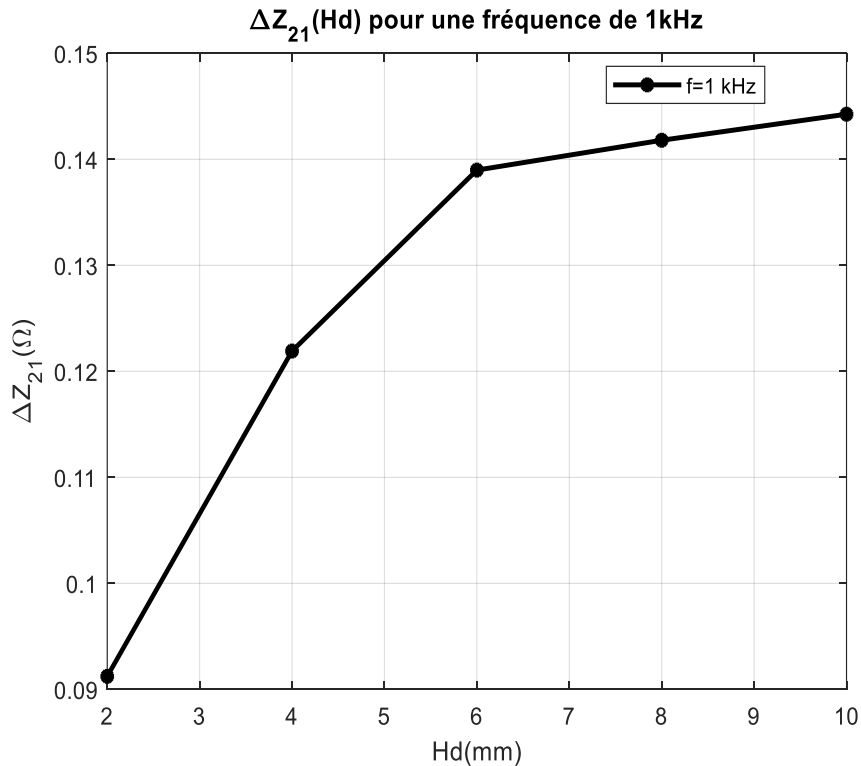


Figure III.33 : variation de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  en fonction des différentes valeurs de la hauteur de défaut pour les fréquences : 1kHz

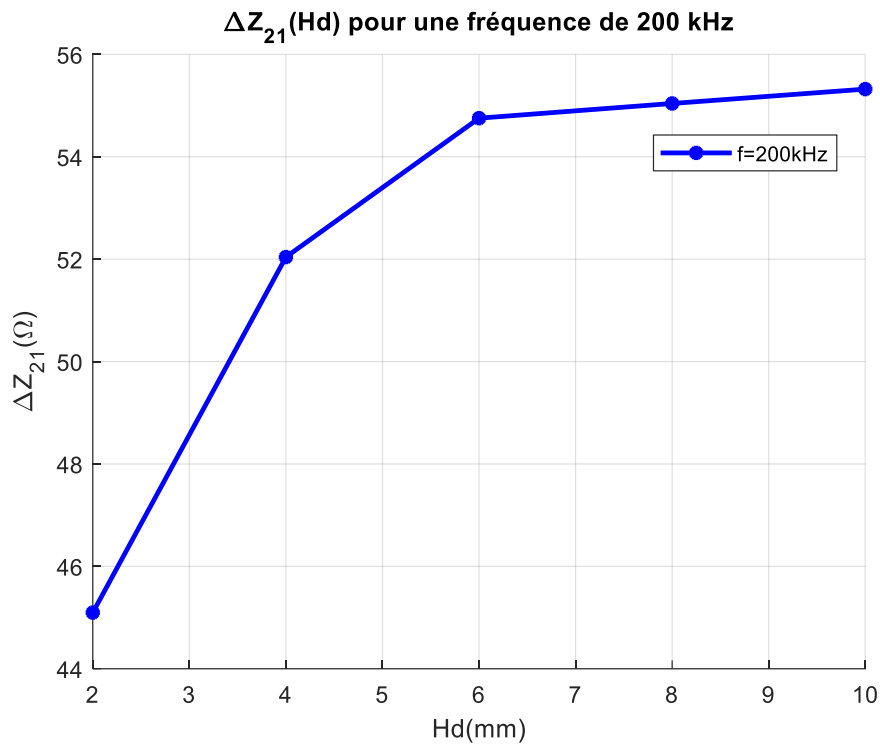


Figure III.34 : variation de l'impédance  $\Delta Z_{21}$  en fonction des différentes valeurs de la hauteur de défaut pour les fréquences : 200 kHz.

On remarque que lorsque la hauteur du défaut augmente l'impédance ( $\Delta Z_{21}$  et  $Z_{21}$ ) de la bobine augmente aussi, parce que le volume de la plaque diminue (courants de Foucault diminuent en conséquence).

### III.6. Conclusions

Dans ce chapitre nous avons utilisé le logiciel COMSOL-Multiphysics, basé sur la méthode des éléments finis, comme plateforme de simulation. Nous avons étudié la détection et la caractérisation des défauts par courant de Foucault et cette étude comprend l'influence de variation de la fréquence, du lift-off, variation de profondeur et largeur ainsi que la position de défaut. Après la présentation des résultats des différents cas de simulation, nous avons conclu que :

Cette méthode permet de qualifier très simplement le défaut détecté en analysant le champ magnétique induit qui dépend des courants de Foucault dans la pièce testée. Le calcul de l'impédance dans un seul point ne suffit pas pour configurer l'absence ou la présence de défaut.

Les résultats obtenus montrent que ce type de capteur a une grande sensibilité de détection des défauts. Cet avantage, ajouté à son faible coût, le rend très utilisable dans l'industrie.

# Conclusion générale

# Conciliation générale

---

## Conclusion générale

Il existe différentes techniques de contrôle non destructif (CND) disponibles. La méthode des courants de Foucault (CF) est largement utilisée en raison de sa facilité de mise en œuvre, de son faible coût et de son caractère non polluant. Elle est principalement utilisée sur des pièces électriquement conductrices et permet de détecter la présence de fissures ou de défauts.

La détection des fissures est essentielle pour prévenir la défaillance des pièces en service et améliorer la fiabilité des produits industriels. Dans ce contexte, un modèle a été développé afin de faciliter la modélisation de ce type de défauts. L'idée sous-jacente est de considérer la fissure comme une surface non conductrice dans le matériau.

L'équation qui régit le fonctionnement de notre dispositif a été déduite des équations de Maxwell pour obtenir une équation aux dérivées partielles. Cette équation est résolue numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics.

Nous avons utilisé le calcul de l'impédance de couplage bobine-plaque tout en intégrant le déplacement du défaut pour voir le changement d'impédance synonyme de détection de défaut. Étant donné que le contrôle des courants de Foucault peut être affecté par différents paramètres, nous avons fait varier des paramètres tels que la fréquence, le lift-off, le déplacement et la géométrie du défaut.

Après la modélisation et simulation en 3D sous COMSOL Multiphysics d'un système CND-CF d'une plaque conductrice avec et sans défaut, nous avons su :

- Détecter la présence ou l'absence de défauts.
- Mettre en évidence l'effet des paramètres qui influent sur le signal d'impédance comme la fréquence, le lift-off, et caractéristiques géométriques et déplacement du défaut (hauteur et largeur), (position verticale X et position horizontale Z).
- Détecter les défauts en surface et en profondeur dans la pièce.

# Bibliographie

# *Bibliographie*

---

## Bibliographie :

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

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

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

[4] : BOUCHALA Tarek, « Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. – Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite » Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar Batna, Juin 2008

[5] : Jacques DUMONT-FILLON « Contrôle non destructif (CND) » R1400, 1996. Ingénieur de l'École Centrale de Paris Ancien Directeur Technique de l'Institut de Recherches de la Sidérurgie (IRSID)

[5] : ARDJAL AGHILES « Modélisation par éléments finis 2D du contrôle non destructif par courant de Foucault) » en vue de la caractérisation de défauts complexes » Mémoire soutenu publiquement le 03 Juillet 2013, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZO

[6] : M. Salhi, « Modélisation Electromagnétique des Capteurs à Fonctions Séparées dans les Dispositifs Axisymétriques de Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault (CND-CF) » Université El Hadj Lakhdar Batna, Juin 2008

[7] : AIT makhter « contrôle non destructif » chapitre2, cours master2 « technique de détection des défaillances » « université de Bejaïa ».

[8] : BACHIR MAOUCHE « Elaboration de modèles par les Grandeurs Electromagnétiques Couplées. Application au Contrôle et à l'Evaluation Non Destructif par Courant de Foucault » thèse doctorat UNIVERSITÉ FERHAT ABBASS – SETIF UFAS, 2007

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

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



# *Bibliographie*

---

- [11]: Charles J. Hellier, « Handbook of nondestructive testing », mcgraw-hill professional; 1 edition (march 14, 2001).
- [12] : O. SAFER, « étude et modélisation de capture a courants de Foucault par CND » Mémoire de master, université Mohamed Boudiaf M'sila, 2013/2014
- [13] : T.L. CUNG, « Évaluation non-destructive quantitative de structures aéronautiques par la méthode des courants de Foucault », Thèse de Doctorat, à l'École Normale Supérieure De Cachan, 22 Juin 2012.
- [14] : S. BENHALIMA, « Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques) ». Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf-M'sila, M'sila 2018
- [15] : A. BOULOUDENINE, « Etude de dispositifs de CND-CF (Contrôle non destructif par Courants de Foucault) appliqués à la caractérisation de matériaux composites à fibres de carbone ». Thèse de Doctorat ; Université des Frères Mentouri de Constantine Algérie 2018.
- [16] : ZERGUINI SAKINA « Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault » Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE
- [17] : O. SAFER, « étude et modélisation de capture a courants de Foucault par CND » Mémoire de master, université Mohamed Boudiaf M'sila, 2013/2014.
- [18] : H. MOHELLEBI, « cours de modélisation numérique de systèmes d'entraînement électriques (MEE36) » Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [19] : A. CERIET, « Contribution à la modélisation tridimensionnelle par la méthode des volumes finis de dispositifs électromagnétiques », Thèse de Doctorat, Spécialité électrotechnique, Université de Biskra, 2007
- [20] : BOUALI Ferroudja « Utilisation d'une méthode semi-analytique pour l'étude du contrôle non destructif en régime pulsé » Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou
- [21] : H. RIMOND, « Performances et apports des capteurs magnétiques à très haute sensibilité aux systèmes de contrôle Non Destructif par Courant de Foucault », thèse de doctorat, université de CAEN, 2011.

# *Bibliographie*

---

[22] : T. BOUCHA, « Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. – Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite » Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar Batna, Juin 2008

[23] : Brahimi, Badi, « Étude de la détection des défauts dans les structures aéronautiques par capteur à courants de Foucault rotatif », mémoire master, M'sila 2019/2020.

[24] : C. R. I. EMSON, J. SIMKIN. An optimal method for 3D eddy currents," IEEE transactions on magnetics, vol. 19, n° 6, pp. 2450-2452, 1983.

# Résumé

---

## Résumé

L'objectif de ce travail est de présenter la principale méthode des courants de Foucault, d'exposer les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par courants de Foucault basée sur la variation d'impédance entre le capteur et la pièce, d'aborder les conditions aux limites et les paramètres pouvant influencer cette détection, et enfin donner un aperçu des techniques numériques utilisées. Enfin en termine par une simulation en utilisons COMSOL Multiphysics.

**Mots clés :** contrôle non destructif (CND), courants de Foucault(CF), équations de Maxwell, capteur, COMSOL Multiphysics.

## Abstract

The objective of This work is primarily to present the main methods of Eddy currents, followed by an explanation of Maxwell's equations that govern the phenomenon of detection by eddy currents. This detection is based on the variation of impedance between the sensor and the part under inspection. The work also aims to discuss the influence of boundary conditions and parameters on this detection process. An overview of the numerical techniques used, Finally, the work concludes with a simulation using COMSOL Multiphysics.

**Index Terms:** Non-destructive testing (NDT), eddy currents, Maxwell equations and sensors. COMSOL Multiphysics.