

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

Modélisation par éléments finis du contrôle non destructif par courants de Foucault à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics

Réalisé par :

M. MAY Rachid
M.LOUAIFI Idris

Encadré par :

M. KASDI Ahmed
Mme MEDJAHED Sakina

Membres du jury :

2021/2022

Remerciement

Remerciements

Nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, qui nous avons donné la force, la patience, la volonté et surtout le courage pour élaborer ce travail.

*Ainsi, Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à nos encadreur, **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.*

Nous sommes aussi redevables 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.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des membres du jury qui nous ont fait honneur d'accepter de juger ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :
À mes chers parents
À ma sœur Madiha
À toute ma famille
À tous mes amis*

MAY Rachid

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

Louaifi Id

Table des matières

Chapitre I GENERALITES SUR LE CONTROLE NON DESTRUCTIF (CND).....	3
I.1 Introduction	3
I.2 Différentes techniques de contrôle non destructif.....	3
I.2.1 Examen visuel.....	3
I.2.2 Ressuage	3
I.2.3 Radiographie.....	4
I.2.4 Magnétoscopie.....	4
I.2.5 Ultrasons	5
I.3 CND par courants de Foucault	5
I.3.1 Principe physique de CND-CF	6
I.3.2 Effet de peau	7
I.3.3 Domaine d'application	8
I.3.4 Avantages et Inconvénient.....	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.4.2 Sonde interne	9
I.4.3 Selon le mode de contrôle.....	12
I.4.4 Modes d'excitation	13
I.5 Conclusion.....	14
Chapitre II Modélisation du Contrôle Non Destructif par CF	15
II.1 Introduction.....	15
II.2 Méthodes de résolution	15
II.2.1 Méthodes analytiques	15
II.2.2 Méthodes numériques.....	15
II.3 Modélisation du dispositif de CND par CF	17
II.4 Mise en équations	18
II.4.1 Équations de Maxwell	18
II.4.2 Lois de comportement des milieux	20
II.4.3 Relations constitutives du milieu	20
II.4.4 Loi d'ohm.....	20

Table des matières

II.4.5	Equation de continuité.....	21
II.4.6	Relations de passage.....	21
II.4.7	Conditions de Jauge.....	22
II.4.8	Hypothèses simplificatrices.....	23
II.5	Formulation électromagnétique	23
II.5.1	Modèle magnétodynamique	23
II.5.2	Formulations de la magnétodynamiques.....	24
II.5.3	Formulation de type A.....	24
II.5.4	Formulation en A-V	24
II.5.5	Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique AV-A harmonique.....	25
II.5.6	Formulation de type ϕ	27
II.6	Comparaison entre les formulations	28
II.7	Calcul de l'impédance	29
II.7.1	Calcul de l'impédance à travers l'énergie magnétique emmagasinée et des pertes joules.....	29
II.7.2	Calcul de l'énergie électromagnétique de la bobine	30
II.8	Conclusion	31
Chapitre III	Résultats de simulation.....	32
III.1	Introduction	32
III.2	Description de logiciel « COMSOL-Multiphysics ».....	32
III.3	Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5.....	32
III.3.1	Création du modèle de simulation	33
III.4	Description de la configuration simulée.....	33
III.4.1	Création de la géométrie	34
III.5	Simulation et traitement des résultats	35
III.5.1	Effet de variation de la fréquence	35
III.5.2	Effet du déplacement vertical du défaut	38
III.5.3	Effet de variation de la position horizontale du défaut	40
III.5.4	Effet du lift-off.....	44
III.5.5	Effet du nombre de spires	45
III.5.6	Effet de la largeur du défaut.....	45
III.6	Conclusions	47

Table des matières

Conclusion générale48

Bibliographie49

Liste figure

Figure I-1 Principe de contrôle par ressuage.....	4
Figure I-2 Principe de la radiographie.....	4
Figure I-3 Principe de la magnétoscopie.....	5
Figure I-4 Principe des Ultrasons.....	5
Figure I-5 Principe du CND par courants de Foucault.....	6
Figure I-6 Répartition des courants de Foucault dans une pièce.....	7
Figure I-7 Sonde interne.....	10
Figure I-8 Bobine encerclant.....	10
Figure I-9 Bobine externe glissante avec noyau.....	10
Figure I-10 Bobine plate.....	11
Figure I-11 Capteur à fonction double.....	11
Figure I-12 Capteur à fonctions séparées.....	12
Figure I-13 Capteur absolu.....	12
Figure I-14 Capteur en mode différentiel.....	13
Figure II-1 Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF.....	16
Figure II-2 Principe du capteur à courants de Foucault Intérêt de la modélisation.....	17
Figure II-3 Domaine d'étude d'un problème de CND-CF.....	18
Figure III-1 Interface utilisateur de COMSOL 5.5.....	33
Figure III-2 : Géométrie étudiée et son maillage.....	35
Figure III-3 : Densité de flux magnétique de la bobine seule.....	35
Figure III-4 : Densité de flux magnétique 50Hz.....	36
Figure III-5 : Densité de flux magnétique à 100khz.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III-6 : Impédances Z_0 , Z_1 et Z_2 en fonction de la fréquence.....	36
Figure III-7 : Résistances R_0 , R_1 et R_2 en fonction de la fréquence.....	36
Figure III-8 : Réactance X_0 , X_1 et X_2 en fonction de la fréquence.....	36

Liste figure

Figure III-9 : Différence d'impédance ΔZ_{10} en fonction de la fréquence	37
Figure III-10 : Différence d'impédance ΔZ_{21} en fonction de la fréquence	37
Figure III-11 : Différence de la résistance ΔR_{10} en fonction de la fréquence	37
Figure III-12 : Différence de la résistance ΔR_{21} en fonction de la fréquence	37
Figure III-13 Différence de la réactance ΔX_{10} en fonction de la fréquence.....	38
Figure III-14 Différence de la réactance ΔX_{21} en fonction de la fréquence.....	38
Figure III-15 Densité de flux magnétique pour différentes positions verticales du défaut	39
Figure III-16 Variations de l'impédance en fonction de la position verticale du défaut pour 100Hz (a), 1kHz (b) et 5kHz (c).....	40
Figure III-17 Densité de flux magnétique pour a)50Hz,b)1kHz et c)100kHz	41
Figure III-18 Variation de la résistance en fonction de la position du capteur sur une pièce sans et avec défaut à 50 Hz.....	41
Figure III-19 Variation de la réactance en fonction de la position du capteur sur une pièce sans et avec défaut à 50 Hz.....	41
Figure III-20 variation de l'impédance en fonction de la position du capteur sur une pièce sans et avec défaut à 50 Hz.....	42
Figure III-21 variation de la résistance en fonction de la position du défaut pour 1 kHz	42
Figure III-22 variation de la réactance en fonction de la position du défaut pour 1 kHz	42
Figure III-23 variation de l'impédance en fonction de la position de défaut pour 1 kHz.....	43
Figure III-24 variation de la résistance en fonction de défaut pour 100 kHz.....	43
Figure III-25 variation de la réactance en fonction de la position du défaut pour 100 kHz	43
Figure III-26 variation de l'impédance en fonction de la position du défaut pour 100 kHz.....	44
Figure III-27 : Variation, en fonction de la fréquence, de l'impédance en présence du défaut pour différents lit-of (0.1 ,0.3 ,0.5 mm).....	44
Figure III-28 Impédance pour 200 ,330 et 500 spires en fonction de f.....	45
Figure III-29 Impédance Z en fonction de la largeur du défaut à a)50, b)500 et c)10000 Hz.....	46

Liste des tableaux

<i>Tableau II-1 Comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF</i>	<i>29</i>
<i>Tableau III-1 Dimension et caractéristiques de la géométries.</i>	<i>34</i>

Introduction générale

La problématique du Contrôle Non Destructif (CND) consiste à détecter des défauts dans une pièce, c'est à dire à mettre en évidence la présence d'une hétérogénéité dans le matériau contrôlé. Cette problématique répond à des enjeux majeurs, tels que la sécurité et la fiabilité des systèmes industriels (secteurs nucléaires et aéronautique) et des personnes, l'optimisation des cycles de maintenance et le développement durable. En effet, une connaissance fine de l'état d'intégrité d'une structure peut permettre de prolonger sa durée de vie, éventuellement au-delà de la durée initialement prévue, tout en maintenant un degré de fiabilité élevé.

Actuellement, le CND a atteint une maturité industrielle grâce à l'évolution et la perfection des logiciels de simulation numérique. D'autre part, cette évolution est encouragée par les demandes des différents secteurs (aéronautique, nucléaire, métallurgie...) qui se sont trouvés devant la nécessité de se doter des techniques les plus sophistiquées pour se renseigner de l'état de santé, des caractéristiques physiques et géométriques des différents matériaux sans les détruire.

Parmi ces techniques de CND les plus utilisées : l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, les ultrasons, les courants de Foucault. Le choix de l'une d'entre elles dans une application dépend d'un certain nombre de paramètres : la nature des matériaux à contrôler, la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position et forme du défaut), l'environnement du contrôle et le contexte économique (coût ...). La contrainte d'utilisation est nécessaire à avoir des propriétés des matériaux à contrôler compatibles avec le phénomène physique mis en jeu par la méthode de CND choisie et que les grandeurs mesurées soient significatives afin d'être correctement interprétées, [7] [5]. 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 CND, dès lors qu'il s'agit de matériaux électriquement conducteurs. Le contrôle par CF est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre (il est très facile de créer des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde) et complexe. En effet, pour un contrôle donné, comment créer une "bonne" répartition des CF permettant d'avoir un "signal de défaut" aussi important que possible ? Il est nécessaire avant toute chose d'avoir une connaissance suffisamment complète du phénomène physique. Les CF n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent Cette méthode est en effet sensible à des défauts dans l'état géométrique ou électromagnétique d'une pièce, comme des inclusions, des fissures ou les effets de la corrosion. De plus, elle est aisée à mettre en œuvre, robuste dans le cadre des applications industrielles et relativement peu coûteuse. Cependant, le besoin grandissant de fiabilité et de rapidité pour les opérations d'inspection requiert le développement de nouveaux systèmes de contrôle.

Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier les interactions sonde-pièce et jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances. La modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction sonde-pièce testée et de définir une structure de sonde adaptée à un problème donné. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix de matériaux, . . .) tout en limitant le nombre de prototype à réaliser. Dans le domaine du CND par CF, la modélisation est ainsi devenue, grâce à la performance du matériel informatique, une actrice importante dans la conception de sondes.

La modélisation des phénomènes du CND-CF est basée sur les équations de Maxwell auxquelles on ajoute les relations constitutives, les conditions aux limites et les conditions de continuité. La résolution de ces équations est faite par la méthode des éléments finis (MEF) qui prend en compte les 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.

Ce mémoire est ainsi organisé 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 continu. Une structure mathématique basée sur deux suites d'espaces regroupant l'ensemble des équations de Maxwell est établie.

Quant au troisième chapitre il sera consacré à la modélisation de fissures de longueurs variable dans une structure multicouches tridimensionnelle en utilisant la méthode à éléments finis sous COMSOL Multiphysics. Dans un premier temps nous allons donner une description du système de CND-CF à étudier.

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) 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 contrôle non destructif est très répandu en milieu industriel en particulier, l'industrie pétrolière, nucléaire, aéronautique et automobile, car toute fissure d'une pièce ou d'un élément de l'ensemble de ces systèmes peut avoir des conséquences très grave sur le personnel travaillant et des répercussions négatives en matière d'économique et de matériels.

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 de mesure. En outre, le développement important de l'informatique a donné un grand élan au domaine du CND.

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

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.

I.2.1 Examen visuel

Le contrôle visuel est un contrôle très simple lié à l'œil humain, il s'applique pour détecter les défauts visibles. Ce contrôle CND est le plus ancien pratiqué depuis les temps les plus reculés et ne nécessite aucun coût particulier. Sa fiabilité reste très faible.

I.2.2 Ressuage

Le ressuage est une technique qui permet de détecter les défauts débouchant à travers l'utilisation d'un liquide 'pénétrant' le long de surface de la pièce testée. Le liquide s'infiltre à l'intérieur des défauts tandis que le reste est éliminé de la surface de la pièce par un lavage.

Ensuite la surface recouverte par une fine couche de "révélateur" qui absorbe le liquide pénétrant contenu dans les fissures et qui donne des taches colorées au niveau des zones de défauts. Ce type de contrôle peut être pratiqué à condition que la matière de la pièce ne réagisse pas chimiquement avec le pénétrant. Le ressuage est la technique de CND la plus ancienne après l'examen visuel, ses premières utilisations datent des années 1880.[1]

Malgré la simplicité du ressuage, cette technique reste très limitée pour les raisons suivantes : La technique est relativement lente, et l'utilisation des produits chimiques augmente le coût du contrôle tout en induisant de possibles nuisances à l'environnement. Aussi, elle n'est pas automatisée et limitée à l'inspection de pièces de géométrie simple.

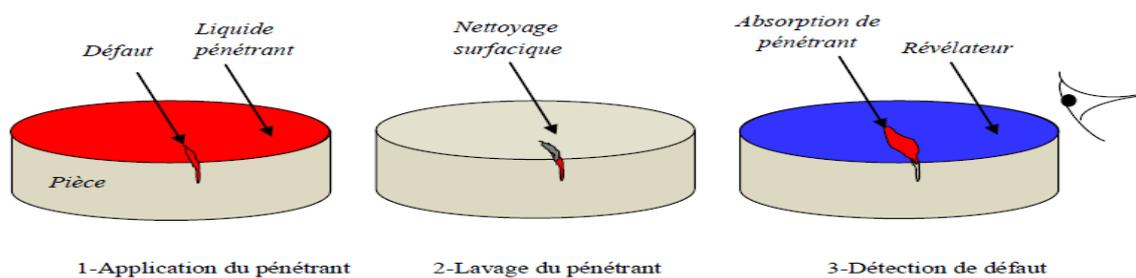


Figure I-1 Principe de contrôle par ressuage.

I.2.3 Radiographie

Le contrôle par radiographie consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement ionisant (rayons X ou γ) et à recueillir le signal atténué sur un récepteur (film photographique ou capteur électronique) qui convertit ce rayonnement en une image visible. Les rayonnements subissent une absorption proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé (**Figure I.2**). Ce contrôle peut s'appliquer à de très nombreux types de matériaux pour mettre en évidence et dimensionner des hétérogénéités telles que des porosités, des soufflures, des amas d'inclusions, des criques, des fissures, des manques de pénétration en soudure..., au stade de la production ou en maintenance. Les défauts se présentant perpendiculairement à la direction du faisceau sont plus difficilement détectables. [1]

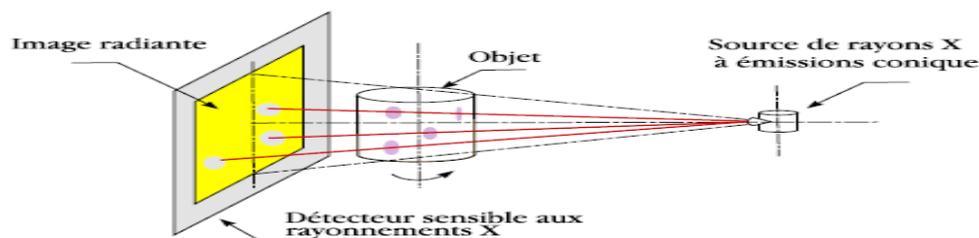


Figure I-2 Principe de la radiographie

I.2.4 Magnétoscopie

Cette méthode permet de mettre en évidence des défauts non débouchant mais proche de la surface. Elle est réservée aux pièces avec alliage ferromagnétique (fer, acier, fonte,...). [1][2][3]

Elle consiste à projeter une poudre magnétique à la surface et de la répartir de façon

homogène ensuite on soumet la pièce à champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce (figure I.3).

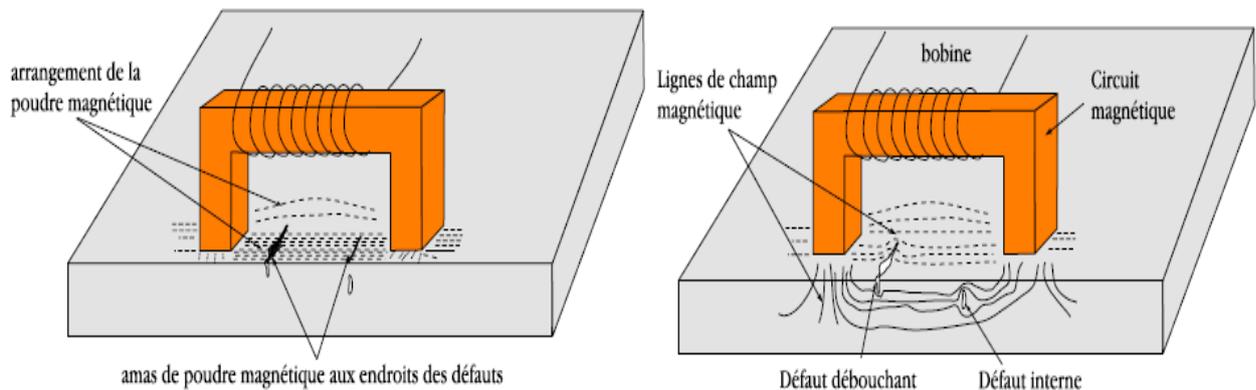


Figure I-3 Principe de la magnétoscopie

I.2.5 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).

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 (Figure I.4).

Le contact entre le transducteur et la cible n'est jamais parfait ; il existe une couche d'air les séparant. La quasi-totalité de l'énergie émise par le transducteur à l'interface air-matériau ne pénètre pas à l'intérieur du matériau.

Il y a ainsi nécessité de déposer un couplant (eau, huile par exemple) entre le transducteur et le matériau.

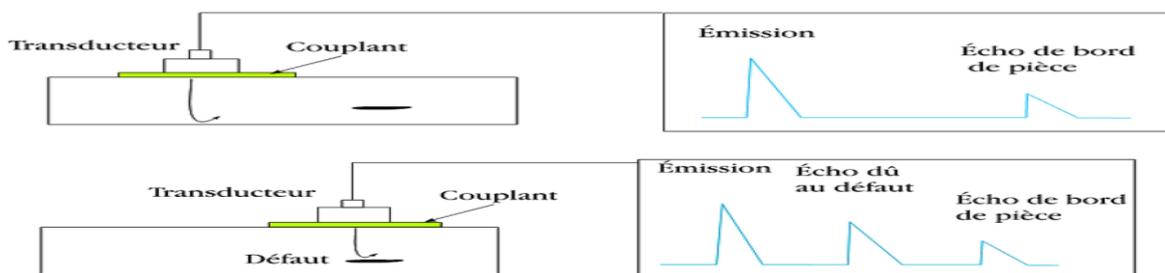


Figure I-4 Principe des Ultrasons.

I.3 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,...) pour mettre en évidence les défauts surfaciques ou sous-cutanés ou n'importe quelle variation des

paramètres physiques du matériau à contrôler (σ : conductivité électrique, μ : perméabilité magnétique). Sa particularité essentielle est de pouvoir injecter de l'énergie électromagnétique dans un dispositif sans qu'il y ait contact avec l'inducteur. [4][5]

Puisque dans ce mémoire nous nous proposons d'étudier et de résoudre un problème de CND à l'aide d'une méthode CF, nous allons détailler plus amplement cette technique dans la suite de ce chapitre.

I.3.1 Principe physique de CND-CF

Le principe consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique variable à l'aide d'une bobine (excitatrice) parcourue par un courant électrique variable, créant ainsi dans la pièce à contrôler des courants induits dont la trajectoire sera perturbée soit par la géométrie, soit par les caractéristiques internes de la pièce (figure I.5). Ces courants vont créer à leur tour un champ magnétique de réaction qui va s'opposer au champ initial d'excitation (loi de Lenz).

Les courants de Foucault sont importants à la surface de la pièce et s'affaiblissent en allant sur la profondeur. L'utilisation des faibles fréquences peut assurer la capture des défauts profonds). En principe, cette technique est basée sur la mesure de la variation de l'impédance qui est souvent fonction de plusieurs paramètres. En effet, la variation de l'un de ces paramètres engendrera une modification sur de l'impédance aux bornes du capteur. A partir de la mesure d'impédance de ce type de capteurs il serait intéressant, dans le domaine du contrôle de pouvoir évaluer les propriétés physiques de la cible, qualitativement mais aussi quantitativement, et détecter d'éventuelles anomalies.

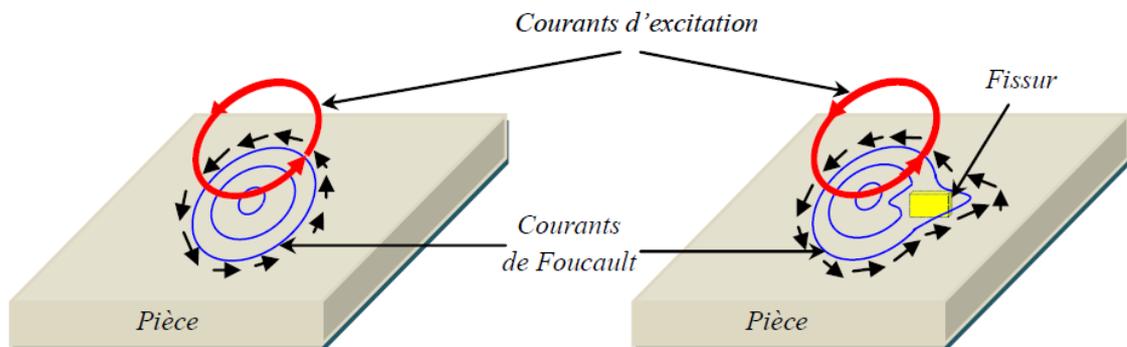


Figure I-5 Principe du CND par courants de Foucault.

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

Ce phénomène d'origine électromagnétique apparaît dans tous matériaux conducteurs parcourus par un courant électrique alternatif ou soumis à un champ électromagnétique variable dans le temps. Dans le cas du contrôle non destructif, les courants induits dans la pièce décroissent de manière exponentielle à partir de la surface. La grandeur caractéristique de ce phénomène est la profondeur de pénétration donnée par :

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

Si 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 est exprimé par la relation suivante. [1]

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

- z la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce.
- $J(z)$ le module de la densité de courant à la profondeur z .
- J_s le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$).
- δ la profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.

La profondeur de pénétration δ est donc donnée par la relation suivante :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad \text{I.3}$$

On peut constater que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur (figure I.6).

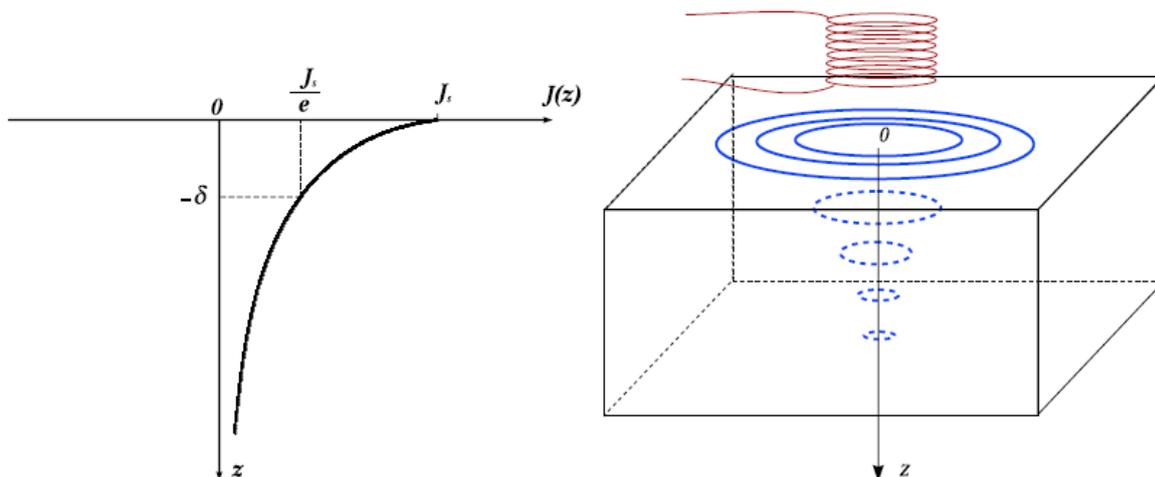


Figure I-6 Répartition des courants de Foucault dans une pièce

La réponse d'une cible à une excitation est recueillie par un élément sensible à une grandeur électromagnétique. Dans la majorité des cas il s'agit de mesurer une impédance ou une différence de potentiel (d.d.p) représentative de la variation d'un flux. Cette mesure s'effectue souvent par l'intermédiaire d'une bobine.

I.3.3 Domaine d'application

Les techniques de contrôle utilisant les courants de Foucault sont utilisées pour effectuer les opérations suivantes :

- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe de composants aéronautiques.
- Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau.
- Mesure d'épaisseur de revêtements (conducteurs non magnétiques sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur...).
- Recherche de défauts sur produits en sortie de fabrication (tubes, rails, barres...). Suivi d'installations et de matériels en service.
- Mesure d'épaisseur.

I.3.4 Avantages et Inconvénient

Les Avantages et Inconvénients des courants de Foucault sont :

I.3.4.1 Avantages :

Le CND par CF :

- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement enfouis (quelques millimètres) dans tout matériau conducteur.
- Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplant. Ceci en facilite par conséquent l'utilisation. De même, aucune nuisance ou pollution n'est engendrée ni pour l'utilisateur ni pour l'environnement, contrairement, par exemple au ressuage largement utilisé, qui nécessite l'application de produits chimiques nocifs.
- Transportabilité : le CND par CF ne nécessite pas de dispositif encombrant, et peut donc être effectué à des endroits difficilement accessibles moyennant un équipement portable. De même les contrôles à température élevées sont possibles.

I.3.4.2 Inconvénients

- La profondeur d'inspection dépend de la fréquence d'excitation.
- La détection des défauts se fait d'une manière locale.
- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs.

- La position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts.
- La compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection. [2]

I.3.5 Limites du CND par courants de Foucault

- Il s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs.
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur.
- L'interprétation des signaux est souvent complexe. [1]

I.4 Différents types de sondes

Le capteur est une bobine ou un ensemble de bobines, il sert à générer les courants de Foucault ainsi que capter leurs effets. La grandeur mesurée est l'impédance ou une différence de potentiel représentant l'image des courants de Foucault. Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un 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 : [7]

- La conductivité électrique σ .
- La perméabilité magnétique μ .
- 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.

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 son mode de contrôle. [7]

I.4.1 Selon la position

I.4.2 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. [7]

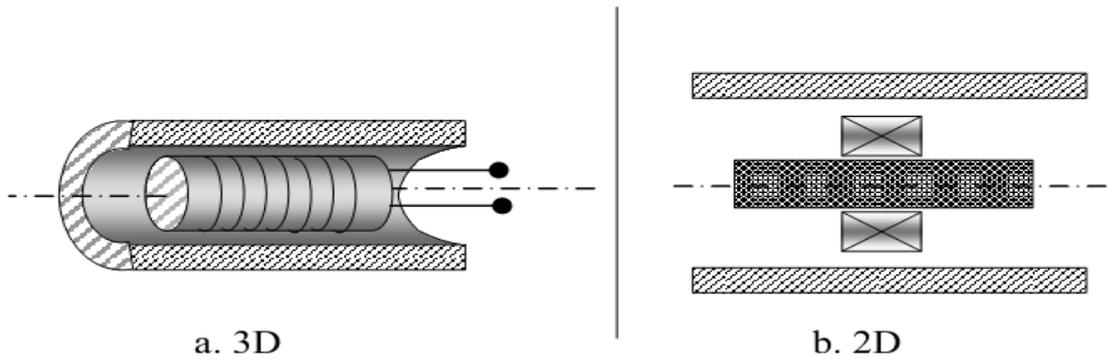


Figure I-7 Sonde interne

I.4.2.1 Sonde encerclant

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner (figure I.8). Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, les barres, [10]

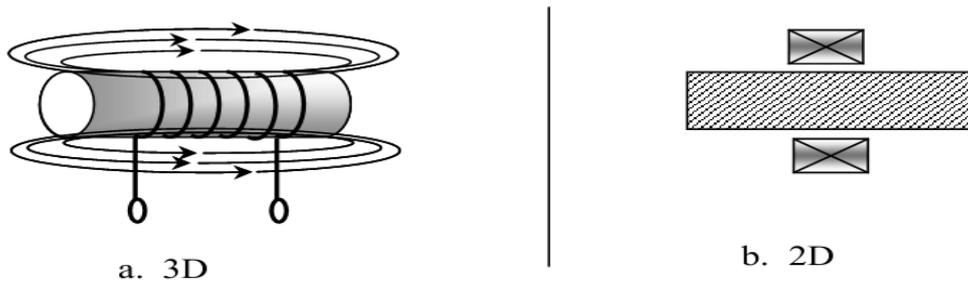


Figure I-8 Bobine encerclant

I.4.2.2 Sonde ponctuelle

Elle est utilisée pour l'inspection des objets à des endroits précis. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce. En effet, ce capteur permet de faire un contrôle local des pièces même celles dont la géométrie est complexe (figure I.9), [2] [1] [6].

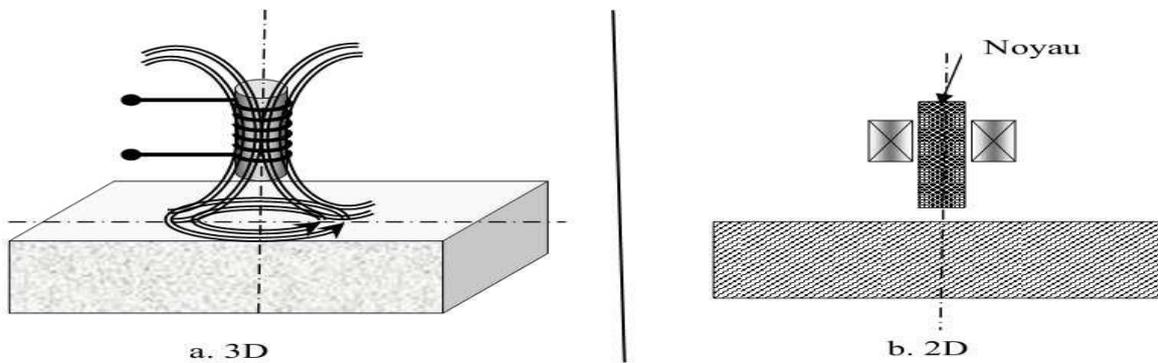


Figure I-9 Bobine externe glissante avec noyau

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.10).

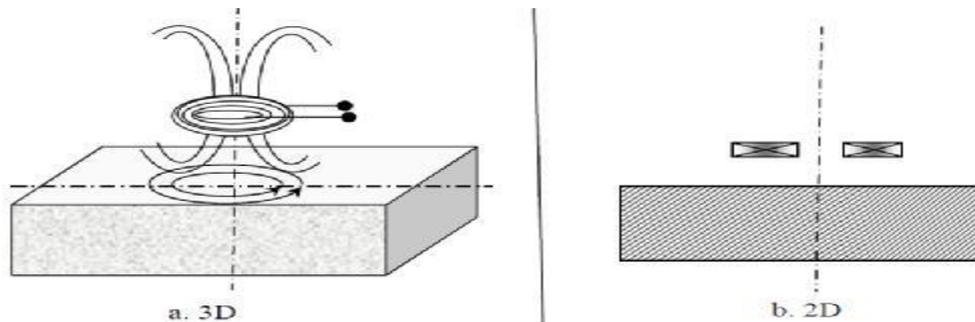


Figure I-10 Bobine plate

I.4.2.3 Capteur à double fonction

Connu aussi sous le nom de systèmes à bobinage simple, est dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par le ou les mêmes enroulements. C'est le montage le plus simple, 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 tension complexe

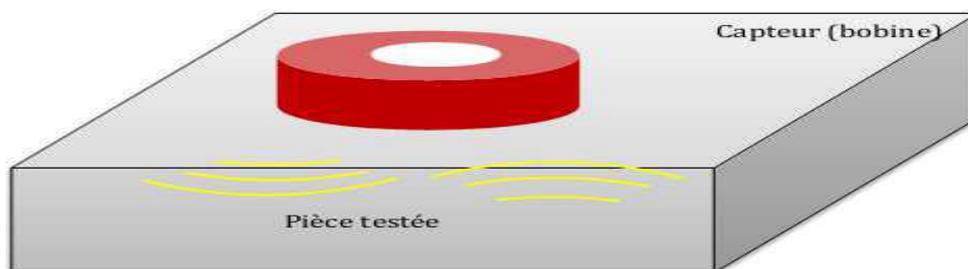


Figure I-11 Capteur à fonction double

I.4.2.4 Capteur à fonctions séparées

Connu aussi sous le nom de systèmes à bobinage double, dans lequel les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par des enroulements distincts. A l'inverse du premier, il est constitué de deux bobines, une pour créer le flux, l'autre pour recueillir les variations de couplage liées aux modifications dues au matériau, c'est-à-dire qu'elle servira uniquement pour la mesure, on parle alors de mesure par trans-impédance. [18]

Ces bobinages sont moulés dans un même boîtier pour éviter toute modification fortuite de leur mutuelle induction. Ce montage est très utilisé pour les contrôles à basses fréquences ($f < 1000$ Hz) pour le contrôle de matériaux magnétiques (élimination de l'effet de variations de température).

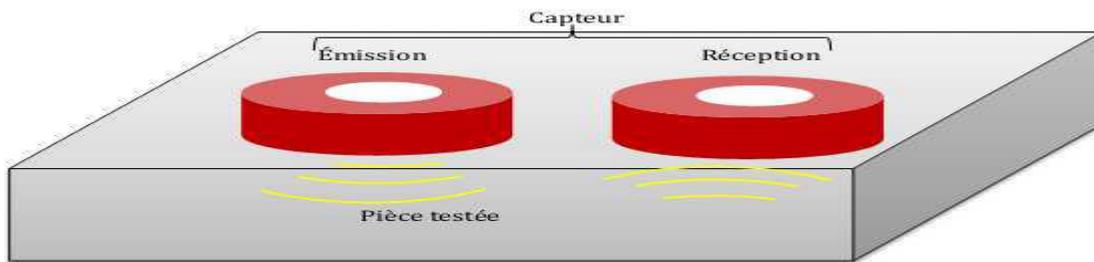


Figure I-12 Capteur à fonctions séparées

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 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), (Figure (I. 13). [9]

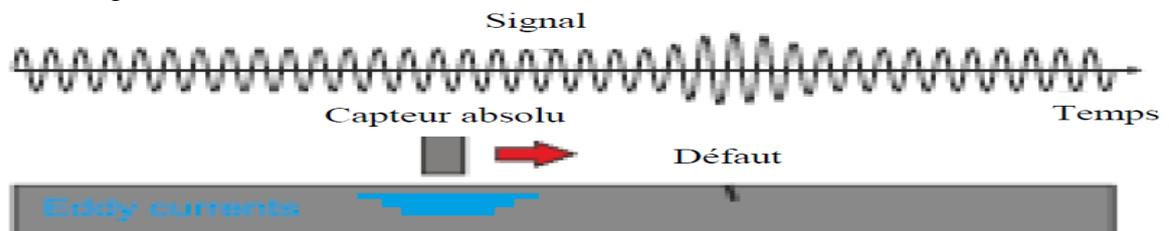


Figure I-13 Capteur absolu

I.4.3.2 Mode différentiel

La mesure différentielle est une comparaison de deux mesures effectuées simultanément d'impédances de deux capteurs absolus dont les flux sont opposés. En effet, dans le cas d'une pièce saine, l'impédance différentielle est nulle. Par contre, si la pièce présente une anomalie l'amplitude de la grandeur d'alimentation est modifiée. [10]

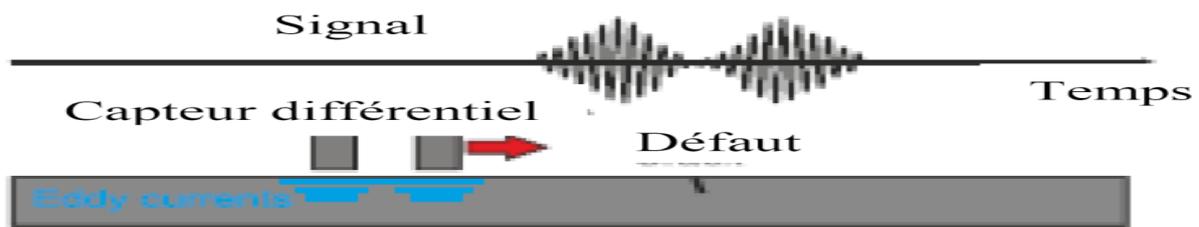


Figure I-14 Capteur en mode différentiel.

I.4.4 Modes d'excitation

L'extraction de l'information sur la pièce à contrôler est liée au mode d'excitation de la sonde. On peut distinguer trois modes d'excitation :

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

I.4.4.1 Signal mono-fréquentiel

Les courants induits sont obtenus par une excitation sinusoïdale de fréquence fixe. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité des paramètres recherchés. Elle devra cependant se situer dans une gamme 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. [11]

I.4.4.2 Signaux multifréquences

La méthode multifréquence est sans doute celle qui est la plus utilisée dans le CND à courant de Foucault. En réalisant des mesures à plusieurs fréquences d'excitation, il est possible d'atténuer fortement l'effet des grandeurs perturbatrices. La réduction de ces grandeurs n'est possible qu'à partir de signaux contenant suffisamment d'informations pour permettre une séparation des paramètres.

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 CF pulsés est totalement différente de celle utilisée en CF sinusoïdaux. On exploite généralement la réponse temporelle directement fournie par la ou les bobines réceptrices. L'analyse se fait alors via l'étude de 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.

Un avantage du CND par CF pulsés, par rapport notamment aux CF mono-fréquence, est la possibilité d'inspecter les structures électriquement conductrices jusqu'à une profondeur relativement grande, grâce à un large spectre de fréquences et notamment basse fréquence.

En revanche, cette méthode nécessite un temps d'inspection très élevé, en particulier si l'on utilise des techniques d'analyse spectrale. [12]

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons consacré un aperçu général sur le CND à travers la présentation des différentes techniques utilisées sur la base des principes physiques qui les régissent. Notre intérêt s'est porté sur l'exploitation de la technique des courants de Foucault appliqués au CND, en précisant les objectifs, les domaines d'application, les différents types de capteurs, les différents modes d'excitation, et les grandeurs qui influent sur le phénomène d'effet de peau en étroite relation avec les CF.

Les capteurs à courants de Foucault sont souvent classés selon leurs géométries, fonctions et leurs modes de contrôle. En principe, la technique CND-CF est basée sur l'exploitation de la mesure de la variation de l'impédance qui est fortement corrélée par plusieurs paramètres (physiques et géométriques). En continuité, le prochain chapitre concernera la modélisation mathématique permettra l'étude des phénomènes physiques en vue de prédire la réponse du capteur en interaction avec la cible.

CHAPITRE II

Modélisation du Contrôle Non Destructif par CF

Chapitre II *Modélisation du Contrôle Non Destructif par CF*

II.1 Introduction

Dans le domaine du contrôle non destructif des CF, la modélisation numérique est devenue, grâce aux performances du matériel informatique, le principal outil de conception des sondes.

Une étude des performances de détection du système. En général la modélisation des 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 a l'avantage d'être rapide et permet d'avoir des résultats très précis. Cependant, la complexité de la configuration CND pour CF, En effet, il est souvent impossible d'obtenir des 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).

Alors ce chapitre sera divisé en deux grandes parties. La première concerne le problème CND des CF, l'évolution des équations de Maxwell pour l'obtention des champs électriques et magnétiques sera passée en revue, Conditions aux limites du domaine, conditions des hypothèses de continuité et de simplification seront ensuite introduites.

Dans la deuxième partie nous représenterons les différentes formules dans le potentiel autorisé, résolvant le problème de la magnétodynamique, nous terminerons par une comparaison entre ces formules.

II.2 Méthodes de résolution

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

II.2.1 Méthodes analytiques

Les premiers travaux se sont basés sur des méthodes de résolution analytiques des équations issues des modèles à une seule dimension. Leur intérêt réside dans la simplicité de calcul et permettent d'obtenir une solution mathématique exacte du problème. Mais cette méthode devient rapidement impraticable si l'on étudie des problèmes présentant des formes complexes (bidimensionnels...), d'où la naissance des méthodes numériques. [1]

II.2.2 Méthodes numériques

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

II.2.2.1 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 ».

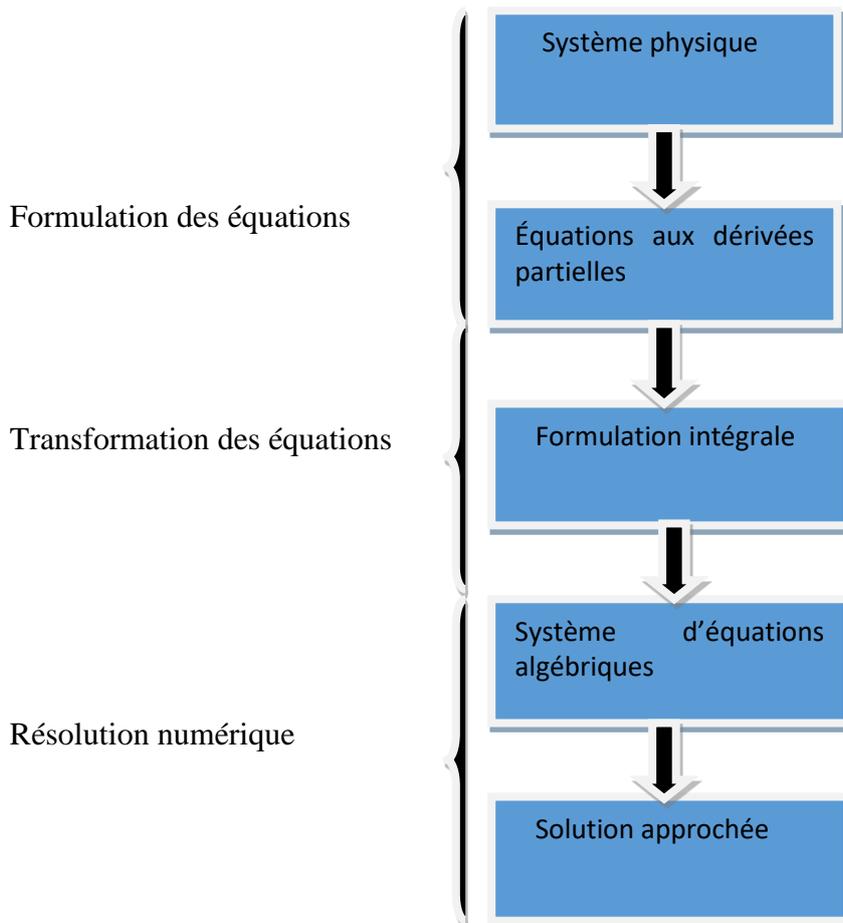


Figure II-1 Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par la méthode des élément finis.

II.2.2.2 La méthode des intégrales de volumes

Se base sur la résolution des Intégrales précédemment citées. Une fois que la fonction de Green correspond à la géométrie étudier les champs électriques ou magnétiques obtenus grâce aux interactions capteur-cible par ces fonctions de Green et la source (électrique ou magnétique) fonctionne.

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

II.2.2.3 La méthode des intégrales aux frontières

Lorsqu'on utilise la méthode des éléments finis (MEF), on calcule les variables inconnues dans tout le domaine. La méthode des intégrales aux frontières (MIF) permet de ramener le maillage à la frontière du domaine. 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 de structure tridimensionnelle 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 (pas de termes nuls). Ceci augmente le temps utilisateur, donc le coût de calcul. Cette méthode trouve son application lorsque les fréquences de travail sont très importantes car la profondeur de pénétration devient très faible vis-à-vis des autres dimensions géométriques du dispositif étudié et une discrétisation en éléments finis ferait aboutir à des difficultés insurmontables à cause du grand nombre d'éléments nécessaires à cette discrétisation. [23]

II.3 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.2. Un matériau constituant la pièce critique 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. 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 [13][14].

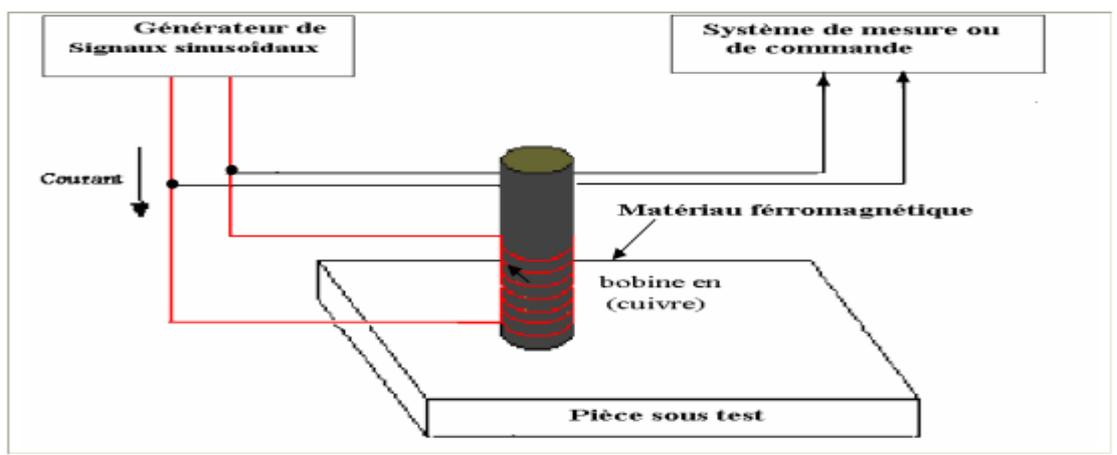


Figure II-2 Principe du capteur à courants de Foucault Intérêt de la modélisation.

Le contrôle non destructif par courants de Foucault est largement utilisé pour tester les matériaux conducteurs. Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier l'interaction des composants des sondes et jouent un rôle croissant dans la conception des systèmes de contrôle et la démonstration de leurs performances.

La modélisation comporte deux étapes ; la première est la recherche et l'analyse du problème et la deuxième est la mise en œuvre de la solution au problème.

II.4 Mise en équations

Les problèmes liés au calcul des courants de Foucault peuvent être schématisés par un modèle type composé de l'air, du matériau conducteur et d'une source de courant (Figure II. 3). Ces trois objets forment le domaine de calcul Ω de frontière Γ . [15]

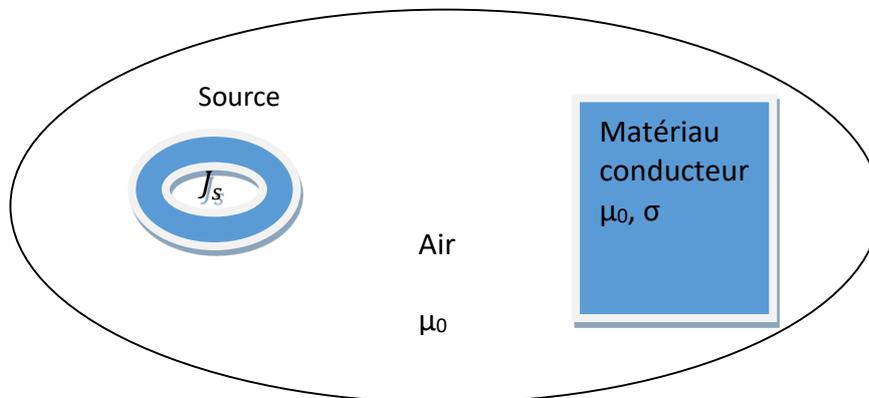


Figure II-3 Domaine d'étude d'un problème de CND-CF.

Ω : Domaine d'étude

J_s : Densité de courant électrique dans la source. →

Γ : Les frontières qui enveloppent le domaine d'étude.

σ Conductivité électrique.

μ_0 : Perméabilité magnétique absolue du vide.

II.4.1 Équations de Maxwell

Les équations de Maxwell spécifient que toute variation spatiale ou temporelle d'un champ électromagnétique en un point de l'espace entraîne ou est due à l'existence d'un autre champ au même point. Ces équations sont donc locales et sont valables dans n'importe quel système d'axes. Ainsi, dans tous les problèmes nécessitant le calcul du champ électromagnétique qui règne dans un système matériel, on utilise les quatre équations fondamentales aux dérivées partielles de MAXWELL, qui sous leurs formes la plus générale s'écrivent : [7]

II.4.1.1 Forme différentielle

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Maxwell-faraday} & \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{II.1} \\ \text{Maxwell-Ampère} & \text{rot } \vec{E} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{II.2} \\ \text{Conservation du flux magnétique} & \text{div } \vec{B} = 0 \quad \text{II.3} \\ \text{Maxwell-Gauss} & \text{div } \vec{E} = \rho \quad \text{II.4} \end{array} \right.$$

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

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

J [A/m²] et ρ [c/m³] : Densités de courant de conduction et de charge électrique.

L'équation (II.1) est une généralisation de la loi d'Ampère. Elle constitue avec (II.2) les équations dites de couplage électromagnétique, alors que les équations (II.3) et (II.4) forment l'équation dite de conservation. L'utilisation directe des équations de Maxwell pour la résolution des problèmes électromagnétiques est parfois déconseillée car nous devrions considérer ces quatre équations différentielles simultanément. Les deux types de champs de vecteur sont liés par des relations constitutives, appelées lois de comportement, qui décrivent les caractéristiques des matérielles. Sans eux, le système (II.1 à II.4) serait indéterminé.

Elles sont données sous les formes suivantes :

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

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

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

σ et μ : peuvent être soit des scalaires, modélisant le comportement de matériaux isotrope, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie.[11]

II.4.1.2 Forme intégrale

$$\left\{ \begin{array}{ll} \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{\partial}{\partial t} \oiint \vec{B} \cdot d\vec{s} & \text{II.8} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{j} \cdot d\vec{s} + \frac{\partial}{\partial t} \oiint \vec{D} \cdot d\vec{s} & \text{II.9} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 & \text{II.10} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_v \rho \cdot dv & \text{II.11} \end{array} \right.$$

Ces équations sont respectivement équivalentes à la première équation et sont dites globales. Les surface des intégrales apparaissant dans le membre droit sont séparées par la courbe fermée du membre gauche.

II.4.2 Lois de comportement des milieux

Pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, on rajoute aux équations précédentes des relations connues sous le nom de loi constitutive du milieu, loi d'Ohm, équation de continuité et relation de passage doivent être considérées. [17]

II.4.3 Relations constitutives du milieu

II.4.3.1 Milieu magnétique

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{II.12}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad \text{II.13}$$

μ [H / m] : Perméabilité magnétique.

μ_0 [$4\pi \cdot 10^{-7}$] : Perméabilité magnétique du vide.

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu.

II.4.3.2 Milieu diélectrique

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad \text{II.14}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad \text{II.15}$$

ε [F / m] : Permittivité électrique.

ε_r : Permittivité électrique relative du milieu considéré

ε_0 [F/m] : Permittivité électrique à vide.

C [m/s] : Vitesse de la lumière.

II.4.4 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 σ [$\Omega \cdot m$]⁻¹ [18]. Cette loi est donnée par :

$$J = J_s + J_{ind} \quad \text{II.16}$$

$$J = \sigma(E + v \wedge B) \quad \text{II.17}$$

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 σE 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 :

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}') \quad \text{II.18}$$

Avec :

$$E' = v \wedge B$$

II.4.5 Equation de continuité

L'équation de continuité, appelée aussi équation de la conservation de la charge électrique est donnée

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{II.19}$$

ρ : Densité de la charge électrique.

II.4.6 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. [19]

II.4.6.1 Champ E

Continuité de la composante tangentielle

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{II.20}$$

$$\text{On a } \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint \vec{\nabla} \wedge \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\iint \frac{\partial B}{\partial t} d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \text{II.21}$$

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

$$\text{Ainsi : } \vec{E}_{T2} - \vec{E}_{T1} = 0 \quad \text{II.22}$$

II.4.6.2 Champ B

Continuité de la composante normale.

$$\text{On a toujours ici } \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \text{ donc } \overline{B_{n2}} - \overline{B_{n1}} = 0 \quad \text{II.23}$$

La discontinuité de la composante normale de l'induction électrique **D** due aux charges surfaciques **qs** si elles existent :

$$(\overline{D_1} - \overline{D_2})\vec{n} = \vec{\rho}_s \quad \text{II.24}$$

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

$$(\overline{H_1} - \overline{H_2})\vec{n} = \vec{K} \quad \text{II.25}$$

n : étant la normale à l'interface séparant les deux milieux. **K** : Densité de courant portée par la surface de séparation. **ρ_s** : Densité de charge électrique portée par la surface.

II.4.7 Conditions de Jauge

Dans les équations de Maxwell, les champs s'expriment soit à un gradient près (champ rotationnel), soit au rotationnel près (champ à divergence) ce qui justifie l'utilisation des jauges dans certaines formulations pour assurer l'unicité de la solution. Soient \vec{U} et \vec{W} deux champs de vecteurs, les conditions de jauge s'écrivent de façon générale par [2] :

II.4.7.1 Jauge de Lorentz

La condition de jauge Lorentz est :

$$\text{div}\vec{U} + K \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \text{II.26}$$

- Elle est homogène
- Elle permet de simplifier souvent les calculs

II.4.7.2 Jauge de Coulomb

En jauge de coulomb, on a :

$$\text{div}\vec{U} = 0 \quad \text{II.27}$$

II.4.7.3 Jauge adaptée pour les éléments d'arêtes

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \quad \text{II.28}$$

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 $\text{div}\mathbf{A}=\mathbf{0}$ normal à la surface de séparation des deux milieux Ω_1 et Ω_2 et dirigé vers l'extérieur.

II.4.8 Hypothèses simplificatrices

A ce jour, la plupart des travaux réalisés dans le domaine des calculs de champs et de courants de Foucault pour les systèmes électromagnétiques reposent sur les hypothèses suivantes :

- 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 ; $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$.

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

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad \text{II.29.a}$$

$$\text{div}\vec{D} = 0 \quad \text{II.29.b}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{U} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{II.29.c}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j} \quad \text{II.29.d}$$

Avec les relations constitutives suivantes :

$$\vec{U} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad \text{II.30}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{II.31}$$

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.5 Formulation électromagnétique

II.5.1 Modèle magnétodynamique

La magnétodynamique comprend l'étude des phénomènes magnétiques et électriques dans des états dynamiques, en ignorant les courants de déplacement. Les champs électromagnétiques

sont variables, soit en faisant varier le courant d'excitation dans le temps, soit en déplaçant Aimants permanents. Un modèle magnétodynamique dérivé des équations de Maxwell s'écrit :

$$\nabla \times E = -\partial_t B \quad \text{II.32}$$

$$\nabla \times H = J \quad \text{II.33}$$

$$\nabla \times B = 0 \quad \text{II.34}$$

Avec

$$\nabla \times J = 0 \quad \text{II.35}$$

Pour définir complètement le problème magnétodynamique, il est encore nécessaire de considérer les relations constitutives des milieux.

II.5.2 Formulations de la magnétodynamiques

Plusieurs formulations ont été développées pour représenter des modèles magnétodynamiques pour la modélisation. Les principales formulations rencontrées peuvent être divisées en deux catégories :

- Formulations de type électrique : E, A et A-V
- Formulations de type magnétique : H et T-Φ

La formulation en champ électrique E, est obtenue en dérivant par rapport au temps l'équation (II.14) et la combinant avec la relation (II.33). Cette formulation n'est pas utilisable dans tous les cas. Selon le problème étudié et la méthode de discrétisation utilisée, elle nécessite certain traitement. A l'heure actuelle, la formulation qui reste attractive surtout quand il s'agit des problèmes de calcul des courants induits en trois dimensions, est la formulation en potentiels A-V (V : potentiel scalaire électrique). [18]

II.5.3 Formulation de type A

Compte tenu de la relation II.3 (conservation du flux de l'induction magnétique B), B dérive d'un potentiel vecteur magnétique A tel que :

$$B = \nabla \times A \quad \text{II.36}$$

Les formulations utilisant le potentiel vecteur A sont très employées en deux dimensions où elles donnent d'excellents résultats. Elles sont aussi utilisées pour les modélisations 3D. [21]

II.5.4 Formulation en A-V

D'après l'équation de la conservation de flux (II.3), l'induction magnétique B dérive d'un potentiel magnétique A, tel que :

$$\vec{B} = \overline{rot}(\vec{A}) \quad \text{II.37}$$

Lorsque cette équation est remplacée dans (II.29.c), on obtient :

Où \mathbf{A} est le potentiel vecteur magnétique.

$$\overline{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad \text{II.38}$$

La combinaison des équations (II.17) et (II.37) donne :

$$\sigma E = J - J_s = \sigma \left\{ \frac{\partial A}{\partial T} + grad(v) \right\} \quad \text{II.39}$$

D'où

$$J = -\sigma \left\{ \frac{\partial A}{\partial T} + grad(v) + J_s \right\} \quad \text{II.40}$$

En remplaçant J par son expression (II.41) dans le système d'équation (II.27), on aboutit à l'expression vectorielle condensée du système d'équation (II.29) représentant ainsi l'équation électromagnétique en potentiel vecteur magnétique A , donnée par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} rot(\mathbf{v}rot(A)) = -\sigma \left\{ \frac{\partial A}{\partial T} + grad(v) \right\} + J_s \\ div(A) = 0 \end{array} \right. \quad \text{II.41}$$

Où $\mathbf{v} = \mathbf{1}/\mu$ désigne la réductivité magnétique.

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

$$rot \left(\frac{1}{\mu} rot(\vec{A}) \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial T} + \sigma \overline{grad}(v) = J_s \quad \text{II.42}$$

L'équation (II.43) prend différentes formes selon la région d'étude et les caractéristiques des différents milieux.

II.5.5 Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique AV-A harmonique

Le système d'équations en potentiel vecteur magnétique et scalaire (AV – A) électrique à résoudre est :

$$rot \left(\frac{1}{\mu} rot(\vec{A}) \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial T} + \sigma \overline{grad}(v) = J_s \quad \text{II.43}$$

$$\text{div}(\sigma \frac{\partial (\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}}(v))}{\partial t}) = 0$$

On remplace $\frac{\partial}{\partial t}$ par $j\omega$

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot}(\vec{A}) \right) - \text{grad} \left(\frac{1}{\mu} \text{div}(\vec{A}) \right) + j\omega\sigma (\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}}(v)) = J_s \quad \text{II.44}$$

$$j\omega\sigma (\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}}(v)) = 0 \quad \text{II.45}$$

Étant donné que le potentiel vecteur magnétique est déterminé au gradient d'une fonction scalaire quelconque près, la solution qui sera obtenue n'est pas unique. Donc pour fixer la fonction scalaire et garantir l'unicité de la solution, un terme de pénalité sera ajouté pour exprimer la condition de Jauge de Coulomb :

$$\text{div}(\vec{A}) = 0 \quad \text{II.46}$$

$$\text{rot} (v_p \cdot \text{rot}(\vec{A})) - v_p \cdot \text{div}(\text{grad}(\vec{A})) + j\omega\sigma \vec{A} + \sigma \overrightarrow{\text{grad}}(v) = J_s$$

Ou v_p : Terme de pénalité ayant la dimension d'une réductivité magnétique.

En utilisant la méthode des éléments finis et en appliquant la méthode de Galerkin et le théorème de Green avec des conditions aux limites homogènes, nous obtenons la formulation intégrale AV – A définis sur les nœuds du maillage du domaine Ω .

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{\Omega} (v(\text{rot}\vec{A})(\text{rot}\vec{N}_i) + \text{div}(\vec{N}_i)\vec{v}_p \cdot \text{div}(\vec{A}))d\Omega + \int_{\Omega} j\omega\sigma \cdot \vec{N}_i(\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}}V)d\Omega = \int_{\Omega} \vec{N}_i \vec{J}_s d\Omega \\ \int_{\Omega} j\omega\sigma \alpha_i \text{grad}(\vec{A})d\Omega + \int_{\Omega} j\omega\sigma \cdot \text{grad}(\alpha_i) \cdot \text{grad}(v)d\Omega = 0 \end{array} \right. \quad \text{II.47}$$

Avec :

N_i : Fonction de projection vectorielles

α_i : Fonction de projection scalaire.

Le domaine d'étude Ω est exprimé par des valeurs nodales du potentiel vecteur magnétique A, les variables inconnues :

$$A_s^e = \sum_{j=1} (N_i \cdot A_{xj} \cdot e_x + N_i \cdot A_{yj} \cdot e_y + N_i \cdot A_{zj} \cdot e_z) \quad \text{II.48}$$

A_{xj}, A_{yj}, A_{zj} : Composantes du potentiel vecteur magnétique au nœud j, $N_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$: Fonction d'approximation nodale associée au nœud j et e_x, e_y, e_z : Vecteurs unitaires.

L'introduction de (II.47) dans les équations intégrales (II.46) permet une intégration volumique dont l'assemblage donne un système d'équations algébriques à degrés de liberté liés au nombre de nœuds du maillage.

$$\begin{pmatrix} \bar{K}_{xx} + M & K_{xy} & K_{xz} & G_{xv} \\ K_{yx} & K_{yy} + M & K_{yz} & G_{yv} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} + M & G_{zv} \\ G_{vx} & G_{vy} & G_{vz} & G_{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ F_v \end{pmatrix} \quad \text{II.49}$$

$$K_{ij} = \int_{\Omega} (v(\text{rot}\vec{A})(\text{rot}\vec{N}_i) + \text{div}(\vec{N}_i)\vec{v}_p \cdot \text{div}(A))d\Omega \quad \text{II.50}$$

Où

$$K_{ij} = \int_{\Omega} jw\sigma \cdot N_i \cdot N_j d\Omega \quad \text{II.51}$$

$$G_{uv} = \int_{\Omega} jw\sigma \cdot N_i \cdot \text{grad}(v)d\Omega \quad \text{II.52}$$

$$K_{ij} = \int_{\Omega} N_i \cdot J_s d\Omega \quad \text{II.53}$$

Avec u = x, y, z et v = x, y, z obtenue par permutations cyclique.

II.5.6 Formulation de type ϕ

On a trois types de formulations :

II.5.6.1 Formulation ϕ : milieu isolant sans source de courant.

D'après l'équation (II.2), le champ magnétique est à rotationnel nul. Il existe alors un potentiel scalaire magnétique de type ϕ tel que : [19]

$$H = -\nabla\phi \quad \text{II.54}$$

Avec cette formulation on peut déduire le flux magnétique à partir du calcul de ϕ .

II.5.6.2 Formulation $T\phi$: milieu conducteur.

La relation (II.2) permet d'écrire : $\nabla \cdot J = 0$, qui est l'équation de conservation de la densité du courant. Donc, J dérive d'un potentiel vecteur électrique T : [19]

$$J = \nabla \times T \quad \text{II.55}$$

La réalisation d'un système d'équations dépendant de T et ϕ permet de connaître les champs électromagnétiques dans le conducteur.

II.5.6.3 Formulation ϕ_r : milieu isolant avec source de courant

Dans les régions non conductrices, les équations de Maxwell se simplifient car la conductivité est nulle. Le système d'équations se réduit à : [19]

$$\nabla \times H = J_s \quad (\text{Théorème Maxwell-Ampère}) \quad \text{II.56}$$

$$\nabla \times B = 0 \quad (\text{Loi de Faraday}) \quad \text{II.57}$$

La formulation ϕ n'est pas applicable dès qu'il y a des courants, le potentiel devient multiforme car le rotationnel du champ magnétique n'est plus nul en tout point. Pour résoudre ce problème, il est fait appel à la formulation du potentiel scalaire réduit. [19]

Le principe de cette méthode est de décomposer le champ magnétique H en deux parties.

$$H = H_r + H_s \quad \text{II.58}$$

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

H_r : champ magnétique créé par la réaction des parties conductrices qui soumises au champ H_s.

H_s est calculé par la formule de Biot-Savart :

$$H_s = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{inducteur}} [J_s(P) \times r/r^3] dP \quad \text{II.59}$$

P : point appartenant à l'inducteur.

H_s vérifie le théorème d'Ampère, tandis que H_r est à rotationnel nul :

$$\nabla \times (H_r + H_s) = J_s \quad \text{II.60}$$

Avec

$$\nabla \times H_r = 0 \quad \text{II.61}$$

Donc

$$\nabla \times H_s = J_s \quad \text{II.62}$$

Alors H_r dérive d'un potentiel scalaire réduit ϕ_r .

II.6 Comparaison entre les formulations

Le tableau II.1 présente une comparaison entre les formulations les plus populaires dans le contrôle non destructif par courant de Foucault.

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

Formulation	Potentiels régions non conductrices	Potentiels régions Conductrices	Avantage	Inconvénients
$\vec{A}V - \vec{A}$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, V$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, V$	Réduire le nombre d'inconnues du système et de conserver la propriété de symétrie de la matrice.	Lorsque la perméabilité est très grande par rapport à celle de la région ceci provoque un problème d'oscillation et de connexité.
$\vec{T} - \phi$	ϕ	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, \phi$	La démarche est simple. Elle ne demande ni calcul initial du champ dû aux courants en l'absence de matériaux magnétiques.	N'est pas utilisable dans beaucoup de domaines d'application.

II.7 Calcul de l'impédance

Plusieurs expressions d'impédance ont été formulées et développées dans le domaine du contrôle.

Les courants de Foucault sont intacts. Y compris :

II.7.1 Calcul de l'impédance à travers l'énergie magnétique emmagasinée et des pertes joules

Pour calculer l'impédance on peut le déterminer par l'énergie magnétique emmagasinée W_m et les pertes Joule P_J par les relations

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_v \frac{1}{\mu} |\vec{B}|^2 dv \quad \text{II.63}$$

$$P_J = \frac{1}{2} \iiint_{\text{conducteur}} \frac{1}{\sigma} |\vec{J}|^2 dv \quad \text{II.64}$$

Et on a les relations suivantes :

$$R = \frac{1}{I^2} P_J \quad \text{II.65}$$

$$X = \frac{1}{I^2} W_m \quad \text{II.66}$$

Avec :

- R : la résistance
- X : la réactance
- I : le courant d'excitation parcourant la bobine
- ω : la pulsation

D'où on peut déduire les variations ΔX et ΔR

$$\Delta X = \frac{1}{\mu \cdot I^2} \iiint_v (|\vec{B}_0|^2 - |\vec{B}|^2) dv \quad \text{II.67}$$

$$\Delta R = \frac{1}{2 \cdot \sigma \cdot I^2} \iiint_{\text{conducteur}} (|\vec{J}_0|^2 - |\vec{J}|^2) dv \quad \text{II.68}$$

Avec :

\mathbf{B}_0 c'est l'induction pour la pièce de référence (sans défaut) ; \mathbf{B} est l'induction pour la pièce à tester (avec défaut) et \mathbf{J}_0 ; densité des courants induits sans défaut et \mathbf{J} ; densité des courants induits avec défaut.

II.7.2 Calcul de l'énergie électromagnétique de la bobine

$$I^2 \Delta Z = - \int_{\Omega_s} (\vec{E} - \vec{E}_0) \cdot \vec{J}_s d\Omega_s \quad \text{II.69}$$

- E : Champs électrique en présence de la fissure
- E0 : Champs électrique en absence de la fissure
- W0 : Représente le volume occupé par la bobine.
- I : L'intensité du courant parcourant la bobine

A la bobine le champ électrique s'écrit :

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -j\omega \vec{A} \quad \text{II.70}$$

Et la variation d'impédance

$$I^2 \Delta Z = -j\omega \int_{\Omega_s} (\vec{A} - \vec{A}_0) \cdot \vec{J}_s d\Omega_s \quad \text{II.71}$$

- A : Potentiel vecteur magnétiques en présence du défaut.
- A0 : Potentiel vecteur magnétiques en l'absence du défaut.

On note que :

$$\frac{I^2 \Delta Z}{j\omega} = - \int_{\Omega_s} (\vec{A} - \vec{A}_0) \cdot \vec{J}_s \, d\Omega_s \quad \text{II.72}$$

Cette équation représente la variation de l'énergie électromagnétique de la bobine en présence et en absence du défaut. Les deux méthodes aboutissent aux mêmes résultats. La taille des matrices obtenues est importante, d'où la nécessité de recourir à des algorithmes de pré conditionnement ainsi que l'utilisation des méthodes itératives pour la résolution du système obtenu. Actuellement, divers logiciels de simulation numérique sont disponibles et permettent de faciliter la résolution numérique des systèmes d'équations aux dérivées partielles décrivant les phénomènes électromagnétiques intervenant dans le CND-CF. Le logiciel utilisé est le COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis et qui permet aussi la possibilité de se coupler à Matlab. [20]

II.8 Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la modélisation du CND par CF. Il a fait l'objet de la présentation des différentes équations utilisées dans le CND et les méthodes de résolution des équations de Maxwell ainsi que les intérêts de la modélisation. Enfin, les différentes formulations en champs électrique et magnétique ont été illustrées.

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 permettent 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 de 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.
- Il permet une modélisation rapide des problèmes.[21]

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 problèmes et les paramètres de solveur (Study) et les options d'affichage et de post-traitement des données (Results). La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans le Modèle, par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans Geometry. C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc. Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre. Finalement, au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, le progrès des

simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée.

Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 5.5 sont présentés à la figure ci-dessous. [13]

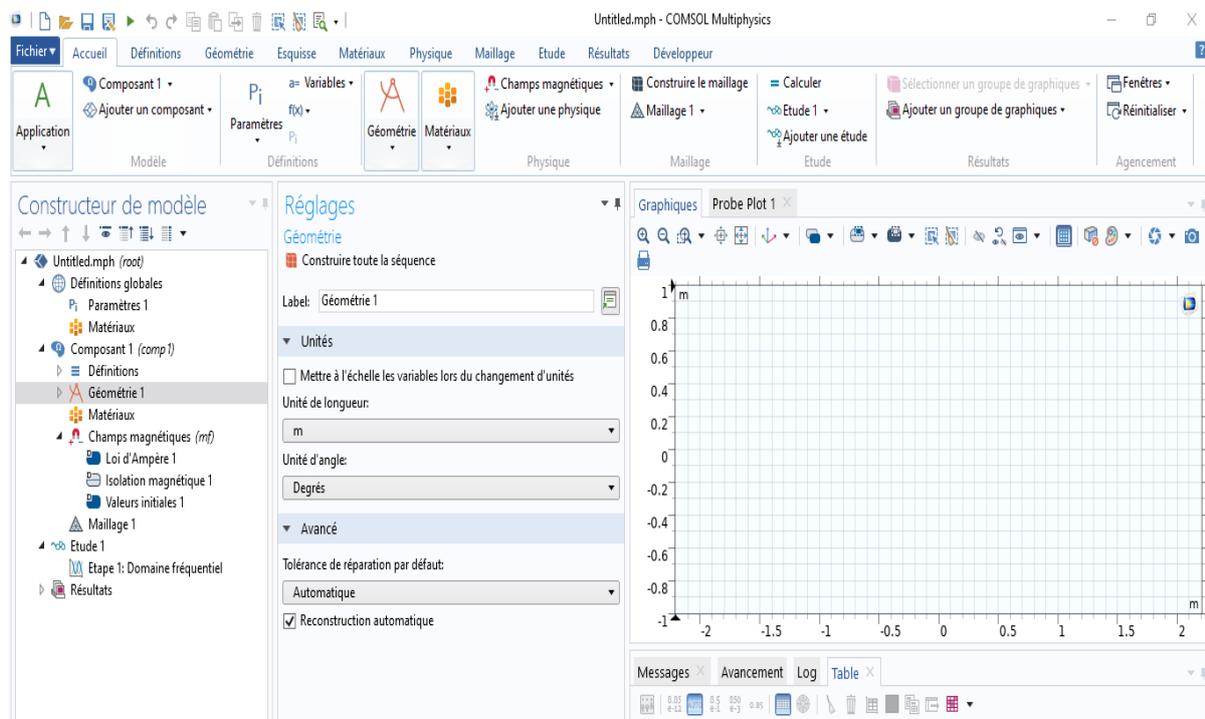


Figure III-1 Interface utilisateur de COMSOL 5.5

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 2D. 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 est l'affectation des propriétés physiques de chaque domaine, on termine par simulation et exploitation des résultats.

III.4 Description de la configuration simulée

Il s'agit d'une bobine qui scanne une plaque en aluminium. Nous avons effectué des simulations 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 du capteur, le lift-off... etc.

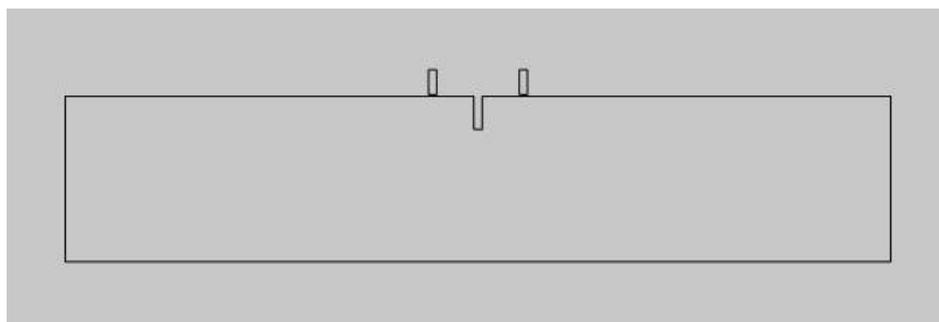
III.4.1 Création de la géométrie

Cette étape consiste à créer un modèle numérique 2D. La géométrie est la combinaison de quatre géométries (plaque, domaine, la bobine et le défaut). Le tableau ci-dessous résume les dimensions de la géométrie.

Tableau III-1 Dimension et caractéristiques de la géométrie.

Paramètres	Valeurs
Capteur	
Tension	5v
Nombre de spires	330
Largeur	1 mm
Hauteur	3 mm
Rayon intérieur de la bobine	5 mm
Plaque	
Hauteur	20 mm
Largeur	100 mm
Profondeur	10 mm
Nature	Aluminium
Conductivité électrique	$3.7 \times 10^{-7} \text{ S/m}$
Défaut	
Largeur	1 mm
Hauteur	4 mm

La figure III.2 représente la géométrie d'étude et son maillage



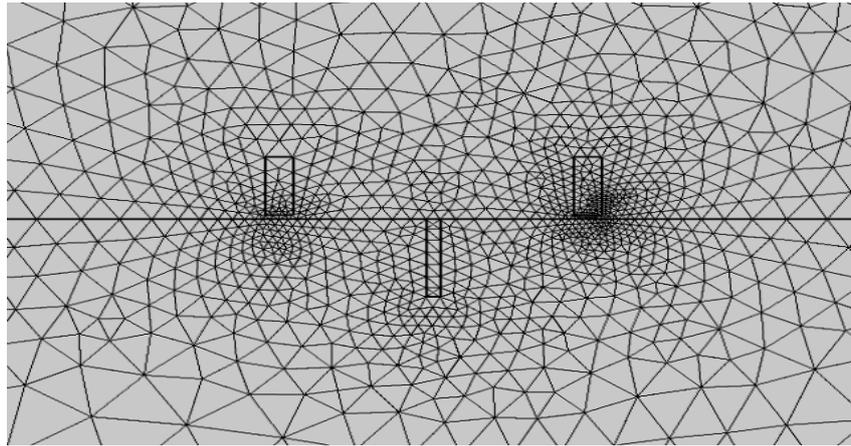


Figure III-2 : Géométrie étudiée et son maillage.

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 500 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 seule.

III.5.1 Effet de variation de la fréquence

Pour différentes valeurs de fréquence, les figures III.3-5 représentent respectivement le flux magnétique de la bobine seule, de la bobine plus la plaque avec défaut pour deux fréquences (50Hz et 100kHz). En outre, 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.

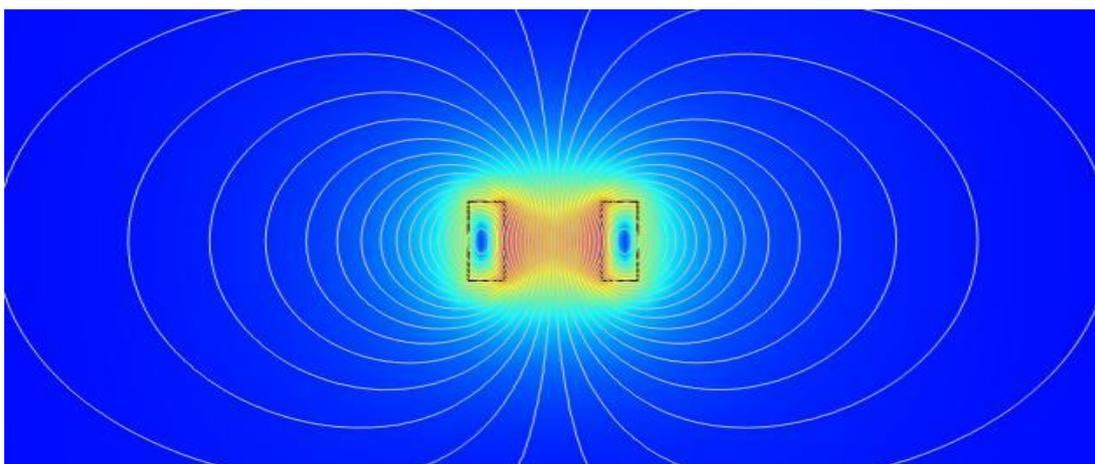


Figure III-3 : Densité de flux magnétique de la bobine seule

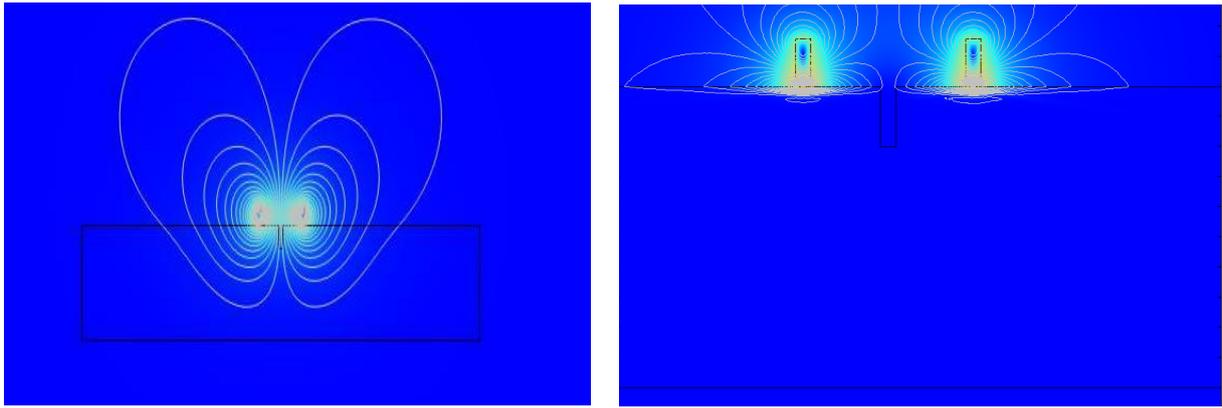


Figure III-4 : Densité de flux magnétique 50Hz

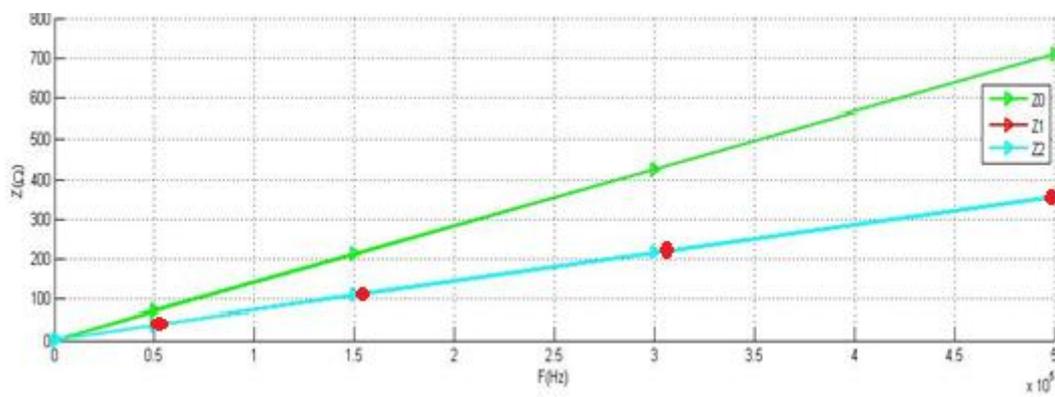


Figure III-5 : Impédances Z_0 , Z_1 et Z_2 en fonction de la fréquence.

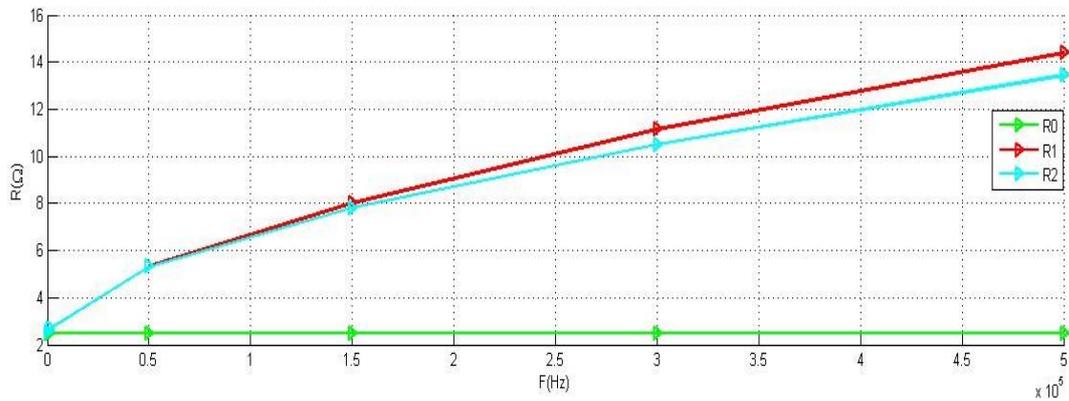


Figure III-6 : Résistances R_0 , R_1 et R_2 en fonction de la fréquence

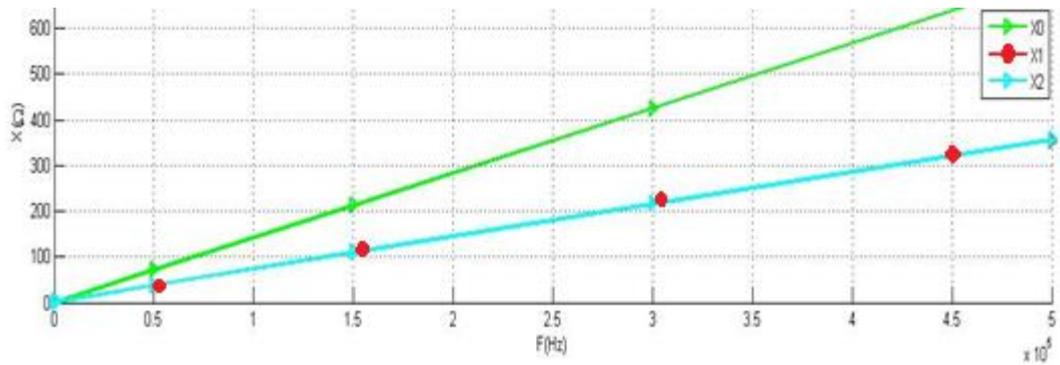


Figure III-7 : Réactance X_0 , X_1 et X_2 en fonction de la fréquence

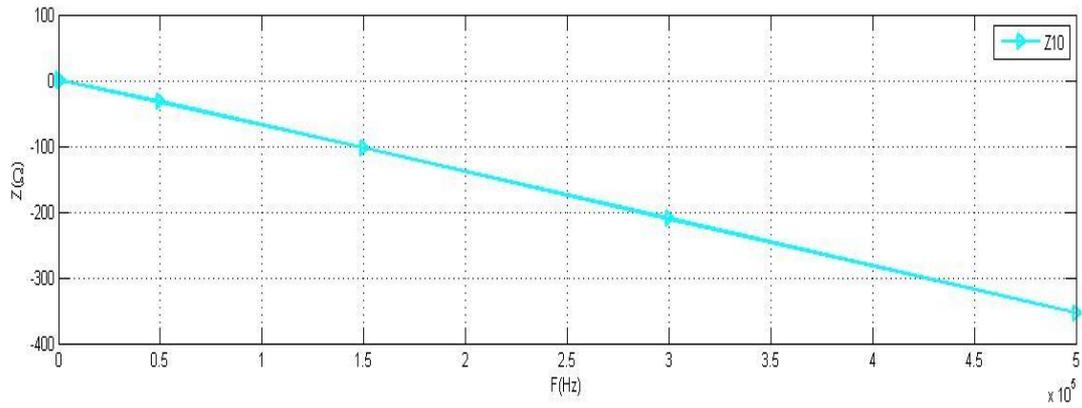


Figure III-8 : Différence d'impédance ΔZ_{10} en fonction de la fréquence

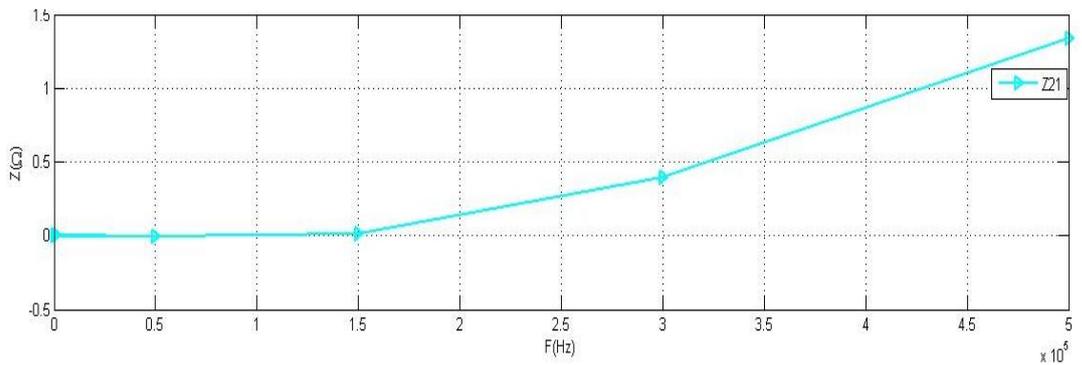


Figure III-9 : Différence d'impédance ΔZ_{21} en fonction de la fréquence

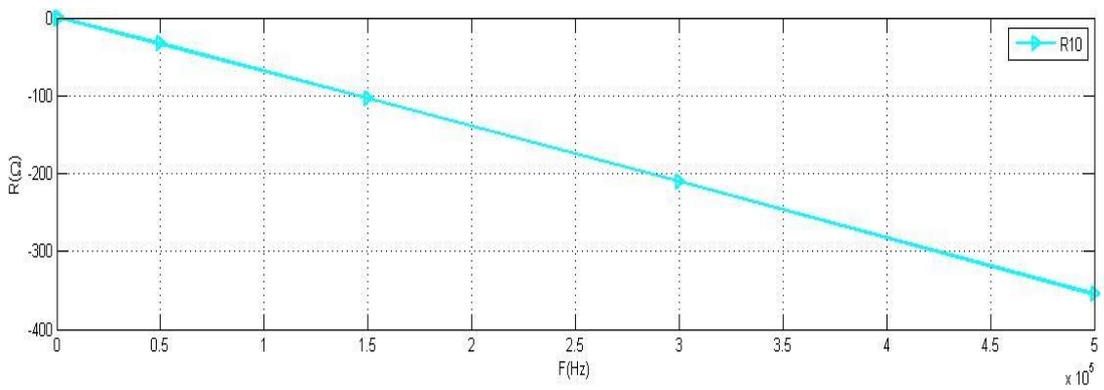


Figure III-10 : Différence de la résistance ΔR_{10} en fonction de la fréquence

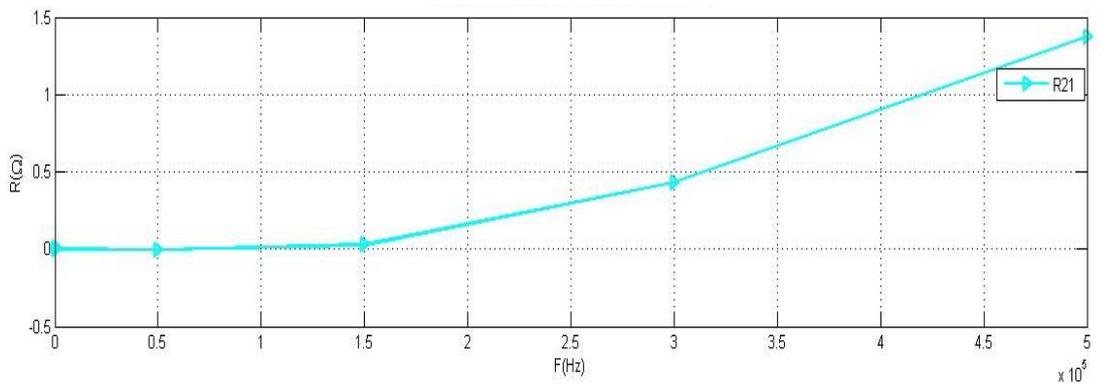


Figure III-11 : Différence de la résistance ΔR_{21} en fonction de la fréquence

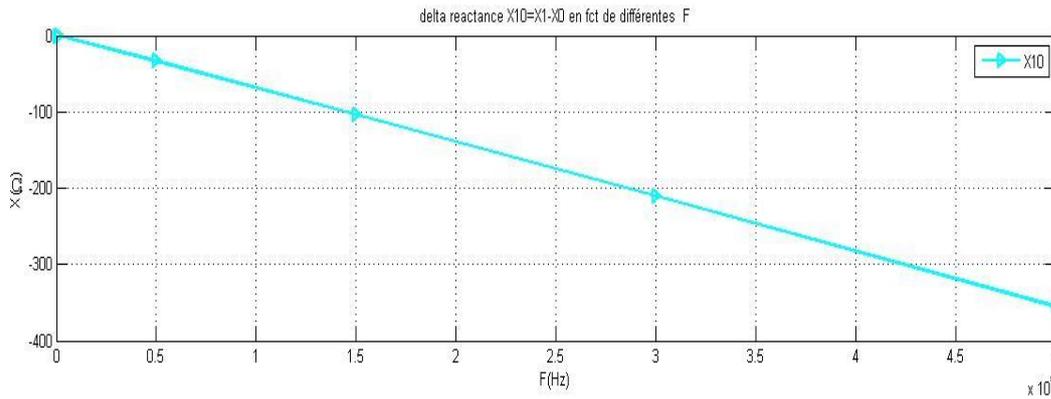


Figure III-12 Différence de la réactance ΔX_{10} en fonction de la fréquence

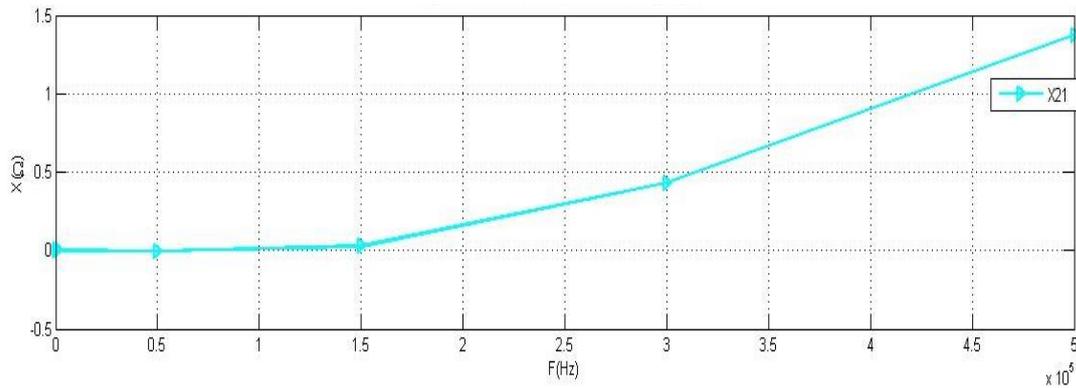
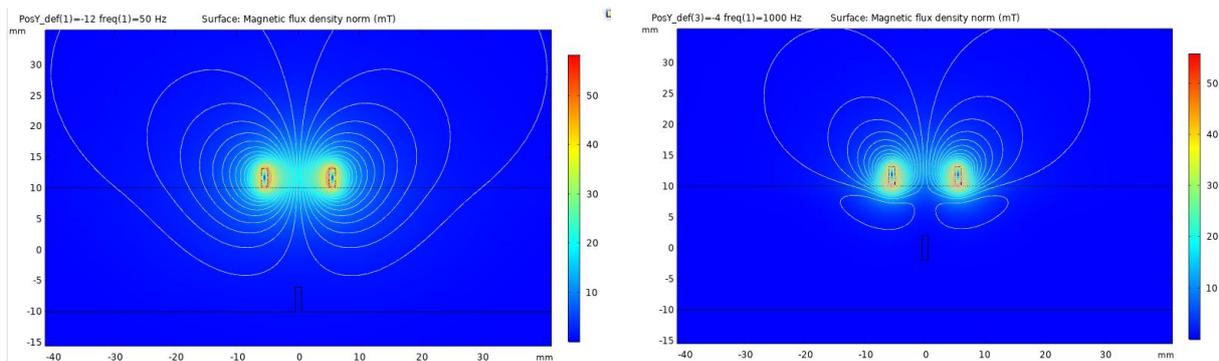


Figure III-13 Différence de la réactance ΔX_{21} en fonction de la fréquence

On remarque, d’après les résultats obtenus, que les valeurs de l’impédance, de la résistance et de la réactance augmentent avec l’augmentation de la fréquence. Néanmoins, ces valeurs sont plus importantes lorsque la bobine est seule (R_0 , X_0 et Z_0). L’augmentation de la fréquence permet de concentrer les courants induit sur une petite surface possible (réduction de l’effet de peau) d’où une variation de l’impédance proportionnelle à la fréquence.

III.5.2 Effet du déplacement vertical du défaut

On fait varier la valeur de la position verticale du défaut de -8mm à 0mm avec un pas de 4mm pour les trois fréquences 100Hz, 1kHz et 5kHz. La figure III.15 représente la densité de flux magnétique et la figure III.16 montre la variation de l’impédance Z_2 en fonction du changement verticale de la position du défaut.



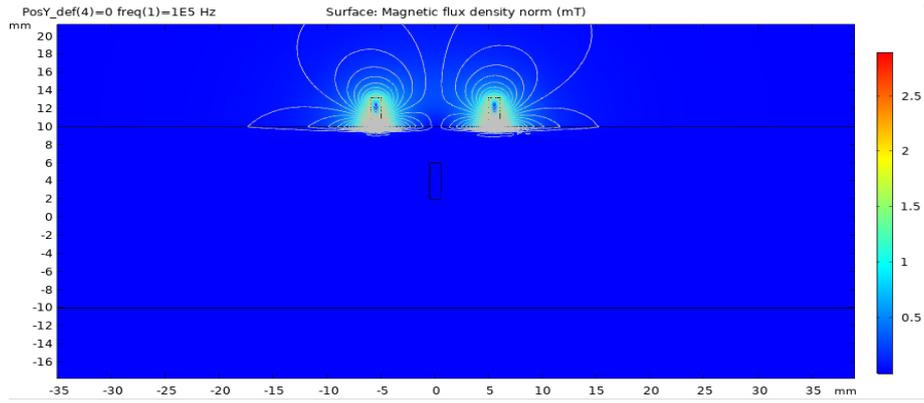
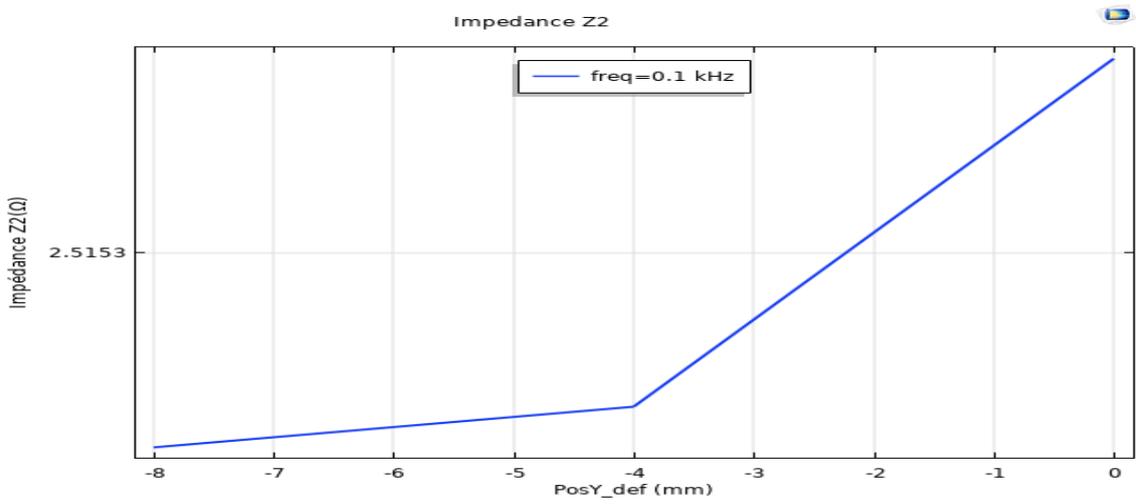
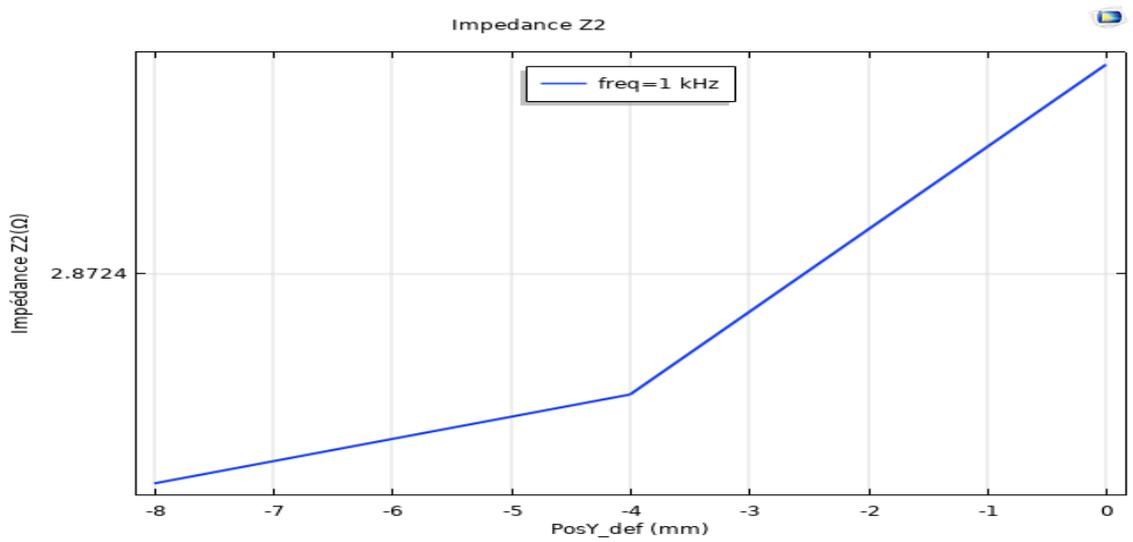


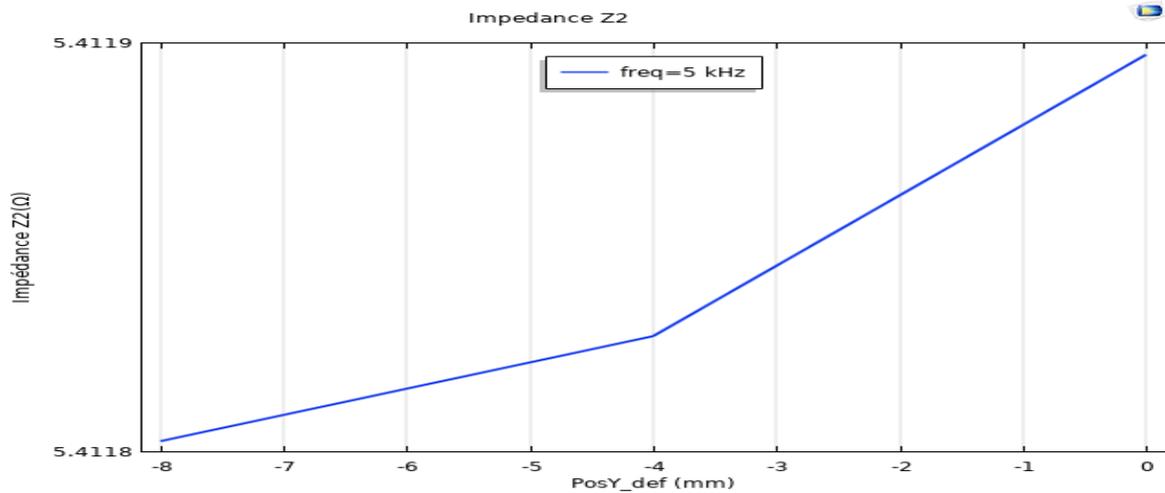
Figure III-14 Densité de flux magnétique pour différentes positions verticales du défaut



a)



(b)



c)

Figure III-15 Variations de l'impédance en fonction de la position verticale du défaut pour 100Hz (a), 1kHz (b) et 5kHz (c)

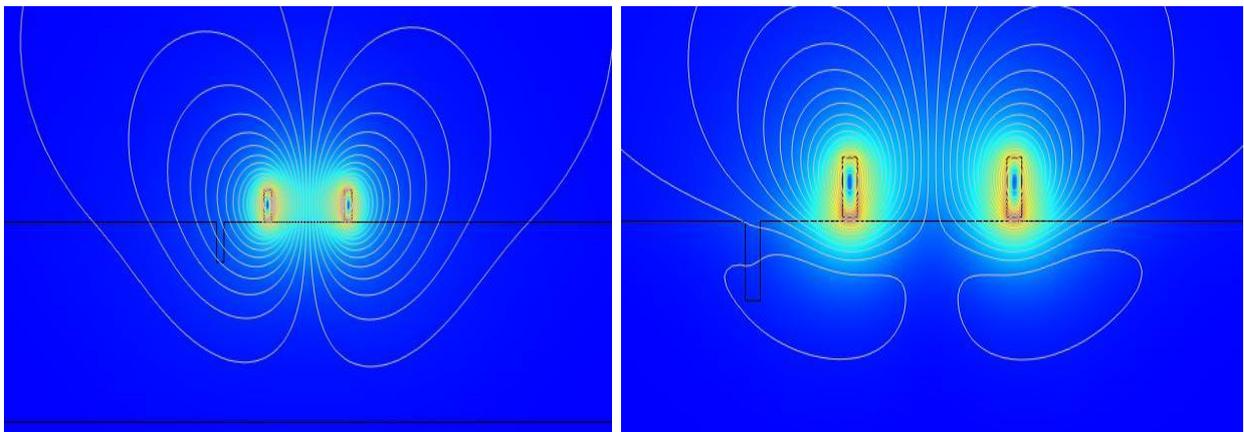
D'après la figure III.16, on remarque que lorsque la position verticale du défaut diminue (plus grand enfouissement) la valeur de l'impédance diminue aussi.

III.5.3 Effet de variation de la position horizontale du défaut

La détermination de l'impédance à un seul endroit n'est pas suffisante pour détecter la présence ou l'absence de défauts. Nous sommes donc obligés de déplacer le capteur.

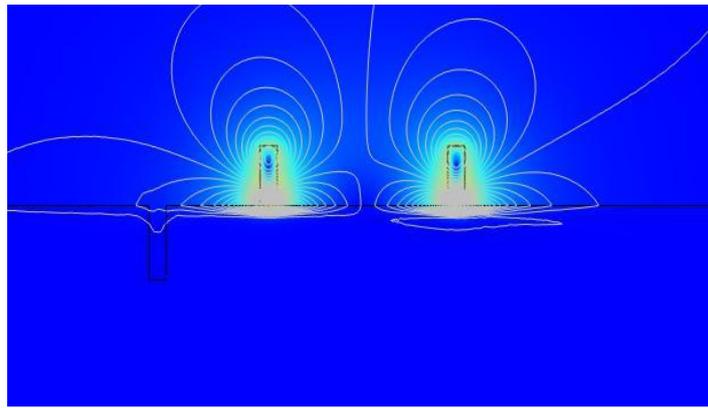
Pour simuler la détection de ce défaut, le capteur est supposé en déplacement horizontale sur la plaque d'aluminium, Les positions choisies varient de -20 à 20 mm avec un pas de 1 mm pour trois fréquences différents 50Hz, 1kHz et 100kHz.

Les allures d'impédance, résistance et réactance sont représenté sur les figures suivants :



a)

b)



c)

Figure III-16 Densité de flux magnétique pour a)50Hz,b)1kHz et c)100kHz

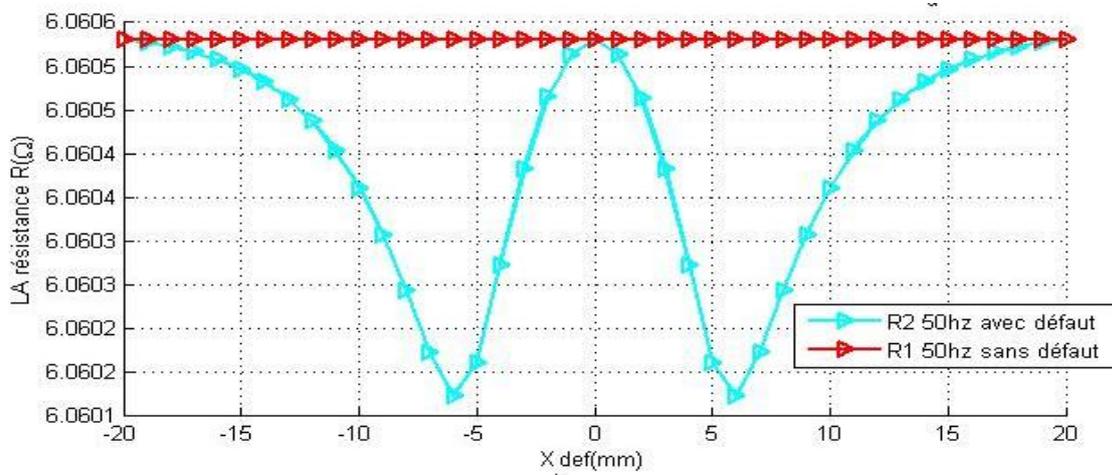


Figure III-17 Variation de la résistance en fonction de la position du capteur sur une pièce sans et avec défaut à 50 Hz

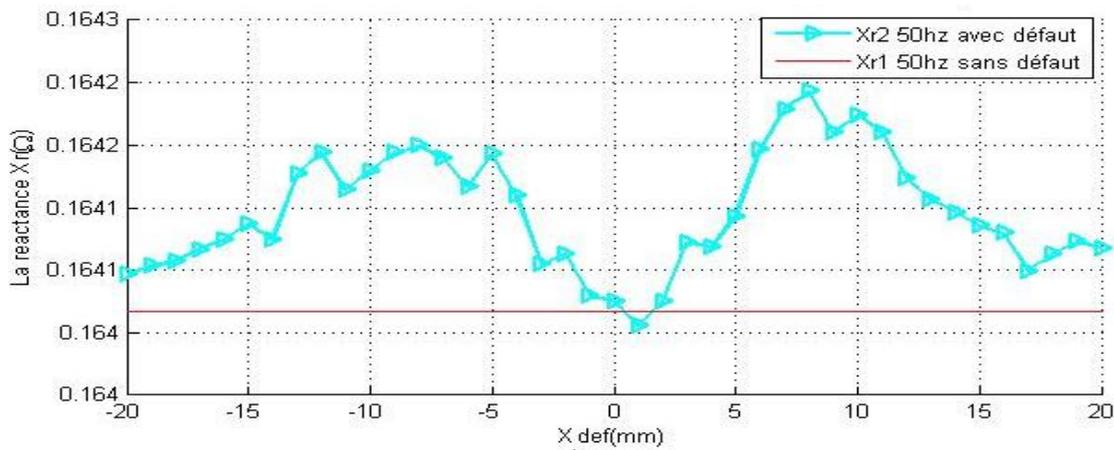


Figure III-18 Variation de la réactance en fonction de la position du capteur sur une pièce sans et avec défaut à 50 Hz

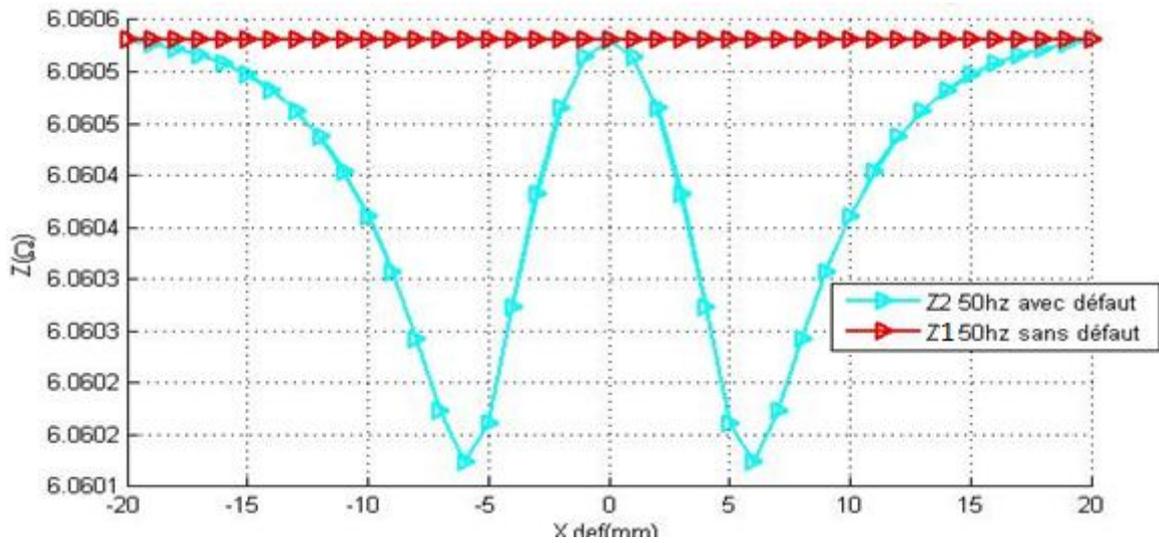


Figure III-19 variation de l'impédance en fonction de la position du capteur sur une pièce sans et avec défaut à 50 Hz

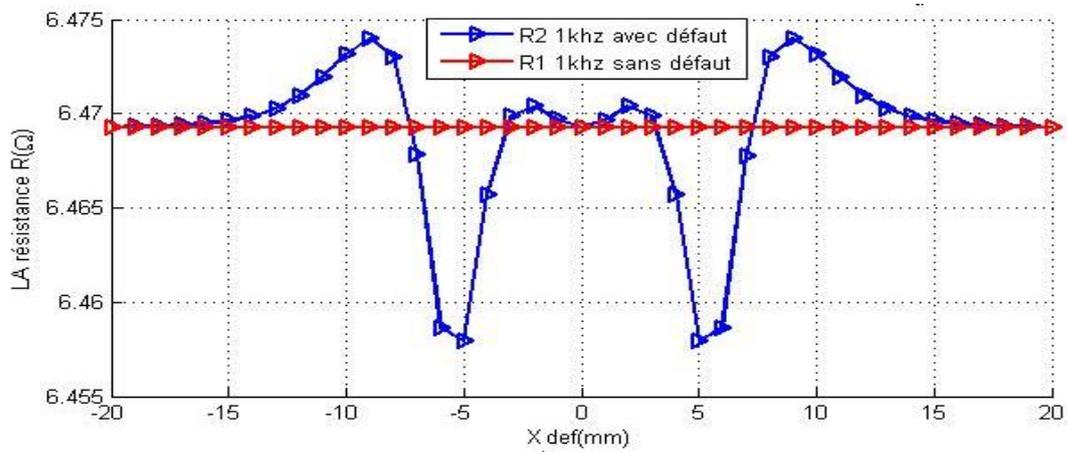


Figure III-20 variation de la résistance en fonction de la position du défaut pour 1 kHz

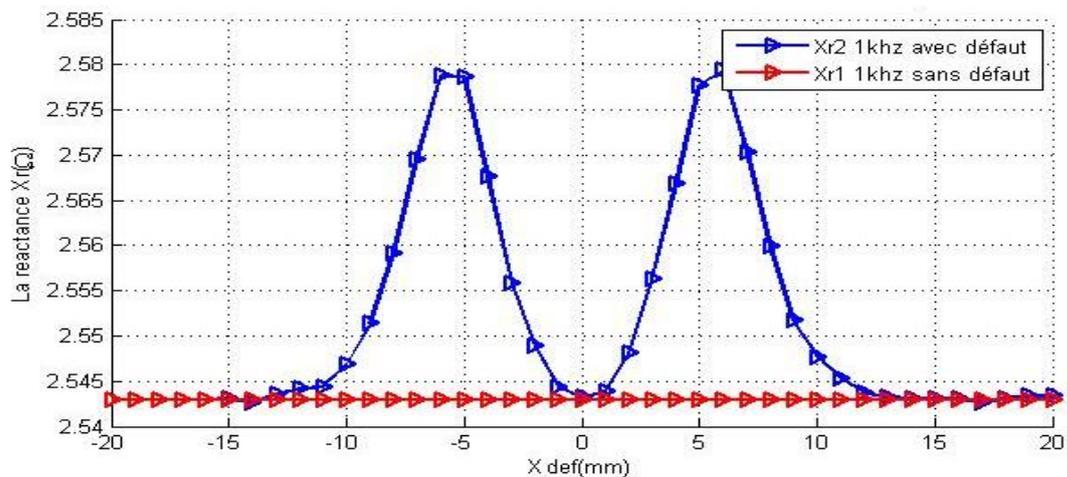


Figure III-21 variation de la réactance en fonction de la position du défaut pour 1 kHz

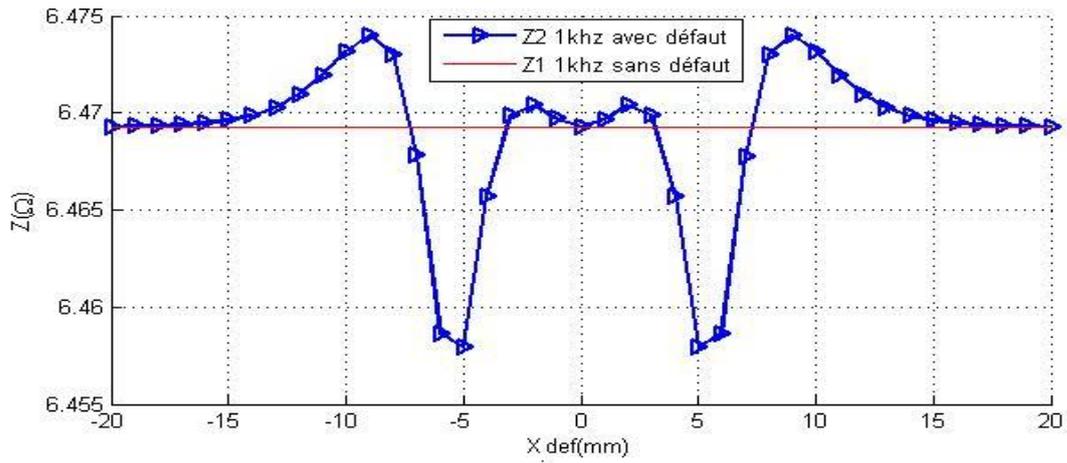


Figure III-22 variation de l'impédance en fonction de la position de défaut pour 1 kHz

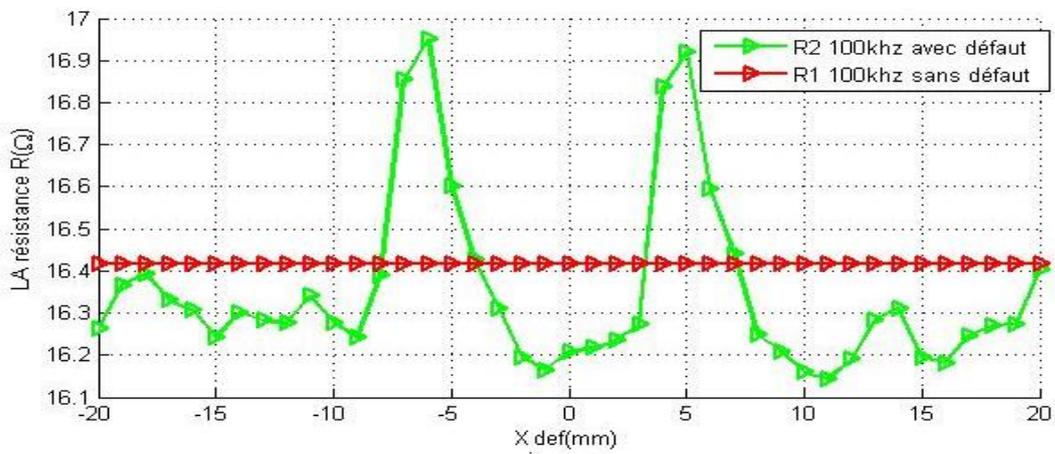


Figure III-23 variation de la résistance en fonction de défaut pour 100 kHz

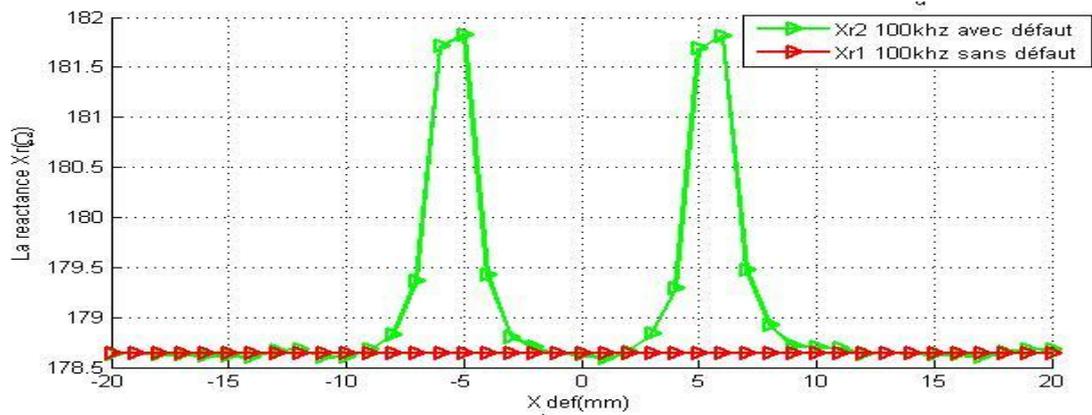


Figure III-24 variation de la réactance en fonction de la position du défaut pour 100 kHz

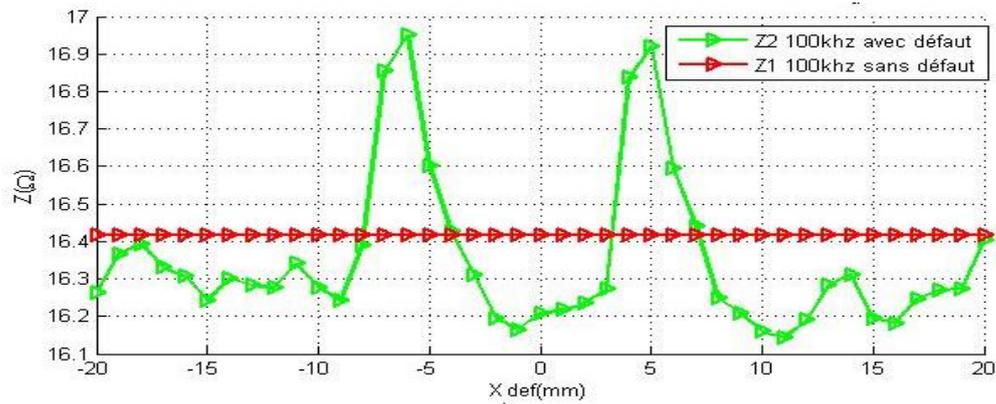


Figure III-25 variation de l'impédance en fonction de la position du défaut pour 100 kHz

On remarque que l'impédance vue par le capteur diminue au fur et à mesure qu'il se rapproche de la zone de défaut, elle est minimale lorsque le défaut est entre les deux bobines, et maximale à son bord. On voit bien aussi que les résultats obtenus sont symétriques par rapport au centre de la bobine. Par contre dans le cas de la plaque sans défaut l'impédance, la résistance ainsi que la réactance restent constantes.

Pour les allures de la réactance et de la résistance en fonction du déplacement à 50 Hz et 1kHz, on remarque que la résistance est plus grande que la réactance mais dans le cas de 100 KHz on observe que la réactance est dominante devant la variation de la résistance.

On constate que plus la fréquence est plus importante plus la variation de l'impédance est meilleure.

III.5.4 Effet du lift-off

La figure (III.27) représente la variation de l'impédance Z_2 de la bobine pour différentes valeurs du lift-off : 0.1mm, 0.3mm et 0.5mm.

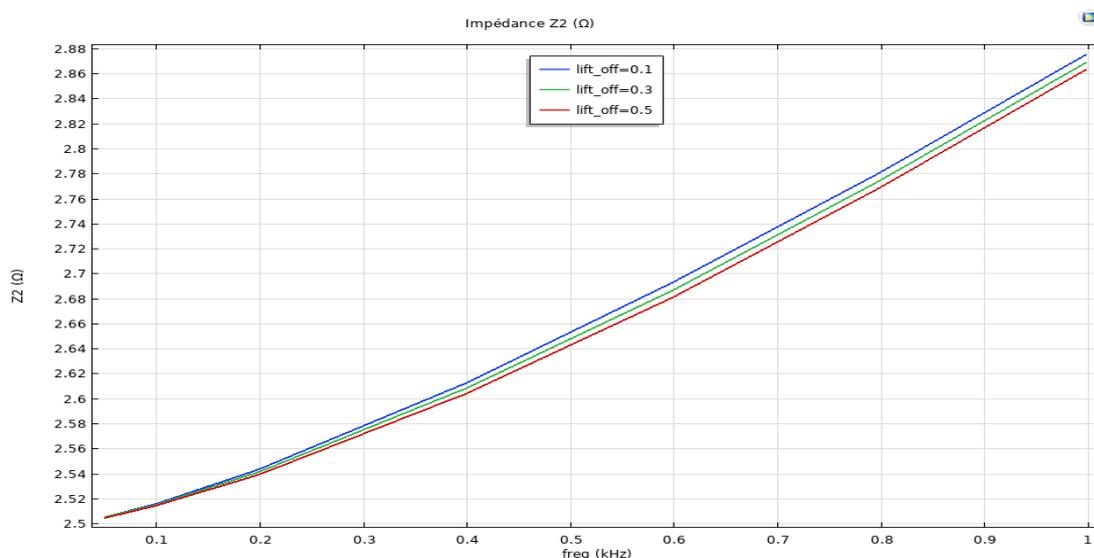


Figure III-26 : Variation de l'impédance en présence du défaut pour différents lift-off (0.1, 0.3, 0.5 mm), en fonction de la fréquence,

La figure (III.27) montre que lorsque la distance capteur-pièce augmente, la variation de l'impédance diminue (variation inversement proportionnelle).

III.5.5 Effet du nombre de spires

Dans cette étude on va varier le nombre de spires de la bobine pour voir l'influence de ce dernier.

Les allures suivantes représentent l'impédance Z_2 pour différents nombres de spires (200, 330 et 500).

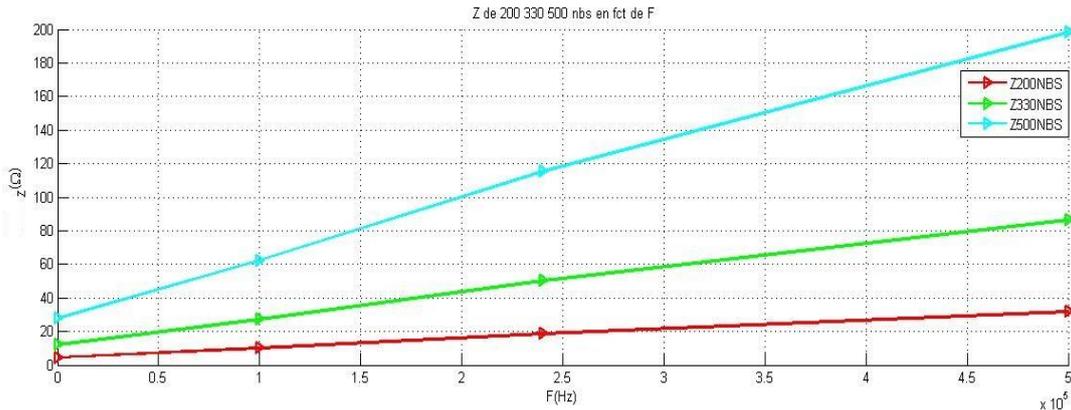
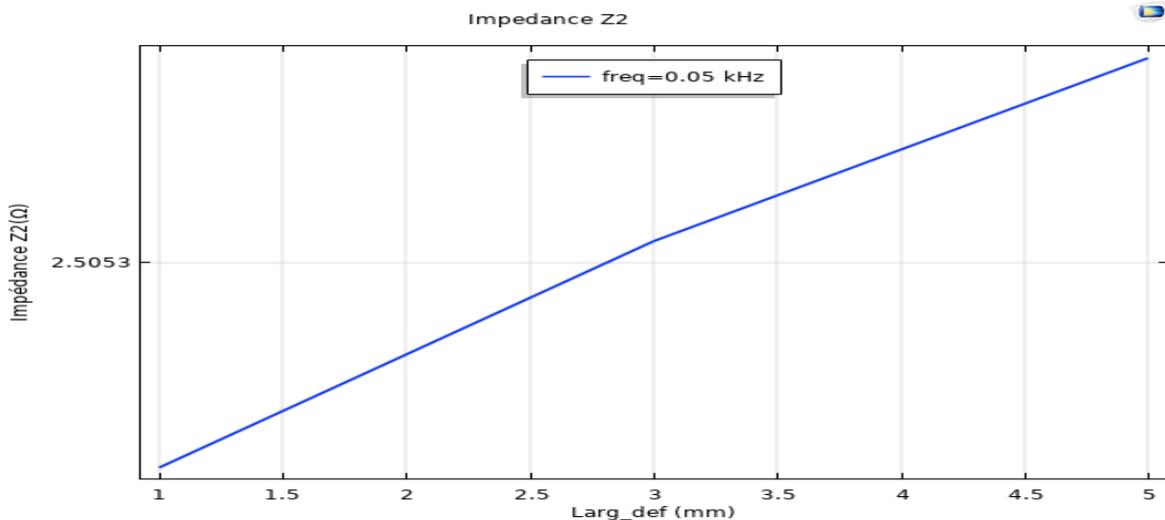


Figure III-27 Impédance pour 200 ,330 et 500 spires en fonction de f

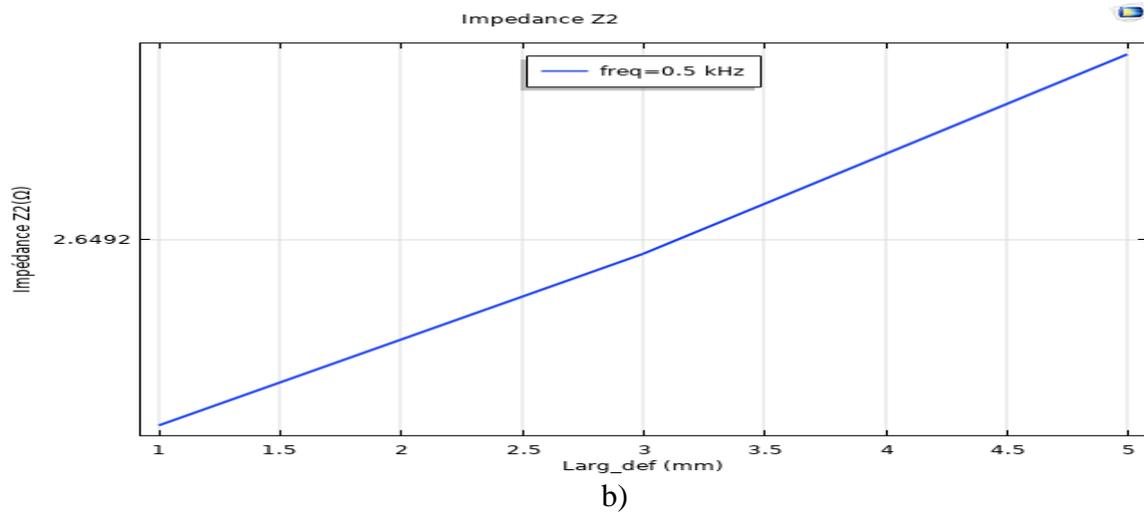
D'après la figure III.28, on remarque que lorsque le nombre de spires augmente la valeur de l'impédance augmente (variation proportionnelle).

III.5.6 Effet de la largeur du défaut

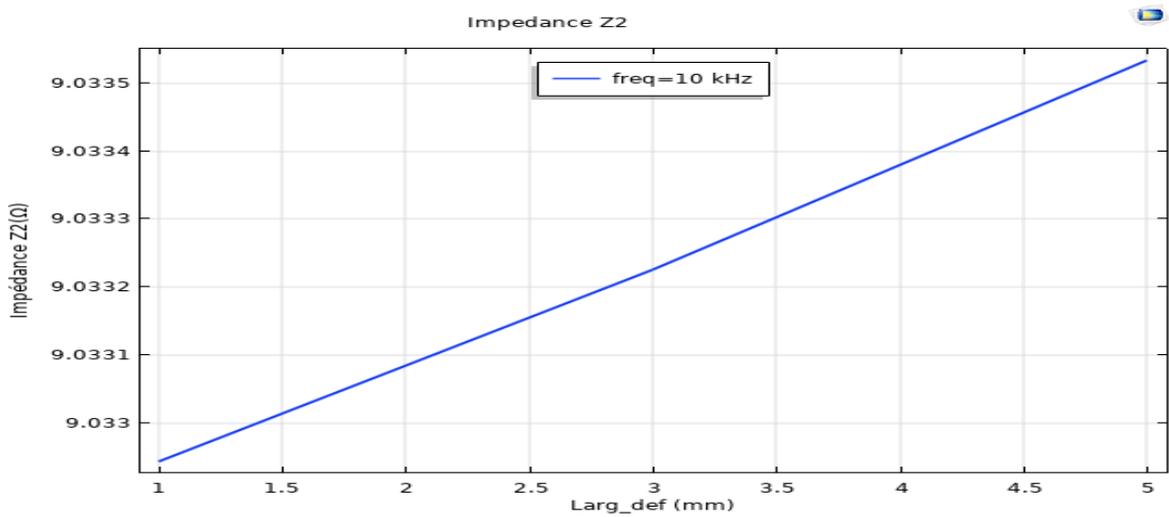
On procède à la variation de la largeur du défaut de 1mm jusqu'à 5mm pour différentes fréquences, les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.29.



a)



b)



c)

Figure III-28 Impédance Z en fonction de la largeur du défaut à a)50, b)500 et c)10000 Hz

D'après la figure III.29, on constate que lorsque la largeur du défaut augmente l'impédance de la bobine augmente aussi.

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, l'effet de nombre de spires, 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.

La profondeur de défaut a un grand effet sur l'impédance et la détection de défauts. En effet, nous avons remarqué que lorsque le défaut est profond, il y a lieu d'utiliser de faibles fréquences. Pour les défauts surfaciques il est, par contre, préconisé d'utiliser les grandes fréquences.

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

Conclusion générale

Il existe de nombreuses techniques de contrôle non destructifs CND. Le contrôle par courant de Foucault (CF) est largement utilisé pour sa facilité de mise en œuvre et son faible coût et ses propriétés non polluantes. Il est réservé aux pièces électriquement conductrices. Il permet de détecter la présence de fissures.

La détection des fissures permet de prévenir la destruction des pièces en fonctionnement et d'augmenter la fiabilité des produits industriels. C'est dans ce contexte qu'un modèle a été développé pour faciliter la modélisation de ce type de défauts. L'idée consiste à considérer la fissure comme une surface non conductrice.

L'équation qui régit le fonctionnement de notre dispositif a été formulée à partir des équations de Maxwell pour aboutir à une équation différentielle aux dérivées partielles, résolue numériquement par la méthode des éléments finis via le logiciel Comsol Multiphysics.

Nous avons utilisé le calcul de l'impédance de couplage bobine-plaque tout en intégrant le déplacement du capteur 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 et la géométrie du défaut.

Après la modélisation et simulation en 2D 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 du défaut (profondeur et largeur),
- Détecter les défauts en surface et en profondeur dans la pièce.

Le travail présenté dans ce mémoire ouvre un certain nombre de perspectives :

- Dans un travail prochain, on propose la réalisation d'un prototype expérimental pour confrontation avec la simulation numérique.
- Modélisation du CND avec capteur magnétique à haute sensibilité, capables de détecter des défauts à plus grande profondeur.
- Modélisation en 3D avec déplacement.
- Modélisation de défaut orienté.

Bibliographie

- [1] Y. CHOUA, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault », Thèse de doctorat, Orsay, Université Paris Sud - Paris XI, Français.2009.
- [2] 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
- [3] M. KHEBBAB, "Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND)", Mémoire de Magister, Université Mentouri De Constantine, 01 /02 / 2007
- [4] W. Slimane, "Conception d'un Système Multi-Capteurs à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND) ", Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar Batna, 14 / 02 / 2008.
- [5] A. ZAOUI, "Contribution à la modélisation du CND par matrice de capteurs à courants de Foucault", Thèse de Doctorat, à l'École Militaire Polytechnique, Alger, Algérie 29 Octobre 2008.
- [6] O. BENSALAH, « Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentiel », Mémoire de master en génie électrique, Université de M'sila, 2012.
- [7] B. 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
- [8] L. OUKHELLOU, « Paramétrisation et Classification de Signaux en Contrôle non Destructif. Application à la Reconnaissance des Défauts de Rails par Courants de Foucault », thèse doctorat, 1997.
- [9] Charles J. Hellier ,« Handbook of nondestructive testing », mcgraw-hill professional; 1 edition (march 14, 2001).
- [10] T. BOUCHALA, « 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.
- [11] O. SAFER, « étude et modélisation de capture a courants de Foucault par CND » Mémoire de master, université Mohamed Boudiaf M'sila, 2013/2014.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] L. BAKAI, « contrôle Non Destructif par Courants de Foucault. (Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Munies d'un Alésage) », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-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] A. DICHE, « Développement de modèles de transformations pour l'étude des capteurs à courants de Foucault ». Mémoire de magister, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2003.
- [17] H. MOHELLEBI, « cours de modélisation numérique de systèmes d'entraînement électriques (MEE36) » Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [18] A. CERJET, "Contribution à la modélisation tridimensionnelle par la méthode des volumes finis de dispositifs électromagnétiques", Thèse de Doctorat, Spécialité électrotechnique, Université de Biskra, 2007.
- [19] 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.
- [20] A. ABDOU, « Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif », Thèse de Doctorat, Batna 2018.
- [21] 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.
- [22] S. HAMDI, "Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel COMSOL-Multiphysics", Mémoire de master en électrotechnique, Université de Biskra, 24 juin 2018.
- [23] F. BOUALI, « Utilisation d'une méthode semi-analytique pour l'étude du contrôle non destructif en régime pulsé ». Mémoire magister 2010, UMMTO.
- [24] H. ZAIDI « Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples », thèse de doctorat Paris, 2012.

Résumé

L'objectif visé par ce travail, en premier lieu, est de présenter les principales méthodes du Contrôle Non Destructif (CND) et en particulier celle des courants de Foucault, ensuite donner les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par courants de Foucault, basé sur la variation d'impédance capteur-pièce, les conditions aux limites et les paramètres qui peuvent influencer sur cette détection et, en fin, donner un aperçu sur les techniques numériques utilisées.

Mots clés : contrôle non destructif (CND), courants de Foucault, équations de Maxwell, capteur

Abstract

The objective of this work, in the first place, is to present the main methods of Non Destructive Testing (NDT) and in particular that of eddy currents, then to give Maxwell's equations which govern the phenomenon of detection by eddy currents, based on the variation of sensor-part impedance, the boundary conditions and the parameters that can influence this detection, and finally, give an overview of the numerical techniques used.

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