



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

OPTION: Ingénierie des Systèmes Électromécaniques

Intitulé du Sujet

**Étude et Modélisation
de Capteur à Courants de Foucault
pour le Contrôle Non Destructif (CND)**

Présenté par :

SAFER Omar Adib

Proposé et encadré par :

M. ABDOU ABDELHAK

Année 2013/2014

Dédicaces

*Je dédie cet humble travail
À mes très chers parents pour
leurs grand amour et leurs
sacrifices*

À toute ma famille

À toutes mes amis

À tous ce qu'il m'a aidé

SAFER OMAR ADIB

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Abdelhak .ABDOU, qui, en tant qu'encadreur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je suis aussi redevable à, tout les enseignants du département de génie électrique, ainsi qu'à Monsieur BERRABEH Fouaade , chef du département de génie électrique.

Je ne peux oublier Je tiens également à adresser mes vives remerciements à Mr. ZEROGUI ABDELRACHIDE, Ingénieur au MEI, qui nous a autorisé à faire le stage au sein de l'entreprise, ainsi que tous le personnel de l'entreprise qui ont instauré un environnement d'entraide et de soutien tant au plan technique qu'au plan humain. Durant notre stage.

Une pensée particulière à mes parents pour leurs contributions, leurs soutiens et leurs patiences. Que DIEU les gardent.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

SAFER OMAR ADIB

Table des matières

Sommaire

Dédicaces	i
Remerciements.....	ii
Sommaire	iii
Tables des figures	v
Liste des Tableaux	ix
Nomenclature.....	x
Préambule	1
I. Généralités sur le contrôle non destructif	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Principe de la détection d'un défaut	5
I.3. Méthodologie de développement des systèmes de CND.....	5
I.4. Différentes méthodes de CND	5
I.4.1. Le ressuage.....	6
I.4.2. La magnétoscopie	6
I.4.3. Radiographie	7
I.4.4. Thermographie	7
I.4.5. La mesure du bruit Barkhausen :	8
I.4.6. Ultrasons	9
I.5. CND par les courant des Foucault	9
I.5.1. Principe	9
I.5.2. Effet de peau	10
I.6. Comparaison entre les principales méthodes de CND	11
I.7. Différentes technologies des capteurs inductifs	12
I.8. Principe physique de CND-CF	13
I.8.1. Objectifs de CND-CF	14
I.8.2. Classification des capteurs	14
I.8.3. Différents fonctions de capteurs	15
I.8.4. Capteurs à double fonctions.....	15
I.8.5. Capteurs à fonctions séparées	15
I.8.6. Différents types de mesures	16
I.8.7. Différents types de bobines.....	16
I.8.8. Différents types des Sondes	17
I.8.9. Différents types d'alimentations	19
I.9. Plan d'impédance normalisée	20
I.10. Intérêt de la modélisation.....	21
I.11. Conclusion	21
II. Contrôle par capteur à courants de Foucault	22
II.1. Introduction	22

II.2. Modélisation mathématique du système	22
II.3. Formulation en potentiel vecteur (couple A-V)	24
II.4. Relations de continuité Conditions aux interfaces	24
II.4.1. Dans la cible :.....	27
II.5. Équation magnétodynamique bidimensionnelle :	27
II.5.1. Dans l'air :.....	28
II.6. Conditions aux limites :.....	29
II.7. Conclusion :.....	30
III. Formulation et modélisation du CND par CF.....	30
III.1. Introduction.....	30
III.2. Méthode des éléments finis.....	30
III.2.1.Principe de la méthode variationnelle.....	30
III.2.2.Formulation résidus pondérés	31
III.2.3. La discrétisation du domaine	32
III.2.3.1. Fonction d'interpolation.....	32
III.2.3.2. Fonction d'approximation sur l'élément.....	33
III.2.3.3. Fonction d'interpolation sur le domaine	33
III.3. Formulation éléments finis des équations du modèle	34
III.3.1. Équation magnétodynamique.....	34
III.3.3.1. cas cartésien	34
III.3.3.2. cas axisymétrique.....	36
III.3.3.3. Organigramme de calcul par éléments finis.....	36
III.4. Conclusion	37
IV. Résultats de simulation :.....	38
IV.1. Introduction :.....	38
IV.2. Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 4.3	39
IV.2.1. Création du modèle de simulation	40
IV.2.2. Ajout des propriétés du matériel composant la plaque.....	41
IV.2.3. Maillage	42
IV.2.4. Simulation et traitement des résultats	43
IV.3. Mode absolu 2D axisymétrique (bobine encerclant)	45
IV.4. Méthode de calcul de l'impédance du capteur.....	47
IV.5.	48
IV.5. Résultats de simulation et interprétation pour une fréquence de 450 Hz	50
IV.5.1. Pièce cylindrique mode absolu sans capteur de référence	50
IV.5.2. Pour une pièce conductrice sans capteur de référence :	51
IV.5.5. L'influence de la variation de la fréquence d'alimentation sur le module de l'impédance.....	55
IV.5.6. La variation de l'impédance en fonction du type de matériau	56
IV.5.7. L'influence de changement du milieu sur le module de l'impédance.....	58

IV.6. Mode absolu 2D :	61
IV.6.	61
IV.6.1.1. Pour une pièce conductrice sans capteur de référence :	61
IV.6.1.2. Pour une pièce conductrice avec capteur de référence :	63
IV.6.1.3. Variation de Z en fonction de lift-off	65
IV.6.1.4. Variation de l'impédance en fonction de la fréquence	66
IV.7. Mode différentiel 2D axisymétrique pour $f=450\text{Hz}$	67
IV.7.1. Variation en fonction du lift-off	68
IV.7.2. Variation en fonction de la fréquence	69
IV.7.3. L'influence de changement du milieu sur la variation de l'impédance pour $f=200\text{kHz}$	70
IV.8. Modèle l'inducteur file 2D	71
IV.8.2. Choix de l'inducteur	71
IV.8.3. Caractéristique des dispositifs	72
IV.8.4. Discrétisation et maillage	73
IV.8.5. Résultats de simulation et interprétation	74
Pour deux cibles une cible ferromagnétique (fer) et l'autre conductrice (aluminium) avec une fréquence de 500 Hz	74
IV.9. Model tridimensionnel 3D	79
IV.9.1. Caractéristique de dispositif	79
IV.9.2. Le maillage	79
IV.9.3. Résultats de simulation pour $f=1\text{kHz}$	80
IV.10. Conclusion	82
Conclusion générale	83
Annexes	85
Références bibliographiques	86

Table des figures et des tableaux

Tables des figures

Figure I. 1–Principe du ressuage.....	6
Figure I. 2–Principe de la magnétoscopie.....	6
Figure I. 3–Principe de la radiographie.....	7
Figure I. 4–Détection par thermographie IR.....	8
Figure I. 5–Influence des sollicitations mécaniques sur le bruit Barkhausen.....	8
Figure I. 6–Principe des ultrasons.....	9
Figure I. 7–Principe du CND par courant de Foucault.....	10
Figure I. 8–Répartition des courants de Foucault sous une surface plane.....	11
Figure I. 9–Différente technologies des capteurs inductifs (CCF et CM).....	13
Figure I. 10–Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault.....	13
Figure I. 11–Nature du CND par CF.....	14
Figure I. 12–Critères de classification des capteurs.....	14
Figure I. 13–Capteur à fonction double.....	15
Figure I. 14–Capteur à fonctions séparées.....	15
Figure I. 15–Étapes de réalisation des bobines micro moulées.....	16
Figure I.16–Capteur constitué de quatre couples de bobines sur un film de kapton souple. Chaque couple est constitué d’une bobine émettrice et d’une bobine réceptrice.....	17
Figure I. 17–Bobine encerclant.....	17
Figure I. 18–Bobine interne glissante avec noyau.....	18
Figure I. 19–Bobine interne glissante avec noyau.....	18
Figure I. 20–Bobine plate.....	18
Figure I.21–Influence de σ ou du lift-off sur le diagramme d’impédance normalisée (cas d’une pièce amagnétique).....	20
Figure I. 22–Effet du défaut sur la valeur de l’impédance de la bobine.....	21
Figure II. 1–vecteur potentiel dans des déférentes régions.....	27
Figure III. 1–éléments classiques en une et deux dimensions.....	32
Figure III. 2–élément de référence triangulaire linéaire.....	32
Figure III. 3–Organigramme de calcul par éléments finis.....	37
Figure IV.1 Interface utilisateur de COMSOL 4.3.....	39
Figure IV.2 Les étapes pour dessiné un carré.....	40
Figure IV.3 Les démentions du carré.....	41
Figure IV.4 L’affichage graphique.....	41
Figure IV.5 Création du domaine pour les bobines.....	42

Figure IV.6 La méthodologie du maillage.....	43	
Figure IV.7 Résultat de simulation pour l'induction normal.....	44	
Figure IV.8 Magnitude et direction du gradient de la densité magnétique normal.....	44	
Figure IV.9 Ligne de coupe	Figure IV.10 Profil du la densité magnétique normal.....	45
Figure IV.11 Représentation du problème en 2D axisymétrie et 3D.....	46	
Figure IV.12 Les conditions aux limites pour le domaine d'étude.....	46	
Figure IV.13 Le maillage du domaine d'étude.....	46	
Figure IV.14 Le circuit électrique équivalent du système capteur-cible.....	48	
Figure IV.15 (a) Module de potentiel vecteur magnétique Az (b) Module des courants de Foucault Jiz.....	50	
Figure IV.16 (a) La partie réelle de vecteur potentiel Az (b) La partie réelle des courants de Foucault Jiz.....	50	
Figure IV.17 (a) La partie imaginaire de vecteur potentiel Az (b) La partie imaginaire des courants de Foucault Jiz.....	51	
Figure IV.18 Variation de module l'impédance Z en fonction de déplacement avec et sans défaut.....	51	
Figure IV.19 Variation de la partie réelle de Z en fonction de déplacement.....	51	
Figure IV.20 Variation de La partie imaginaire de Z en fonction de déplacement.....	52	
Figure IV.21 Variation de l'impédance dans le plan de phase.....	52	
Figure IV.22 Module de l'impédance Z en fonction de déplacement avec et sans défaut.....	52	
Figure IV.23 La partie réelle de Z en fonction de déplacement.....	53	
Figure IV.24 La partie imaginaire de Z en fonction de déplacement.....	53	
Figure IV.25 Variation de l'impédance dans le plan de phase.....	53	
Figure IV.26 Variation du module de l'impédance en fonction de déplacement pour des différents lift-off.....	54	
Figure IV.27 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de déplacement pour des différents lift-off.....	54	
Figure IV.28 Variation de la partie réelle de l'impédance en fonction de déplacement pour des différents lift-off.....	54	
Figure IV.29 Variation de l'impédance dans le plan de phase en fonction du lift-off.....	55	
Figure IV.30 Module de l'impédance en fonction de déplacement pour des fréquences de (a) 200kHz (b) 400kHz (c) 800kHz.....	56	
Figure IV.31 Variation de l'impédance en fonction de déplacement pour différents matériaux pour 200kHz (a) d'aluminium 3003-H18 (b) cuivre (c) fer (d) aluminium.....	57	
Figure IV.32 Variation de l'impédance dans le plan de phase en fonction du type de matériau.....	57	
Figure IV.33 Variation de l'impédance dans le plan de phase pour un matériau ferromagnétique (le fer).....	58	
Figure IV.34 (a) Module du potentiel vecteur Az pour un matériau ferromagnétique (b) Module des courants de Foucault Jiz pour un matériau ferromagnétique pour 200kHz.....	58	

Figure IV.35 Représentation du problème (a) 1 ^{er} cas le tube ferromagnétique et le défaut amagnétique (b) 2 ^{ème} cas le tube amagnétique et le défaut ferromagnétique.....	59
Figure IV. 36 Variation de l'impédance en fonction de déplacement pour $f=200\text{kHz}$ () une pièce amagnétique (aluminium) défaut ferromagnétique (fer) ; () Une pièce ferromagnétique (fer) défaut amagnétique (aluminium)	59
Figure IV.37 Un tube d'aluminium et défaut fer (a) module du potentiel vecteur A_z (b) module des courants de Foucault J_{iz} pour $f=200\text{kHz}$	60
Figure IV.38 Un tube du fer et défaut aluminium(a) module du potentiel vecteur A_z (b) module des courants de Foucault J_{iz} pour $f=200\text{kHz}$	60
Figure IV.39 Représentation du problème en 2D et 3D	61
Figure IV.40 (a) Module de potentiel vecteur magnétique A_z (b) Module des courants de Foucault J_{iz}	61
Figure IV.41 (a) Imaginaire de potentiel vecteur magnétique A_z (b) Imaginaire des courants de Foucault J_{iz}	62
Figure IV.42 (a) Réel du potentiel vecteur magnétique A_z (b) Réel des courants de Foucault J_{iz}	62
Figure IV.43 Variation du module de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut	62
Figure IV.44 Variation de la partie réelle de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut.....	62
Figure IV.45 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut.....	63
Figure IV.46 Variation de l'impédance dans le plan de phase	63
Figure IV.47 Variation du module de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut	63
Figure IV.48 Variation de la partie réelle de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut.....	64
Figure IV.49 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut.....	64
Figure IV.50 Variation de l'impédance dans le plan de phase.	64
Figure IV.51 Variation le module de l'impédance en fonction du lift-off.....	65
Figure IV.52 Variation de la partie réel de l'impédance en fonction du lift-off.....	65
Figure IV.53 Variation de la Imaginaire real de l'impédance en fonction du lift-off.....	65
Figure IV.54 Variation de l'impédance dans le plan de phase en fonction de lift-off.....	65
Figure IV.55 Variation du module de l'impédance en fonction de déplacement pour (a) 200kHz (b) 400kHz (c)800kHz.....	66
Figure IV.56 Représentation du problème en 2D axisymétrie et 3D.....	67
Figure IV.57 Variation de la partie réel de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut.	67
Figure IV.58 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de déplacement	67
Figure IV.59 Variation de l'impédance dans le plan de phase.	67
Figure IV.60 Variation de la partie réel de l'impédance en fonction du lift-off.....	68

Figure IV.61 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction du lift-off.....	68
Figure IV.62 Variation de l'impédance dans le plan de phase en fonction du lift-off.....	68
Figure IV.63 Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence.....	69
Figure IV.64 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence.	69
Figure IV.65 Variation de la partie réelle de l'impédance en fonction de la fréquence.	69
Figure IV.66 Variation du module de l'impédance en fonction du déplacement pour deux types de matériaux et défaut avec $f=200\text{kHz}$	70
Figure IV.67 Variation de la partie imaginaire de Z en fonction du déplacement pour deux types de matériaux et défaut avec $f=200\text{kHz}$	70
Figure IV.68 Variation de la partie réelle de Z en fonction du déplacement pour deux types de matériaux et défaut avec $f=200\text{kHz}$	70
Figure IV.69 Principe de mise en œuvre d'un capteur GMI.....	71
Figure IV.70 Présentation du fonctionnement du système.	72
Figure IV.71 Représentation du problème.....	72
Figure IV.72 Schéma de maillage.....	73
Figure IV.73 Module du potentiel vecteur (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique	74
Figure IV.74 Module des courants induits (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique induits	74
Figure IV.75 La partie imaginaire de B_x en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique	74
Figure IV.76 La partie réelle de B_x en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique	75
Figure IV.77 La partie imaginaire de B_x en fonction la partie real de B_y (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique	75
Figure IV.78 La partie imaginaire de B_y en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique	75
Figure IV.79 La partie réelle de B_y en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique	76
Figure IV.80 La partie imaginaire de B_y en fonction la partie real de B_y (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique	76
Figure IV.81 Le module de B_x en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique.....	76
Figure IV.82 Le module de B_y en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique.....	77
Figure IV.83 La partie imaginaire de B_x en fonction la partie real de B_x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique.....	77
Figure IV.84 La partie imaginaire de B_y en fonction la partie real de B_y (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique	77
Figure IV.85 Module du potentiel vecteur A_z (a) Cible conductrice et défauts ferromagnétique (b) Cible ferromagnétique et défauts conducteur.	78
Figure IV.86 Module des courants induits(a) Cible conductrice et défauts ferromagnétique (b) Cible ferromagnétique et défauts conducteur.....	78
Figure IV.87 Représentation du maillage avant et après le Zoom.....	79

Figure IV.88 Représente respectivement la partie imaginaire et la partie réelle de l'induction selon l'axe X (B_x)	80
Figure IV.89 Module de l'induction selon l'axe X.....	80
Figure IV.90 Représentes respectivement la partie imaginaire et la partie réelle des courants induits selon l'axe X (J_{ix}).....	81
Figure IV.91 Module des courants induits selon l'axe X (J_{ix}).....	81
Figure IV.92 Représentes respectivement la partie imaginaire et la partie réelle du potentiel vecteur magnétique selon l'axe X (A_x).....	81
Figure IV.93 Représentes respectivement le module des courants induits selon l'axe X (J_{ix}) pour $f_1=1\text{kHz}$, $f_2=10\text{kHz}$	82

Liste des Tableaux

Tableau I. 1–Comparaison entre les différentes méthodes de CND.....	12
Tableau VI. 1 Paramètres du système en mode absolu axisymetrie.....	45
Tableau VI.2 Différents paramètres des dispositifs.....	72
Tableau VI.3 Caractéristique de dispositif.....	79

Nomenclature

CND	: Contrôle Non Destructif
CF	: Courants de Foucault
CND-CF	: Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
MEF	: Méthode des éléments finis.
2D	: Bidimensionnel.
3D	: Tridimensionnel.
CCF	: Capteur par Courants de Foucault.
CM	: Capteur Magnétique.
CND-CM	: Contrôle Non Destructif par Capteur Magnétique.
IGMIM	: Improved Giant Magneto-Impedance Magnetometer.
IGMRM	: Improved Giant Magneto-Resistance Magnetometer.
GMI	: Giant Magneto-Impedance.
GMR	: Giant Magneto- Resistance.
e	: La source d'excitation [V]
m	: L'inductance mutuelle [H].
k	: Le rapport de rapprochement entre la cible et le capteur.
I_1	: Le courant du capteur [A].
I_2	: Les courants induits dans la cible [A].
Z :	L'impédance totale du système [Ω].
L_1 :	L'inductance propre du capteur [H].
L_1	: L'inductance propre de la cible [H].
R_1	: La résistance du capteur [Ω].

Préambule

Préambule

Pour satisfaire aux contraintes réglementaires et normatives en termes de qualité et de sécurité, de nombreux industriels, notamment dans l'aéronautique, le nucléaire, le génie civil, l'automobile, recourent au CND (Contrôle Non Destructif).

Le CND permet de caractériser l'état d'intégrité de structures industrielles et la conformité de pièces sans les dégrader. Il vise à déceler la présence ou l'apparition de défauts dans les matériaux - en cours de production ou d'utilisation - et d'en déterminer précisément les caractéristiques : position, forme, dimension, etc.

Le contrôle non destructif comprend l'ensemble des techniques et des procédés qui peuvent fournir des informations sur la sante d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations pour leur utilisation ultérieure. Ces essais ont pour objectif la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné. En ce sens, le contrôle non destructif (CND) apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits.

Différentes techniques de contrôles sont envisageables parmi lesquelles on peut citer le contrôle par courants de Foucault. Le Contrôle Non Destructif (CND) est une technique industrielle largement utilisée pour inspecter les matériaux durant leur phase d'élaboration ou régulièrement tout au long de leur vie. Ce contrôle repose sur le phénomène d'induction électromagnétique, dont une particularité essentielle est de pouvoir injecter de l'énergie électromagnétique à l'aide d'un inducteur dans un matériau conducteur (induit), sans qu'il y ait contact entre eux. Sous l'effet de la variation du champ incident, des courants induits se développent dans l'induit. L'intensité et la répartition de ces courants dépendent des propriétés physiques et géométriques de l'induit, de la géométrie de l'inducteur, de sa disposition par rapport à l'induit, ainsi que de la fréquence du courant d'excitation.

L'évaluation de la réaction électromagnétique de l'induit va permettre, par l'intermédiaire de mesures adaptées, d'accéder à des informations concernant ses propriétés physiques (conductivité et perméabilité), ses propriétés géométriques (épaisseur), ou encore la présence d'un défaut qui modifie la répartition des courants induits et de la cartographie du champ électromagnétique.

Les courants de Foucault n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être étudiés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent, ou en utilisant des outils de modélisation, basés sur les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection de défauts par courant de Foucault.

La concrétisation du contrôle par courant de Foucault est possible grâce à l'utilisation de capteurs inductifs, ces derniers peuvent être utilisés selon plusieurs techniques, parmi ces dernières on peut citer la détection par capteur en mode absolu qui permet d'accéder à toutes les grandeurs utiles et également perturbatrices, cette technique de mesure fera l'objet de notre travail.

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans certaines industries, notamment aéronautique et nucléaire, où la nécessité d'avoir un produit sûr et fiable est vitale, a poussé la recherche à s'intéresser à des techniques de contrôle et d'évaluation non destructives, même si la philosophie du CND et END est connue depuis bien longtemps avec des contrôles pas vraiment rigoureux, tel que le contrôle visuel ou le ressuage, des méthodes plus efficaces et mieux adaptées qui permettent de contrôler l'état interne de chaque produit à n'importe quelle période de sa vie (de sa fabrication jusqu'à sa mise en service), se basant chacune sur un principe physique différent ont vu le jour. On peut citer parmi elles : la méthode des ultrasons, la radiographie, la thermographie stimulée, le contrôle par rayon X, sans oublier bien sûr les méthodes électromagnétiques telles que : la magnétoscopie, et le contrôle par courants de Foucault qui sera le sujet de ce mémoire, [1] [3] [5] .

Tout l'intérêt du contrôle par courant de Foucault est la simplicité de sa mise en œuvre, sa robustesse et sa sensibilité aux défauts type manque de matière (fissures, inclusion, corrosion...), en effet les capteurs utilisés pour ce genre de contrôle sont de simples bobines qui génèrent un champ magnétique pour induire des courants dans la pièce à contrôler, ce qui s'avère idéale pour des pièces métalliques conductrices d'électricité même dans le cas où elles présentent une géométrie complexe , [1] [6] [20].

L'objectif de ce travail est l'étude d'un dispositif de contrôle par courants de Foucault à travers une simulation d'un capteur fonctionnant en mode absolu pour deux types de matériaux magnétique et amagnétique, qui présentent des défauts de profondeurs différentes. La résolution des équations formulées s'est faite par la méthode des éléments finis implantés sous environnement COMSOL multiphysics. Ce logiciel permet de simuler un nombre important de phénomènes physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multiphysiques, y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF, [1] [7] [11].

Ainsi le premier chapitre a été réservé à l'étude bibliographique qui a pour but d'expliquer le contrôle non destructif à partir des différentes techniques mises en œuvre, mettant en avant les principes physiques qui les régissent, avec une intention particulière d'accorder au contrôle par courants de Foucault, qui est le sujet de ce mémoire, [6] [7] [23].

Le deuxième chapitre a été consacré aux rappels des principales lois qui gouvernent chaque phénomène électromagnétique (équation de Maxwell) pour formuler l'équation de la magnétodynamique transitoire en régime harmonique, cette équation étant une équation différentielle aux dérivées partielles dont la solution dépend entièrement des conditions aux limites que nous avons jugées utiles d'introduire dans ce chapitre, [9] [6].

Les équations étant formulées, le troisième chapitre fera l'objet d'un exposé sur les méthodes de résolution des équations différentielles aux dérivées partielles, avec un intérêt particulier

à la méthode des éléments finis avec une formulation résidus pondérés qui sera utilisée dans ce mémoire pour résoudre l'équation de la magnétodynamique, avec une implantation d'algorithme de calcul sous environnements COMSOL Multiphysics et MATLAB, [2] [15] [23].

Le dernier chapitre sera dédié, en premier à une recherche bibliographique sur la prise en main du logiciel COMSOL Multiphysics, à savoir ses fonctionnalités et ses performances, en second aux différentes applications et aux résultats de simulation par MEF et l'exploitation de la méthode, pour les cas suivants :

- La première application concernera un capteur en mode absolu 2D en axisymétrie contrôlant une plaque magnétique et amagnétique;
- La deuxième application représentera un capteur en mode absolu 2D non axisymétrique contrôlant une plaque magnétique et amagnétique;
- La troisième application montrera un capteur en mode différentiel en axisymétrie détectant les défaut sur plaque amagnétique et magnétique;
- La quatrième application étudiera un capteur en mode différentiel non axisymétrique détectant les défaut sur plaque amagnétique et magnétique;
- La cinquième application traitera le cas où l'inducteur c'est un fil électrique, cette méthode basée sur la détection du défaut à partir de l'induction magnétique.

On terminera notre travail par une conclusion générale où on résumera les travaux réalisés à travers ce mémoire, les difficultés rencontrées et les perspectives envisagées.

Chapitre I.

Généralités sur le contrôle non destructif (CND)

I. Généralités sur le contrôle non destructif

I.1. Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) a pour objectif de vérifier l'intégrité d'une pièce ou d'un matériau sans l'endommager en détectant d'éventuels défauts présents dans celui-ci. Dans différents secteurs industriels (aéronautique, nucléaire, automobile, métallurgie...), le CND est primordial afin de garantir la sûreté de fonctionnement des systèmes critiques. Une grande variété de méthodes existent et permettent de détecter des anomalies internes ou de surface, de déterminer la composition ou la structure des matériaux. Le CND peut être utilisé en production, lors de la mise en service ou lors d'opérations de maintenance, [1].

Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif (CND) constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Aussi l'histoire des essais non destructifs (END) commence-t-elle avec celle de la physique moderne à la fin du XIX^e siècle : découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la piézoélectricité, etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des END s'est manifesté ensuite vers les années 60/70 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que le génie des centrales électriques nucléaires, l'aéronautique civile, les gazoducs, oléoducs et les plates-formes offshores. La dernière décennie enfin voit l'émergence des techniques de CND qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante ; on assiste ainsi au développement rapide des contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique, comme les contrôles optiques, [2] [3].

Selon la nature du matériau à tester et du phénomène physique mis en jeu, plusieurs techniques sont utilisées. Dans ce chapitre nous allons décrire l'une de ces méthodes qui est basée sur le phénomène des courants de Foucault.

L'état actuel de la technologie ne le permet pas, sauf dans certains cas particuliers. Le mot "Contrôle" n'en figure pas moins dans "CND". Autant dire qu'il doit être pris "avec des pincettes" : ce que l'on recherche, c'est avant tout la qualification d'un défaut, sans nécessairement le quantifier, [4] [5].

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

- le ressuage
- la magnétoscopie
- les courants de Foucault
- les ultrasons
- la radiographie

Auxquelles il faut ajouter l'émission acoustique (en plein développement), la tomographie et la neutronographie. Certains classent également la thermographie, l'holographie, le contrôle d'étanchéité et l'analyse de signature mécanique parmi les techniques de CND, [7].

I.2. Principe de la détection d'un défaut

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée, [4] [8]:

- mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;
- modulation ou altération de ce processus par les défauts ;
- détection de ces modifications par un capteur approprié ;
- traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée, [8].

I.3. Méthodologie de développement des systèmes de CND

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

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

La première phase consiste à essayer de comprendre et d'analyser l'interaction entre le champ émis par le capteur et la pièce à contrôler. Ensuite, vient la traduction des phénomènes mis en jeu par des modèles analytiques, semi-analytiques ou numérique. Ces outils de simulation sont à la base de la conception et l'optimisation des capteurs. Ils permettent aussi d'inverser le rapport capteur/pièce, cela permet à partir de signaux recueillis de s'informer des caractéristiques de la pièce (ou du défaut), [4].

I.4. Différentes méthodes de CND

Les techniques de CND utilisées sont diverses : la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, le bruit Barkhausen, les courants de Foucault... Elles dépendent de la nature même du contrôle envisagé. Ces méthodes exploitent des phénomènes différents et sont le plus souvent complémentaires. Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué. Pour la plupart de ces méthodes, les moyens d'acquisition ont été automatisés, permettant ainsi le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données. Ce premier chapitre est consacré à la présentation des principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault qui sera l'objet d'étude de ce manuscrit, [1] [4] [6] .

Examen visuel

Le contrôle visuel est le plus ancien des contrôles non destructifs. C'est la méthode la plus utilisée, car la plus économique à mettre en œuvre. Elle nécessite uniquement les "bons yeux" d'un opérateur, [1] [2] [4] [8] .

I.4.1. Le ressuage

Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchant, un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...) ; la pièce étant ensuite examinée visuellement, [1] [4] [7].

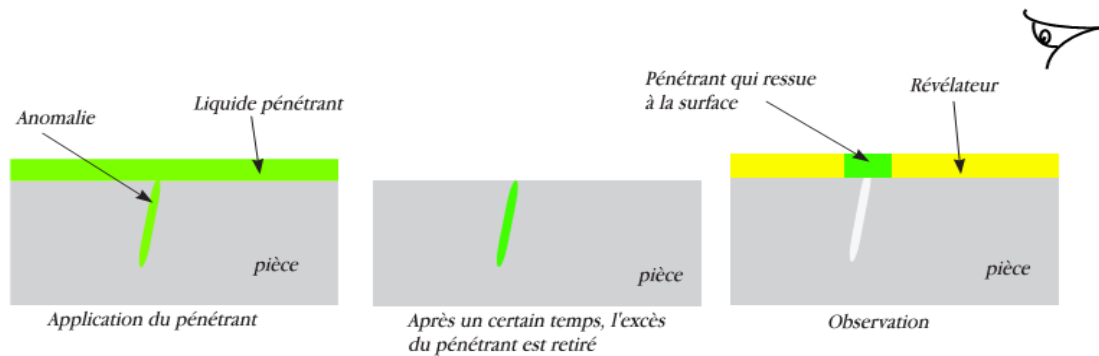


Figure I. 1–Principe du ressuage [1].

I.4.2. La magnétoscopie

La magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructive pour la détection des défauts débouchant ou sous jacents (de 1 à 2 mm de la surface) dans les matériaux ferromagnétiques. Elle consiste à créer un flux magnétique intense dans les structures entraînant, au droit des défauts, des flux de fuite. Ces flux sont mis en évidence par des révélateurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux ou, de façon plus marginale, par une mesure directe avec des capteurs. Il s'agit, dans la majorité des cas, d'une inspection visuelle réalisée par un opérateur. La sensibilité de détection est liée en partie à la granulométrie des poudres magnétiques utilisées, qui doivent être très homogènes. Le contrôle peut se faire de façon automatisée sur des pièces de forme simple, en particulier toutes les pièces axisymétriques du type barres et tubes, à l'aide de capteurs électriques sensibles aux champs magnétiques, [1] [7].

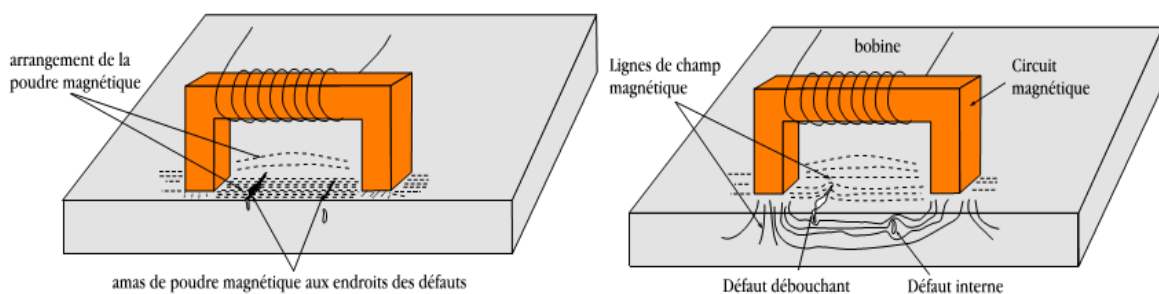


Figure I. 2–Principe de la magnétoscopie [2].

I.4.3. 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. Comme l'illustre la figure 1.3. 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, [4] [7] [8].

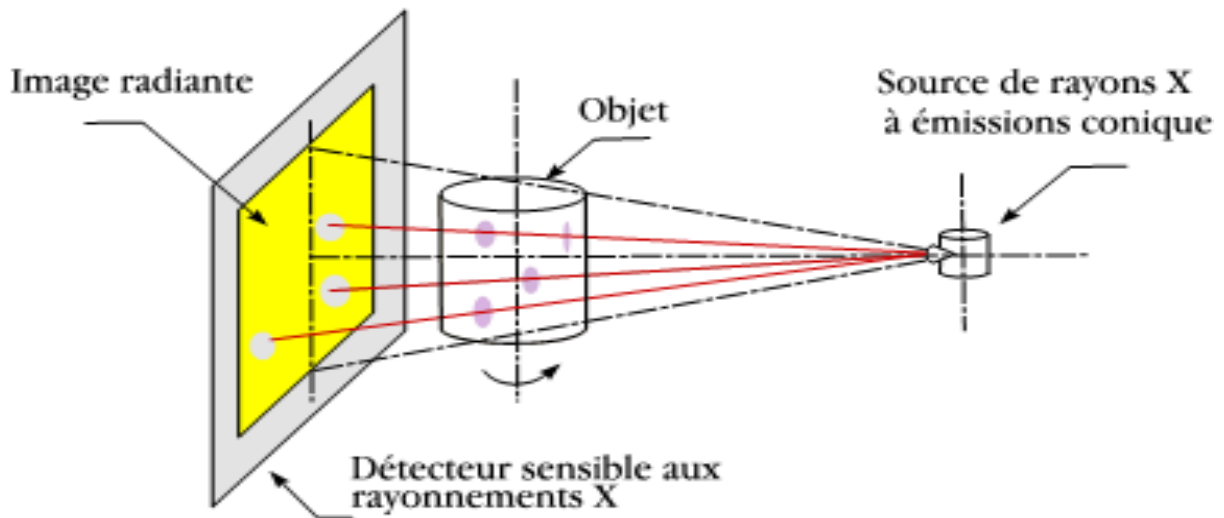


Figure I. 3—Principe de la radiographie [3].

I.4.4. Thermographie

Cette technologie est applicable pour le contrôle de défauts volumiques et de défauts de surface. Le contrôle par thermographie consiste à produire dans la structure à tester un échauffement local homogène et à observer l'évolution de la température après un certain temps de latence. Les défauts présents constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques pouvant être détectées par une caméra infrarouge. L'observation et la stimulation peuvent s'effectuer sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages) et pour le contrôle de matériaux céramiques, qui sont des conducteurs de chaleur relativement médiocres, [4] [7] [8].

Image en contraste inverse
obtenue 0,06 s après le flash

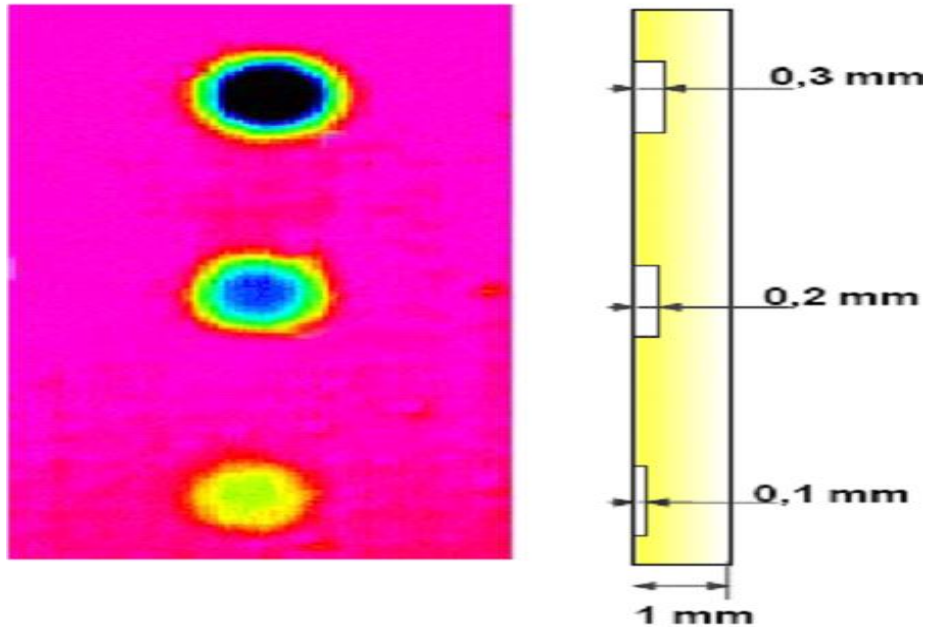


Figure I. 4–Détection par thermographie IR [1].

I.4.5. La mesure du bruit Barkhausen :

L'effet Barkhausen est dû à une émission locale d'ondes électromagnétiques qui se créent au cœur même des cristaux d'un matériau sous l'effet d'un champ magnétique. Basée sur la microstructure magnétique et sa réorganisation, la technique Barkhausen est très proche du matériau et permet ainsi d'avoir des informations précises sur son état métallurgique et son niveau de contraintes résiduelles. Les émissions Barkhausen peuvent être mesurées par l'intermédiaire de sondes encerclantes ou de sondes de côté constituées de bobines plates posées à la surface de l'échantillon. Le bruit Barkhausen est généralement représenté par sa courbe enveloppe, tracée en fonction du champ appliqué, et qui a la forme d'un pic, [7] [11].

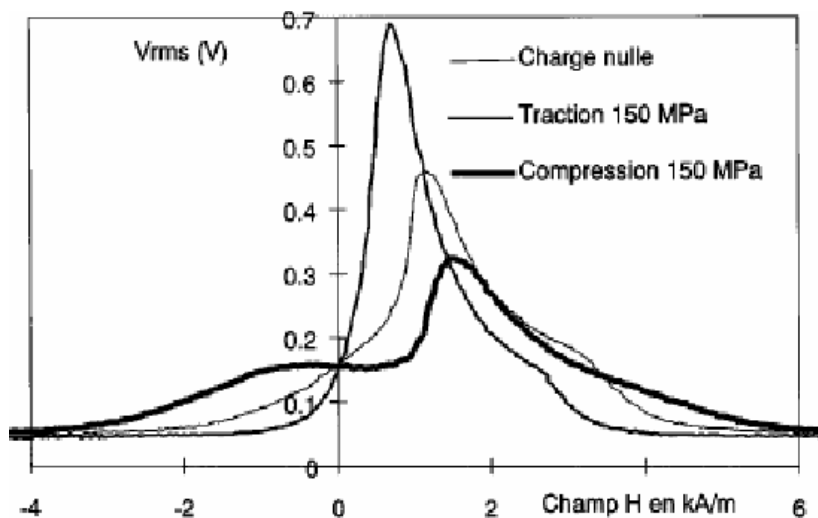


Figure I. 5–Influence des sollicitations mécaniques sur le bruit Barkhausen [4].

I.4.6. Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce) [10]. 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 1.5), [1] [4] [7].

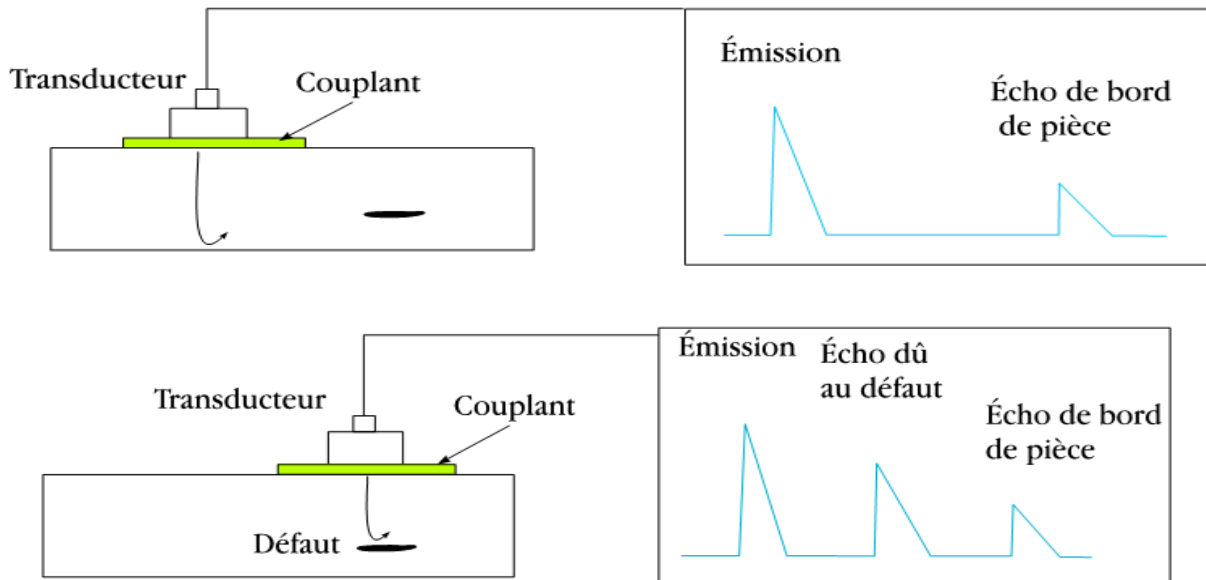


Figure I. 6–Principe des ultrasons [4].

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, [4] [12] [10].

I.5. CND par les courant des Foucault

I.5.1. Principe

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 superficiels ou sous-cutanés ou une quelconque variation des paramètres physiques du matériau à contrôler (σ , μ), [8]. Pour appliquer la technique de CND par CF, une bobine (appelée émetteur ou exciteur) parcourue par un courant alternatif est placée au voisinage de la pièce conductrice testée. Des courants de Foucault se développent dans la pièce en formant des boucles. Ces courants ont la même fréquence que le courant émetteur et génèrent, [1][13] [14].

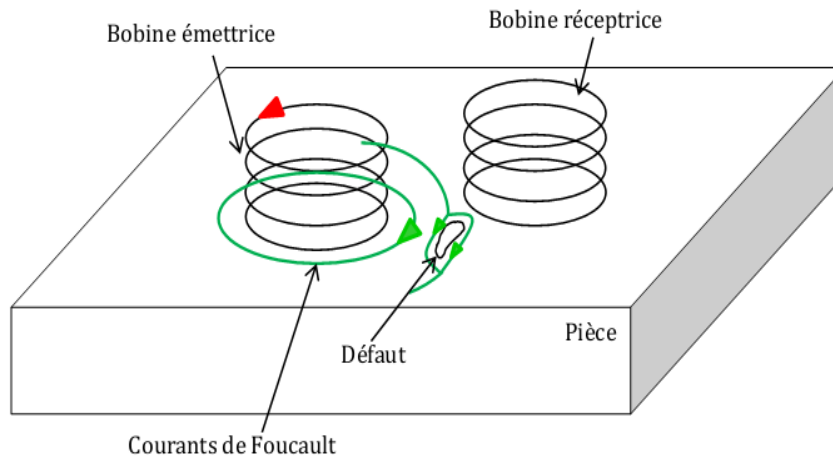


Figure I. 7–Principe du CND par courant de Foucault [6].

En CND par CF, on utilise des fréquences généralement faibles (au plus quelques dizaines de MHz), ce qui implique que la longueur d’onde est grande par rapport aux dimensions de la pièce. Ceci permet de négliger l’effet de propagation de l’onde, [13] [14].

1.5.2. 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 commencent à décroître d’une manière exponentielle à partir de la surface (relation 1.1). La grandeur caractéristique de ce phénomène est la profondeur de pénétration donnée par, [5] [13]:

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

f : La fréquence d’alimentation [Hz].

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

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

σ : La conductivité électrique [S/m].

La profondeur de pénétration est donc inversement proportionnelle à la fréquence du champ et à la nature du matériau. Si on considère une cible plane semi infinie excitée par une nappe de courants extérieurs parallèles au plan, dans ce cas le module de la densité de courant est régi par la relation suivante, [1] [3]:

$$J(z) = J_0 \cdot e^{-z\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} = J_0 \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (I. 2)$$

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

$J(z)$: Le module de la densité de courant en fonction de la profondeur [A/m^2].

δ : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau [m].

On peut constater que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur (figure 1.8), [1] [3] .

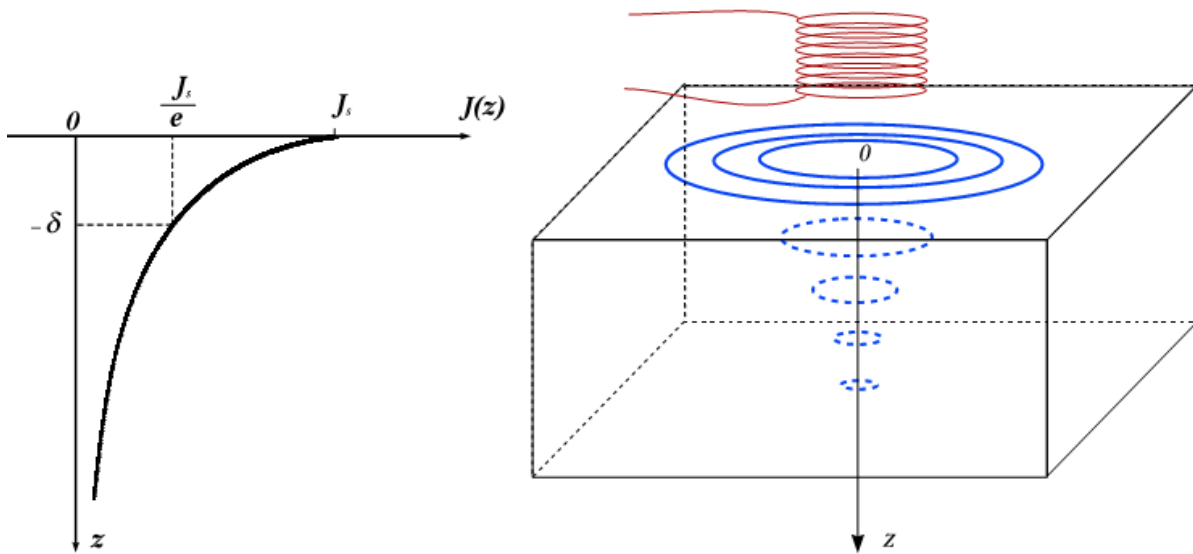


Figure I. 8–Répartition des courants de Foucault sous une surface plane [2].

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, [3][6].

I.6. Comparaison entre les principales méthodes de CND

La comparaison entre les différentes méthodes les plus utilisées du CND incluant, le type de défaut à détecter, la nature du matériau à contrôler et les avantages et inconvénients de la méthode, est donnée par le tableau 1.

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

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

I.7. Différentes technologies des capteurs inductifs

La technologie des capteurs inductifs est principalement dictée par les pièces à contrôler. Pour des cibles purement conductrices Ou des courants de Foucault peuvent être générés on parle

de « capteur a courant de Foucault ou CCF » mais dans le cas d'une cible magnétique non conductrice qui va entraîner une modification des lignes du champ du capteur, qui se trouvent attirées par la pièce, le dispositif fonctionne en « Capteur Magnétique ou CM »(fig. 1-8), [2] [7].

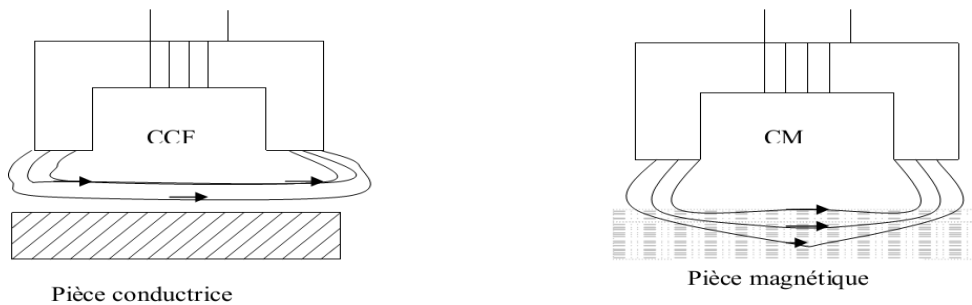


Figure I. 9–Différente technologies des capteurs inductifs (CCF et CM) [4].

I.8. Principe physique de CND-CF

L'alimentation de la bobine du capteur par un courant variable crée un champ d'excitation variable sous la loi de Maxwell Ampère. Toute pièce conductrice baignant dans ce champ sera le siège des courants induits appelés courants de Foucault .En vertu de la loi de Lenz, ces courants reproduisent à leur tour un champ magnétique opposant au champ qui leur a donné naissance. Le champ résultant modifiera alors le courant dans la source et par conséquent l'impédance du capteur. La figure (I.4) résume le principe de CND par courant de Foucault, [2] [3].

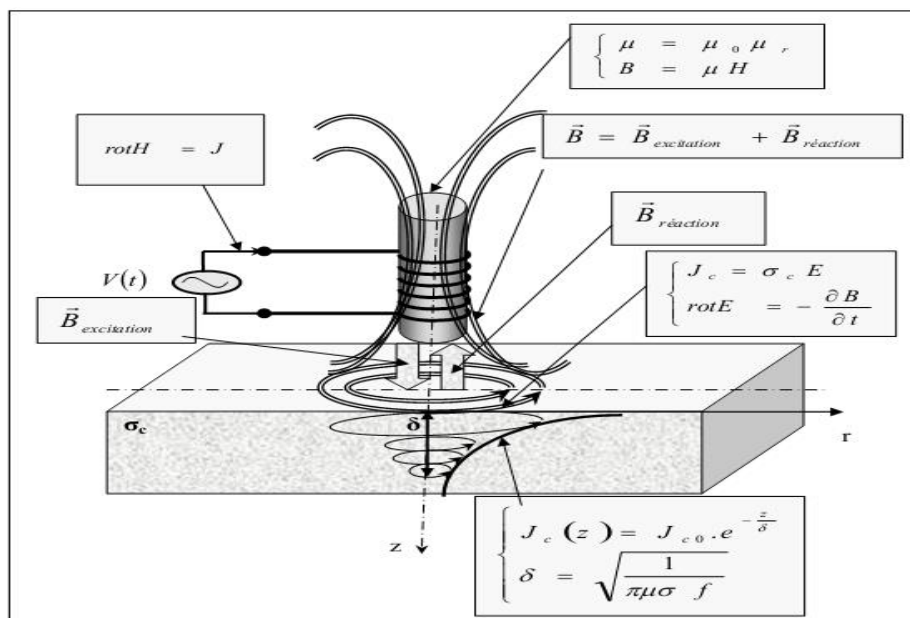


Figure I. 10–Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault [4].

I.8.1. Objectifs de CND-CF

Un capteur à courants de Foucault peut accomplir diverses tâches. Du fait que l'impédance du système Capteur/Pièce est fonction des différentes caractéristiques électromagnétiques et géométriques. Parfois utilisé pour la caractérisation géométrique et électromagnétique, d'autre fois pour le contrôle de l'état de santé en cherchant et caractérisant les défauts. La figure (I.5) illustre les différentes fonctions d'un capteur CF, [2] [3] [7].

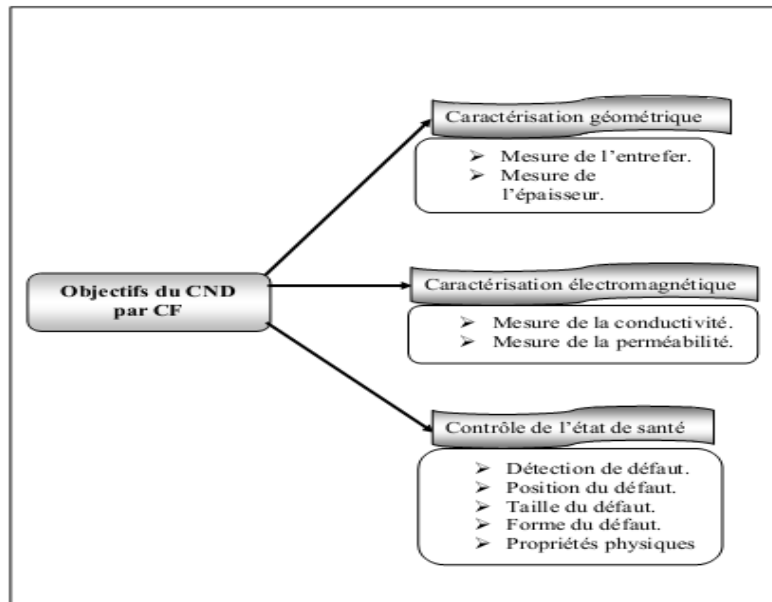


Figure I. 11–Nature du CND par CF [4].

I.8.2. Classification des capteurs

Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs. La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle. La figure (I.6) résume les trois critères déjà cités, [2] [4] [7].

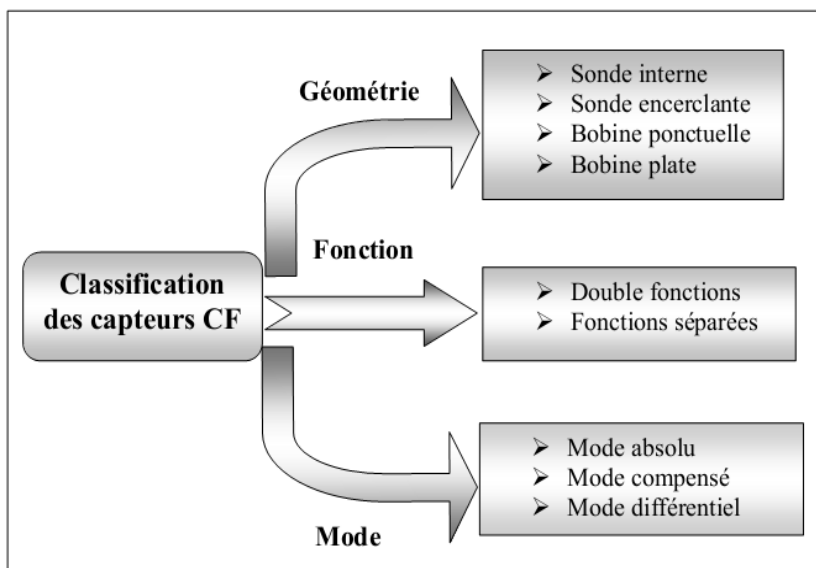


Figure I. 12–Critères de classification des capteurs [4].

I.8.3. Différents fonctions de capteurs

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les configurations de base à partir desquelles d'autres montages peuvent être envisagés, [4].

I.8.4. Capteurs à double fonctions

Le montage le plus simple est celui de la sonde à double fonctions constituée d'une seule bobine. Les fonctions d'émission et de réception sont assurées par la même bobine. L'exploitation se fait, en régime sinusoïdal, par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine dans son environnement, [4] [5].

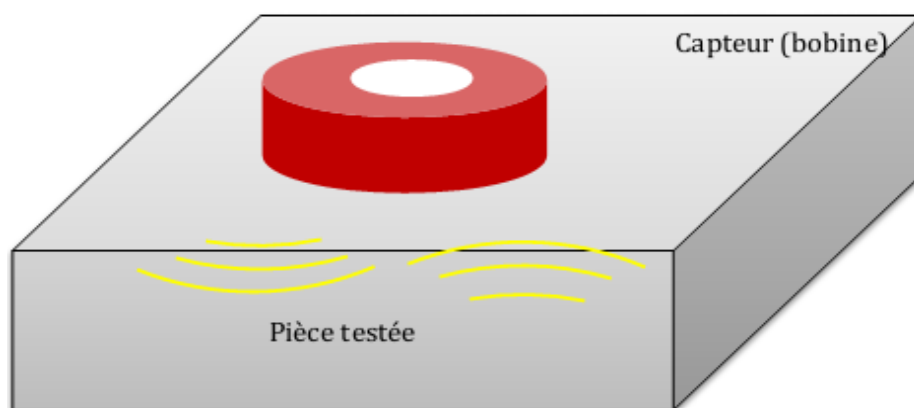


Figure I. 13–Capteur à fonction double [6].

I.8.5. Capteurs à fonctions séparées

Dans ce cas, le capteur contient au moins deux éléments, une bobine pour l'émission d'un champ alternatif et une autre bobine ou un capteur de champ magnétique pour la réception de la réponse de la pièce examinée. Dans le cas où le récepteur est une bobine la grandeur mesurée est la force électromotrice (f.e.m) induite aux bornes de celle-ci, [3] [11].

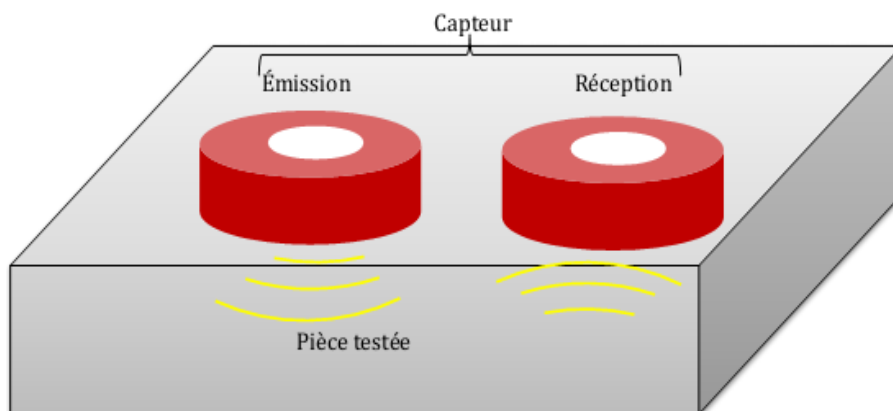


Figure I. 14–Capteur à fonctions séparées [6].

I.8.6. Différents types de mesures

I.8.6.1 Capteur à mesure absolue

Ce type de capteur est sensible à tous les paramètres géométriques et électromagnétiques de l'environnement. Typiquement le récepteur est constitué d'un seul élément. Avant le contrôle d'une pièce un étalonnage peut être effectué sur une pièce de référence (maquette), [5].

I.8.6.2 Capteur à mesure différentielle

Ce mode de mesure est, par opposition à un capteur à mesure absolue, sensible uniquement à des variations locales de l'objet à inspecter. Il permet de détecter les changements dus aux discontinuités lors du déplacement du capteur le long du produit examiné en se débarrassant des perturbations lentes telles que la variation du lift-off, conductivité... Typiquement, le récepteur est constitué d'au moins deux éléments voisins. Cette approche revient à effectuer la différence de mesures réalisées conjointement sur les deux éléments. Le signal fourni par un capteur différentiel est idéalement nul lorsque la pièce est saine, [2] [5].

I.8.7. Différents types de bobines

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

I.8.7.1 Bobines classiques

La bobine est fabriquée par l'enroulement hélicoïdal d'un conducteur (cuivre) émaillé autour d'un noyau. Le noyau est généralement diélectrique (isolant) ou magnétique (ferrite...). L'utilisation d'un noyau magnétique permet de focaliser le champ magnétique autour de la bobine, [5] [6].

I.8.7.2 Bobines gravées

Il existe deux types de bobines gravées :

- bobines réalisées sur circuit imprimé en utilisant les technologies PCB standards,
- micro bobines (taille de l'ordre du mm) réalisées en salle blanche par des moyens de micro technologies. La fabrication fait appel à différentes étapes de dépôts et de gravure telles que montrées dans la figure 1.15, [5] [6].

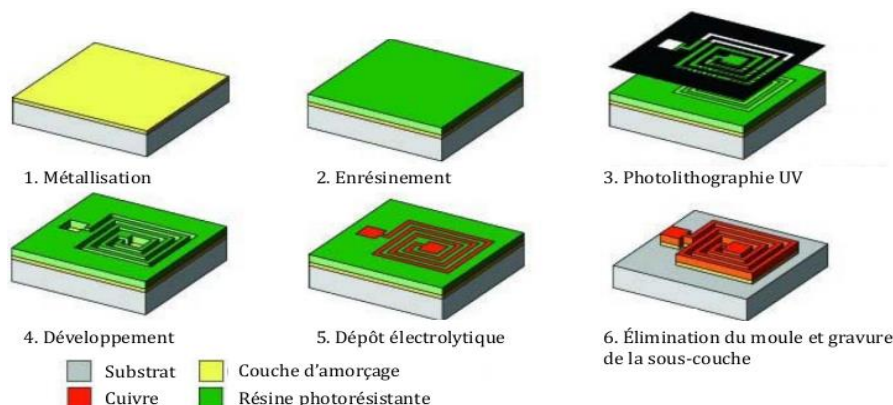


Figure I. 15–Étapes de réalisation des bobines micro moulées [5].

I.8.7.3 Bobines souples

L'utilisation de capteurs traditionnels dans une application de CND par CF est mal adaptée pour l'examen d'objets dont la surface est de forme complexe (comme la variation du rayon de courbure). Le capteur n'épousera pas la forme de la pièce et son couplage magnétique avec celle-ci sera mauvais. Des études spécifiques sont alors nécessaires, ce qui alourdit les coûts de développement. Pour pallier à ces obstacles et apporter aux utilisateurs des solutions efficaces, un recours à un capteur flexible apparaît comme une solution adéquate. En déplaçant le capteur sur la surface irrégulière, sa flexibilité lui permet d'épouser la surface de la pièce testée en minimisant la variation du lift-off durant le scan des surfaces complexes, [5].

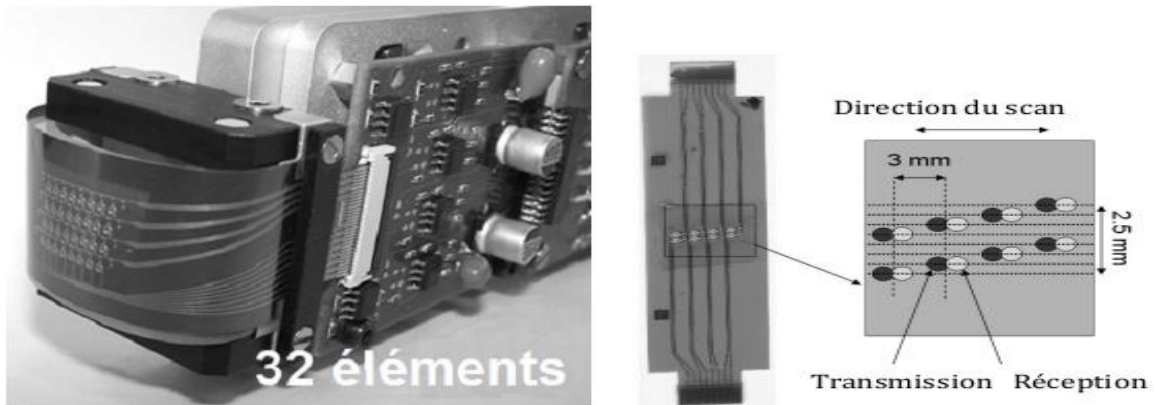


Figure I.16—Capteur constitué de quatre couples de bobines sur un film de kapton souple. Chaque couple est constitué d'une bobine émettrice et d'une bobine réceptrice [5].

La conception de capteurs souples fait l'objet de développements récents. On voit ainsi apparaître des capteurs mettant en œuvre des petites bobines montées sur un support souple ou encore de grandes bobines souples. La figure 1.11 montre un exemple de capteur développé au CEA constitué de plusieurs bobines gravées sur support flexible, [5].

I.8.8. Différents types des Sondes

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

I.8.8.1 Sonde encerclant

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

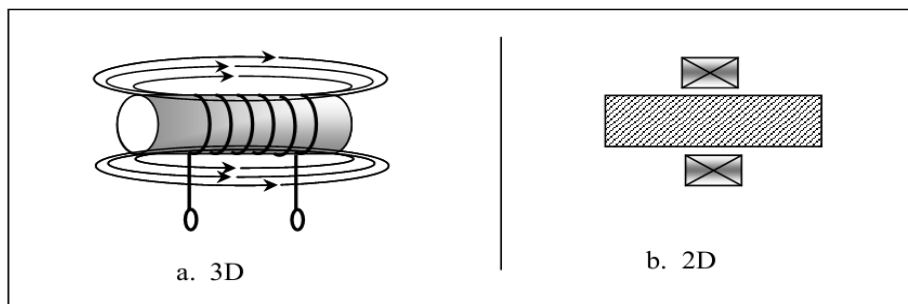


Figure I. 17—Bobine encerclant [2].

I.8.8.2 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 (figure I.8), [2] [4] [7].

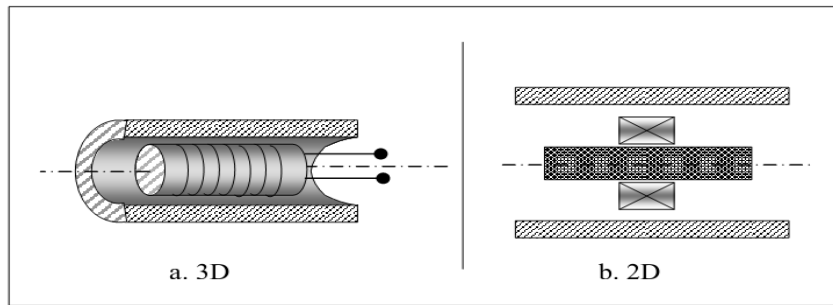


Figure I. 18–Bobine interne glissante avec noyau [2].

I.8.8.3 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 palpeur permet de faire un contrôle local des pièces même celles dont la géométrie est complexe (figure I.9), [2] [4] [7].

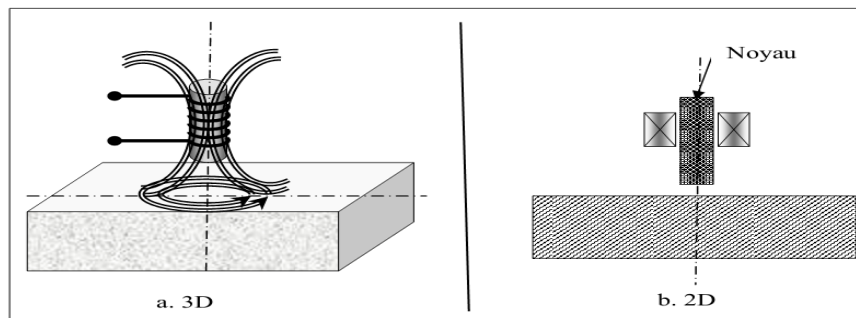


Figure I. 19–Bobine externe glissante avec noyau [2].

I.8.8.4 Sonde plate

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vu sa géométrie, sa zone d'action est plus large (figure I.10), [2] [4] [7].

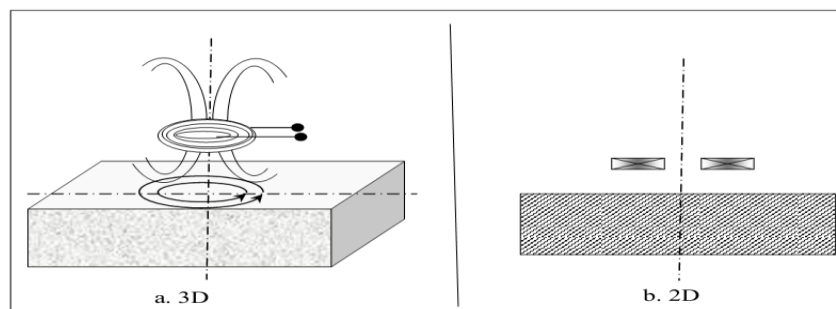


Figure I. 20–Bobine plate [2].

I.8.9. Différents types d'alimentations

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

I.8.9.1 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, [4] [5].
- Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés notamment par les capacités inter spires du capteur, [4] [5].

Cette méthode présente des limitations car elle permet difficilement de caractériser le défaut, [2] [4] [6] [5].

I.8.9.2 Signal 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 paramètres permet d'avoir $2n$ informations réelles et d'éliminer $2n-1$ perturbation. Cette technique est très utilisée pour l'inversion de données fournies par le capteur en vue de déterminer les paramètres d'une cible malgré la présence de grandeurs perturbatrices. L'excitation multifréquences peut être réalisée soit, [3] :

- En séquence : fréquence par fréquence en utilisant un dispositif de mesure classique (mono fréquence). L'inconvénient de cette méthode réside dans le temps d'acquisition important qui ralentit la mesure, [2] [4] .
- Simultanément : les fréquences sont générées simultanément, cette méthode nécessite un dispositif de mesure compliqué est onéreux. En pratique, le nombre de fréquences dépasse rarement quatre du fait de la complexité et de la difficulté de réglage de tels appareils, [2] [4] .

I.8.9.3 Signal pulse

Dans un problème de contrôle où il s'agit de discriminer plusieurs paramètres, une alternative à l'alimentation sinusoïdale multi- fréquences consiste à émettre un champ magnétique large bande en excitant la sonde avec un signal impulsionnel ou quasi-impulsionnel. 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. Dans ce type de contrôle, c'est l'évolution temporelle des signaux qui est utilisée. Sur le principe, une telle méthode est plus riche en informations qu'un contrôle par courants de Foucault sinusoïdal mono ou multifréquences. Cependant, l'excitation pulsée nécessite une instrumentation particulière : générateur d'impulsions à fort courant de bande passante élevée, système d'acquisition performant (les signaux à mesurer étant rapides et souvent de faibles amplitudes), [2] [4] .

I.9. Plan d'impédance normalisée

Il est possible d'exploiter les résultats à l'aide d'un plan d'impédance normalisée. Pour cela, on utilise les grandeurs X_0 (réactance de la bobine dans l'air), X (réactance de la bobine en présence du matériau), R_0 (résistance du fil de bobinage de la bobine à vide) et R (résistance de la bobine en présence du matériau). On définit, [5] [8] :

– la résistance normalisée, [4] [8] :

$$R_n = \frac{R-R_0}{X_0} \quad (I.3)$$

– la réactance normalisée, [4] [8] :

$$X_n = \frac{X}{X_0} \quad (I.4)$$

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

$$Z_n = R_n + jX_n \quad (I.5)$$

La figure 1.12 illustre l'allure des trajectoires que décrit le point d'impédance de la sonde pour des variations de conductivité électrique σ et de distance de mesure (lift - off), [4].

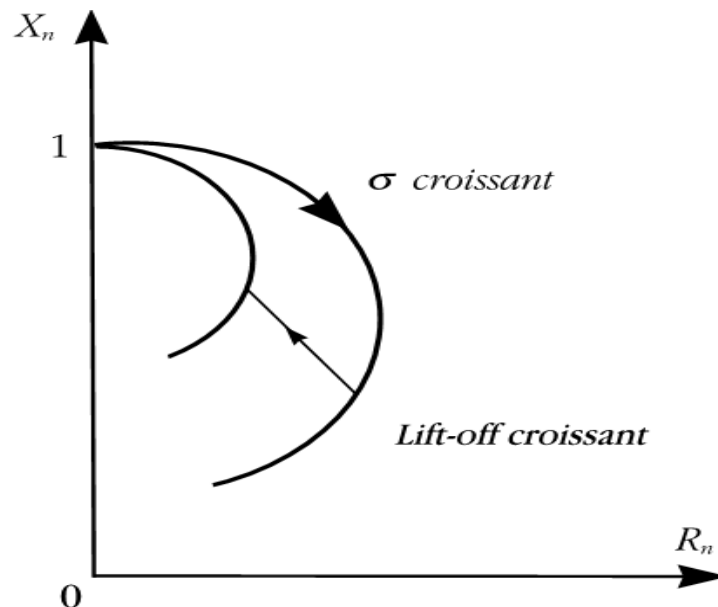


Figure I.21–Influence de σ ou du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée (cas d'une pièce amagnétique) [2].

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

$$Z_{n+def} = Z_n + \Delta Z_{def} \quad (I.6)$$

ΔZ_{def} : L'impédance qui crée par le défaut

Un changement de caractéristique physique de la pièce contrôlée fait varier le point de fonctionnement suivant une trajectoire que l'on appelle signature, [6] [24].

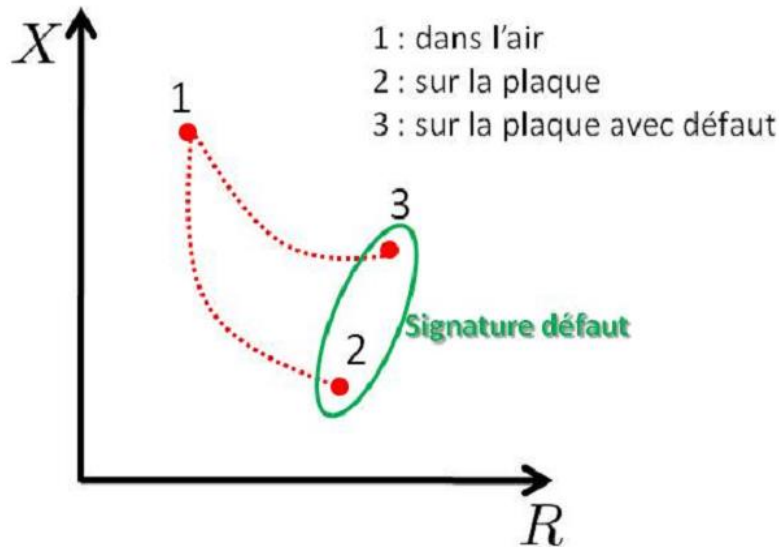


Figure I. 22–Effet du défaut sur la valeur de l'impédance de la bobine [2].

I.10. Intérêt de la modélisation

Dans le contexte du CND par CF, les outils de modélisation permettent la conception des capteurs et la prédiction de leur comportement sans réalisation effective, [4] [7].

Ces outils ont des conséquences sur le développement d'outils de production, en permettant de réduire le coût de la phase expérimentale. La modélisation comporte deux étapes, [12]: la première est l'étude et l'analyse du problème et la deuxième est la mise en œuvre d'une solution au problème. La première étape aboutit en CND par CF à des équations aux dérivées partielles (EDP) basées sur les lois de l'électromagnétisme. Des méthodes utilisées pour la résolution de ces dernières sont présentées dans le chapitre suivant, [1] [5] [7].

I.11. Conclusion

Le CND consiste en la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation des paramètres physiques ou géométriques ou la détection des défauts apparaissant dans des structures industrielles diverses, ce qui est un enjeu dont dépend notamment la sécurité, [7]. Parmi les différentes méthodes de CND, celle des courants de Foucault est très employée pour le contrôle de milieux conducteurs. Ce premier chapitre a été consacré à la présentation des différentes techniques du contrôle non destructif en générale et plus particulièrement le contrôle par capteurs à courants de Foucault et les différentes sondes utilisées pour ce type de contrôle.

la modélisation d'un contrôle par courants de Foucault requière la connaissance des lois qui le régissent, ce qui fera l'objet du chapitre suivant, [2] [3].

Chapitre II.

Contrôle par capteur à courants de Foucault

II. Contrôle par capteur à courants de Foucault

II.1. Introduction

Le principe de fonctionnement du contrôle non destructif par les courants de Foucault est basé sur les phénomènes d'électromagnétisme. La compréhension de ces phénomènes est très importante pour la modélisation mathématique puis la simulation et faire des modifications pour la conception des capteurs efficace et minimiser les problèmes rencontrés dans le contrôle. En premier lieu nous allons mettre l'équation qui régit notre système, [1] [2] [13].

Dans notre travail ça sera l'équation de la magnétodynamique en régime quasi-stationnaire pour une formulation en potentiel vecteur magnétique A, [2] [3].

En suite la résolution de cette équation (qui est une équation différentielle aux dérivées partielles) se fait à l'aide des méthodes numériques en l'occurrence la méthode des éléments finis qui se présente dans le dernier chapitre, [3] [7] [23].

II.2. Modélisation mathématique du système

Tous les phénomènes d'électromagnétismes variables dans le temps et dans l'espace dans nos études des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell suivantes, [14] [15] :

Loi de Maxwell Faraday (induction)

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

Loi de Maxwell Gauss (électrique)

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho \quad (\text{II. 2})$$

Loi de Maxwell Ampère

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) \\ = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{aligned} \quad (\text{II. 3})$$

Loi de Maxwell Gauss (magnétique)

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II. 4})$$

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

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

\vec{j} [A/m²] et ρ [C/m³] : Densité du courant et la charge volumique.

Tel que :

$$\vec{j} = \vec{j}_{\text{ind}} + \vec{j}_{\text{exi}} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

\vec{j}_{ind} : La densité de courant induit.

\vec{j}_{exi} : La densité de courant d'excitation.

Ces équations sont liées entre eux par les lois constitutives qui traduisent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considéré sont, [14] [16] [24]:

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

μ [H/m] : Perméabilité magnétique.

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

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu.

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

ε [F/m] : Permittivité diélectrique.

$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ [F/m] : Constante diélectrique du vide

ε_r : Permittivité électrique relative du milieu.

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

Ou σ [S.m⁻¹]: Conductivité électrique.

Suivant les dispositifs que l'on étudie certains phénomènes deviennent négligeables (régimes quasi-stationnaires), ce qui va nous donner des équations découplées plus simples à résoudre, ajouté aussi que certaines hypothèses simplificatrices sont introduites, dans notre cas d'étude nous allons considérer que, [14] [15] [16] :

Dans un milieu conducteur σ est de l'ordre de **10⁶S.m⁻¹**, et ε_0 de l'ordre de **8.85.10⁻³²F/m** jusqu'à des fréquences qui avoisinent les MHZ nous avons $\omega \cdot \varepsilon_0 \ll \sigma$ ce qui nous permet d'avoir :

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \mathbf{0}$$

La densité volumique de charge est considérée comme nulle ($\rho=0$). Les paramètres σ , μ , ϵ , sont considérés linéaires, donc ils ne dépendent pas de la solution du système.

le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale.

Toutes ces hypothèses considérées, le système d'équation devient, [12] [14] [16]:

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

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

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{j} \quad (\text{II.11})$$

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

II.3. Formulation en potentiel vecteur (couple A-V)

Pour résoudre les équations de Maxwell, des changements de variables sont nécessaires. La méthode la plus connue est la « méthode A-V ». Les équations différentielles aux dérivées partielles (II.9) et (II.11) correspondent aux équations de diffusion des grandeurs H et E, toute fois, les formulations en champ présentent un inconvénient majeur, c'est celui de la discontinuité aux interfaces et particulièrement aux coins, [3] [16] [14]. (Continuité de la composant normal de l'induction B). Ce qui est justifié par les relations de passage, [23] [24]:

II.4. Relations de continuité Conditions aux interfaces

La méthode des éléments finis, lorsque l'inconnue recherchée aux nœuds est le potentiel vecteur magnétique, impose la continuité à l'interface de deux milieux de nature différente. Si A_1 et A_2 sont respectivement les potentiels du milieu 1 et 2 à l'interface alors, [2] [3]:

$$A_1 = A_2$$

La continuité du potentiel assure la continuité de la composante normale de l'induction magnétique à l'interface. Compte tenu des équations de passage qu'on rappelle ci-après, [2] [3] [24]:

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K}$$

\vec{n} : Le vecteur normal a la surface.

\vec{K} : représente la composante de la densité de courant perpendiculaire a l'axe du plan.

De plus les vecteurs ont généralement trois composantes augmentant de ce fait le nombre d'inconnues, et par la même le temps de calcul, [7].

Pour palier à ce problème, on fait appel à une entité purement mathématique connue sous le nom de potentiel, si ce potentiel n'a aucun sens physique, sa variation, elle, est très significative, [3].

La relation (II.12) nous renseigne sur l'existence d'un vecteur \vec{A} et nous permet d'écrire[24] :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \quad (\text{II.13})$$

Pour assurer l'unicité de la solution nous allons imposer une condition de jauge (condition de coulomb) de telle sorte que :

$$\text{div}(\vec{A}) = 0 \quad (\text{II.14})$$

En remplaçant (II.13) dans (II.9), on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$$

Le rotationnel étant associatif on aura :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{II.15})$$

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

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (\text{II.16})$$

Alors la loi d'ohm(II.8) est :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V) \right) \quad (\text{II.17})$$

Ce qui de permet de définir les deux densités de courant cité précédemment:

$$\vec{j}_{\text{ind}} = -\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$$\vec{j}_{\text{exi}} = -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V)$$

On remplace (II.17) dans (II.11) on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V) \right) \quad (\text{III. 18})$$

La combinaison entre l'équation (II.6) et (II.13) donne :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \quad (\text{III. 19})$$

En remplaçant (II.18) dans (II.19), on tenant compte que l'alimentation est sinusoïdale $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$ on obtient :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} \\ = \vec{j}_s \end{aligned} \quad (\text{III. 20})$$

ω : La pulsation d'alimentation

$j^2 = -1$: Nombre complexe

Avec :

$$\vec{j}_s = -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V)$$

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

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

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

Dans l'air :

La région qui entoure le dispositif est caractérisée par l'absence de source ainsi qu'une conductivité électrique nulle, l'équation qui lui sera associée s'écrira :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = 0 \quad (\text{II. 21})$$

Dans l'inducteur :

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

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \vec{j}_s \quad (\text{II. 22})$$

II.4.1. Dans la cible :

La pièce à contrôler est obligatoirement conductrice, l'équation électromagnétique dans cette région s'écrit alors :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{II. 23})$$

La figure(II.23) illustre les équations du vecteur potentiel dans des différentes régions

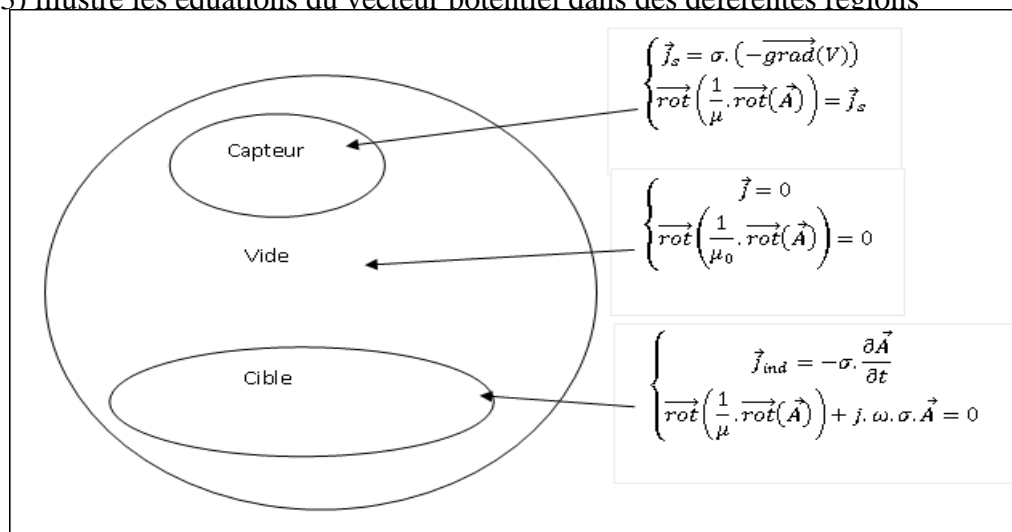


Figure II. 1–vecteur potentiel dans des différentes régions.

II.5. Équation magnétodynamique bidimensionnelle :

Dans les problèmes bidimensionnels on peut avoir deux types :

Le premier concerne les systèmes à symétrie translationnelle, ou aucune variation n'est enregistrée sur l'une des trois directions d'un plan cartésien. On choisit généralement l'axe (oz), [3] [12].

Dans l'autre cas on trouve les systèmes axisymétriques, ou aucune variation n'a lieu le long de la direction orthoradiale (φ). Dans un plan cylindrique (r, φ, z).

Le potentiel vecteur dans ce cas n'a qu'une seule composante parallèle à (oz). A partir (II.8) et (II.16), il vient que \vec{A} et \vec{E} doivent être dans la même direction que \vec{j} alors : $\vec{A} (0, 0, A_z)$ et $\vec{j} (0, 0, j_z)$.

En coordonnée cylindrique le potentiel vecteur magnétique ne présente que la composante orthoradiale, d'où : $\vec{A} (0, A_\varphi, 0)$ et $\vec{j} (0, j_\varphi, 0)$.

D'où l'équation du rotationnel peut s'écrire en coordonner cartésiennes :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \right) = \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] \cdot \vec{k} \quad (\text{II. 24})$$

Avec \vec{k} le vecteur unitaire selon Oz

Et en coordonner cylindriques :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \right) = \left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] \cdot \vec{u}_\varphi \quad (\text{II. 25})$$

Avec \vec{u}_φ le vecteur unitaire selon la direction orthogonale.

II.5.1. Dans l'air :

En coordonnée cartésienne

$$\left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] = 0 \quad (\text{II. 26})$$

En coordonnée cylindrique

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] = 0$$

II.5.2. Dans l'inducteur :

En coordonnée cartésienne

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] = j_z \quad (\text{II. 27})$$

En coordonnée cylindrique

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] = j_{s\varphi}$$

II.5.3. Dans la charge :

En coordonnée cartésienne

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] - \sigma \cdot \frac{\partial A_z}{\partial t} = -j_z \quad (\text{II. 28})$$

En coordonnée cylindrique

$$\left[- \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] - \sigma \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = 0$$

Ces équations étant posées, leurs solution dépend entièrement des conditions de limites qui lui seront associées on peut distinguer trois sortes de conditions aux limites qu'on peut généralement rencontrer :

II.6. Conditions aux limites :

1. Condition de Dirichlet (ou condition du premier problème aux limites) : on cherche une solution de l'équation qui prend des valeurs données sur le bord du domaine, on cherche donc à résoudre le système d'équation, [9] [17]:

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ A = A_0 & x \in \partial\Omega \end{cases}$$

2. Condition de Neumann (ou condition du deuxième problème aux limites) : on cherche la solution de l'équation différentielle dont on connaît la valeur du gradient sur le bord du domaine de résolution, notant que n la normal unitaire dirigée vers l'extérieur de Ω , on cherche donc à résoudre le problème, [2] [4] [12]:

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ \frac{\partial A}{\partial n} = A_n & x \in \partial\Omega \end{cases}$$

3. Condition de mixte (ou condition de Dirichlet Neumann) : on cherche une solution qui vérifie la troisième condition de bord qui est, [12] [17] :

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ a \cdot A + b \cdot \frac{\partial A}{\partial n} = c & x \in \partial\Omega \end{cases}$$

Où : a, b sont des constantes et A et l'inconnus du problème.

On note que :

Δ : L'opérateur Laplacien

f: Terme source.

Ω : le domaine d'étude.

$\partial \Omega$: le bord du domaine d'étude.

II.7. Conclusion :

Ce chapitre a été essentiellement consacré au rappel des équations de l'électromagnétisme, et a leurs formulations en termes de potentiel vecteur magnétique dans le repère cartésien pour ensuite faciliter le passage aux coordonnées cylindriques. On obtient ainsi l'équation de la magnétodynamique transitoire pour les adaptés finalement à notre dispositif d'étude, [2] [3].

Chapitre III.

Formulation et modélisation du CND par CF

III. Formulation et modélisation du CND par CF

III.1. Introduction

L'équation qui régit le dispositif étant formulée, on propose de résoudre cette équation. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées, d'une façon tout à fait générale, on peut classer les méthodes de résolution des équations différentielles aux dérivées partielles, en deux grandes catégories : Les méthodes numériques et les méthodes analytiques, [3] [12].

Parmi les méthodes analytiques on peut citer : la méthode des séparations des variables, la méthodes des séries d'exponentielles, la méthode des intégrales sur la frontière et les méthodes de transformation, [2] [7].

Parmi les méthodes de résolution numériques les plus utilisées sont : la méthode des différences finies qui consiste en l'approximation de l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences, ou chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de l'inconnue à déterminer en un certain nombre de points du domaine de résolution. La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation des solutions d'équations différentielles aux dérivées partielles qui est construite à partir d'une formulation équivalente du problème, elle peut être soit une « formulation variationnelle » ou en « résidus pondéré », [3] [7] [17].

Dans ce qui suit nous allons nous intéresser plus précisément à la méthode des éléments finis ainsi qu'à la formulation éléments finis des équations magnétodynamiques, [3] [7] [17].

III.2. Méthode des éléments finis

III.2.1.Principe de la méthode variationnelle

La méthode variationnelle nécessite la connaissance à priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée par le principe de l'action Hamiltonienne qui stipule l'existence d'un fonctionnel type intégral défini par, [12] [23]:

$$F(A) = \int_{\Omega} L. d\Omega \quad (III.1)$$

L : est la fonction de la grange résultant de la coénergie du système de type cinétique et de son énergie potentiel.

$$L = W_c - W_p$$

Ω : est le domaine d'étude.

La résolution du problème variationnel défini par la fonction d'énergie $F(A)$ revient à minimiser cette fonctionnelle, [2] [3].

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

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

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

A : inconnue au nœud n du domaine.

III.2.2. Formulation résidus pondérés

Le principe de la méthode des résidus pondérés est de remplacer la solution exacte par la solution approchée, ce qui va engendrer une erreur appelée résidu R, [3].

$$R_i = L(A) - f \quad (III.2)$$

R : est le résidu de l'approximation.

L(A) : opérateur différentiel.

f : fonction définie sur le domaine d'étude Ω

A : l'inconnue à chercher.

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

$$\int_{\Omega} R_i \Phi_i \cdot \partial \Omega \quad (III.3)$$

Φ_i : Fonction de pondération ou de projection.

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

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

1- La méthode de collocation par points, ou les fonction de Dirac sont prises comme fonctions de pondérations ou on impose au résidu de s'annuler dans chaque pont ou on veut approcher la solution, [2] [3] [4].

2- Méthode des moindres carrés qui est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites, [4] [5].

3- La méthode de Galerkin qui consiste à choisir des fonctions de projections identiques aux fonctions d'approximation, qui donne à la fin un système algébrique symétrique facile à résoudre, [4].

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

III.2.3. La discrétisation du domaine

Le domaine de résolution est discrétisé en petits domaines appelés éléments finis, l'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément, grâce aux fonctions d'interpolation. L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction des valeurs de l'inconnue aux nœuds de cet élément. On parle alors d'interpolation nodale. Des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques, [4].

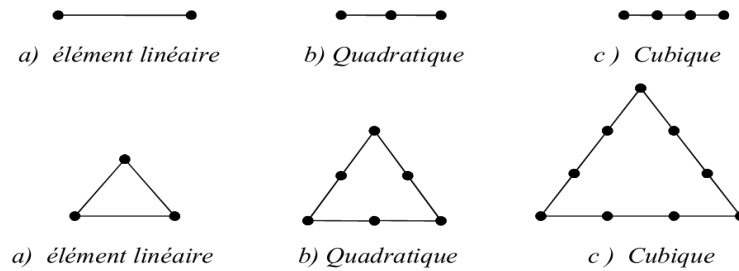


Figure III. 1 – éléments classiques en une et deux dimensions [3].

Afin de simplifier la définition des éléments de forme complexe, on introduit la notion d'élément de référence. Cela permet de ne définir qu'une seule fois, pour chaque type d'élément, les fonctions d'interpolation, [6] [4].

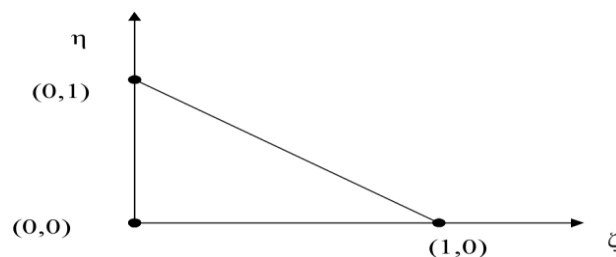


Figure III. 2 – élément de référence triangulaire linéaire [3].

Pour notre cas qui est l'élément triangulaire linéaire, l'élément de référence est tel que donné dans la figure (III.2)

3.1.2.1. Fonction d'interpolation

Ces fonctions sont construites de telle sorte à obéir à deux principes :

1) Principe de l'état complet :

- Le nombre de termes de la fonction doit être égal au nombre de nœuds de l'élément, [4].
- La fonction doit contenir un terme constant, [4].

2) Principe de compatibilité :

Celui-ci est explicité par la continuité de la fonction. Dans le cas d'un élément triangulaire linéaire, la fonction d'interpolation est donnée par, [4] :

$$u(x,y) = a \cdot x + b \cdot y + c \tag{III.4}$$

3.1.2.2. Fonction d'approximation sur l'élément

Dans le cas d'élément triangulaire linéaire, approximation d'une fonction $u(x,y)$ de valeur u_1, u_2 et, u_3 respectivement aux sommets 1,2 et 3, est de la forme suivante :

$$u(x,y) = [N_1(x,y) \quad N_2(x,y) \quad N_3(x,y)] \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \tag{III.5}$$

Avec ;

$$N_1(x,y) = \frac{1}{2 \cdot T} \cdot [(y_3 - y_2) \cdot (x_2 - x) - (x_3 - x_2) \cdot (y_2 - y)] \tag{III.6}$$

$$N_2(x,y) = \frac{1}{2 \cdot T} \cdot [(y_1 - y_3) \cdot (x_3 - x) - (x_1 - x_3) \cdot (y_3 - y)] \tag{III.7}$$

$$N_3(x,y) = \frac{1}{2 \cdot T} \cdot [(y_2 - y_1) \cdot (x_1 - x) - (x_2 - x_1) \cdot (y_1 - y)] \tag{III.8}$$

Où T est la surface du triangle décrit par les sommets (1), (2) et (3).

$N(x,y)$: fonction d'interpolation.

On remarque que :

$$N_1(x,y) = 1$$

$$N_2(x,y) = 0$$

$$N_3(x,y) = 0$$

3.1.2.3. Fonction d'interpolation sur le domaine

Dans le domaine global contenant N nœuds, l'inconnue s'exprime alors :

$$A = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_j \tag{III.9}$$

N : le nombre de nœuds.

α_j : Fonction d'interpolation au nœud j.

A_j : Inconnue au nœud j.

III.3. Formulation éléments finis des équations du modèle

3.2.1. Équation magnétodynamique

3.2.2.1. cas cartésien

L'équation magnétodynamique dans le cas comportant une source et en régime harmonique est donnée par, [7] [3] [6] [4]:

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = \vec{j}_z \quad (\text{III. 10})$$

L'équation (III.10) peut s'écrire sous la forme :

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y}\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot A_z = j_z \quad (\text{III. 11})$$

La formulation intégrale de l'équation (III.11) peut être donnée par :

$$\iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \left(-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y}\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot A_z - j_z\right) dx dy = 0 \quad (\text{III. 12})$$

L'équation (III.12) peut être réécrite comme suit :

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \alpha_i v \left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y}\right)\right) dx dy + j\omega \iint_{\Omega} \alpha_i \sigma A_z dx dy \\ = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot j_z dx dy \end{aligned} \quad (\text{III. 13})$$

Avec :

$v = \frac{1}{\mu}$: La réductivité magnétique

L'application de théorème de Green, nous permet d'écrire :

$$-\iint_{\Omega} \alpha_i v \left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y}\right)\right) dx dy = -\iint_{\Omega} v \left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial x}\left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x}\right) + \frac{\partial \alpha_i}{\partial y}\left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y}\right)\right) dx dy$$

$$+ \int_{\Gamma} v \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \alpha_i \cos(n, x) \frac{\partial A_z}{\partial y} \alpha_i \cos(n, y) \right) d\Gamma \quad (III. 14)$$

On peut écrire l'équation (III.14) sous une forme plus compacte en introduisant l'opérateur nabra :

$$- \iint_{\Omega} \alpha_i v \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right) dx dy = - \iint_{\Omega} v \vec{\nabla} \alpha_i \vec{\nabla} A_z dx dy + \int_{\Gamma} v \alpha_i \frac{\partial A}{\partial n} d\Gamma \quad (III. 15)$$

En remplaçant (III.15) dans l'équation (III.13) on aura :

$$- \iint_{\Omega} v \vec{\nabla} \alpha_i \vec{\nabla} A_z dx dy + \int_{\Gamma} v \alpha_i \frac{\partial A}{\partial n} d\Gamma + j\omega \iint_{\Omega} \alpha_i \sigma A_z dx dy = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot j_z dx dy \quad (III. 16)$$

Avec Γ le contour sur le quel repose la surface Ω .

En considérant des conditions aux limites type Dirichlet ou Neumann homogène, le terme sur la frontière s'annule :

$$\int_{\Gamma} v \alpha_i \frac{\partial A}{\partial n} d\Gamma = 0$$

L'expression (III.16) devient alors :

$$- \iint_{\Omega} v \vec{\nabla} \alpha_i \vec{\nabla} A_z dx dy + j\omega \iint_{\Omega} \alpha_i \sigma A_z dx dy = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot j_z dx dy \quad (III. 17)$$

Sachant que :

$$A_z = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_j \quad (III. 18)$$

En remplaçant (III.18) dans (III.17) nous obtenons :

$$\sum_{j=1}^N \left(- \iint_{\Omega} v \vec{\nabla} \alpha_i \vec{\nabla} \alpha_j dx dy \right) A_j + j\omega \sum_{j=1}^N \left(\iint_{\Omega} \sigma \alpha_i \alpha_j dx dy \right) A_j = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot j_{sz} dx dy \quad (III. 19)$$

L'équation (III.19) peut être écrite pour tous les nœuds du domaine sous la forme algébrique, on obtient alors l'expression suivante, [4] [24] :

$$[M] \cdot [A] + j\omega [L] \cdot [A] = [K] \quad (III. 20)$$

Avec :

$$[M] = M_{ij} = - \iint_{\Omega} \nu \vec{\nabla} \alpha_i \vec{\nabla} \alpha_j dx dy$$

$$[L] = L_{ij} = \iint_{\Omega} \sigma \alpha_i \alpha_j dx dy$$

$$[K] = K_{ij} = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot j_{sz} dx dy$$

$$[A] = \bar{A} = A_r + jA_i$$

Où A_r est la partie réel et A_i est la partie imaginaire.

3.2.2.2. cas axisymétrique

$$[M] = M_{ij} = - \iint_{\Omega} \nu \vec{\nabla} \alpha_i \vec{\nabla} \alpha_j dr dz$$

$$[L] = L_{ij} = \iint_{\Omega} \sigma \alpha_i \alpha_j \frac{dr dz}{r}$$

$$[K] = K_{ij} = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot j_{s\varphi} dr dz$$

3.2.2.3. Organigramme de calcul par éléments finis

Pour l'implémentation du modèle sous environnement ' MATLAB', on procédera à plusieurs étapes pour définir la solution de l'équation décrite précédemment citées peuvent se résumer sous la forme de l'organigramme suivant, [9] [10]:

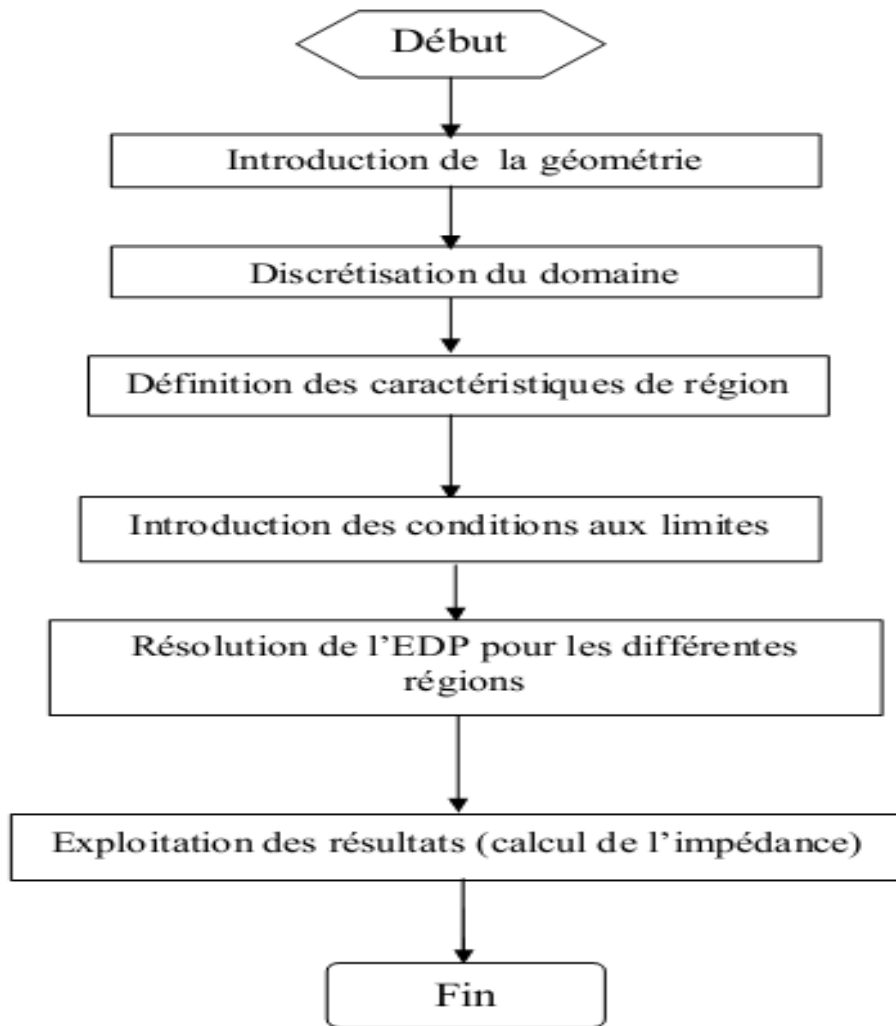


Figure III. 3–Organigramme de calcul par éléments finis [3].

III.4. Conclusion

Les équations étant formulées, ce troisième chapitre a fait l'objet d'une présentation des méthodes analytiques, numériques, ou les méthodes semi analytiques pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles. La résolution dans notre mémoire est basée sur la méthode des éléments finis, [4].

Comme le logiciel COMSOL Multiphysics est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel. C'est pour ces raisons qu'on jugé utile d'utilisé ce logiciel comme outil de simulation pour les différent cas possible du contrôle non destructif par capteurs à courants de Foucault qui ferons l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV.

Résultats de simulation

IV. Résultats de simulation :

IV.1. Introduction :

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

Ce logiciel est un outil de conception et de modélisation dont l'avantage principal est de ne pas être dédié à un domaine d'application particulier. Il rassemble un ensemble d'outils et une bibliothèque de modèles prédéfinis permettant la simulation de tout processus physique pouvant être décrit par des EDP, y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF, et il peut même simuler des géométries 3D complexes

Une simulation électromagnétique avec COMSOL se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. Une simulation avec COMSOL se décompose en trois étapes principales : le pré-traitement, le calcul et le post-traitement. L'étape de pré-traitement inclut la description géométrique et physique du domaine de travail, la détermination des conditions aux limites et la discrétisation du domaine sur un maillage. Lorsque le problème est complètement défini, l'étape du calcul est consacrée à la résolution numérique en utilisant les différents solveurs proposés par COMSOL. Finalement, le post-traitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement. [25][26]

Le COMSOL multiphysics a le pouvoir de travailler avec des liens pour des autres programmes comme MATLAB.

Les dispositifs considérés pour la modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault sont :

- Capteur par CF en mode absolu axisymétrique pour deux pièces conductrices et l'autre ferromagnétique.
- Capteur par CF en mode absolu non-axisymétrique pour des différents paramètres.
- Capteur par CF en mode différentielle axisymétrique pour deux pièces l'une conductrice et l'autre ferromagnétique.
- utilisation d'un inducteur supposé comme un fil basé sur la détection du champ magnétique pour deux types de matériaux ferromagnétique et conducteur.
- Simulation en 3D. on se limitera à la présentation à la visualisation de la répartition des courants de Foucault, lignes de champs et densité des courants induits.

IV.2. Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 4.3

L'interface de COMSOL peut être séparée en quatre parties. À gauche, on retrouve le *Model Builder* où il est possible de définir des variables et autres paramètres du problème (*Parameters*), le modèle (*Model*) où se retrouvent la géométrie (*Geometry*), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles de physique s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (*Mesh*). Le *Model Builder* 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 *Model Builder*, 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 4.3 sont présentés à la figure IV.1.

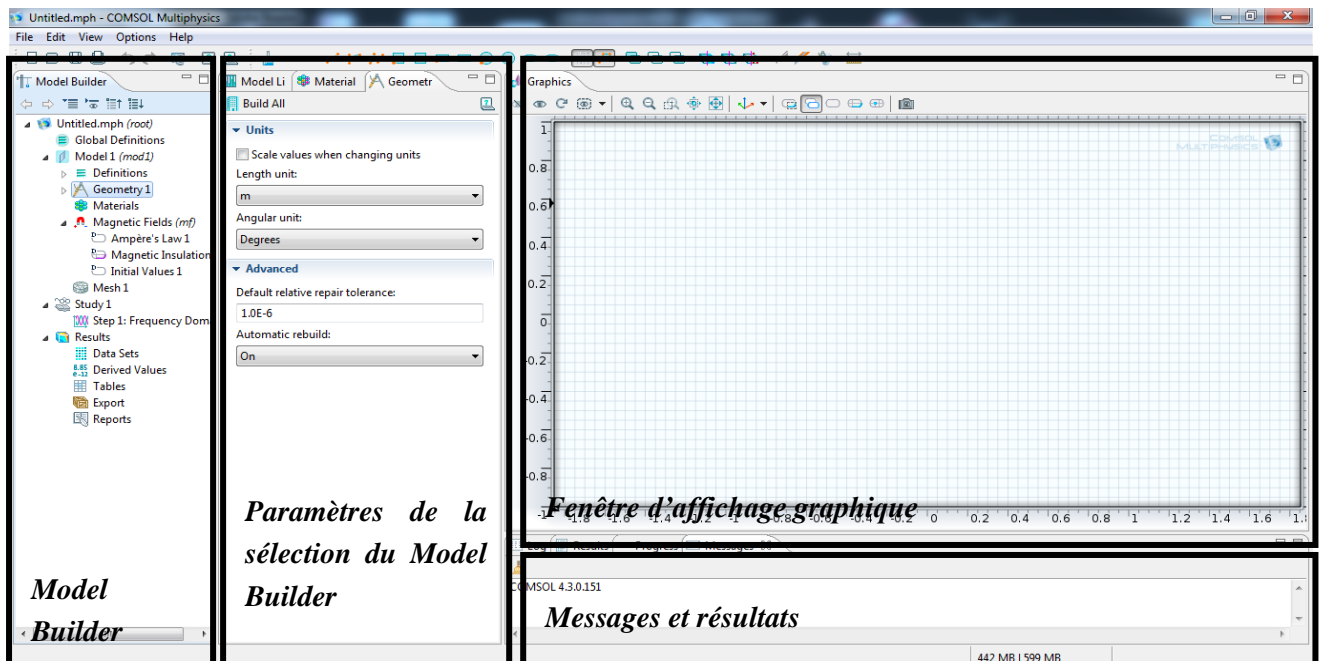




Figure IV.1 Interface utilisateur de COMSOL 4.3.

4.1.1. Création du modèle de simulation

Ouvrez une nouvelle simulation COMSOL, choisissez le modèle spatial en 2D, cliquez sur *Next* (). Vous devez par la suite choisir le modèle physique approprié. Sélectionnez le modèle *magnetic fields (mf)* dans la catégorie *AC/DC*. Une fois la sélection du modèle effectué, vous devez sélectionner le type d'étude désiré. Sous *Preset Studies*, choisissez le cas d'étude en régime permanent (*frequency domain*), puis cliquez sur *Finish* (). Sauvegardez la simulation dans votre répertoire personnel.

Dans le *Model Builder*, faites apparaître le menu contextuel (clic droit de la souris) de *Geometry* et cliquez sur *square* (voir Figure IV.2). Vous pouvez maintenant entrer les différentes démentions relatives au problème :

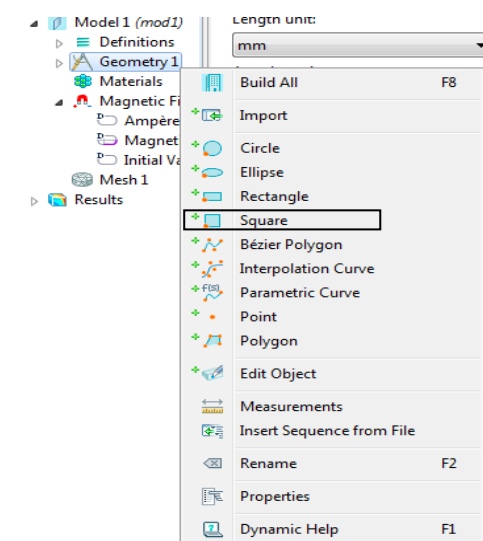


Figure IV.2 Les étapes pour dessiné un carré.

Dans nôtre exemple on a besoins 3 carré (le domaine d'étude et les 2 carré pour la bobine différentielle) avec le démentions suivantes :

La longueur de domaine d'étude (side length) :10

La position du domaine d'étude(x,y) :0,0

La longueur de la 1ere bobine : 1

La position 1ere bobine (x,y) : (3,4)

La longueur de la 2eme bobine : 1

La position 1eme bobine (x,y) : (5,4)

Pour entrer ces démentions cliqué sur *square* (voir la figure IV.3).

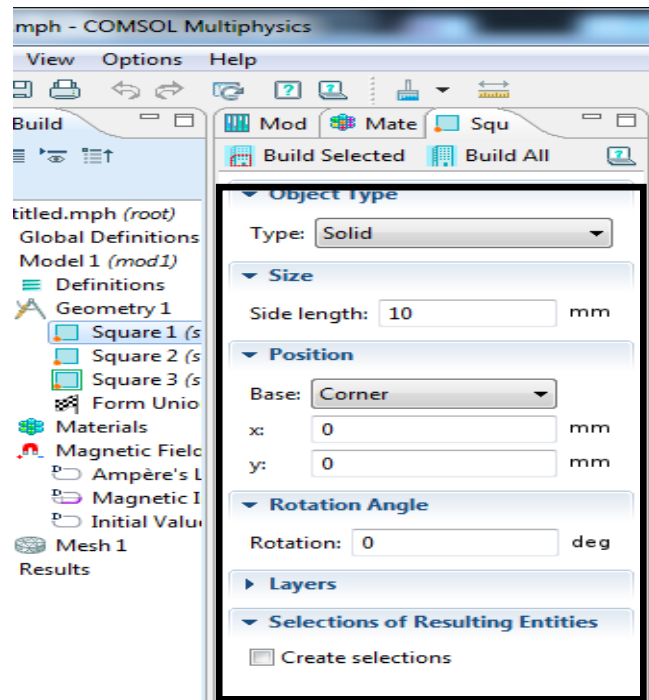
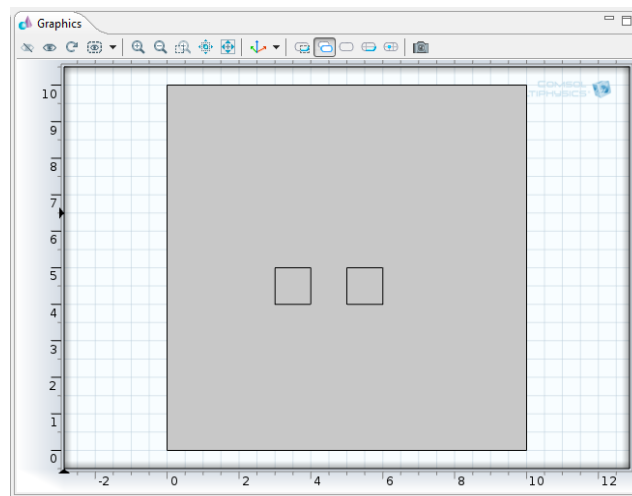


Figure IV.3 Les démentions du carré.

Après cette opération cliquez sur *Build All* () dans la fenêtre d'affichage graphique vous trouvez (voir la figure 4)



4.1.2. Ajout des propriétés du matériel composant la plaque

Faites apparaître le menu contextuel de *Materials* dans le *Model Builder* puis sélectionnez *Open Material Browser*. Choisissez *Air* et *Copper* sous l'onglet *Built-In* puis ajoutez-le au modèle. *Air* et *Copper* est maintenant sous l'onglet *Materials*, l'air est associé dans les trois domaines par défaut. Les domaines associés à un matériau sont surlignés en bleu lorsque ce dernier est sélectionné. Pour le cuivre (*Copper*) on a sélectionné les deux petits carrés.

5 valeurs initiales, condition aux limites, lois d'ampères :

Vous trouverez cette partie dans (*magnetic field(mf)*) dans *model builder* les conditions aux limites (*magnetic insulation*) et les condition initiales (*initial values*) sont posé automatiquement zéro et vous pouvez les changé.

Pour les nombres des spires et la valeur du courant d'alimentation dans le *Model Builder* (clic droit de la souris) de *Magnetic Field (mf)* et cliquez sur *Multi-Turn Coil Domain* pour les deux bobines (voir Figure IV.5)

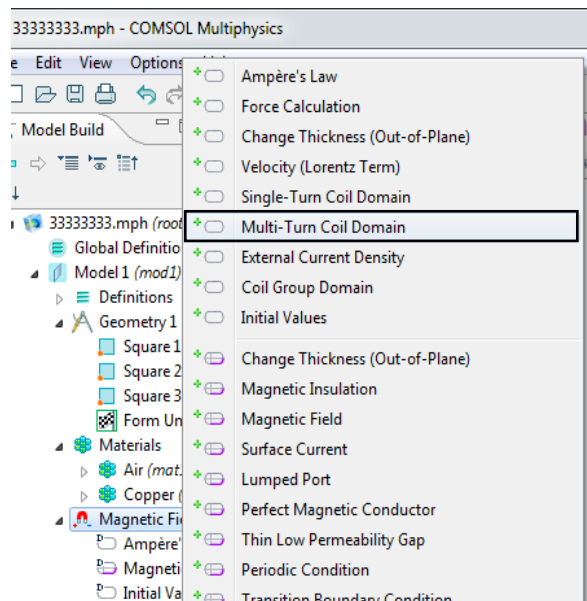


Figure IV.5 Création du domaine pour les bobines

Après cette opération dans la partie *Multi-Turn Coil Domain* sélectionnez sur les deux petits carrés et vous trouverez les cases pour remplir le nombre de spires (10 spire par défaut) et la valeur du courant d'alimentation (1 [A] par défaut).

4.1.3. Maillage

Cliquez sur *Mesh* et choisissez comme taille de maillage *Coarse*, laissez le maillage défini en tant que *Physics-controlled mesh*. Cliquez sur *Build All*, il est maintenant possible de voir le maillage triangulaire (option par défaut). Il est possible de définir manuellement les paramètres de maillage (clic droit de la souris) sur *Mesh*.

À ce stade, nôtre modèle devrait ressembler à celui présenté à la figure IV.6.

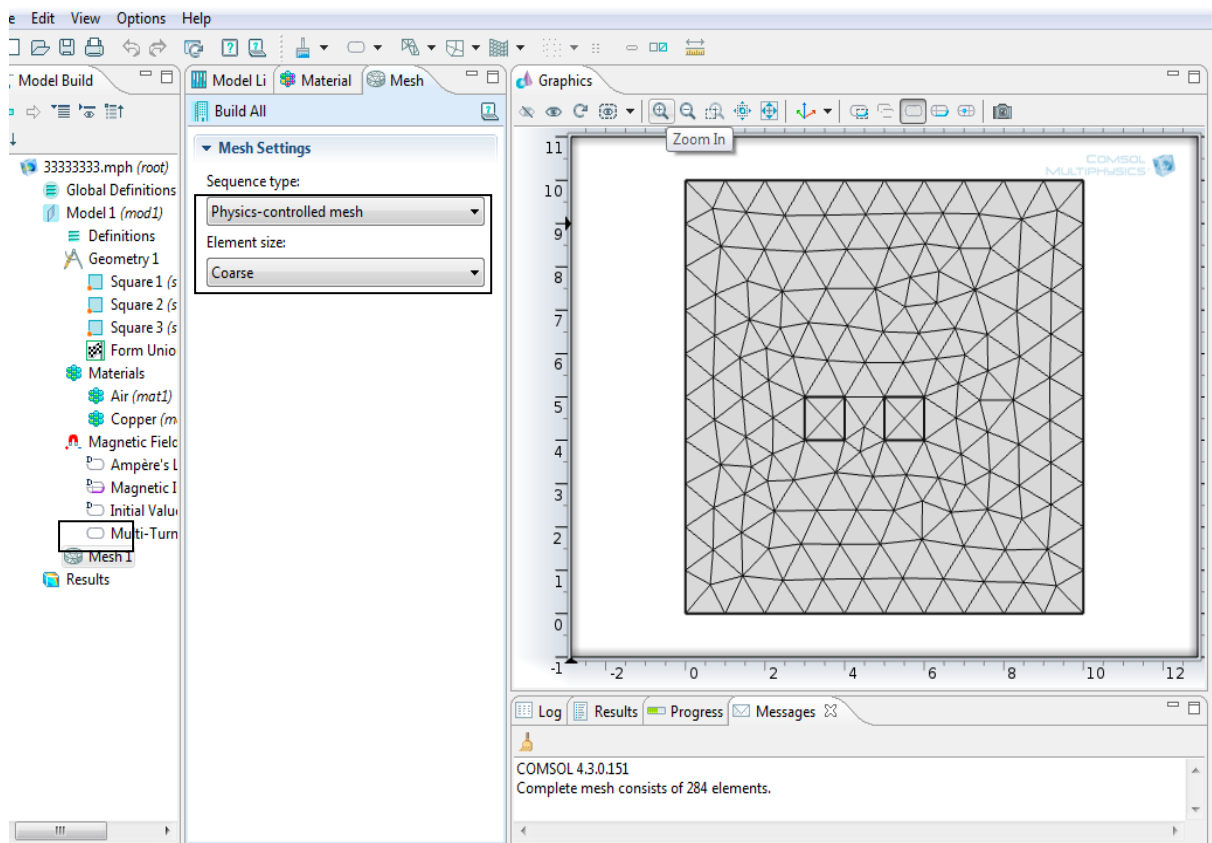



Figure IV.6 La méthodologie du maillage.

4.1.4. Simulation et traitement des résultats

Pour effectuer la simulation, cliquez sur *Study* dans le *Model Builder* puis sur *Frequency Domain* on pose un fréquence 500 Hz puis clic sur *Compute* (). COMSOL se chargera de choisir les paramètres du solveur en fonction des modèles physiques choisis. Si vous désirez changer les paramètres du solveur, ces derniers sont accessibles à partir de l'onglet *Study*, mais cela n'est pas nécessaire dans le cadre de ce tutoriel.

Le résultat que vous devriez obtenir est présenté à la figure IV.7.

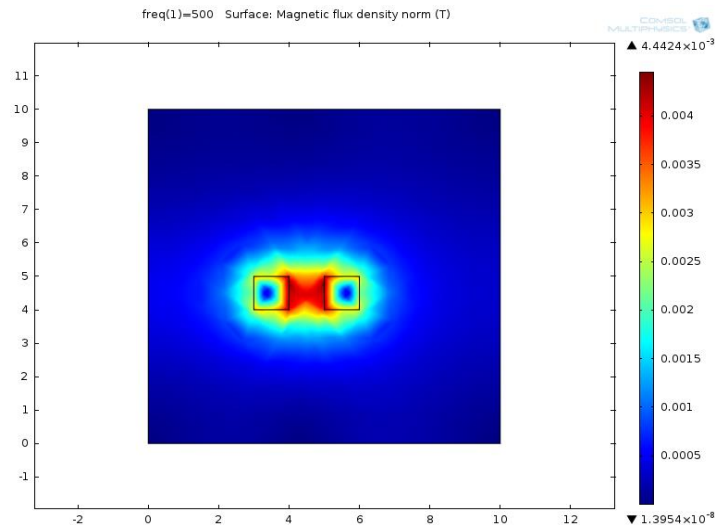



Figure IV.7 Résultat de simulation pour l'induction normal

Vous devez maintenant tracer le profil d'un paramètre électrique ou magnétique selon x à une hauteur de y . Pour ce faire, vous devez créer une ligne de coupe (*cut line*). Effectuez un clic droit sur *Data Sets* sous l'onglet *Results* et créez une ligne de coupe en deux dimensions (*Cut Line 2D*). Définissez la position des points à chaque bout de la ligne de manière à placer cette dernière à une hauteur de y . Vous pouvez cliquer sur *Plot* () pour vérifier que la ligne de coupe se situe à l'endroit désiré.

Vous allez maintenant créer un graphique en deux dimensions. Effectuez un clic droit sur *Results* et choisissez *2D Plot Group*. Ajoutez une surface (*Surface*) ainsi qu'une surface de flèches (*Arrow Surface*) au groupe de graphiques en 2D que vous venez de créer. Dans *Surface 1*, affichez la magnitude du gradient de température et dans *Arrow Surface 1*, affichez le gradient de température. Le graphique que vous devriez obtenir est présenté à la figure IV.8.

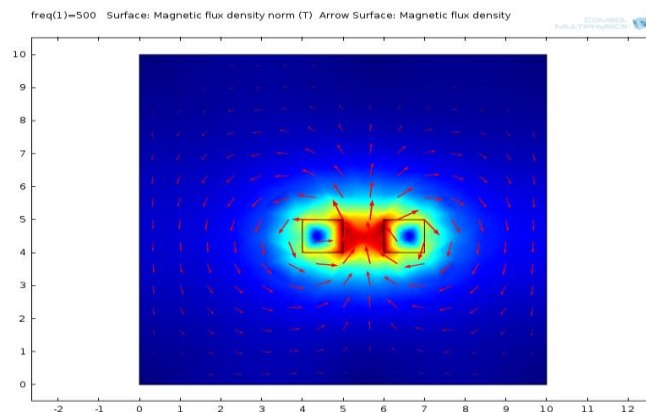



Figure IV.8 Magnitude et direction du gradient de la densité magnétique normal

Maintenant, créez un groupe de graphiques en une dimension en effectuant un clic droit sur *Results* et en choisissant *1D Plot Group*. Une fois le groupe de graphiques créé, faites un clic droit sur ce dernier et choisissez l'option *Line Graph*. Une fois le *Line Graph* sélectionné, sous l'onglet *Data*, choisissez la ligne de coupe que vous venez de créer comme *Data Set*. Sous *y-Axis Data*, entrez *mf.Bnorm* dans l'expression. En cliquant sur

Replace Expression (), vous avez accès à la listes de différentes variables calculées par COMSOL si vous désirez tracer des courbes représentant d'autres variables. Sous *x-Axis Data*, choisissez Expression plutôt que *Arc Length* et entrez x afin d'afficher la courbe en fonction de la position en x plutôt qu'en fonction de la longueur de la ligne de coupe. Il est aussi possible si vous le désirez de changer les titres du graphique et des axes. La figure IV.9 présente la ligne de coupe et la figure IV.10 présente le graphique du profil de température dans la plaque à une hauteur de y.

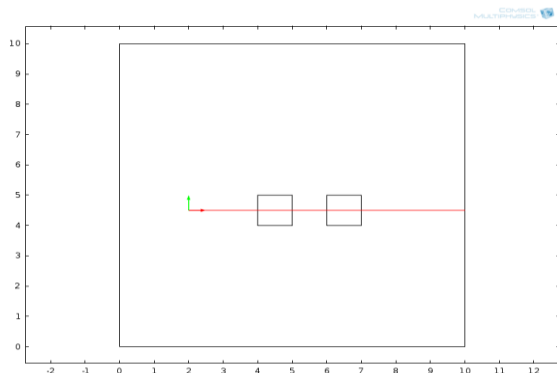


Figure IV.9 Ligne de coupe

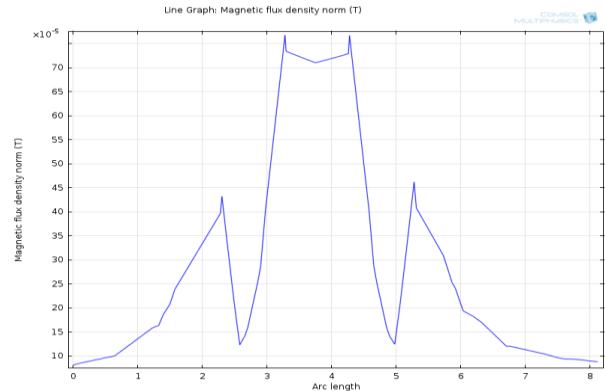


Figure IV.10 Profil du la densité magnétique normal

IV.3. Mode absolu 2D axisymétrique (bobine encerclant)

Pour toute la simulation on conserve tous les paramètres géométriques de la cible même

Caractéristique des dispositifs

	Le Capteur	Le tube	Le défaut
Caractéristiques physique	Courant d'excitation : 0.18 A Fréquence d'alimentation : 450Hz Nombre de spire : 10 spires Perméabilité relative : 1	Type de matériau : Aluminium de : Perméabilité relative : 1 H.m Conductivité électrique : $3.774 \cdot 10^7$	
Caractéristique géométrique	Rayon interne : 1.6 cm Rayon externe : 2.3 cm Lift-off : 1 mm	Rayon : 1.5 cm Hauteur : 15 cm Lift-off : 1mm	Longueur : 0.5 cm Largeur : 0.75 cm

Tableau VI. 1 Paramètres du système en mode absolu axisymetrie.

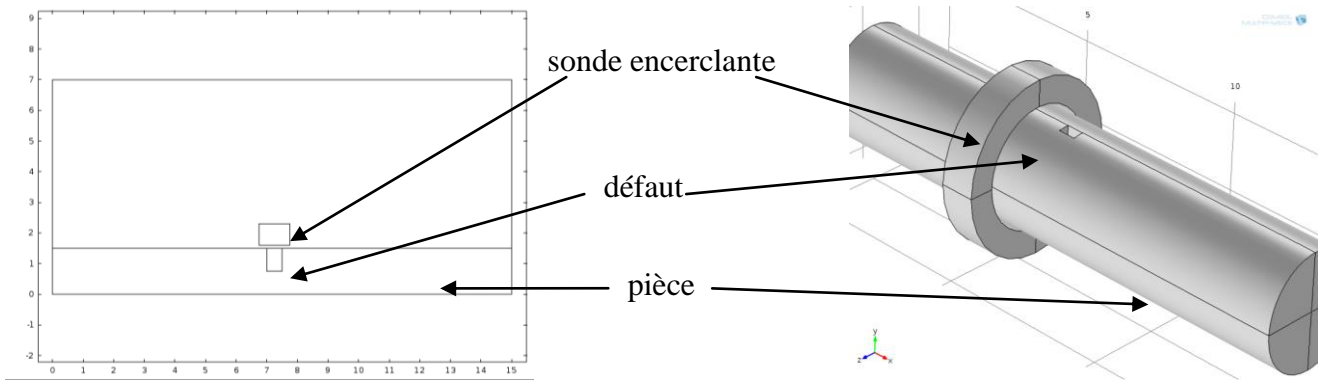


Figure IV.11 Représentation du problème en 2D axisymétrie et 3D

IV.3.1. Domaine de résolution et conditions aux limites:

La figure (VI.12) donne un aperçu sur la géométrie du dispositif à étudier et les conditions aux limites qui lui sont associées (condition de Dirichlet).

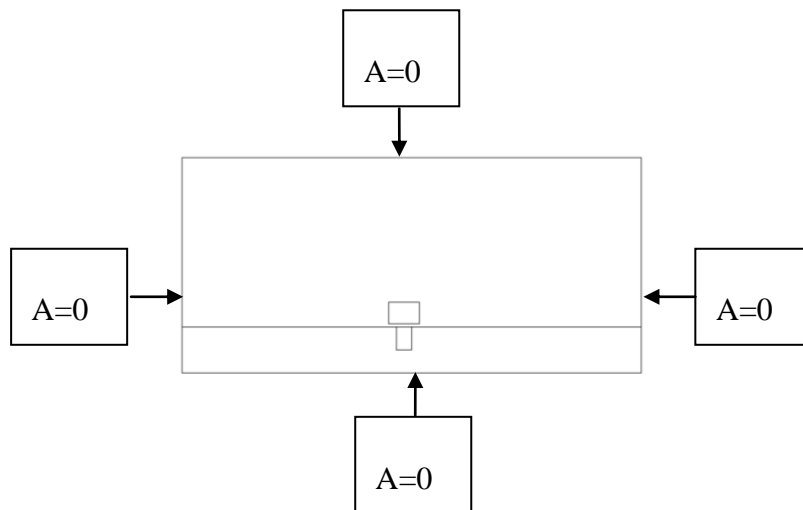


Figure IV.12 Les conditions aux limites pour le domaine d'étude

La figure (VI.13) présente la désertisation du domaine qu'on se propose d'étudier avec un maillage réalisé avec le logiciel COMSOL.

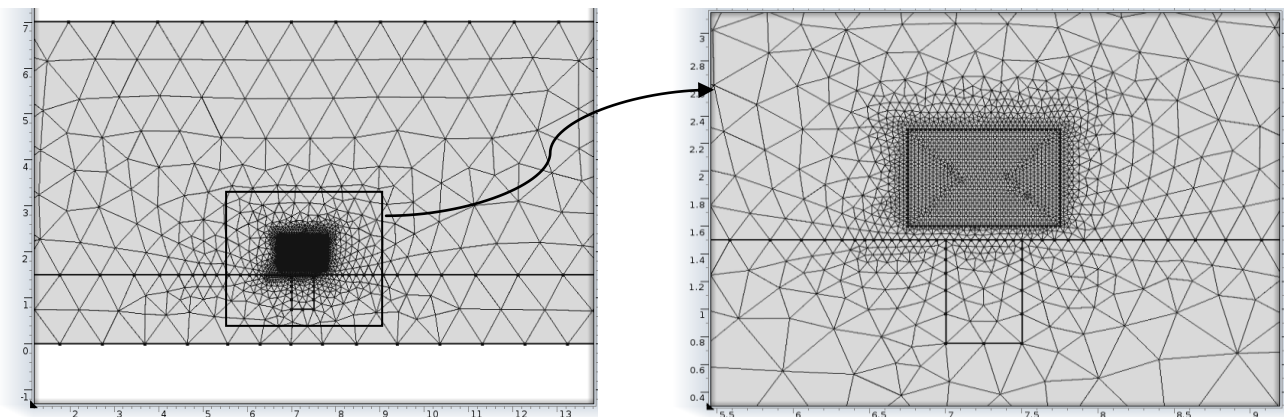


Figure IV.13 Le maillage du domaine d'étude

Le maillage consiste 4178 éléments triangulaires. Concentré dans la sonde pour décrocher de bons résultats.

IV.4. Méthode de calcul de l'impédance du capteur

Le CND par courants de Foucault repose sur l'analyse des différentes grandeurs électriques et magnétiques du capteur lors de son déplacement par rapport aux défauts, ces grandeurs sont influencées par de nombreux paramètres. Une fois les valeurs de potentiel vecteur magnétique en tout nœud de la région maillée sont déterminées. L'impédance de la bobine qui est notre paramètre principal peut être calculé en utilisant l'une des trois approches suivantes : [2],[4]

IV.4.1. Approche magnétique :

Cette méthode est basée sur la détermination du flux traversant la bobine, donc l'induction magnétique à partir de cette dernière on peut déduire les valeurs du potentiel vecteur magnétique.

Considérons une bobine de section s composée de N spires traversées par un courant d'intensité I . Le flux traversant un tube de courant d'un rayon r et de section s' , est donné par l'expression suivante :

$$\Phi = k \iint_{s'} \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot ds' \quad (\text{VI. 1})$$

k : est le nombre de conducteurs dans la section s' .

Sachant que :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$$

L'application du théorème du rotationnel (théorème de Stokes), permet d'avoir :

$$k \iint_{s'} \text{rot} \vec{A} \cdot \vec{n} \cdot ds' = \oint_C \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (\text{VI. 2})$$

C : contour fermé s'appuyant sur s' .

Après intégration

$$\Phi = k \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot A$$

Puisque notre problème est axisymétrique le potentiel vecteur magnétique ne représente que la composante ortho-radiale donc :

$$\Phi = k \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot A_z$$

Le flux total traversant la bobine, est alors donné par :

$$\Phi = \iint_s \Phi \cdot ds = \iint_s k \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot A_z \cdot ds \quad (\text{VI. 3})$$

Si on prend en compte la répartition uniforme des conducteurs dans les bobines on aura :

$$k = \frac{N}{s}$$

$$\Phi = \frac{N}{s} \cdot \iint_s 2 \cdot \pi \cdot r \cdot A_z \cdot ds$$

L'impédance est donnée par :

$$\bar{Z} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}}$$

\bar{U} : La tension d'alimentation.

\bar{I} : Le courant traversant la bobine.

$$\bar{U} = \frac{d\Phi}{dt}$$

$$I = J \cdot \frac{s}{N}$$

$$\bar{Z} = \frac{N^2}{J \cdot s^2} \cdot \iint_s 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{\partial A_z}{\partial t} ds \tag{VI.4}$$

Dans le cas d'une alimentation sinusoïdale, le potentiel vecteur magnétique obtenu est de la forme suivante :

$$A_z = A_0 \cdot e^{-j\omega t} = \text{Re}(A_z) + j\text{Im}(A_z) \tag{VI.5}$$

Et l'expression de l'impédance devient :

$$\text{Re}(\bar{Z}) = -\frac{N^2}{J \cdot s^2} \cdot \omega \cdot \iint_s 2 \cdot \pi \cdot \text{Im}(A_z) \cdot ds \tag{VI.6}$$

$$\text{Im}(\bar{Z}) = \frac{N^2}{J \cdot s^2} \cdot \omega \cdot \iint_s 2 \cdot \pi \cdot \text{Re}(A_z) \cdot ds \tag{VI.4}$$

IV.4.2. Approche électrique :

Le système (capteur-cible) est équivalent à un transformateur dont le secondaire est en court circuit:

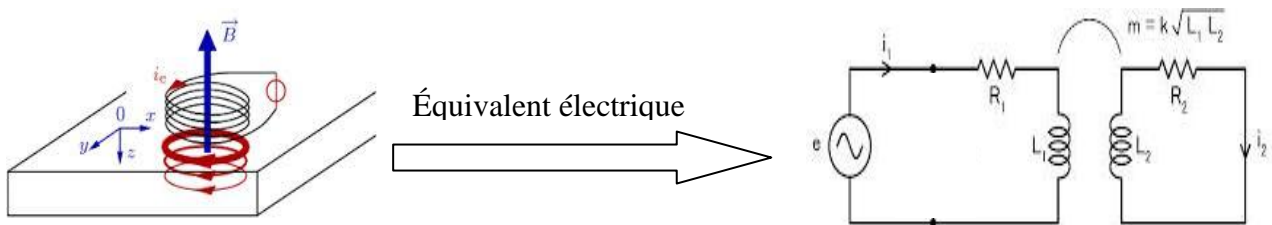


Figure IV.14 Le circuit électrique équivalent du système capteur-cible.

On a pour le primaire :

$$e = R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 - j\omega m I_2 \tag{VI.7}$$

Pour le secondaire :

$$0 = R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 - j\omega m I_1 \quad (\text{VI. 8})$$

Tel que :

$$m = k\sqrt{L_1 L_2}$$

$$Z = e / I_1$$

e : La source d'excitation [V]

m : L'inductance mutuelle [H].

k : Le rapport de rapprochement entre la cible et le capteur.

I_1 : Le courant du capteur [A].

I_2 : Les courants induits dans la cible [A].

Z : L'impédance totale du système [Ω].

L_1 : L'inductance propre du capteur [H].

L_2 : L'inductance propre de la cible [H].

R_1 : La résistance du capteur [Ω].

R_2 : La résistance de la cible [Ω].

IV.4.3. Approche énergétique :

Le comportement électromagnétique de l'ensemble bobine-matériau à contrôler peut être étudié au moyen d'une analogie électrique : un circuit constitué de deux bobines couplées de manière inductive est équivalent à un seul circuit dont les paramètres sont ramenés à la bobine source . Il en est de même pour l'énergie dissipée par effet de joule. La résistance R vue par le capteur peut être évaluée à travers le calcul de la puissance perdue par effet de joule.

$$W_j = RI^2 \rightarrow R = \frac{W_j}{I^2}$$

L'énergie magnétique emmagasinée nous permet de déduire l'inductance L du système.

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \rightarrow L = \frac{2W_m}{I^2}$$

Ce qui permet de déduire l'impédance du système :

$$Z = R + jX = \frac{1}{I^2} (W_j + j\omega 2W_m) \quad (\text{VI. 9})$$

Avec :

R : La résistance vue par le capteur.

X : La réactance vue par le capteur.

I : Le courant traversant le capteur.

W_j : Énergie correspondant aux pertes joule dans le conducteur.

W_m : Énergie magnétique emmagasinée dans tout l'espace.

IV.5. Résultats de simulation et interprétation pour une fréquence de 500 Hz

IV.5.1. Pièce cylindrique mode absolu sans capteur de référence

Dans cette partie on utilise un contrôle avec et sans capteur de référence, c'est-à-dire une pièce étalon sans défaut, pour faire la différence entre les deux impédances des deux capteurs.

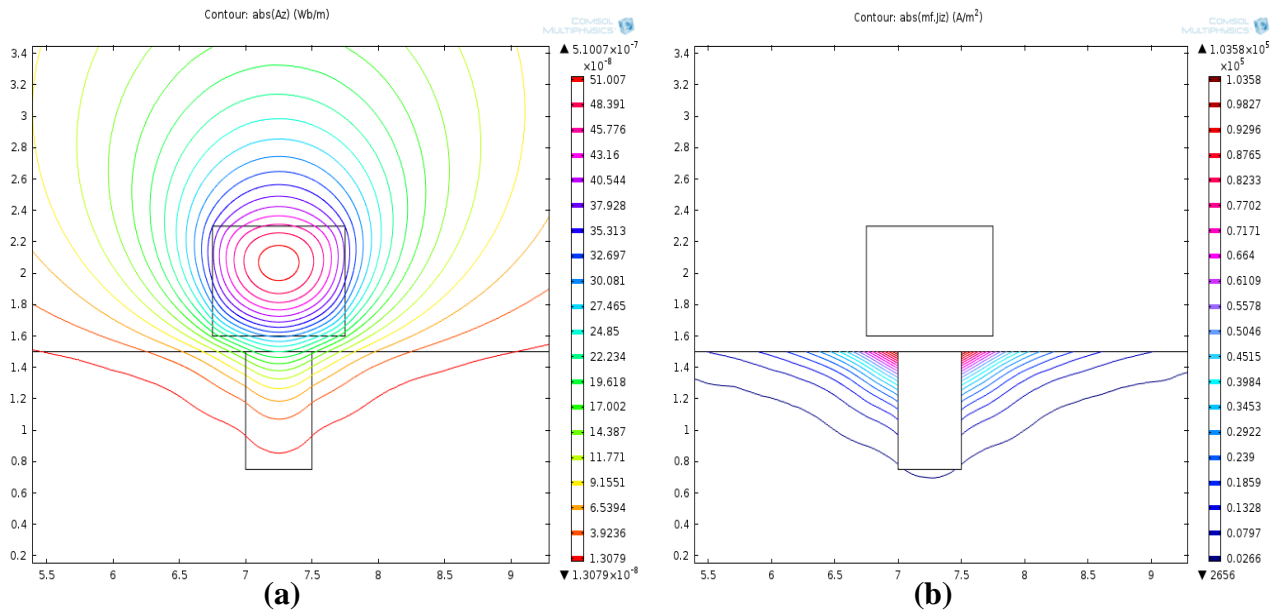


Figure IV.15 (a) Module de potentiel vecteur magnétique A_z (b) Module des courants de Foucault J_z

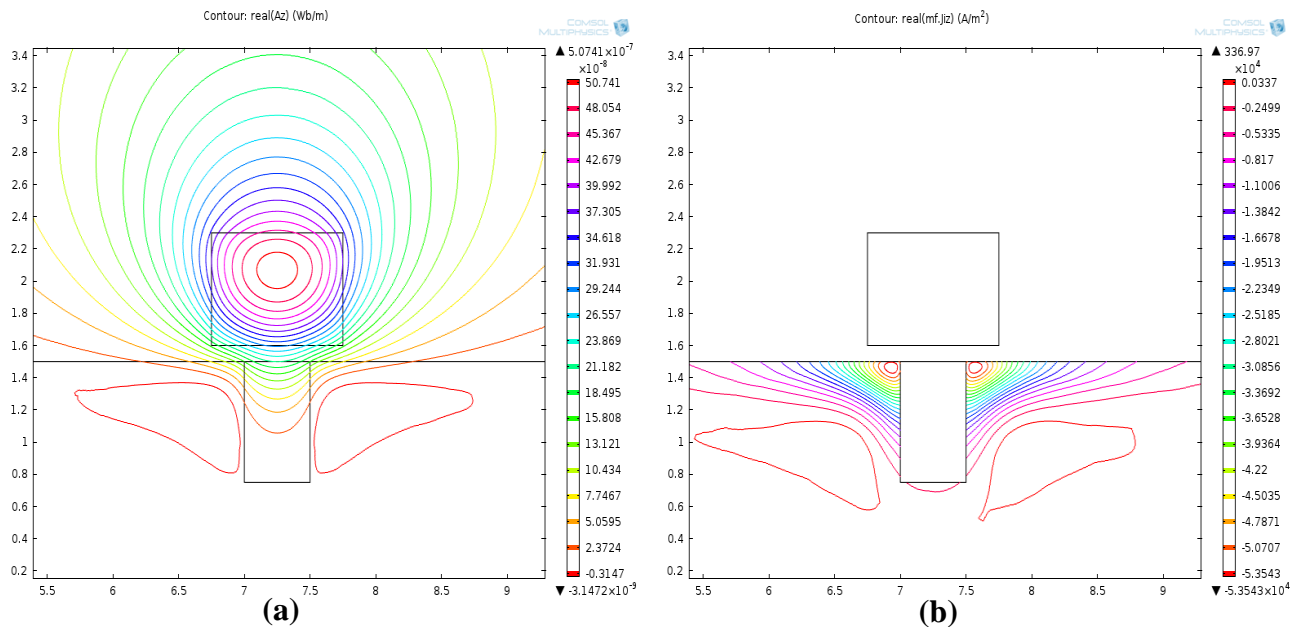


Figure IV.16 (a) La partie réelle de vecteur potentiel A_z (b) La partie réelle des courants de Foucault J_z

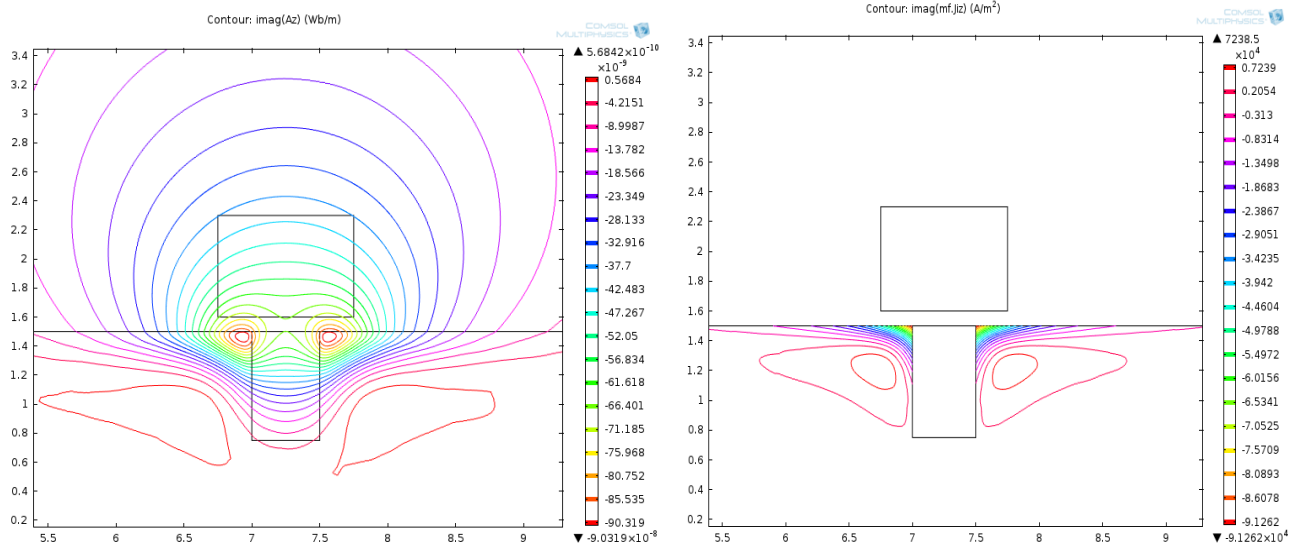


Figure IV.17 (a) La partie imaginaire de vecteur potentiel Az (b) La partie imaginaire des courants de Foucault Jiz

Les figures ci-dessus (15 à 17) représentent respectivement les lignes du module du potentiel vecteur et la partie réelle (c'est-à-dire la source) et la partie imaginaire (la partie induite dans la charge) et le module des courants induit et la partie réelle et la partie imaginaire des courants induit dans une pièce conductrice (aluminium) lorsqu'on a une bobine.

IV.5.2. Pour une pièce conductrice sans capteur de référence :

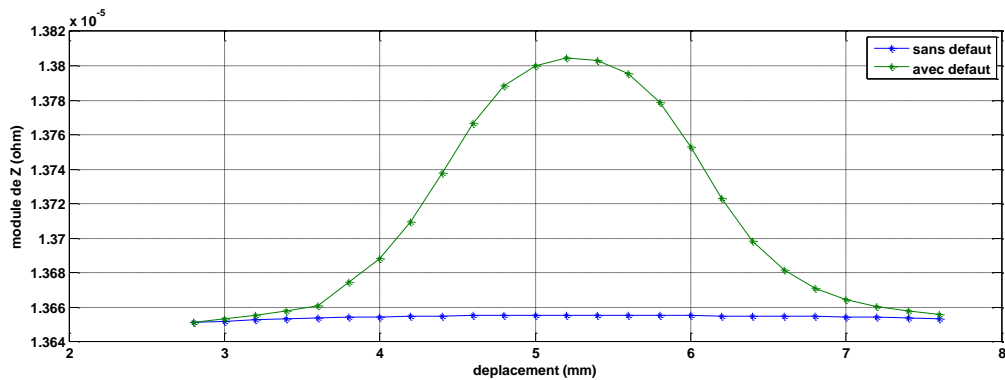


Figure IV.18 Variation de module l'impédance Z en fonction de déplacement avec et sans défaut

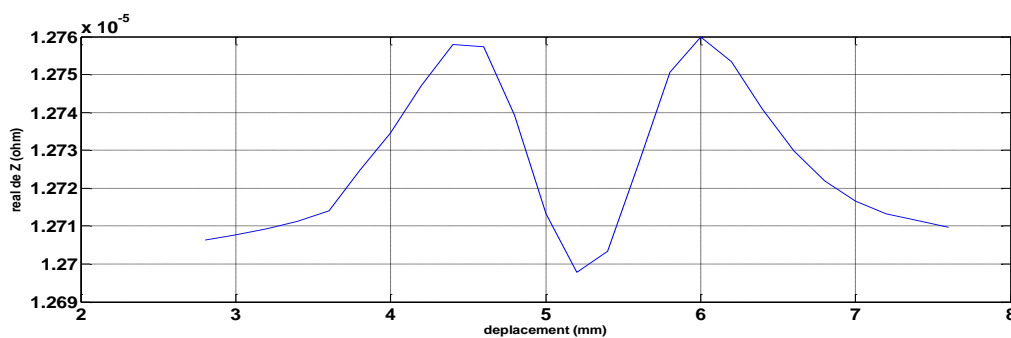


Figure IV.19 Variation de la partie réelle de Z en fonction de déplacement

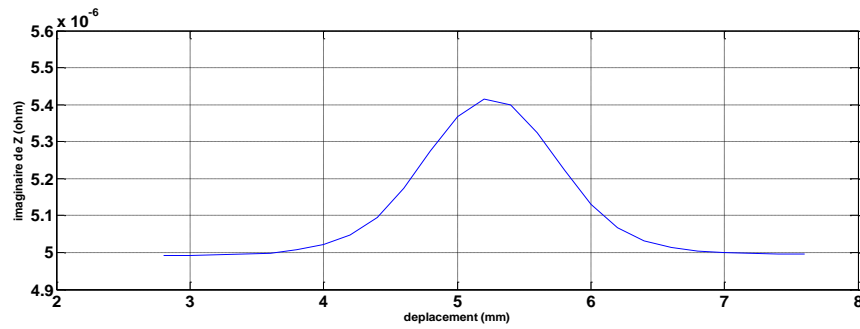


Figure IV.20 Variation de La partie imaginaire de Z en fonction de déplacement

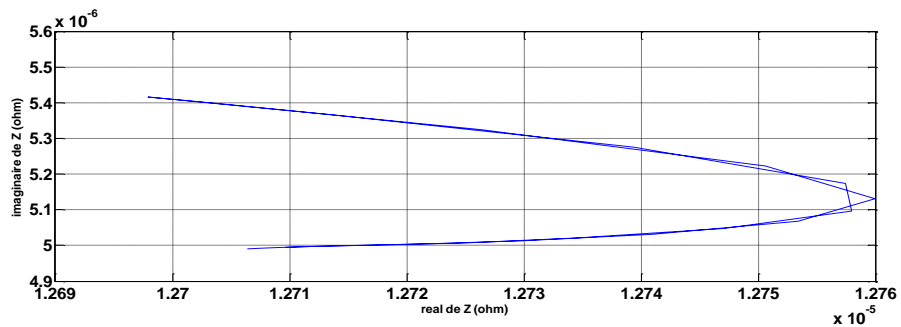


Figure IV.21 Variation de l'impédance dans le plan de phase

on remarque que la valeur de l'impédance ne démarre de zéro, cette méthode de contrôle set simple à mettre en œuvre en pratique, mais son inconvénient majeur c'est qu'elle susceptible aux différents paramètres perturbateurs (parasites)

IV.5.3. pour une pièce conductrice avec capteur de référence :

Dans cette partie en utilise un système avec mesure de référence , un deuxième capteur contrôle une pièce saine et on procède à la différence entre l'impédance des deux capteurs.

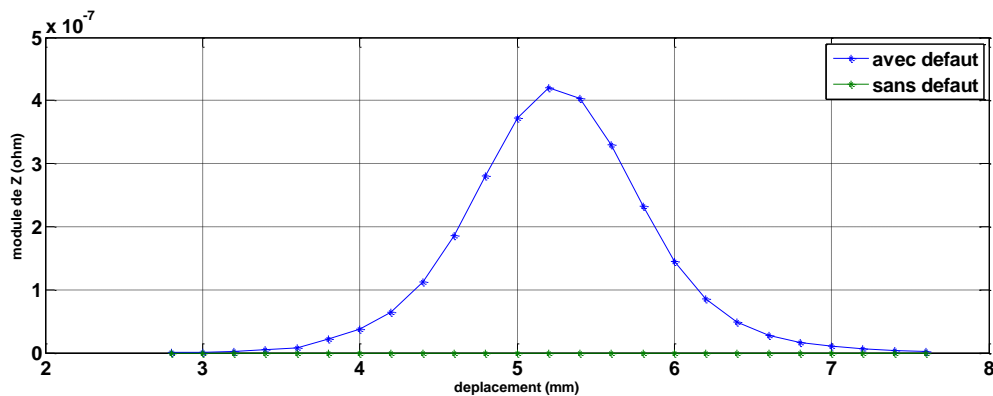


Figure IV.22 Module de l'impédance Z en fonction de déplacement avec et sans défaut

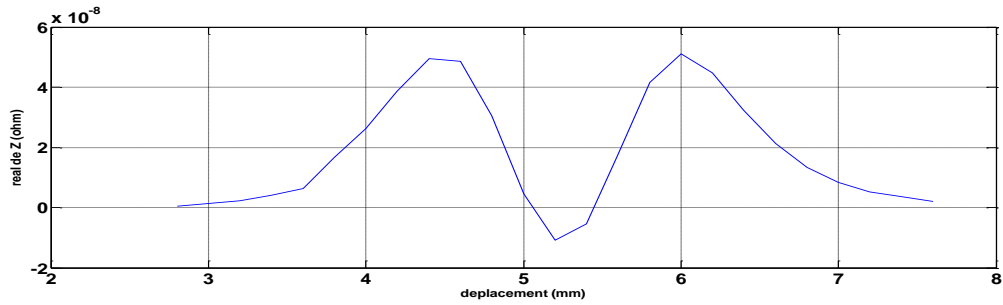


Figure IV.23 La partie réelle de Z en fonction de déplacement

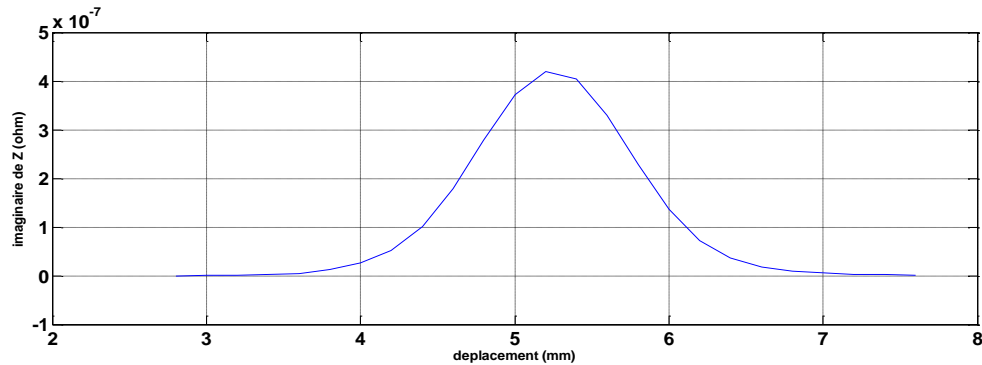


Figure IV.24 La partie imaginaire de Z en fonction de déplacement

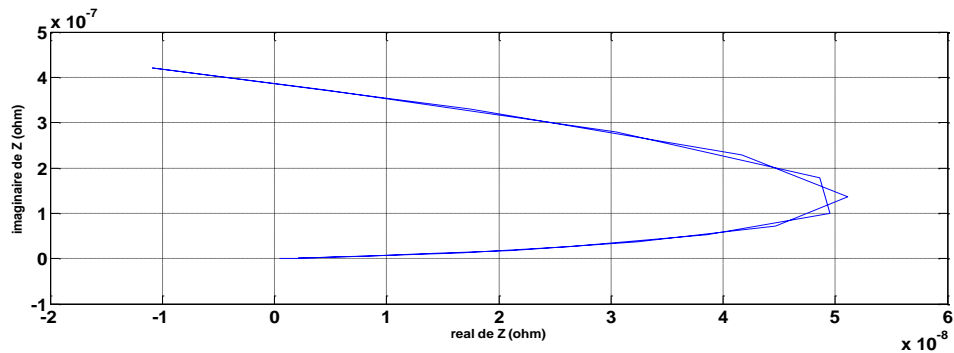


Figure IV.25 Variation de l'impédance dans le plan de phase

la première constatation qu'on peut faire c'est que l'impédance démarre de la valeur zéro, contrairement au cas précédant, cette technique permet d'éliminer les facteurs perturbateurs qui peuvent faussé le contrôle.

Les figures (18 à 25) représentent la variation du module de l'impédance et la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance en fonction de déplacement du capteur et la variation de l'impédance dans le plans de phase dans deux méthode avec et sans capteur de référence.

La comparaison entre les deux résultats de la variation de l'impédance pour les deux types de mesure avec et sans capteur de référence permet de découvrir une impédance ne varie pas lorsqu'on n'a pas un défaut la valeur de l'impédance dans le cas sans réafférence mais le capteur il garde sa propre

impédance dans le cas l'existence un capteur de référence les valeurs de l'impédance lorsqu'on n'a pas un défaut reste zéro et varie lorsqu'on a un défaut.

IV.5.4. L'influence du lift-off sur la variation de l'impédance

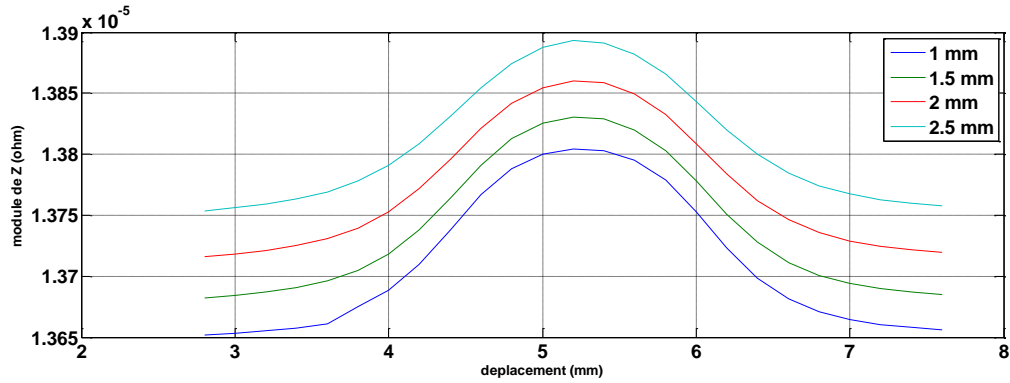


Figure IV.26 Variation du module de l'impédance en fonction de déplacement pour des différents lift-off

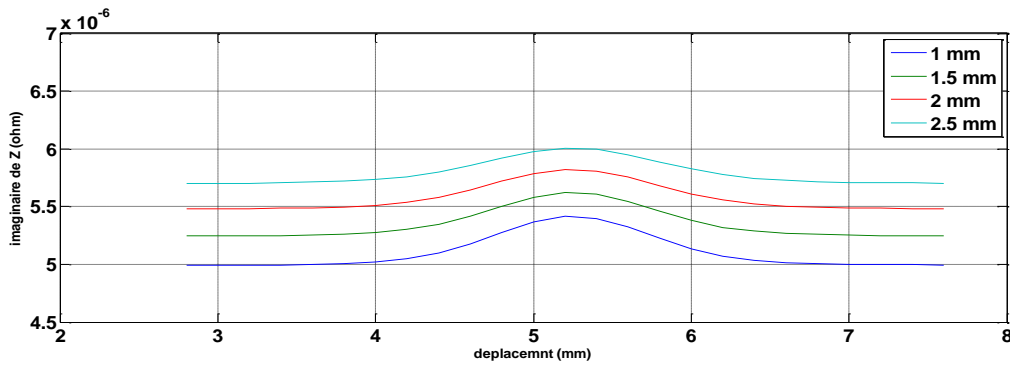


Figure IV.27 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de déplacement pour des différents lift-off

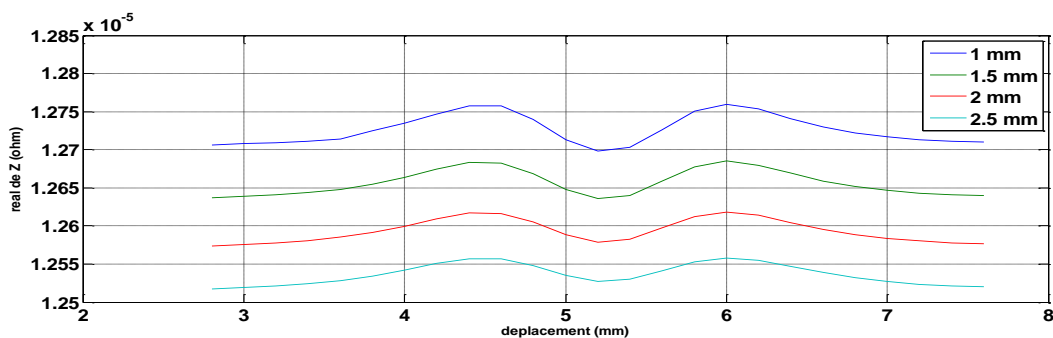


Figure IV.28 Variation de la partie réelle de l'impédance en fonction de déplacement pour des différents lift-off

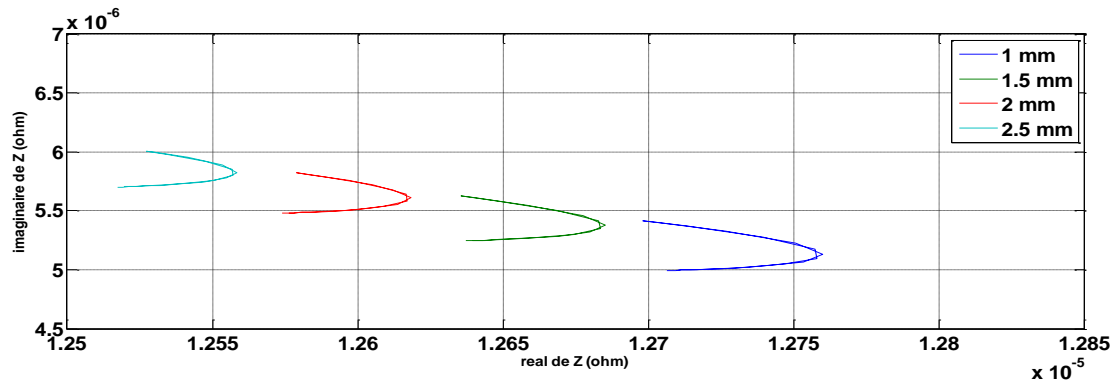


Figure IV.29 Variation de l'impédance dans le plan de phase en fonction du lift-off

Les figures (26 à 29) représentent, pour différentes valeurs du lift-off (distance capteur-pièce), la variation du module de l'impédance, de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de déplacement est cela sans capteur de référence.

On remarque que plus le lift-off augmente, plus la valeur de l'impédance augmente, c'est-à-dire variation proportionnelle, chose qui est logique étant donné que l'inverse des courants de Foucault est réduit. donc le flux totale est augmenté et par conséquent la partie imaginaire de l'augmentation de mais il y a une diminution l'évolution de l'impédance par rapport au défaut.

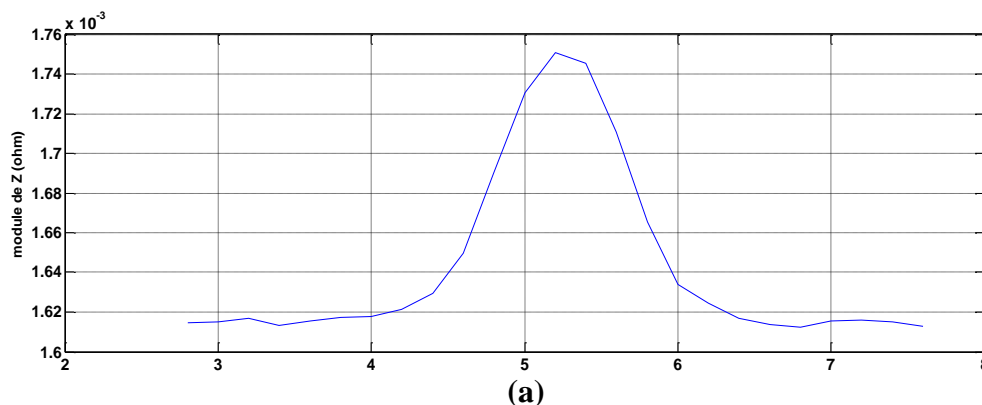
La diminution de la partie réelle de l'impédance grâce à la diminution des courants induit à cause de lift-off c'est-à-dire l'éloignement du capteur par rapport au tube.

L'évolution du module de l'impédance par rapport au défaut est diminuée car l'augmentation de l'éloignement du capteur par rapport au tube (lift-off) a cause de la diminution des courants induits dans la cible.

IV.5.5. L'influence de la variation de la fréquence d'alimentation sur le module de l'impédance

Les graphes dans la figure (30) représentent la variation du module de l'impédance en fonction de déplacement pour différentes valeurs de fréquences.

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



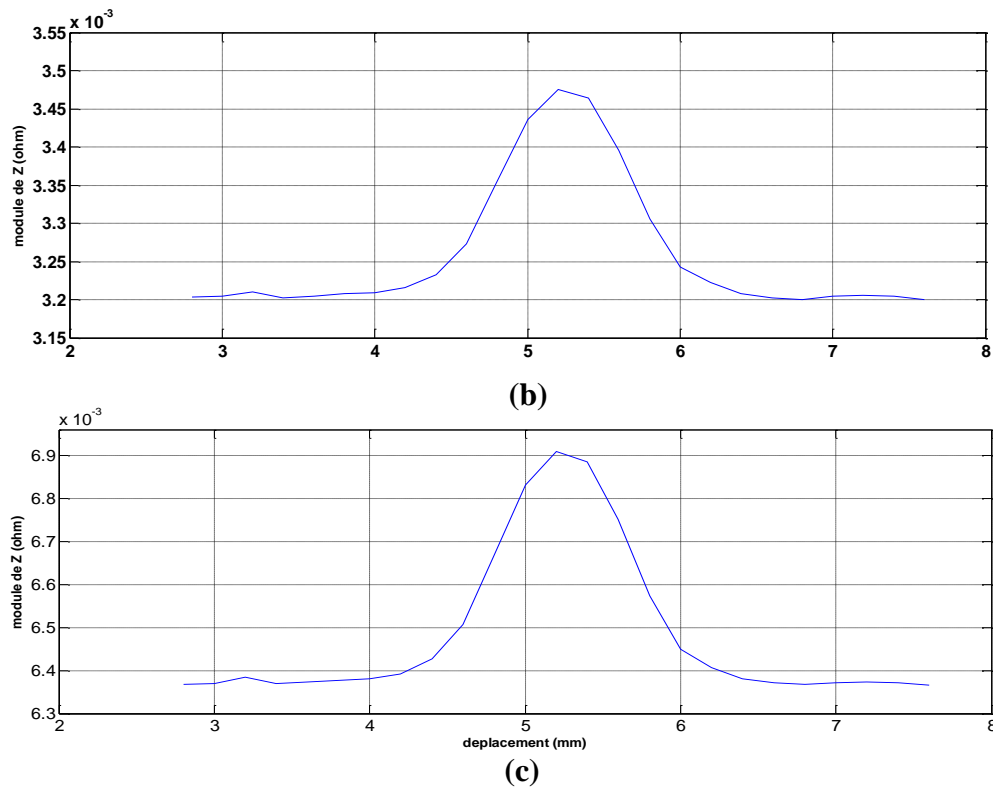
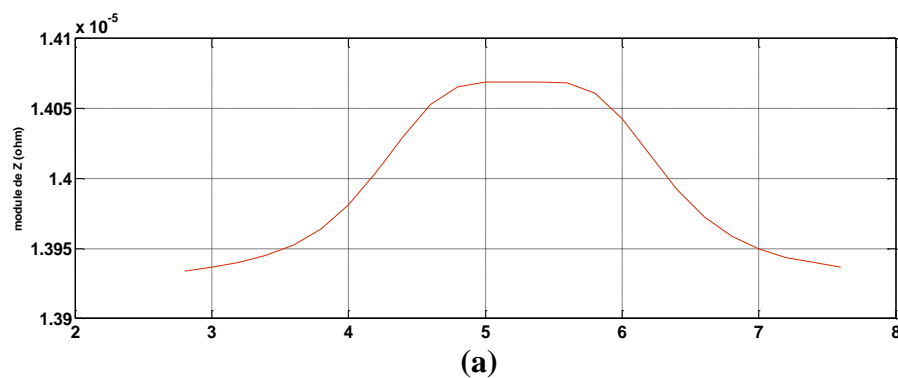
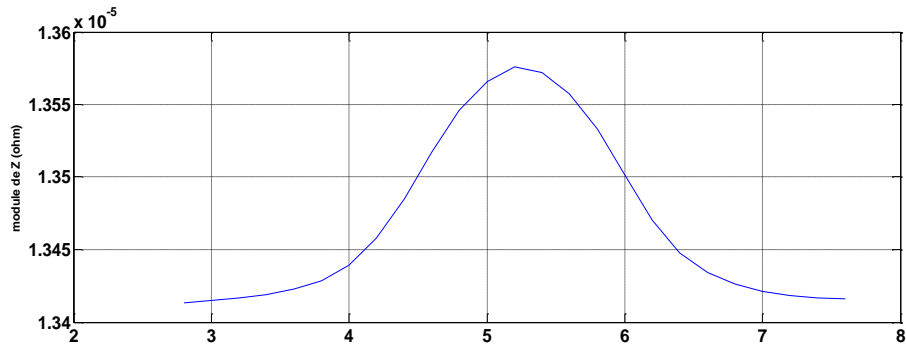


Figure IV.30 Module de l'impédance en fonction de déplacement pour des fréquences de (a) 200kHz (b) 400kHz (c) 800kHz

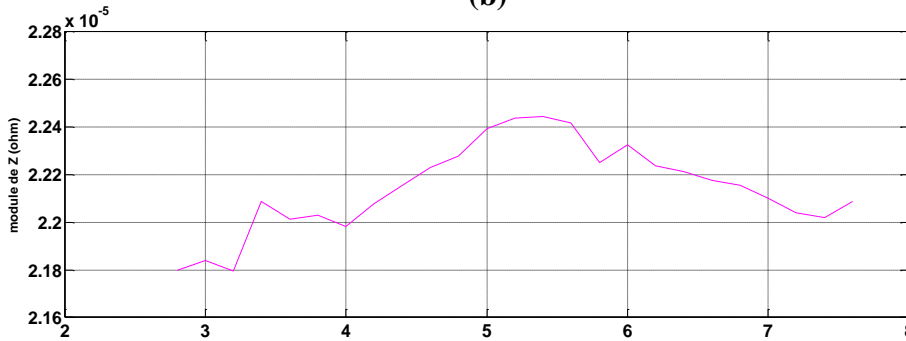
IV.5.6. La variation de l'impédance en fonction du type de matériau

Dans cette partie on va introduire l'influence du type matériaux sur l'impédance du couple capteur-cible. On a utilisé matériaux sous forme de tubes, amagnétique (conducteur) et ferromagnétique afin de constater la variation de l'impédance du capteur-cible.

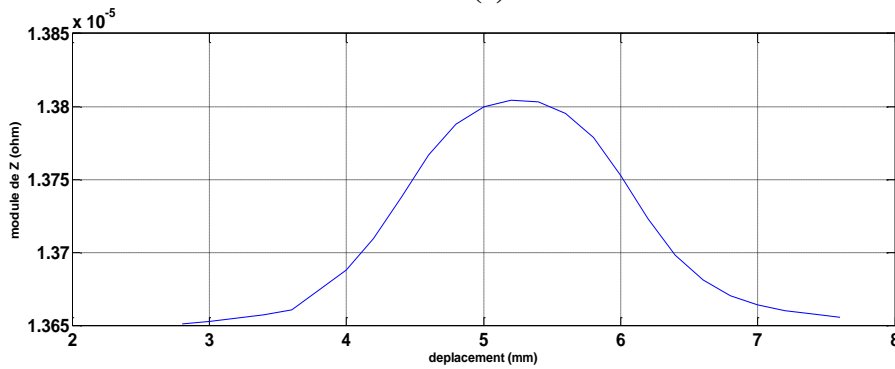




(b)



(c)



(d)

Figure IV.31 Variation de l'impédance en fonction de déplacement pour différents matériaux pour 200kHz
(a) d'aluminium 3003-H18 (b) cuivre (c) fer (d) aluminium

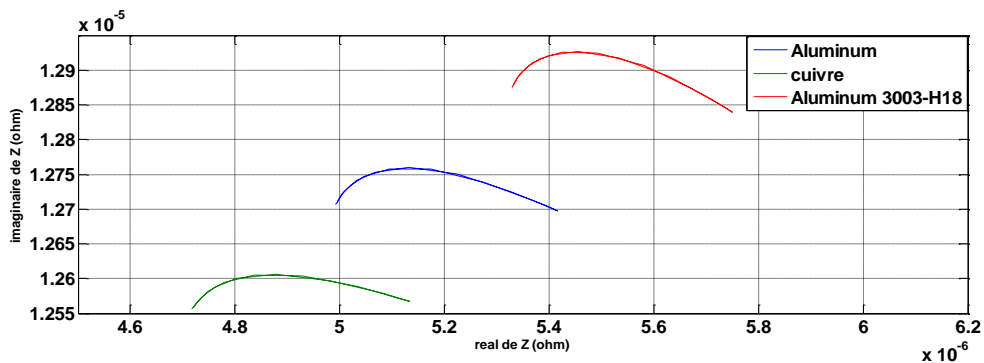


Figure IV.32 Variation de l'impédance dans le plan de phase en fonction du type de matériau

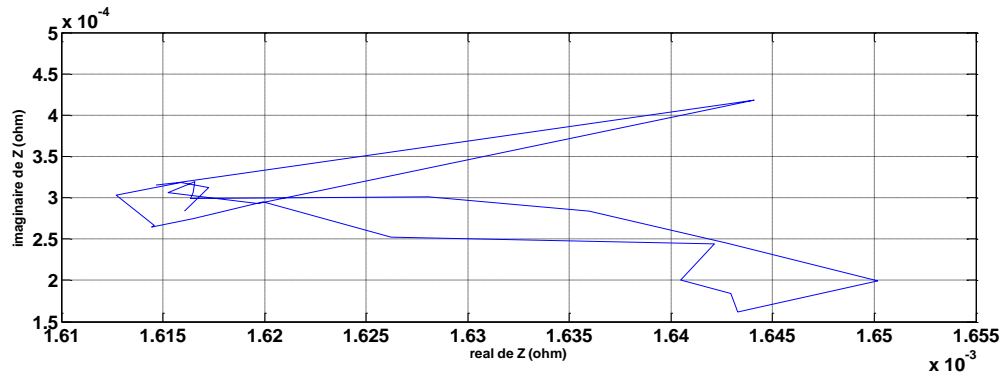


Figure IV.33 Variation de l'impédance dans le plan de phase pour un matériau ferromagnétique (le fer)

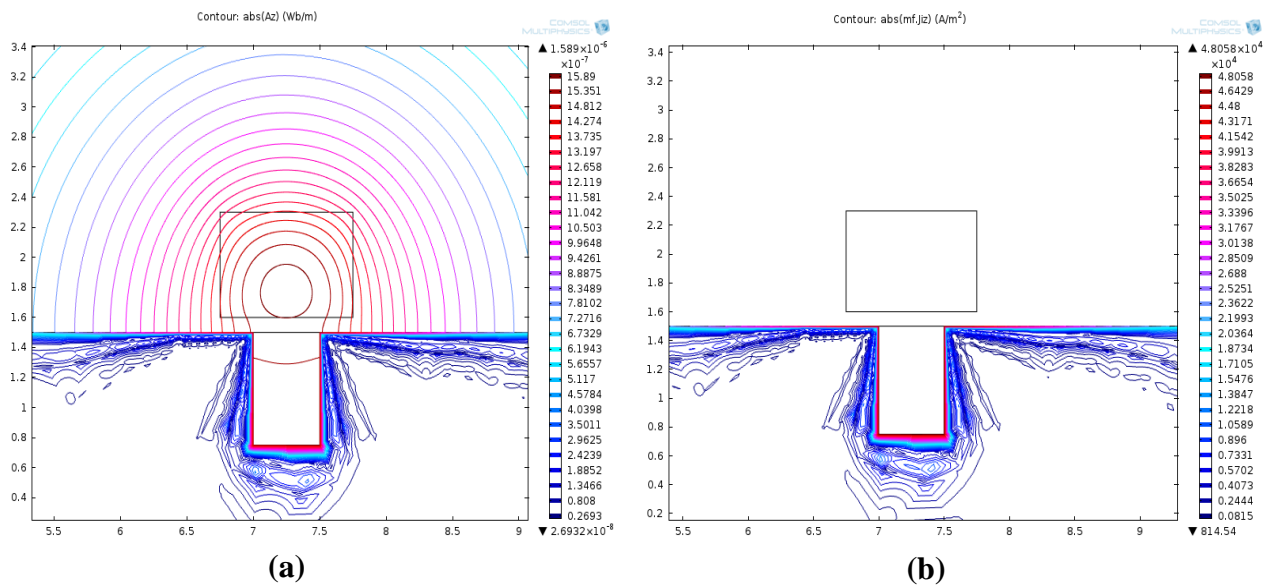


Figure IV.34 (a) Module du potentiel vecteur A_z pour un matériau ferromagnétique (b) Module des courants de Foucault J_{iz} pour un matériau ferromagnétique pour 200kHz

La répartition du potentiel vecteur et les courants de Foucault dans les deux milieux amagnétique et ferromagnétique n'est pas la même et n'est pas uniforme comme le milieu amagnétique voir les figure (15 et 34) ca influe sur l'évolution de l'impédance en remarque que dans les milieux ferromagnétique la détection du défaut n'est pas claire a cause de l'influence de la perméabilité du fer (difficile à interprété).

IV.5.7. L'influence de changement du milieu sur le module de l'impédance

Dans cette partie on va changer la nature du matériau vers un milieu ferromagnétique (fer) et le défaut un milieu amagnétique (aluminium) et l'inverse pour voir le développement de l'impédance pour une fréquence 200kHz dans ces deux cas (trou obstrué par un autre matériau, ou rivet entre matériaux).

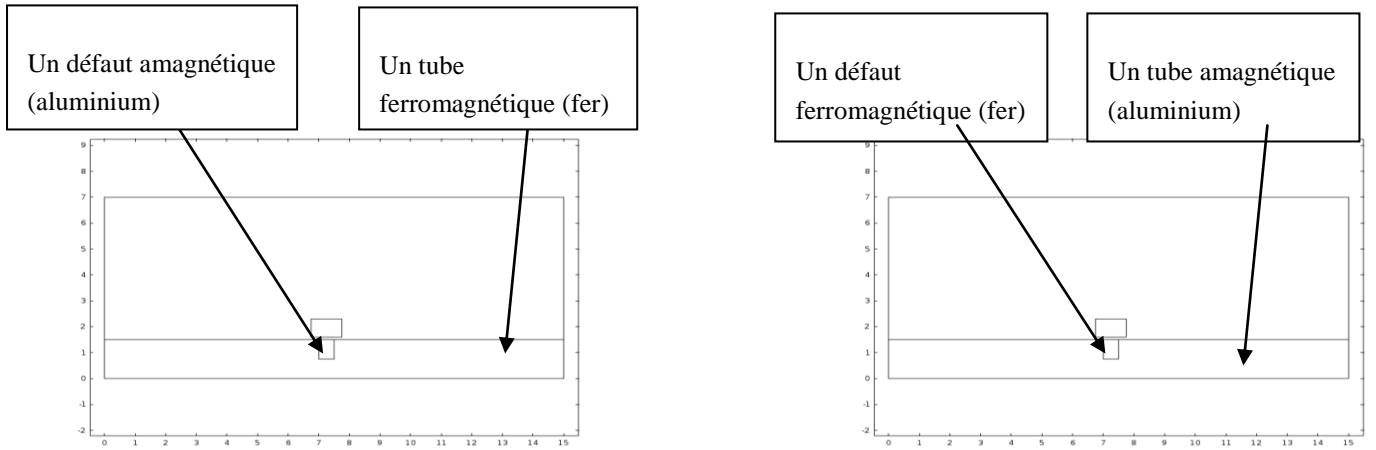


Figure IV.35 Représentation du problème (a) 1 er cas le tube ferromagnétique et le défaut amagnétique (b) 2 éme cas le tube amagnétique et le défaut ferromagnétique

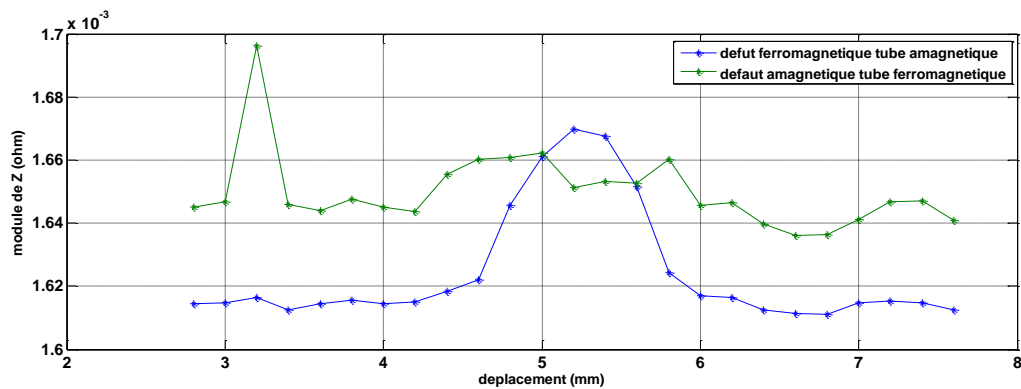


Figure IV. 36 Variation de l'impédance en fonction de déplacement pour f=200kHz (—■) une pièce amagnétique (aluminium) défaut ferromagnétique (fer) ;(—▲) Une pièce ferromagnétique (fer) défaut amagnétique (aluminium)

La figure (36) représente la variation du module de l'impédance en fonction de déplacement pour deux cas, le premier cas on suppose que le tube de milieu amagnétique on choisi l'aluminium et le défaut ferromagnétique le fer. Pour le deuxième cas le tube de milieu ferromagnétique et le défaut de milieu amagnétique et on garde mêmes matériaux et les mêmes démentions du cible et du capteur voir la figure (35).

On remarque que dans le premier cas l'évolution de l'impédance par apport au défaut grâce à la grande différence dans les deux perméabilités du fer et de l'aluminium qu'il a le pouvoir d'augmente l'inductance c'est pour cela que le module de l'impédance a augmente. Dans le deuxième cas c'est l'opération inverse le module de l'impédance dans le cas un milieu ferromagnétique est grande par apport le milieu amagnétique alors le capteur ne peuvent pas de détecter le défaut.

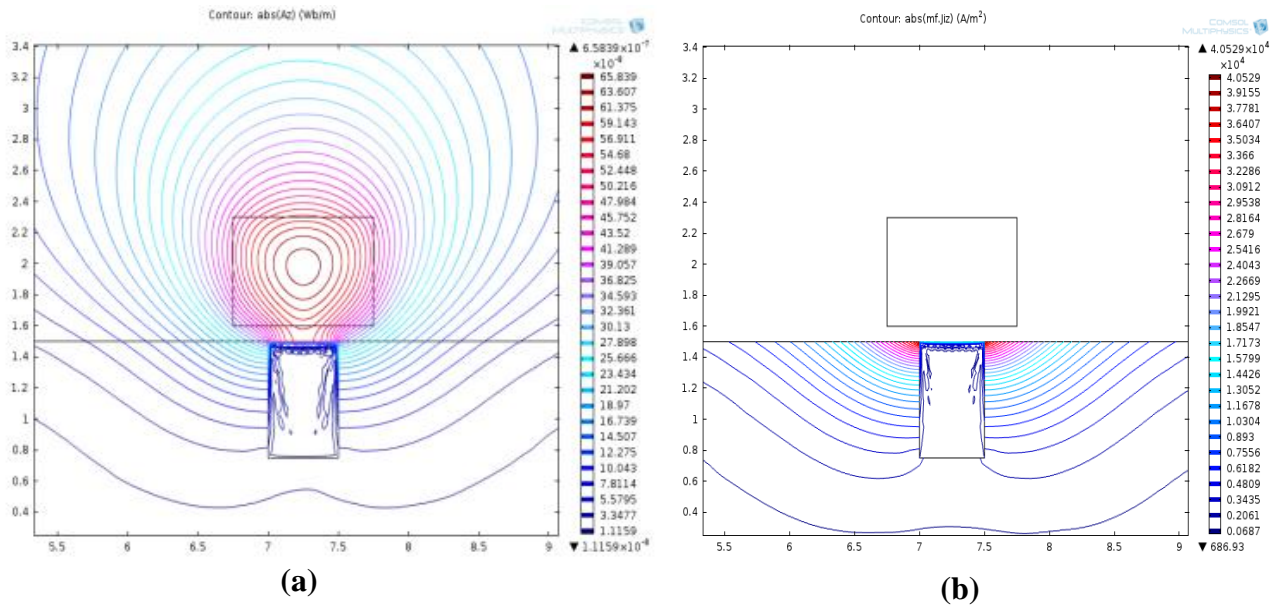


Figure IV.37 Un tube d'aluminium et défaut fer (a) module du potentiel vecteur Az (b) module des courants de Foucault Jz pour $f=200\text{kHz}$

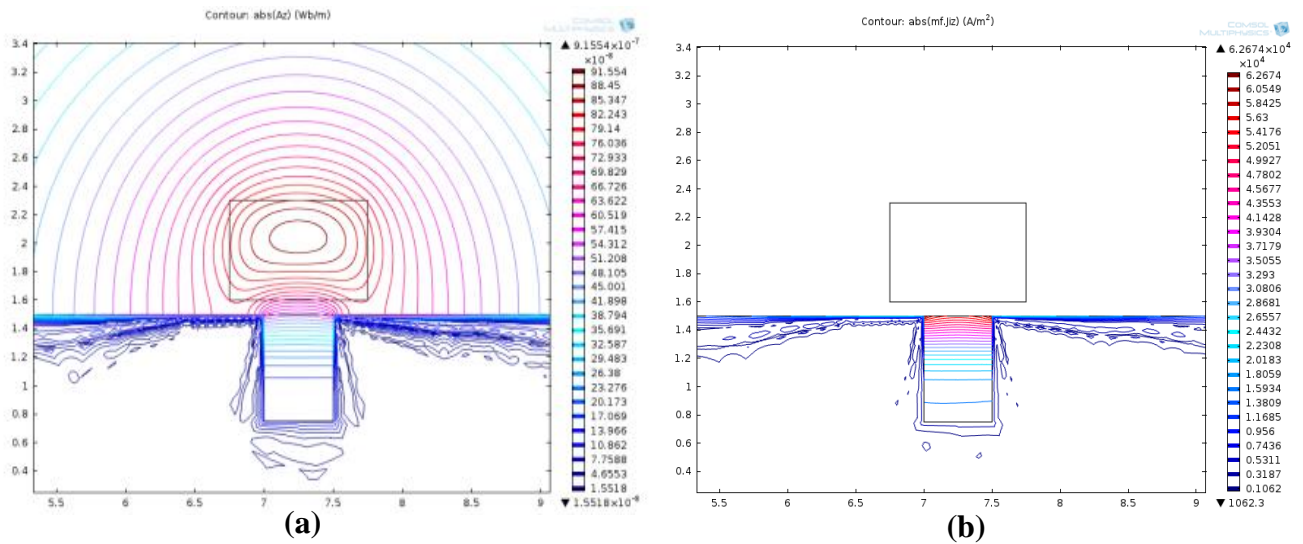


Figure IV.38 Un tube du fer et défaut aluminium (a) module du potentiel vecteur Az (b) module des courants de Foucault Jz pour $f=200\text{kHz}$

Les figures (37 et 38) représentent respectivement les deux cas la distribution des lignes du module de potentiel vecteur et les lignes du module des courants induits.

IV.6. Mode absolu 2D :

Dans cette partie en va étudier la modélisation 2D non axisymétrique

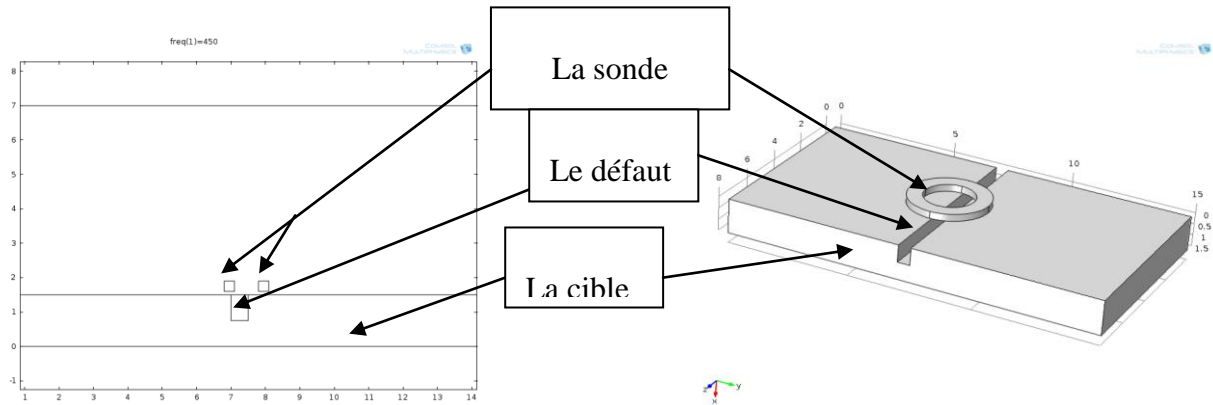


Figure IV.39 Représentation du problème en 2D et 3D

IV.6.1. Résultats de simulation et interprétation pour une fréquence de 450 Hz

IV.6.1.1. Pour une pièce conductrice sans capteur de référence :

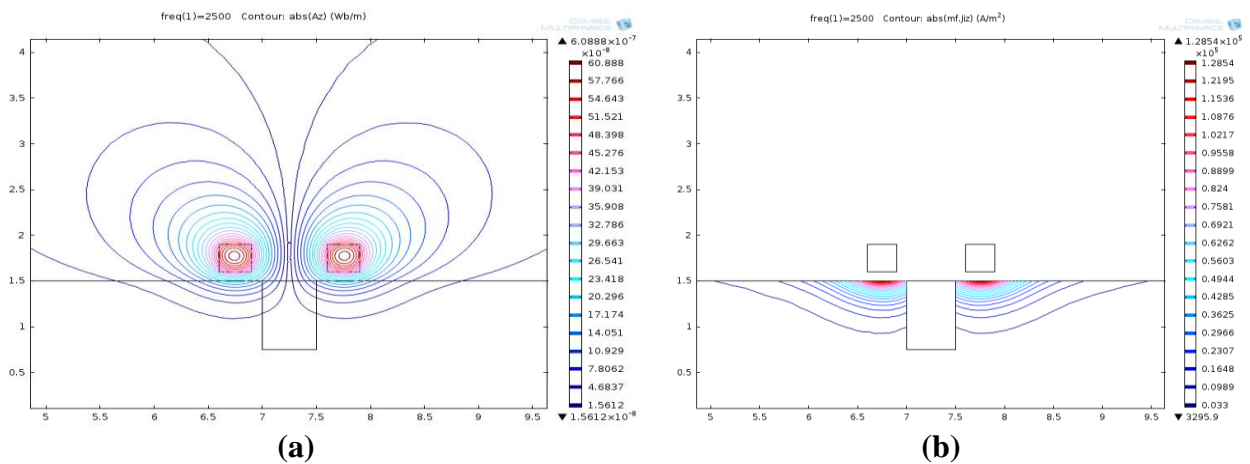


Figure IV.40 (a) Module de potentiel vecteur magnétique A_z (b) Module des courants de Foucault J_z

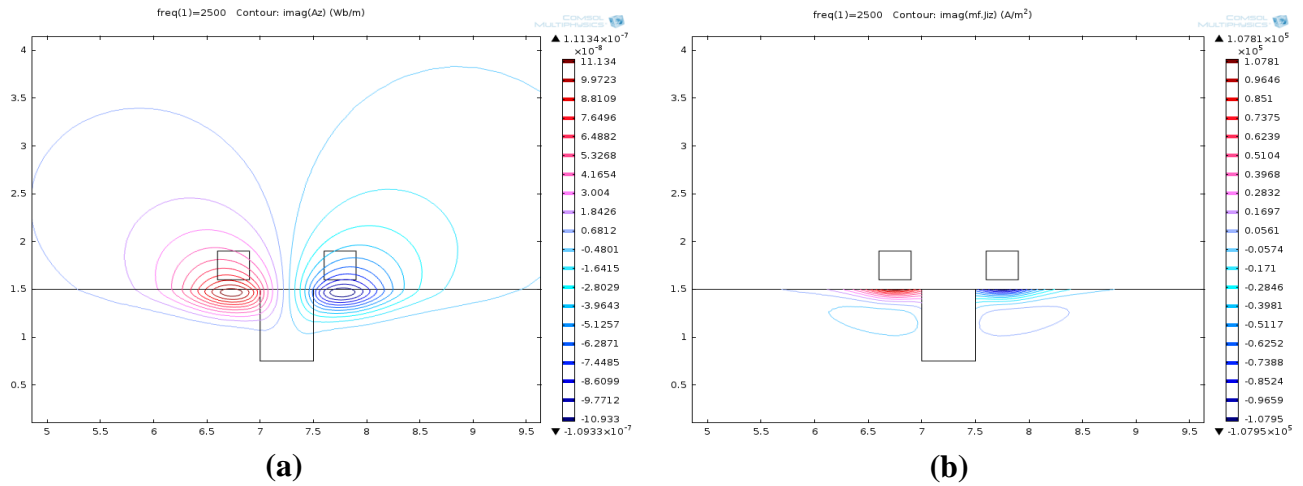


Figure IV.41 (a) Imaginaire de potentiel vecteur magnétique Az (b) Imaginaire des courants de Foucault Jiz

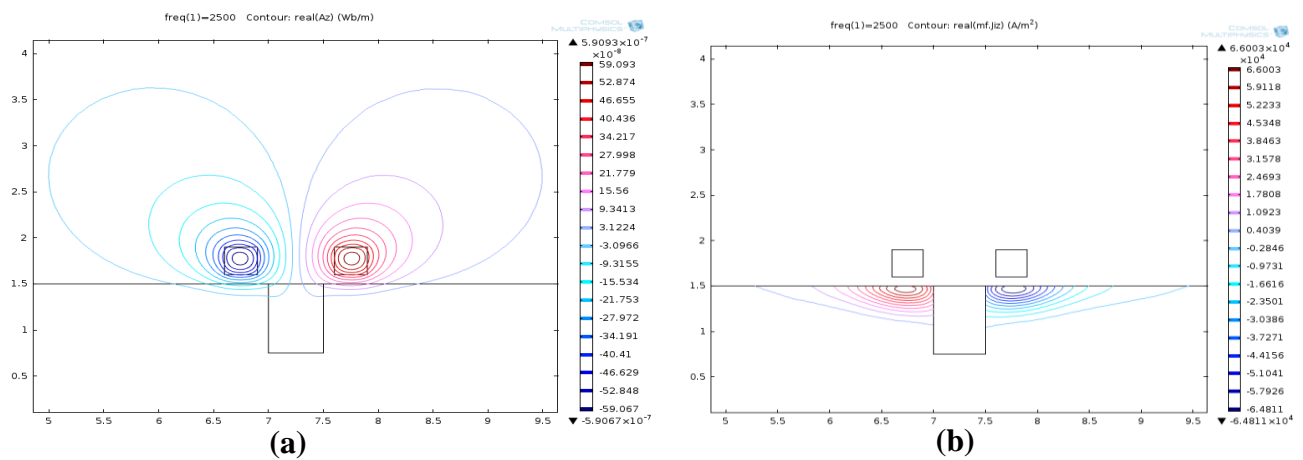


Figure IV.42 (a) Réel du potentiel vecteur magnétique Az (b) Réel des courants de Foucault Jiz

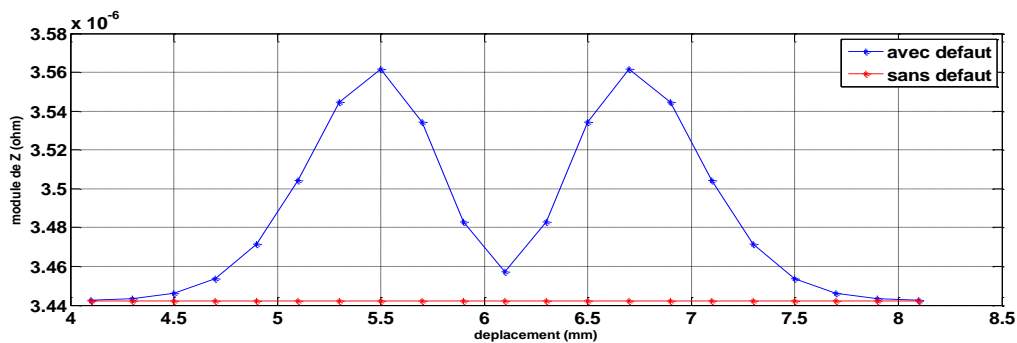


Figure IV.43 Variation du module de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut

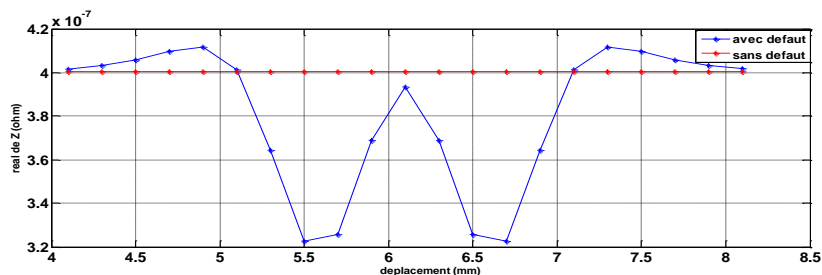


Figure IV.44 Variation de la partie réelle de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut

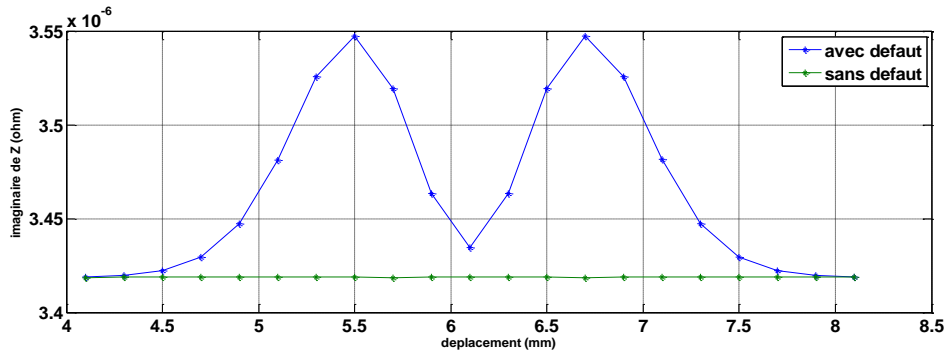


Figure IV.45 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut

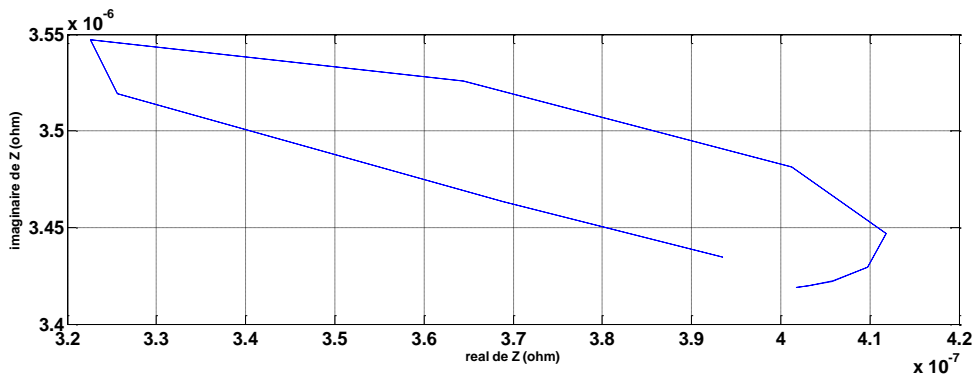


Figure IV.46 Variation de l'impédance dans le plan de phase

on remarque que la variation est similaire à celle du contrôle en mode différentiel, sauf que la valeur de Z loin du défaut n'est nulle, chose qui est vrai, les courants sont concentrés à la surface de la cible.

IV.6.1.2. Pour une pièce conductrice avec capteur de référence :

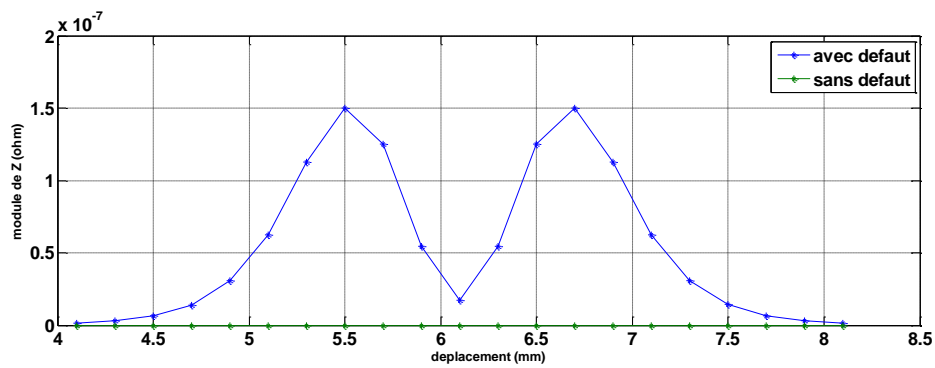


Figure IV.47 Variation du module de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut

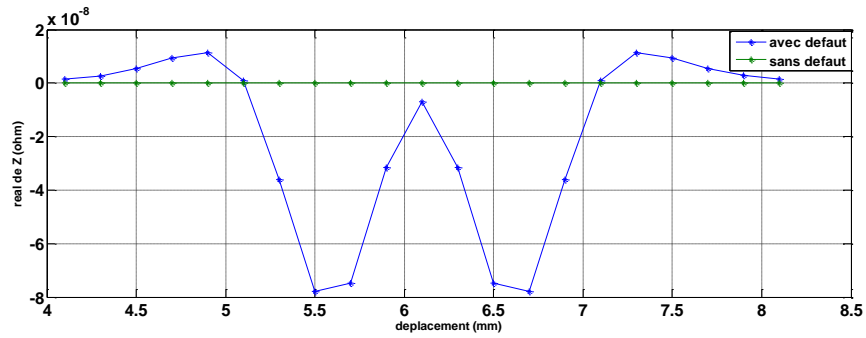


Figure IV.48 Variation de la partie réelle de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut

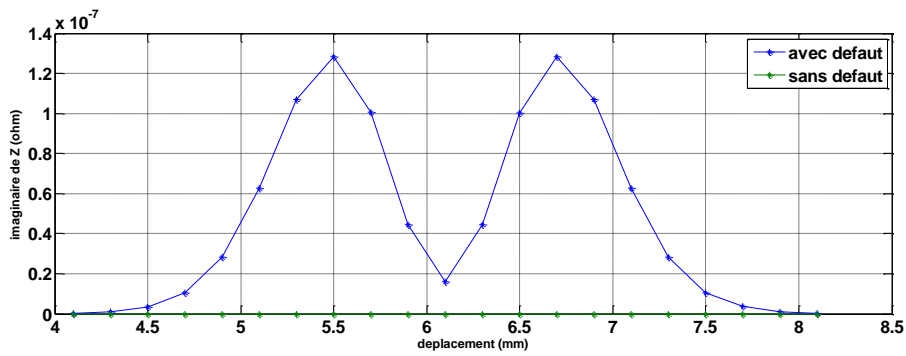


Figure IV.49 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut

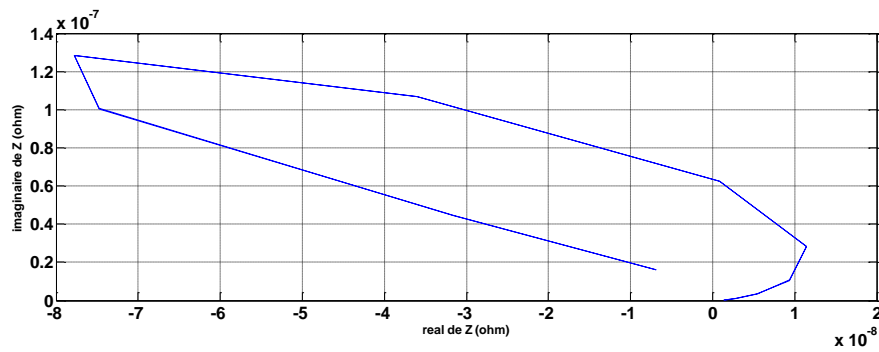


Figure IV.50 Variation de l'impédance dans le plan de phase.

lors de l'utilisation d'une pièce de référence, les résultats sont identiques à ceux trouvés pour un contrôle en mode différentiel.

IV.6.1.3. Variation de Z en fonction de lift-off

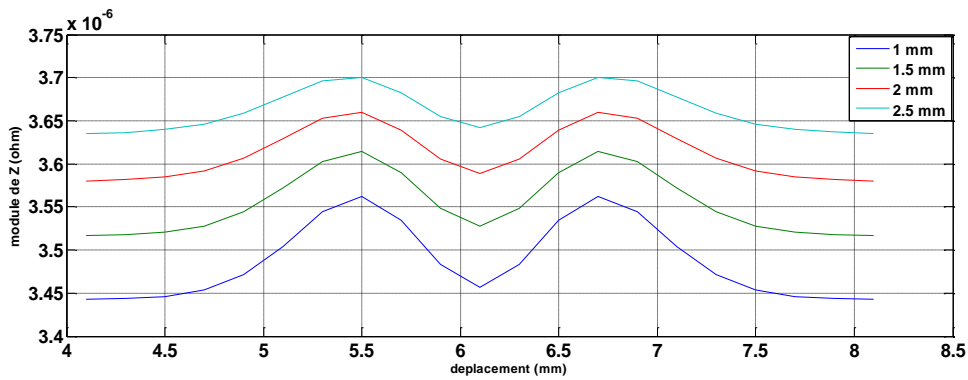


Figure IV.51 Variation le module de l'impédance en fonction du lift-off.

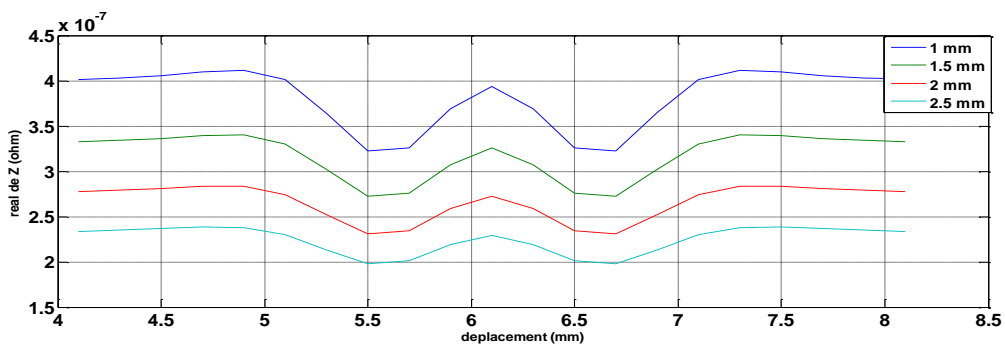


Figure IV.52 Variation de la partie réelle de l'impédance en fonction du lift-off

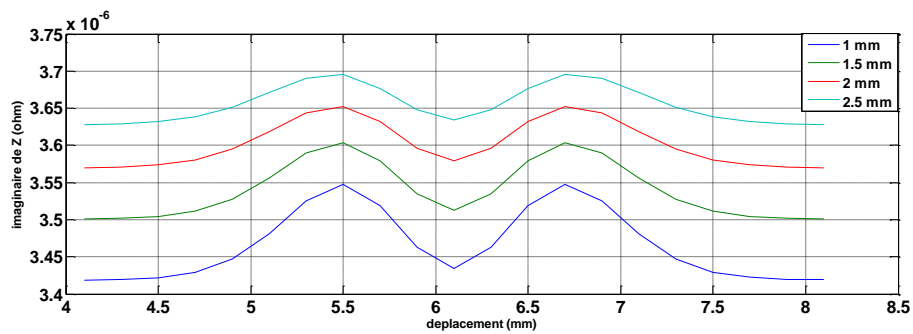


Figure IV.53 Variation de la partie Imaginaire et réelle de l'impédance en fonction du lift-off

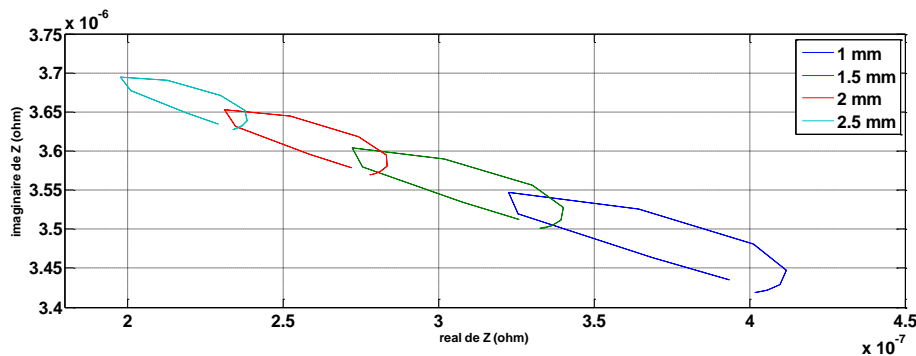


Figure IV.54 Variation de l'impédance dans le plan de phase en fonction de lift-off

les résultats montre une variation proportionnelle de l'impédance en fonction du lift-off, diminution de l'effet de l'induction inverse des courants de Foucault.

IV.6.1.4. Variation de l'impédance en fonction de la fréquence

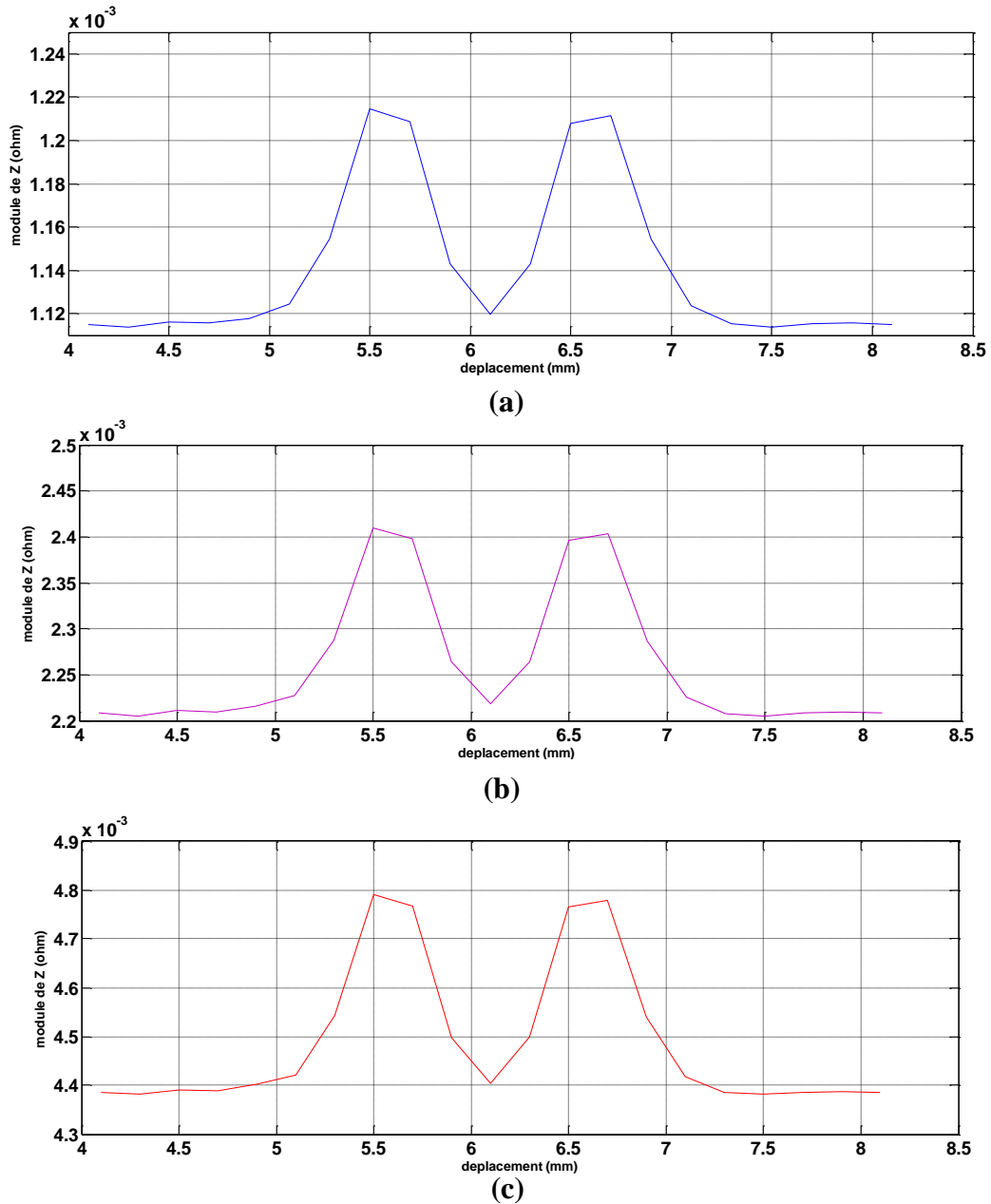


Figure IV.55 Variation du module de l'impédance en fonction de déplacement pour (a) 200kHz (b) 400kHz (c)800kHz

Comme pour les cas précédents, l'impédance est proportionnelle à la variation de la fréquence.

IV.7. Mode différentiel 2D axisymétrique pour $f=450\text{Hz}$

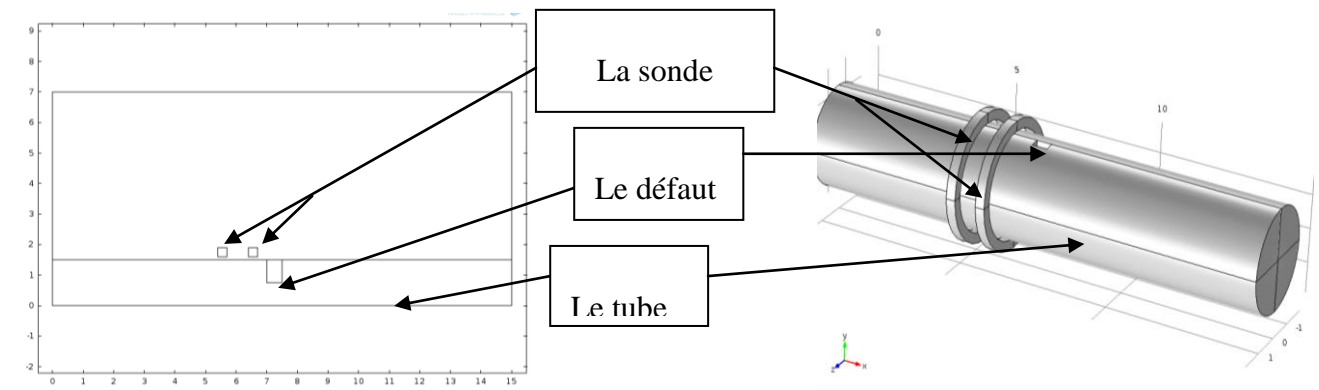


Figure IV.56 Représentation du problème en 2D axisymétrie et 3D

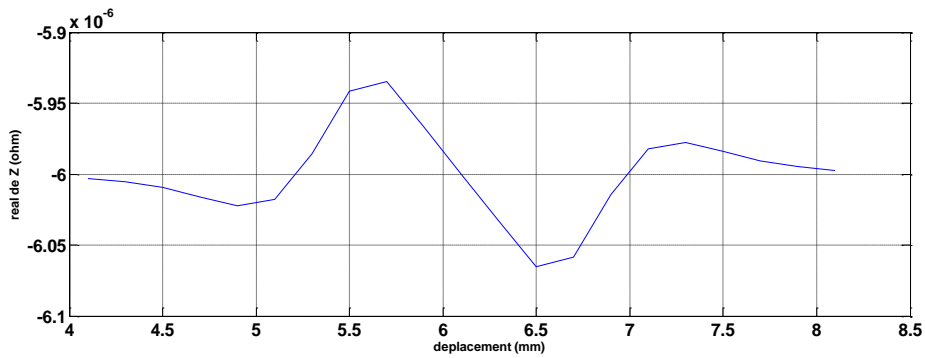


Figure IV.57 Variation de la partie réel de l'impédance en fonction de déplacement avec et sans défaut.

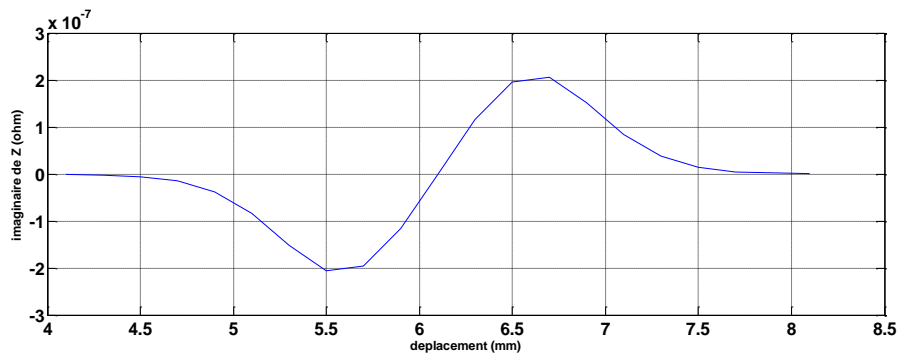


Figure IV.58 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de déplacement.

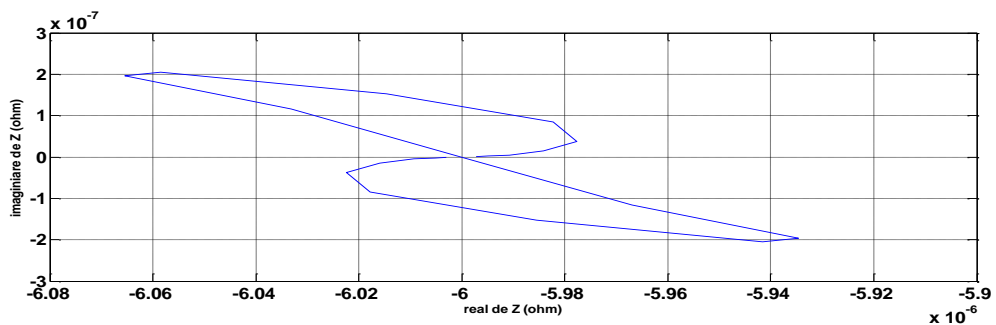


Figure IV.59 Variation de l'impédance dans le plan de phase.

IV.7.1. Variation en fonction du lift-off

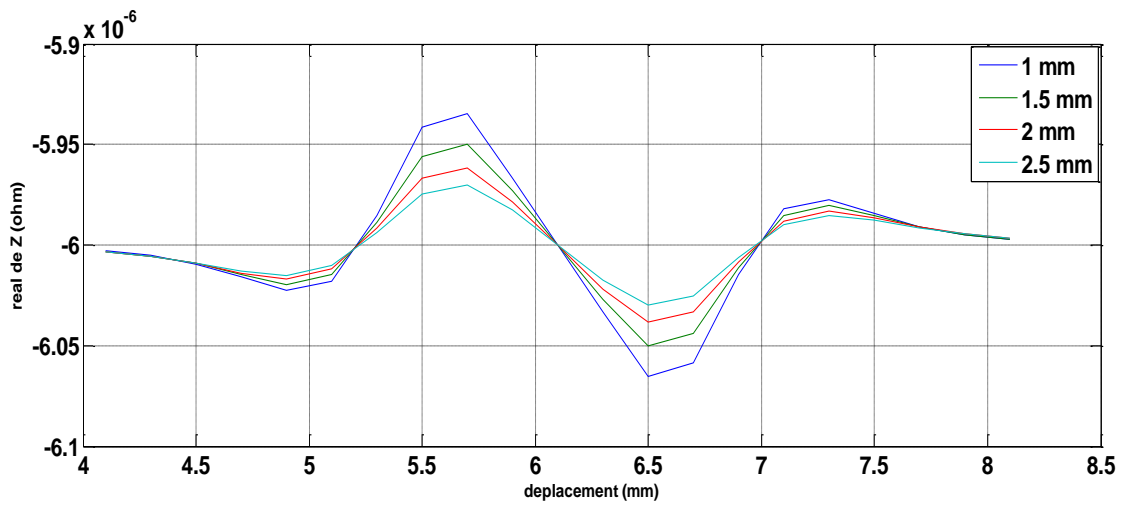


Figure IV.60 Variation de la partie réelle de l'impédance en fonction du lift-off.

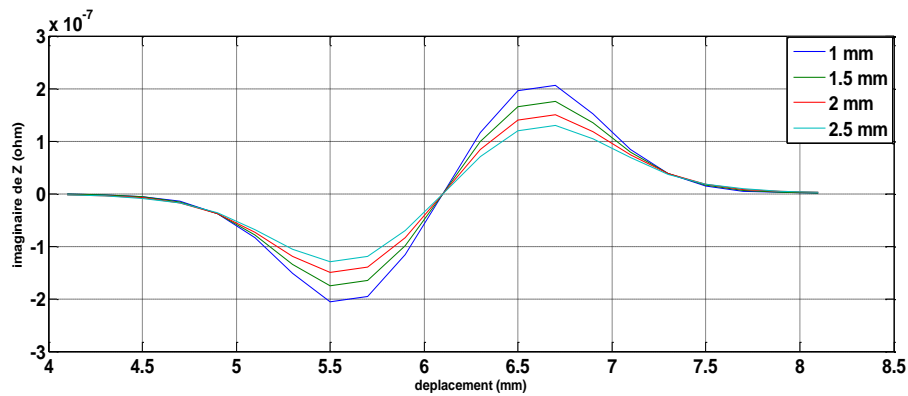


Figure IV.61 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction du lift-off.

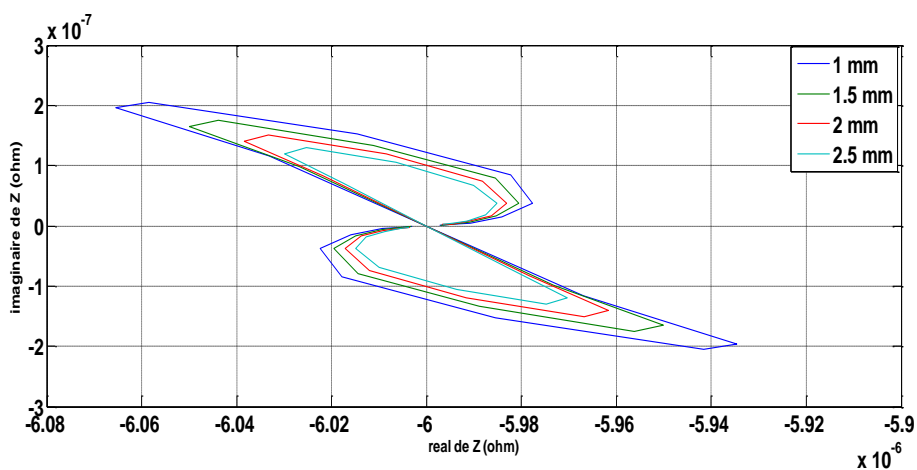


Figure IV.62 Variation de l'impédance dans le plan de phase en fonction du lift-off.

IV.7.2. Variation en fonction de la fréquence

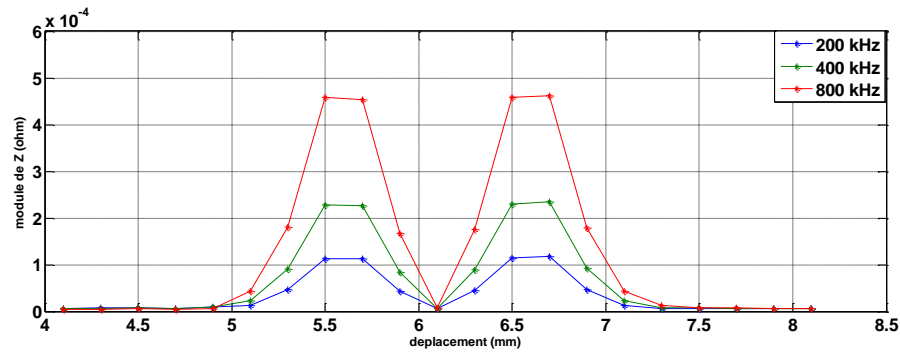


Figure IV.63 Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence.

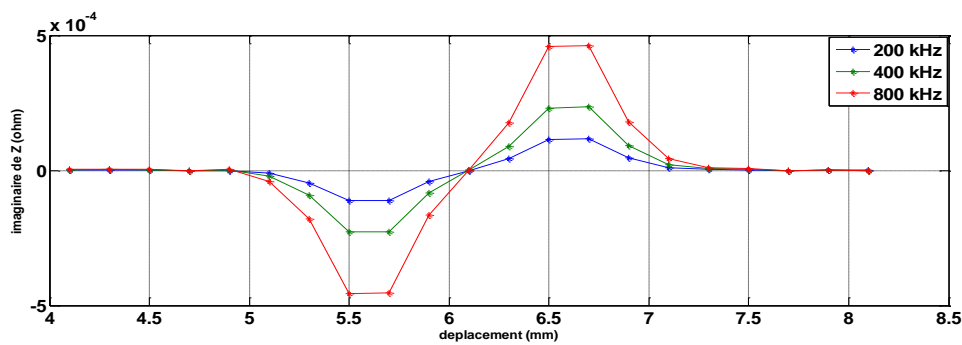


Figure IV.64 Variation de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence.

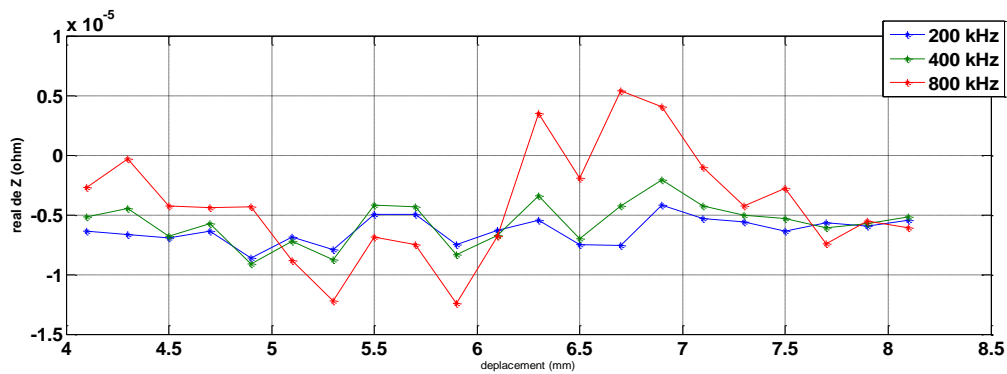


Figure IV.65 Variation de la partie réelle de l'impédance en fonction de la fréquence.

On peut voir sur les deux figures (VI.63 à VI.65) la variation par rapport au déplacement de la partie réactive et de la partie résistive de l'impédance du capteur, pour les trois fréquences de 200 kHz, 400 kHz et 800 kHz pour une pièce qui présente un défaut. On remarque que la valeur de la réactance est plus grande que celle de la résistance, et que la réponse du capteur par rapport au même défaut est plus importante (en valeur crête) pour une fréquence de 800 kHz que celle de 400 kHz et 200 kHz. Ceci est dû essentiellement à la pénétration du champ électromagnétique (profondeur de peau) qui est moins grande pour les fréquences élevées, ce qui produit une plus grande concentration des courants induits sur la surface, donc une réponse meilleure (une bonne détection du défaut).

IV.7.3. L'influence de changement du milieu sur la variation de l'impédance pour f=200kHz

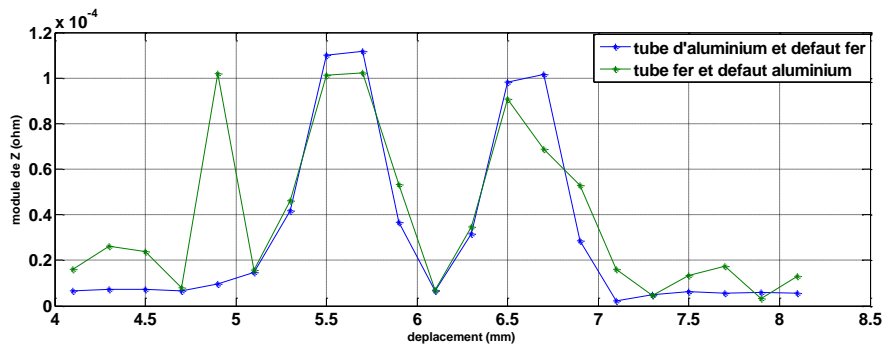


Figure IV.66 Variation du module de l'impédance en fonction du déplacement pour deux types de matériaux et défaut avec f=200kHz.

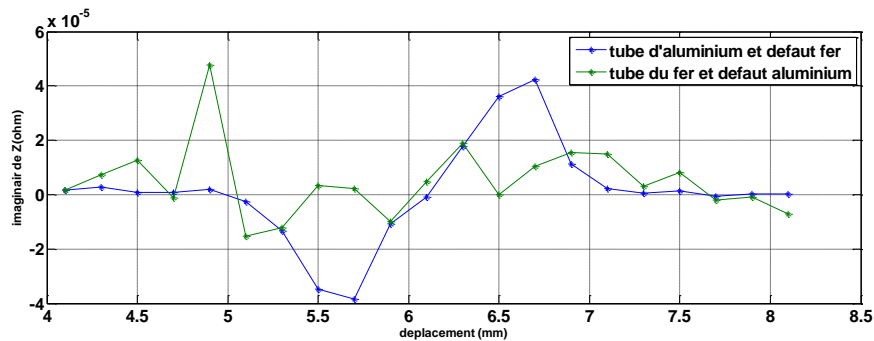


Figure IV.67 Variation de la partie imaginaire de Z en fonction du déplacement pour deux types de matériaux et défaut avec f=200kHz

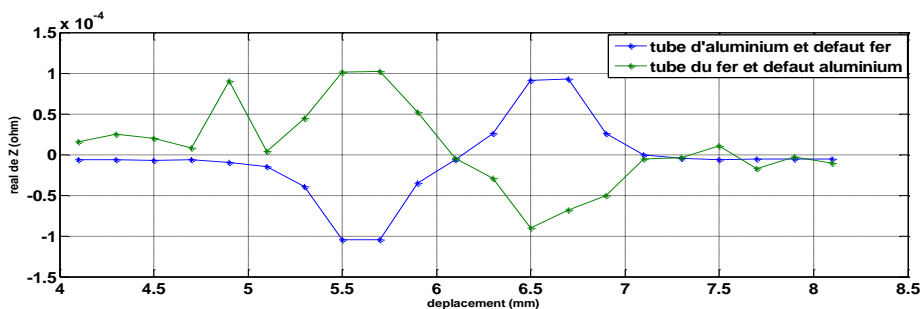


Figure IV.68 Variation de la partie réelle de Z en fonction du déplacement pour deux types de matériaux et défaut avec f=200kHz

Les figures (VI.66 à VI.68) représentent respectivement le développement de l'impédance en fonction du déplacement avec le changement du milieu de défaut et le milieu du tube le premier changement du tube magnétique (aluminium) avec un défaut ferromagnétique (fer) le deuxième un tube ferromagnétique et le défaut magnétique pour f=200kHz.

On remarque que dans le cas d'une bobine différentielle la détection est mieux que celle en absolu mais dans la partie imaginaire (réactance) de l'impédance mais la partie réelle (résistive) dans le deuxième

changement n'est pas claire car les courants de Foucault est inversement proportionnel à la perméabilité du matériau dans le fer 4000 H.m alors il prend des petit valeurs et leur répartition n'est pas homogène que celle dans le premier changement.

IV.8. Modèle l'inducteur file 2D

Cette méthode est basée sur la détection du défaut par la variation de l'induction magnétique par un magnétomètre qui fait le déplacement et la mesure au-dessus d'un inducteur .

Description des magnétomètres utilisés

Deux magnétomètres ont été utilisés dans cette partie : l'un nommé « **Improved Giant Magneto Impedance Magnetometer** » (IGMIM) et l'autre « **Improved Giant Magneto-Resistance Magnetometer** » (IGMRM). Ce dernier a été testé ces dernières années pour la détection des fissures profondes dans des plaques conductrices [24] et utilisé dans une tête rotative pour l'inspection de joints rivetés sur des cales aéronautiques [26],[25].

IV.8.1. Le système d'inspection par CF

Les deux magnétomètres décrits précédemment ont été testés pour la détection de défauts enfouis (défauts de type corrosion dans une plaque d'aluminium de référence). Cette étude présente l'une des premières applications mettant en œuvre un magnétomètre à base de GMI pour le CND par CF, [29].

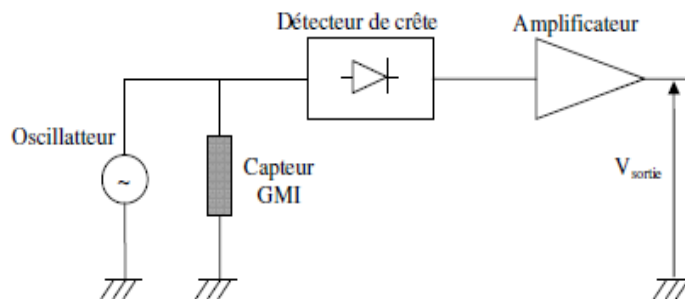


Figure IV.69 Principe de mise en œuvre d'un capteur GMI.

IV.8.2. Choix de l'inducteur

Dans notre étude, l'inducteur est constitué d'un simple fil et le magnétomètre est placé à côté. Le principal avantage de cette méthode est son aspect modulaire. En effet, l'inducteur et le magnétomètre sont mécaniquement et électriquement découplés offrant ainsi une importante souplesse de mise en œuvre et une bonne adaptabilité à l'application visée. En outre de nombreux magnétomètres peuvent être facilement ajoutés pour former un réseau de capteurs à haute résolution spatiale [29]. Cette particularité offre la possibilité de concevoir des sondes au "design" original. Il est à noter que cette technique serait totalement irréalisable avec des systèmes conventionnels constitués de bobines [26]. Le système de CND utilisé pour évaluer les performances de détection a été élaboré dans notre étude. Il est schématiquement présenté sur la figure suivante :

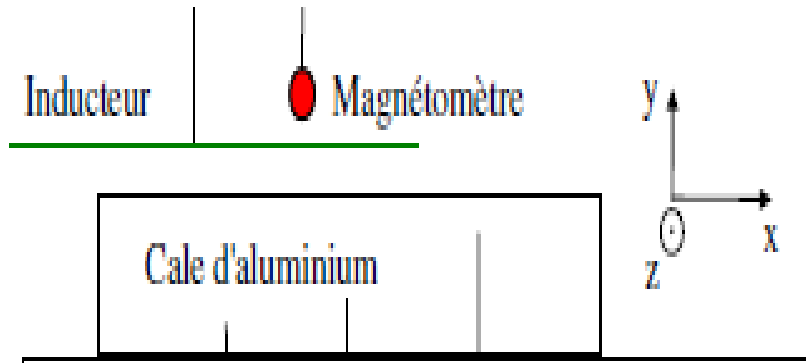


Figure IV.70 Présentation du fonctionnement du système.

IV.8.3. Caractéristique des dispositifs

	L'inducteur	La cible	Le défaut
Caractéristiques physique	<p>Courant d'excitation : 0.18 A</p> <p>Fréquence d'alimentation : 500Hz</p> <p>Nombre de spire : 10 spires</p>	<p>Type de matériau 1 : Aluminium</p> <p>Perméabilité relative : 1 H.m</p> <p>Conductivité électrique : $3.77.10^7$ S/m</p> <p>Type de matériau 2 : fer</p> <p>Perméabilité relative : 4000 H.m</p> <p>Conductivité électrique : $1.12.10^7$ S/m</p>	
Caractéristique géométrique	<p>Longueur du fil : 15 cm</p> <p>Lift-off : 1 mm</p>	<p>Rayon : 1.5 cm</p> <p>Hauteur : 15 cm</p>	<p>Langueur : 0.3 cm</p> <p>Largeur : 0.5 cm</p>

Tableau VI.2 Différents paramètres des dispositifs

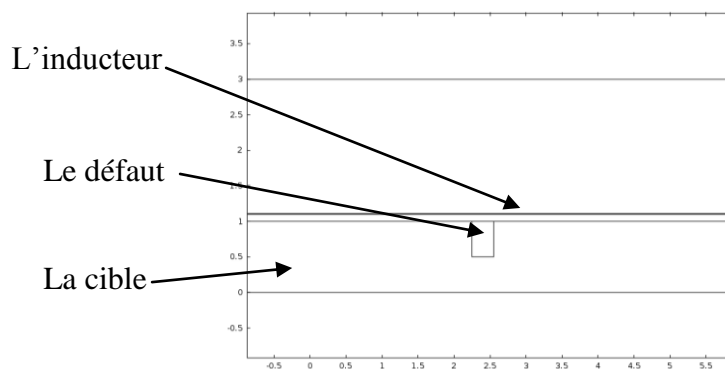


Figure IV.71 Représentation du problème.

Le système d'inspection par CF

Les deux magnétomètres décrits précédemment ont été testés pour la détection de défauts enfouis (défauts de type corrosion dans une plaque d'aluminium de référence). Cette étude présente l'une des premières applications mettant en œuvre un magnétomètre à base de GMI pour le CND par CF. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication dans un article de revue internationale [25].

Méthode de calcul de l'induction magnétique créée par le fil

Grâce à la formulation magnétique que nous avons choisie, il n'est pas nécessaire de modéliser l'inducteur. Par conséquent, le champ magnétique créé par un fil infiniment long est simplement donné par la loi de Biot-Savart :

$$\vec{H}_s = \frac{I}{2\pi(x^2 + y^2)} (y\vec{e}_x + \vec{e}_y)$$

Où est \vec{e}_x et \vec{e}_y les vecteurs unitaire selon l'axe X et l'axe Y I l'amplitude du courant dans l'inducteur.

IV.8.4. Discrétisation et maillage

On utilise le même type de maillage précédent avec 11238 éléments.

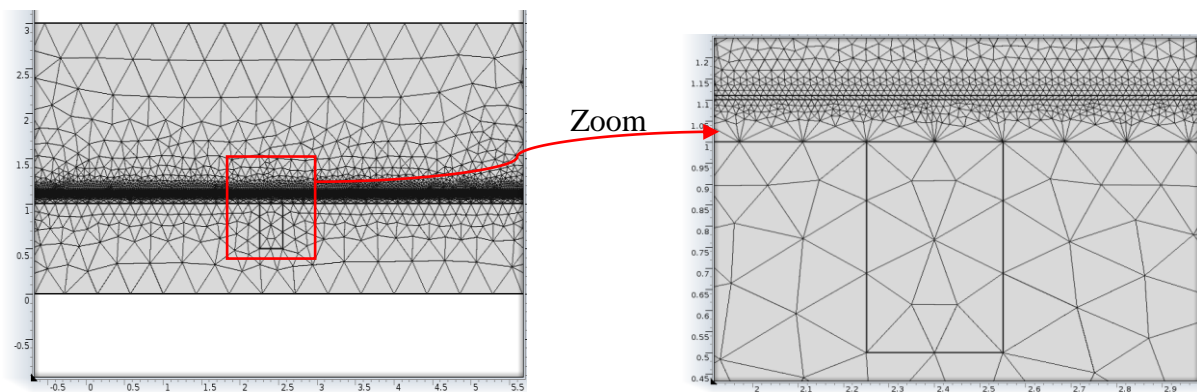


Figure IV.72 Schéma de maillage

IV.8.5. Résultats de simulation et interprétation

Pour deux cibles une cible ferromagnétique (fer) et l'autre conductrice (aluminium) avec une fréquence de 500 Hz

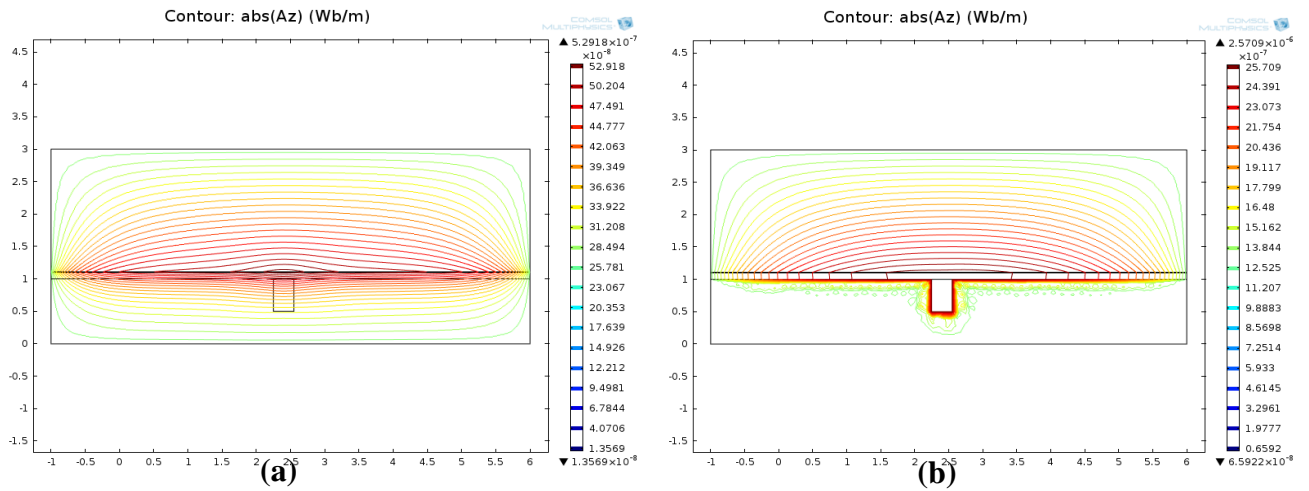


Figure IV.73 Module du potentiel vecteur (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique

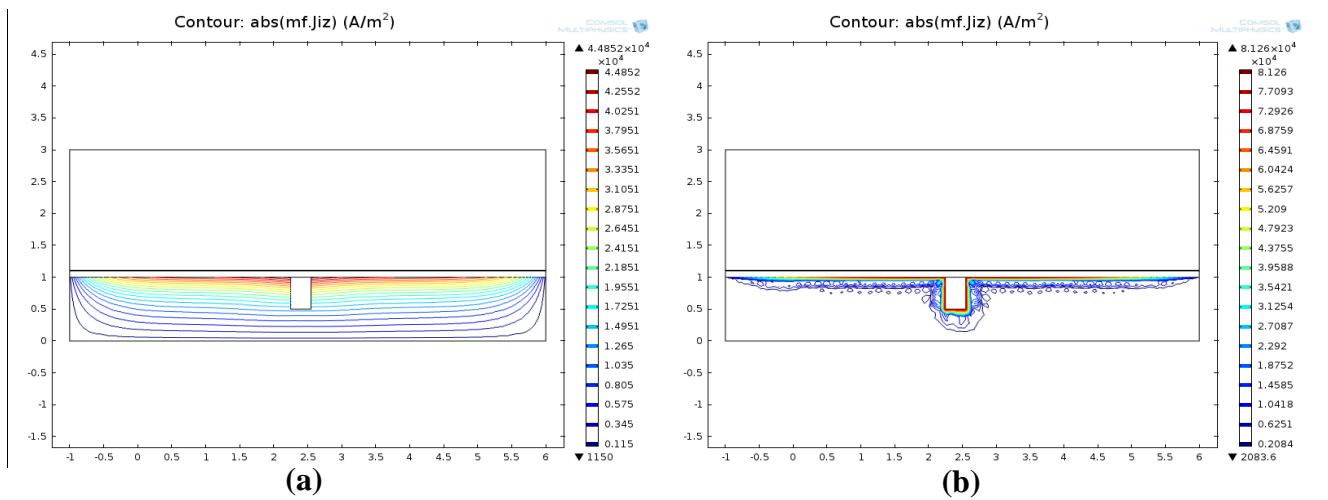


Figure IV.74 Module des courants induits (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique induits

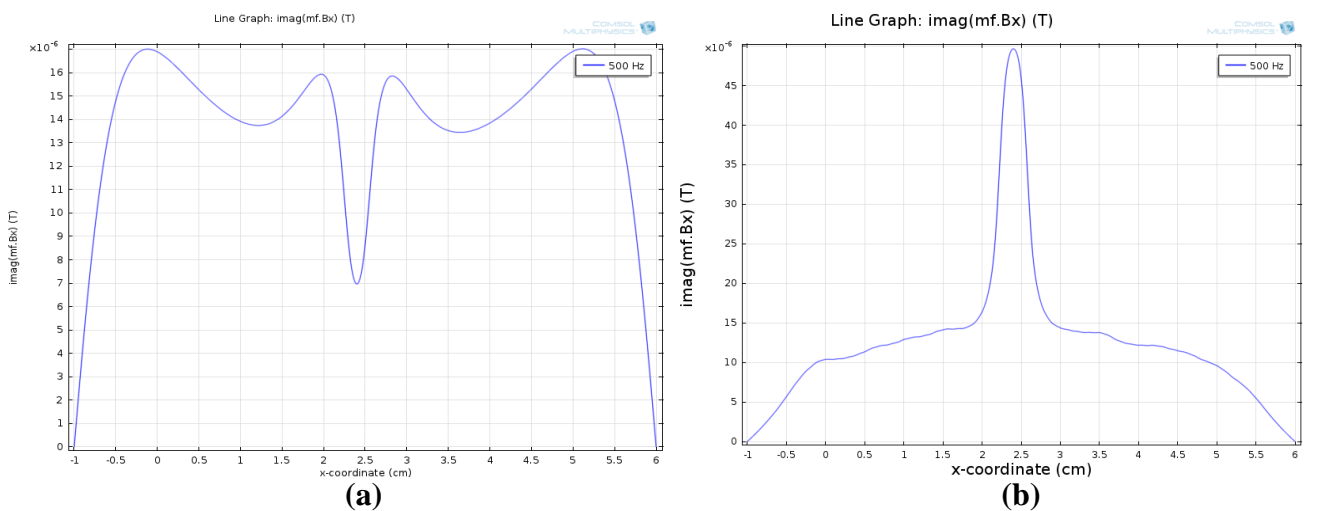
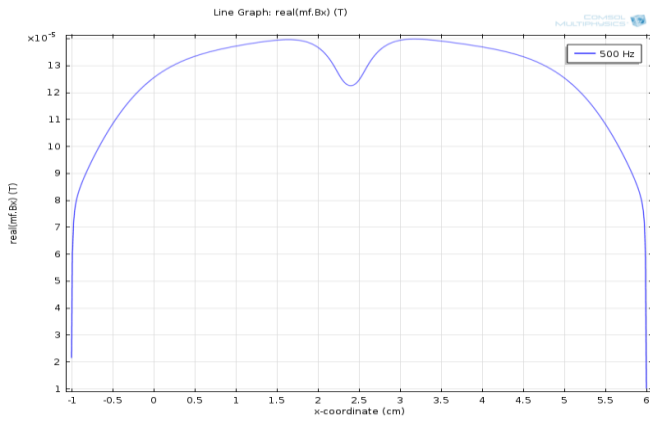
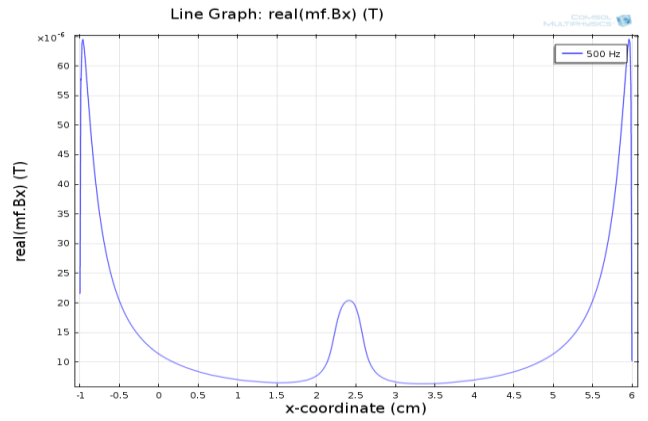


Figure IV.75 La partie imaginaire de Bx en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique

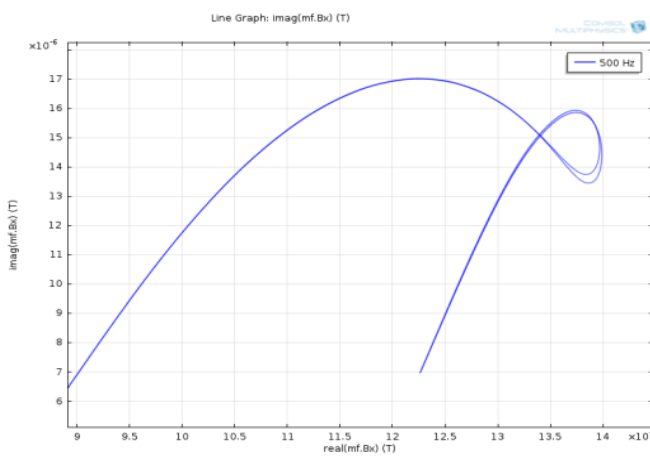


(a)

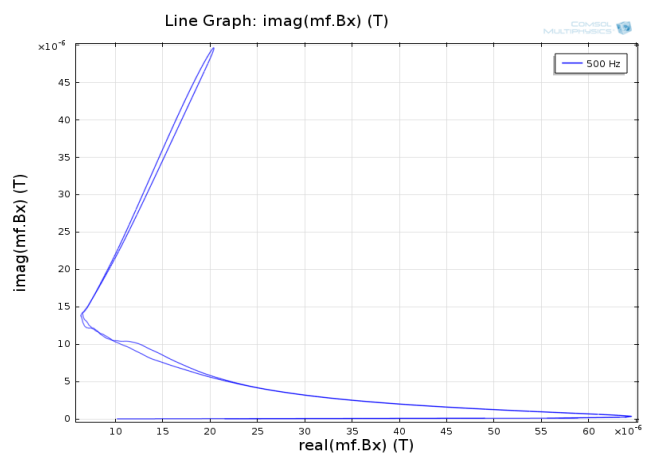


(b)

Figure IV.76 La partie réelle de Bx en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique

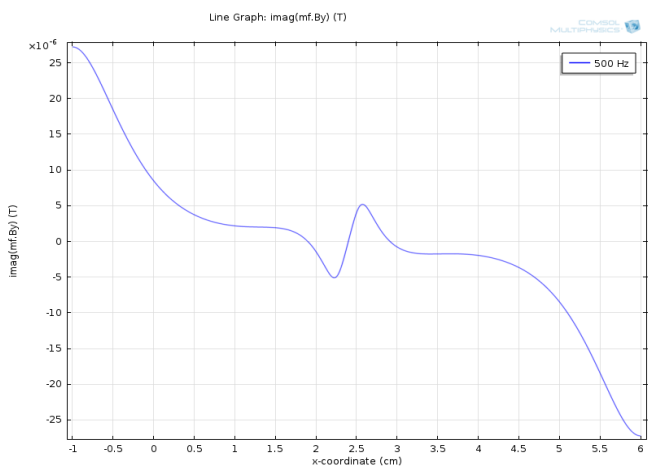


(a)

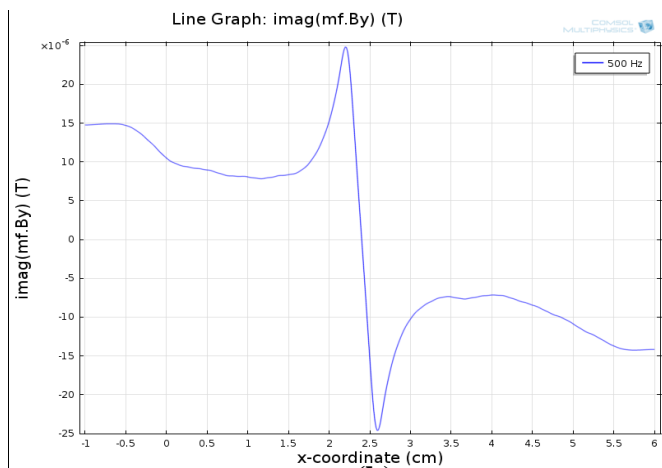


(b)

Figure IV.77 La partie imaginaire de Bx en fonction la partie réelle de By (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique



(a)



(b)

Figure IV.78 La partie imaginaire de By en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique

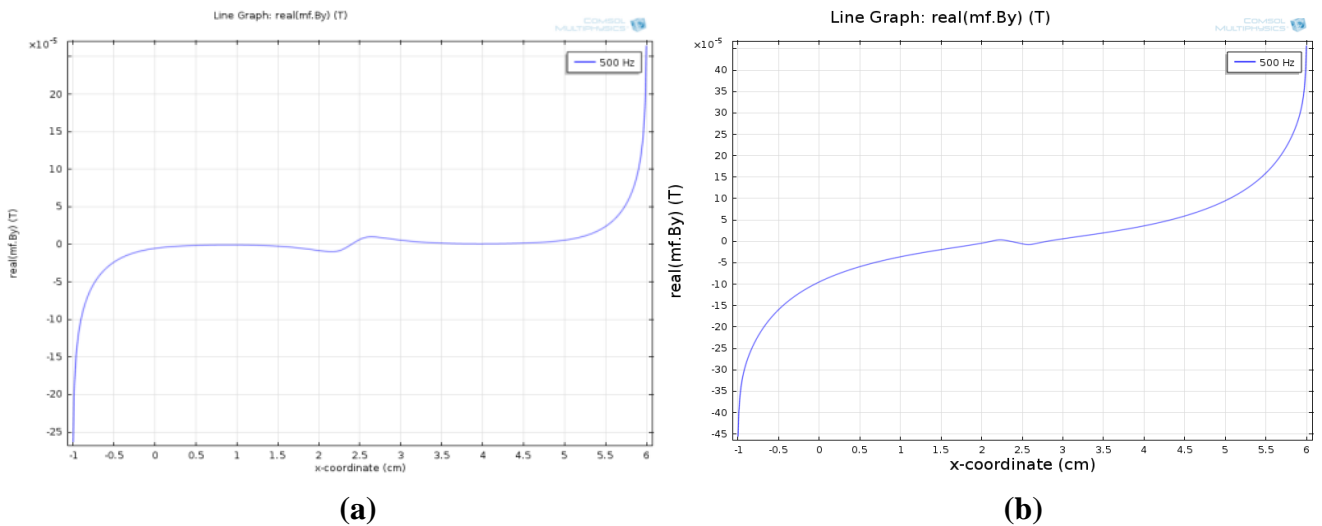


Figure IV.79 La partie réelle de B_y en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique

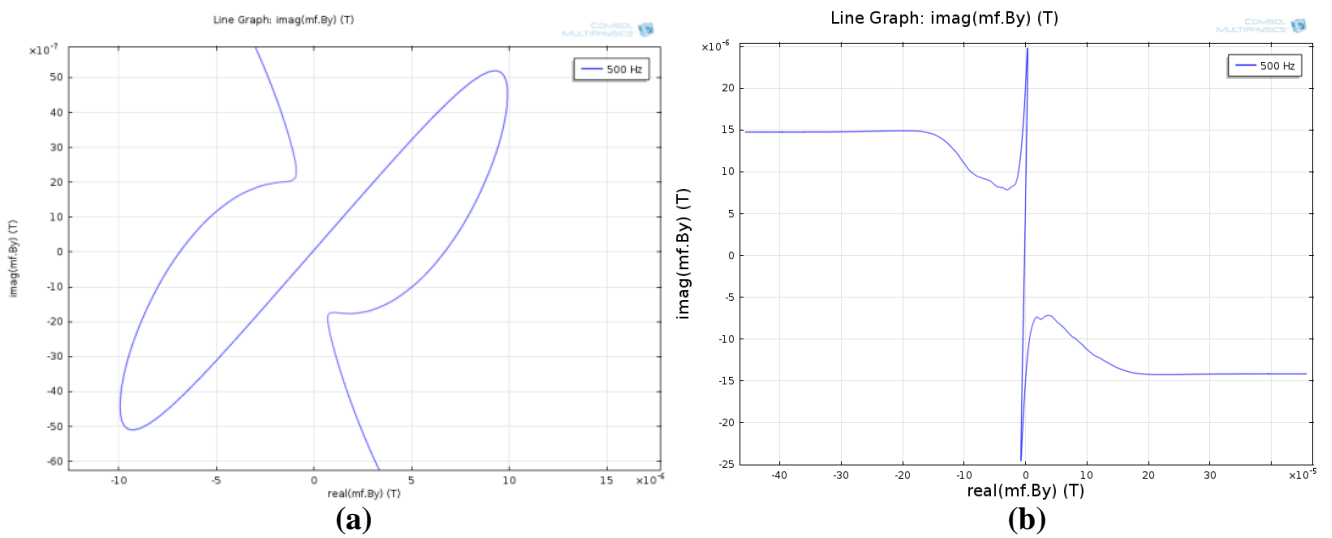


Figure IV.80 La partie imaginaire de B_y en fonction la partie réelle de B_y (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique

Variation de l'induction en fonction de la fréquence :

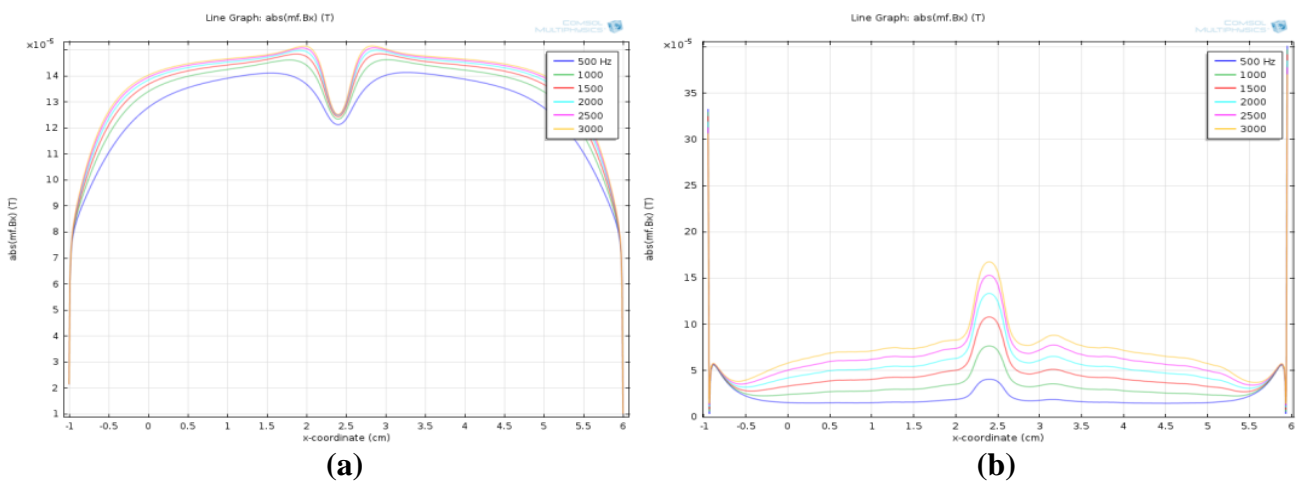
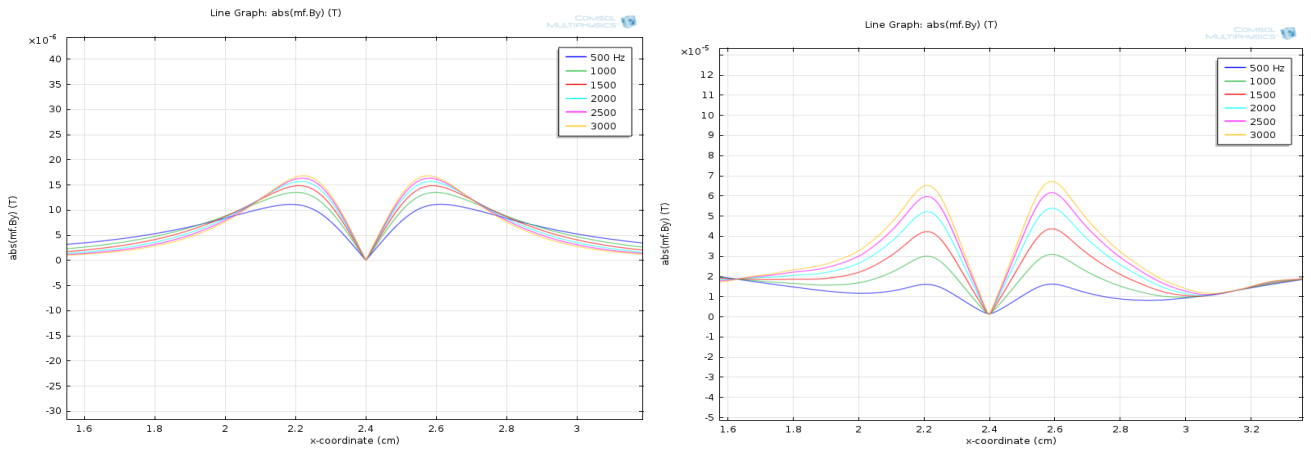
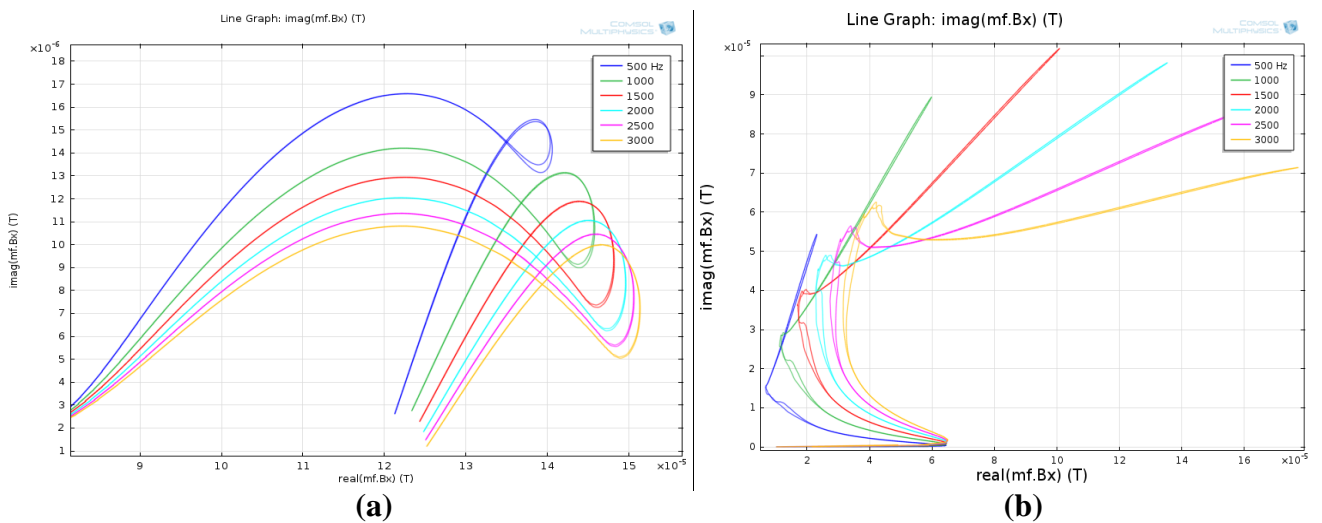


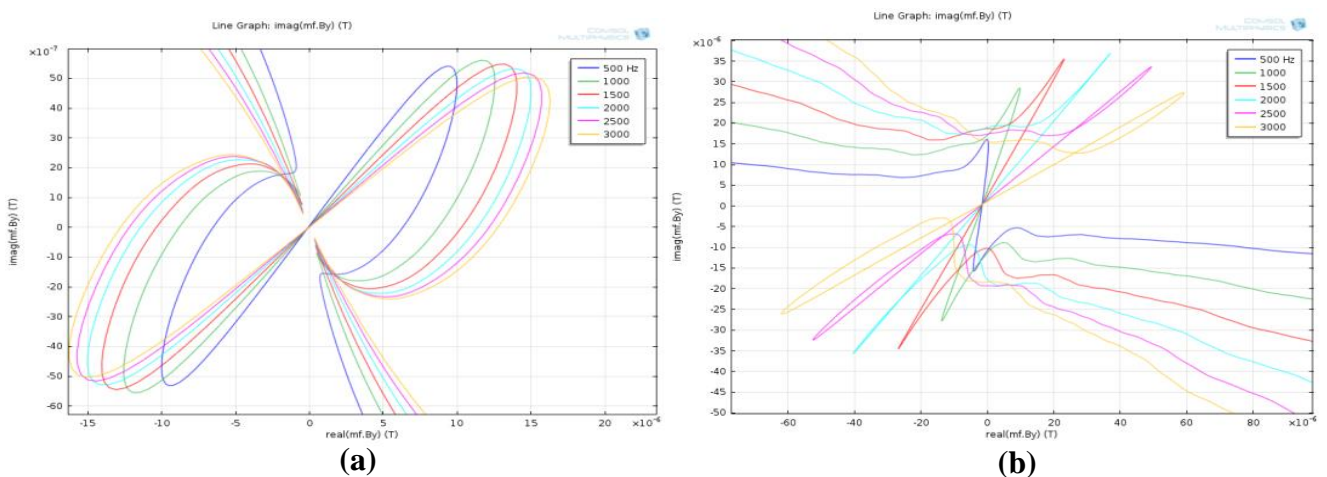
Figure IV.81 Le module de B_x en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique.



(a) (b)
Figure IV.82 Le module de B_y en fonction de x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique.



(a) (b)
Figure IV.83 La partie imaginaire de B_x en fonction la partie réelle de B_x (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique.



(a) (b)
Figure IV.84 La partie imaginaire de B_y en fonction la partie réelle de B_y (a) Cible conductrice (b) Cible ferromagnétique

Avec deux cibles cible conductrice (aluminium) caractérisées par trois défauts ferromagnétique (fer) et cible ferromagnétique (fer) et trois défauts conductrice (aluminium). Les trois défauts son de

profondeur différente et de même largeur 0.3 cm le premier défaut avec 0.3 cm de profondeur et le deuxième 0.5 cm et dernier 0.7 cm.

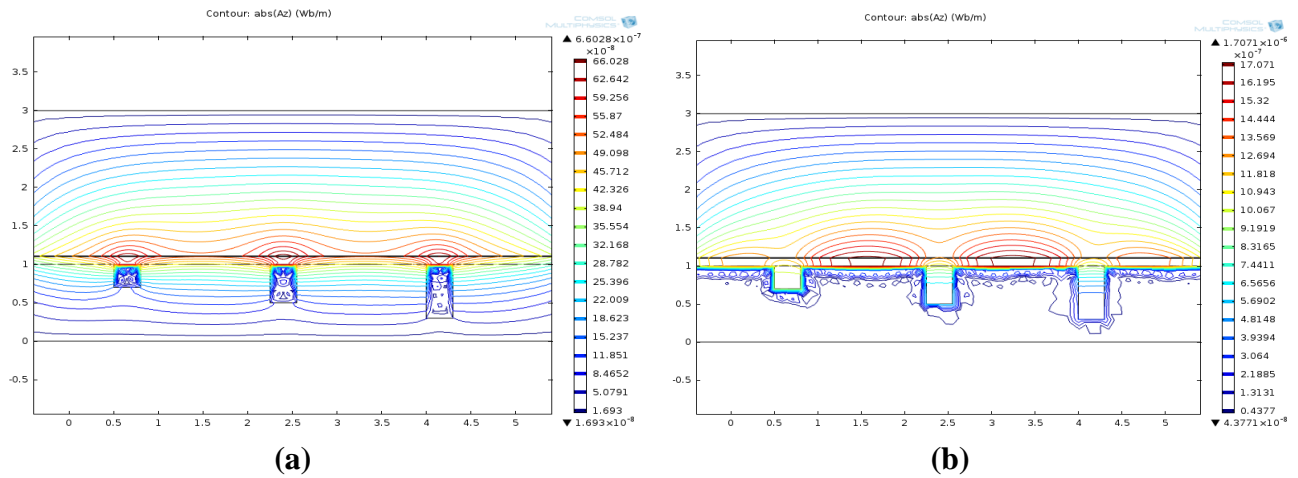


Figure IV.85 Module du potentiel vecteur A_z (a) Cible conductrice et défauts ferromagnétique (b) Cible ferromagnétique et défauts conducteur.

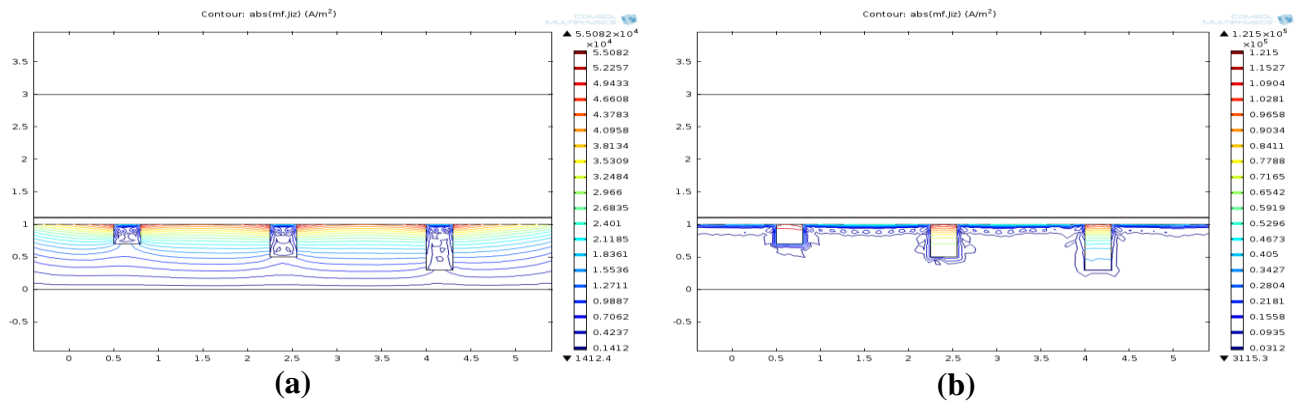


Figure IV.86 Module des courants induits (a) Cible conductrice et défauts ferromagnétique (b) Cible ferromagnétique et défauts conducteur.

on remarque que lorsque la pièce est conductrice électriquement, les courants induit pénètrent à l'intérieur de cette dernière, par contre lorsqu'elle est ferromagnétique ils se concentrent à la surface. si on utilise à l'intérieur des défauts des matériaux, ils obéissent au même principe selon la nature du matériau utilisé.

IV.9. Model tridimensionnel 3D

IV.9.1. Caractéristique de dispositif

	La cible	La sonde	Le défaut
Caractéristique physique	Type de matériau : Aluminium	Nombre de spire :20 spires Courant d'excitation : 0.18 A Fréquence : 1 kHz	
Caractéristique géométrique	Largeur : 100 mm Longueur : 50mm Profondeur : 20 mm	Rayon intérieur : 3mm Rayon extérieur : 5mm Lift-off : 2mm	Largeur : 1 mm Longueur : 15mm Profondeur : 5 mm

Tableau VI.3 Caractéristique de dispositif.

IV.9.2. Le maillage

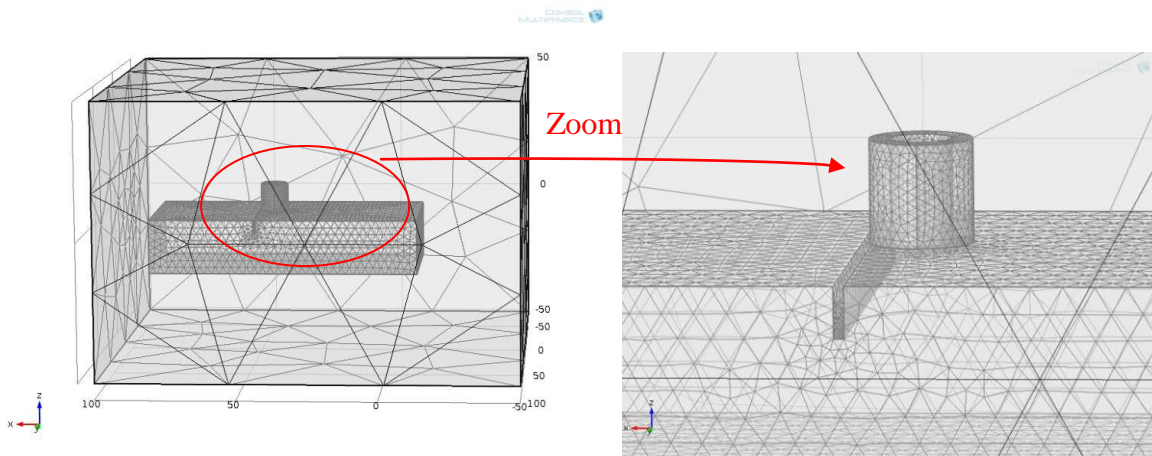


Figure IV.87 Représentation du maillage avant et après le Zoom.

IV.9.3. Résultats de simulation pour $f=1\text{kHz}$

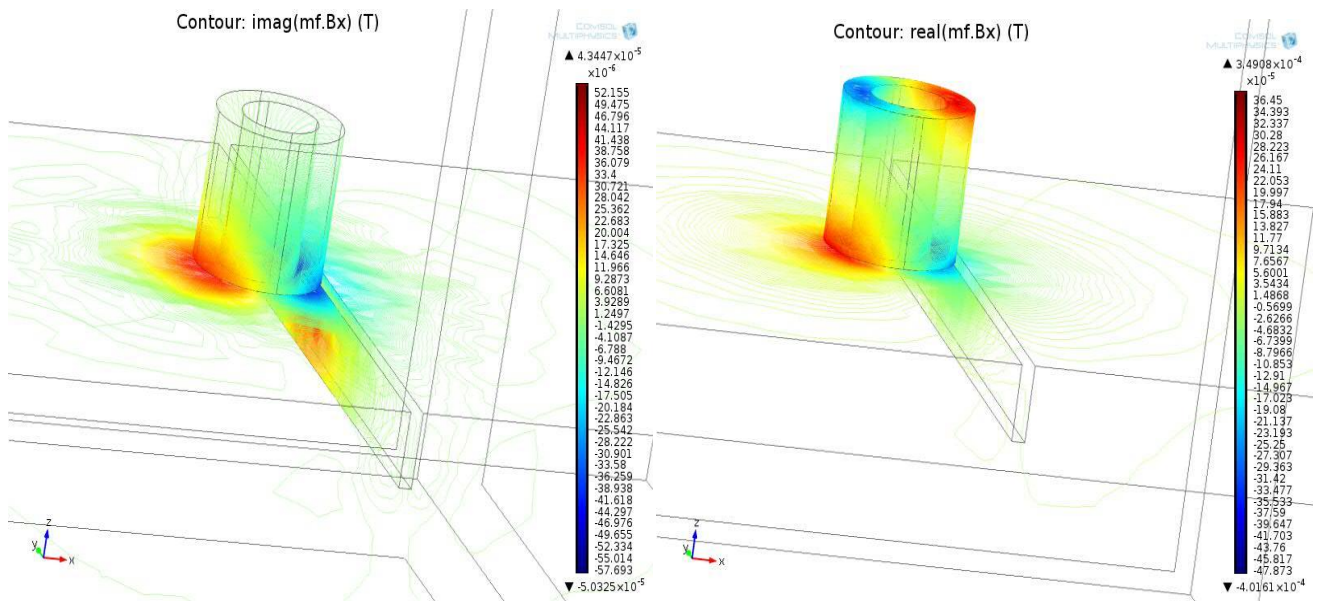


Figure IV.88 Représente respectivement la partie imaginaire et la partie réelle de l'induction selon l'axe X (B_x)

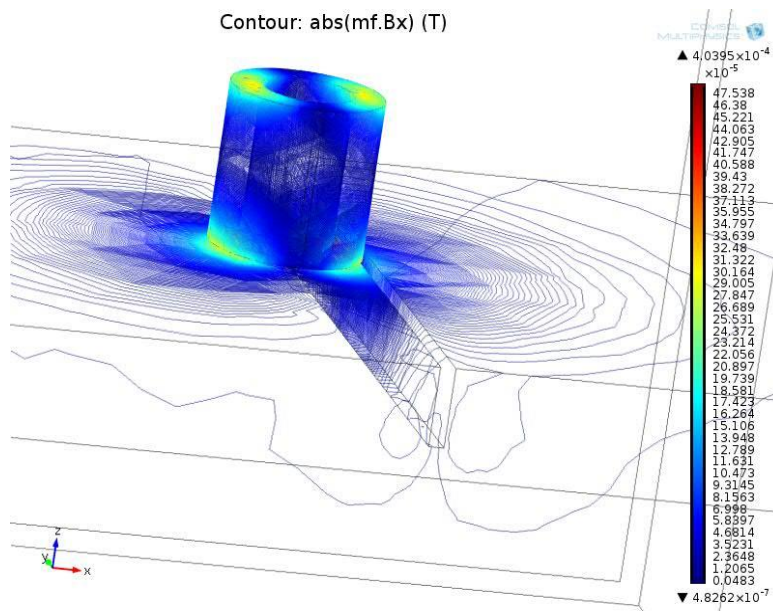


Figure IV.89 Module de l'induction selon l'axe X

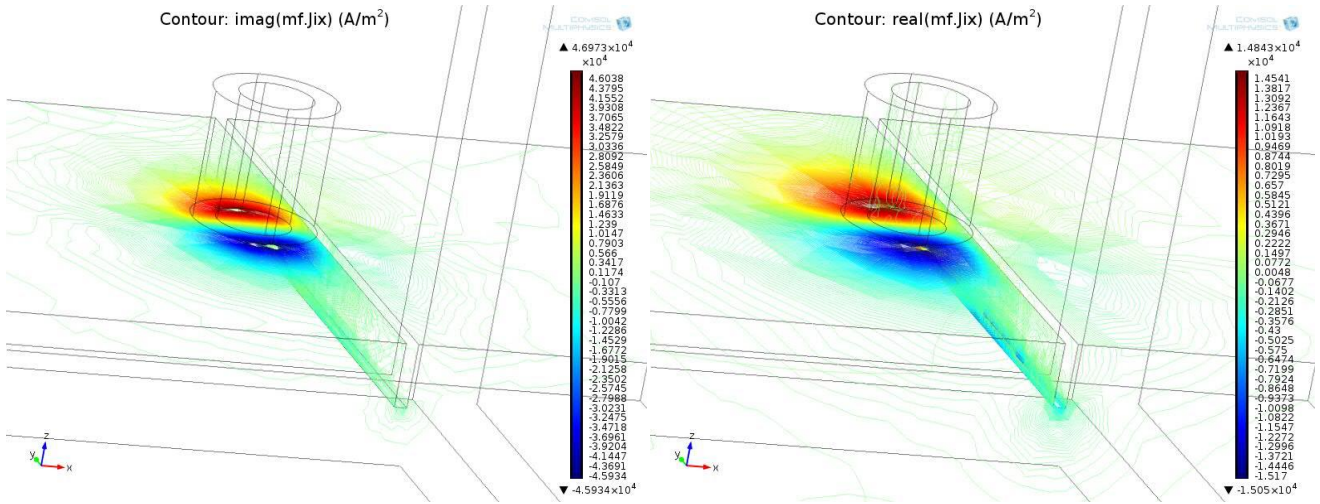


Figure IV.90 Représentes respectivement la partie imaginaire et la partie réelle des courants induits selon l'axe X (Jix)

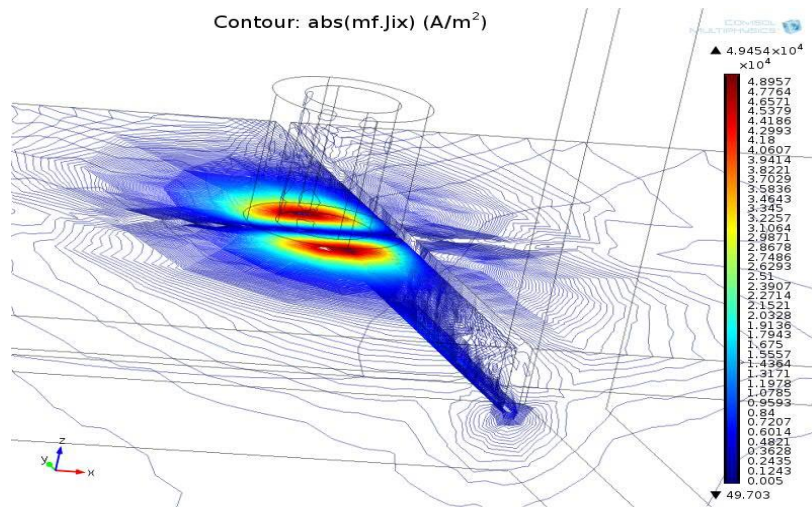


Figure IV.91 Module des courants induits selon l'axe X (Jix)

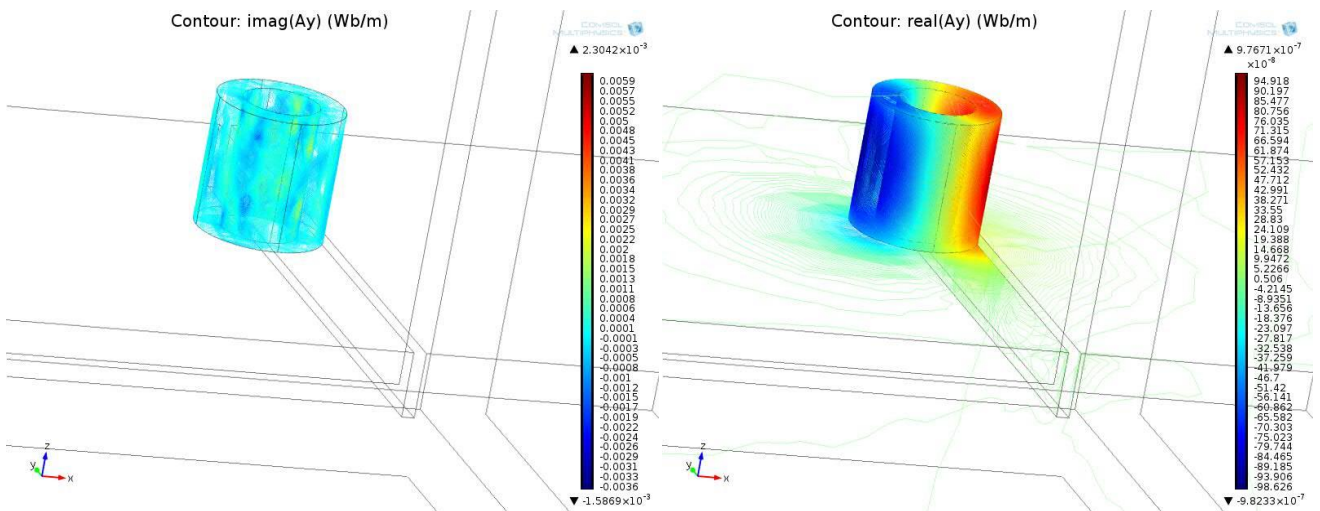


Figure IV.92 Représentes respectivement la partie imaginaire et la partie réelle du potentiel vecteur magnétique selon l'axe X (Ax)

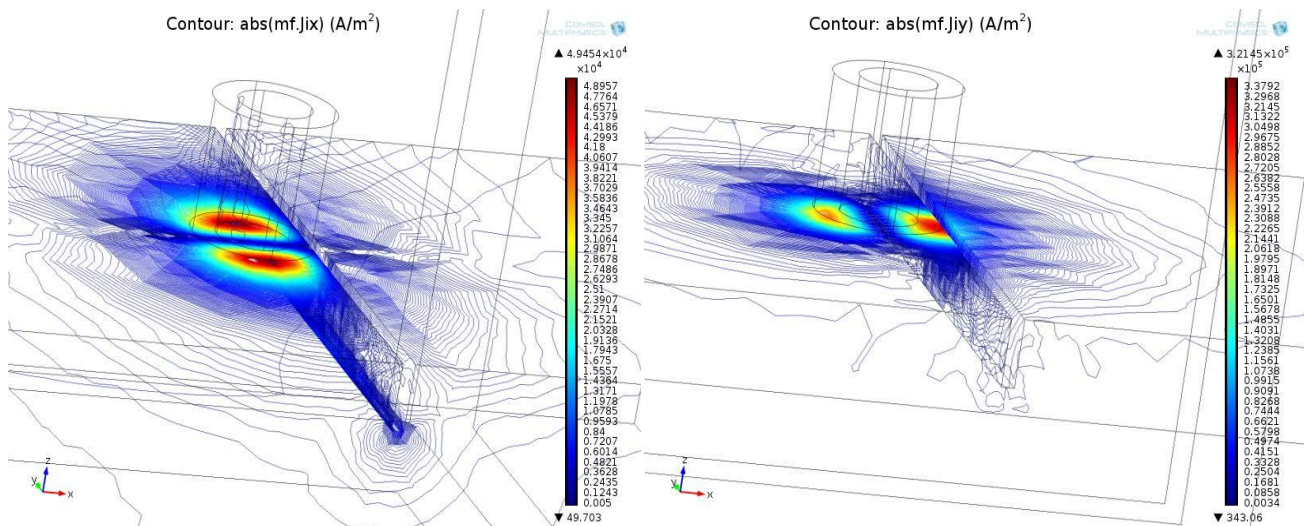


Figure IV.93 Représentes respectivement le module des courants induits selon l'axe X (Jix) pour $f_1=1\text{kHz}$, $f_2=10\text{kHz}$

Les résultats obtenus montrent la répartition des courants induit à la surface des cible et selon l'axe X

IV.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la solution de l'équation de la magnétodynamique qui a été formulée précédemment, c'est à dire la répartition du potentiel vecteur magnétique A sur notre domaine d'étude pour différents type de pièce, de caractéristiques physiques différentes (respectivement magnétique et amagnétique), puis l'influence de la variation de la fréquence, variation du lift off, variation du type du matériau et le type du milieu du défaut pour les différentes techniques de contrôle utilisées en CND par CF.

Le premier mode utilisé est le mode absolu, on procède à la mesure avec et sans capteur de référence, on a remarqué l'évolution de l'impédance varie d'un cas à l'autre en terme de valeur, par contre du côté détection elle toujours la même. Sans capteur de référence le couple capteur-pièce admet une impédance loin du défaut, et varie près de ce dernier. Alors que pour le deuxième cas elle nulle loin du défaut car on mesure la différence entre les deux impédances, et elle variable près du défaut.

Pour le model fil inducteur l'analyse effectuée dans cette section a montré que la capacité d'un système de CND à séparer des défauts, dépend de l'étalement des courants induits lié à l'épaisseur de la pièce et à la fréquence d'excitation et de l'évasement des lignes de champ observé lors de l'éloignement du capteur par rapport aux défauts. La fréquence d'excitation et le lift-off du capteur peuvent être ajustées dans une certaine configuration afin d'améliorer la capacité du système à séparer des défauts multiples tout en veillant à ne pas détériorer leur détectivité.

Dans ce chapitre nous avons proposé une méthode de détection et de caractérisation des défauts orientés et enfouis dans des pièces conductrices. Cette méthode utilise un magnétomètre comme détecteur et une source d'excitation originale qui permet de générer un champ magnétique à l'aide

de un inducteur filaire perpendiculaire. Les résultats montrent que cette méthode permet de qualifier très simplement le défaut détecté en analysant le champ magnétique induit qui dépendes des courants de Foucault dans la pièce testée à l'aide des courbes classiques telles que les courbes de Lissajous.

on a terminé nos simulations, par une présentation en 3D, d'un système de contrôle non destructif par capteur à courants de Foucault , on c'est limité à la visualisation des courant induit dans la cible .

Conclusion générale

Conclusion générale

Différents secteurs industriels imposent des normes de sécurité contraignantes, par exemple l'aéronautique, le nucléaire... Ces secteurs recourent au contrôle non destructif (CND) pour s'assurer de l'état d'intégrité de leurs matériels. De nombreuses techniques existent. Celle dite des courants de Foucault (CF) est très répandue en raison de sa facilité de mise en œuvre, de son faible coût et de son caractère non polluant. Elle est réservée aux pièces électriquement conductrices dans lesquelles elle permet de détecter la présence de fissures, de mesurer une épaisseur... La nécessité de contrôler des pièces de géométries de plus en plus complexes tout en améliorant les performances de contrôle conduit à développer des capteurs souples destinés à s'adapter à la surface de la pièce contrôlée afin de minimiser la distance capteur-pièce (lift-off), [8].

L'équation qui régie le fonctionnement de notre dispositif a été formulée à partir des équations de Maxwell pour aboutir à une équation différentielle aux dérivées partielles, qu'on a résolu numériquement par la méthode des éléments finis, pour avoir comme solution une répartition du potentiel vecteur magnétique et les différentes grandeurs qui peuvent être dérivés directement de celui-ci (c'est-à-dire l'induction magnétique et le courant induit dans la charge) sur l'ensemble de notre domaine d'étude (capteur, air et cible), [2].

En CND par CF, l'utilisation d'outils de modélisation permet d'améliorer les procédés de contrôle et la compréhension des données expérimentales observées. La méthode des éléments finis (MEF), grâce à sa souplesse et à sa possibilité de traiter des géométries complexes, occupe une place importante dans le cadre des techniques de modélisation utilisées dans le CND par CF. La MEF présente cependant des problèmes liés à la modélisation de certaines structures particulières qui contiennent des zones où les grandeurs géométriques sont très différentes en valeur par rapport aux autres régions (lift-off, dépôts, revêtements...). En effet, ces régions posent des difficultés pour trouver un maillage approprié présentant un bon compromis entre le nombre et la qualité des éléments. La méthode overlapping représente une solution intéressante pour répondre à ce compromis. Elle permet également de gérer le déplacement du capteur puisque son principe consiste à recoller deux maillages indépendants séparés par un milieu, initialement non maillé, de faible épaisseur, [8].

Les capteurs à courants de Foucault (CF) en contrôle non destructif sont depuis de nombreuses années appréciés pour leurs robustesses et leurs facilités d'implantation l'interprétation des « signaux CF » reste un problème délicat. Cela vient du fait que les signaux obtenus sont fonction de la géométrie locale de la cible, de ses propriétés électriques, du positionnement relatif capteur/cible... etc. L'évaluation d'un (ou de plusieurs) paramètre(s) de la cible est donc le plus souvent influencé par l'ensemble des paramètres d'influence qui interviennent comme des sources de perturbations vis à vis du paramètre recherché.

Dans la suite de notre mémoire nous nous sommes intéressés à la modélisation avec le logiciel COMSOL multiphysics. Ce logiciel est un outil de conception et de modélisation dont l'avantage principal est de ne pas être dédié à un domaine d'application particulier. Il rassemble un ensemble d'outils et une bibliothèque de modèles prédéfinis permettant la simulation de tout processus physique pouvant être décrit par des équations différentielles, y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF.

Le logiciel COMSOL multiphysics permet d'une part, de travailler en 2D ou 3D et d'autre part d'économiser des ressources informatiques en particulier en ce qui concerne le temps de calcul et la mémoire requise pour les simulations.

Dans le présent travail une étude a été faite sur un capteur par courants de Foucault qui est largement utilisé comme moyen de contrôle non destructif dans l'industrie, il se présente sous forme de bobine fonctionnant en mode absolu ou différentiel pour deux cas de modélisation en 2D axisymétrique et non-axisymétrique et un modèle du fil inducteur pour mettre en œuvre des capteurs magnétiques à haute sensibilité.

Ainsi on a exploité le calcul de l'impédance du couple sonde-pièce tout en intégrant le déplacement du capteur afin de voir la variation de l'impédance qui est synonyme de détection de défaut. Comme le contrôle par courants de Foucault peut être influencé par différents paramètres sur la réponse recueillie, c'est pour cela qu'on a procédé à la simulation du CND à CF avec la variation des paramètres tel que la fréquence, le lift-off, nature du matériau et géométrie du défaut, et on a même simulé le cas où le défaut n'est pas de l'air mais un matériau de nature différente, c'est le cas où des rainures sont obstruées par un matériau ou le cas des rivets utilisés pour l'assemblage de tôles.

Pour la deuxième partie de ce travail, on a testé à travers une simulation le cas de fil inducteur (capteur magnétique), qui est une technique utilisée dans le cadre de la détection des défauts enfouis. Cette étude constitue l'une des premières applications des magnétomètres à base de GMI pour le CND par CF.

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

- Dans un travail prochain, on propose l'étude du même phénomène mais cette fois sur 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.
- modélisation avec la méthode de plan d'expérience.

Annexes

Annexes

Détermination du potentiel vecteur

On peut déterminer la relation (II.13) à partir de l'équation de Biot et Savart :

$$\vec{dH} = \frac{I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

Tel que $I d\vec{l} = \vec{j} dv$ et r le rayon de l'élément $\vec{j} dv$ vers le point M alors :

$$\vec{dH} = \frac{I}{4\pi} \frac{\vec{j} \wedge \vec{r}}{r^3} dv$$

On a:

$$\text{grad}_M \left(\frac{1}{r} \right) = -\frac{\vec{r}}{r^3}$$

grad_M : le gradient dans le point $M(x,y,z)$ qui nous cherchons le champ H

Alors on peut écrire :

$$\frac{\vec{j} \wedge \vec{r}}{r^3} = -\vec{j} \wedge \text{grad}_M \left(\frac{1}{r} \right) = \text{grad}_M \left(\frac{1}{r} \right) \wedge \vec{j}$$

On a aussi :

$$\begin{aligned} \text{rot}_M \left(\frac{\vec{j}}{r} \right) &= \vec{\nabla}_M \wedge \left(\frac{\vec{j}}{r} \right) = \frac{1}{r} \vec{\nabla}_M \wedge \vec{j} + \vec{\nabla}_M \left(\frac{1}{r} \right) \wedge \vec{j} \\ &= \frac{1}{r} \text{rot}_M \vec{j} + \text{grad}_M \left(\frac{1}{r} \right) \wedge \vec{j} \end{aligned}$$

Alors :

$$\frac{\vec{j} \wedge \vec{r}}{r^3} = \text{grad}_M \left(\frac{1}{r} \right) \wedge \vec{j} = \text{rot}_M \left(\frac{\vec{j}}{r} \right) - \frac{1}{r} \text{rot}_M \vec{j}$$

On pose que $\vec{j} dv$ il a les coordonner (x_0, y_0, z_0) et $M(x,y,z)$ on remarque que la quantité $\text{rot}_M \vec{j}$ ne dépend pas de M alors $\text{rot}_M \vec{j} = 0$ $\frac{\vec{j} \wedge \vec{r}}{r^3} = \text{rot}_M \left(\frac{\vec{j}}{r} \right)$

Donc :

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int_V \text{rot}_M \left(\frac{\vec{j}}{r} \right) dv$$

On pose :

$$\vec{A} = \mu_r \mu_0 \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\vec{j}}{r} dv$$

Alors :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \text{rot} \vec{A}$$

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. I. Dufour, M. Busawon, D. Premel, « General analysis of inductive sensor based systems ». France : J, phy. III., 1994. 1481-1493.
- [2]. BOUCHALA, TAREK, «Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault», Batna : s.n., 2008.
- [3]. Yahya, CHOUA, «Application de la méthode des éléments finis», Orsay : s.n., 2009. 9535.
- [4]. MOHAMED, KHEBBAB, «Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) », CONSTANTINE : , 2007.
- [5]. M'hemed Rachek, Mouloud Féliachi, « modélisation par Eléments Finis Tridimensionnelle des Phénomènes Magnétodynamiques Harmonique avec la Formulation AV-V», Nantes : ,2003,Vol. 5.
- [6]. Salma, CHRIF, «modélisation électromagnétique de systèmes multicapteurs-pièce à défauts complexe pour le CND par CF», TIZI-OUZOU :, 2011.
- [7]. Samir, BENSAID, «Cours théorie de champ. M'sila», : Université de M'sila, 2010.
- [8]. ZAIDI, Houda, «Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples», Paris : , 2012.
- [9]. OUKHELLOU, Latifa, «Paramétrisation et Classification Des Signaux En CND. Application à la Reconnaissance Des Défauts De Rail par Courant de Foucault», Paris : , 1997. 2133.
- [10]. HOANG, Dung, «Détermination simultanée de al résistivité et l'épaisseur des tôles métalliques et d'alliages non magnétiques par méthode électromagnétique sans contact», LYON :, 2002. E.C.L 2002-8.
- [11]. Salvatore Baglio, Senior Member, IEEE, Salvatore Castorina, and Nicolò Savalli, «Integrated Inductive Sensors for the Detection», Barcelona: IEEE SENSORS JOURNAL, 2005. Vol. 5, 3.
- [12] Georges Asch, «Les capteurs en instrumentation industrielle», Paris : DUNID, 1991. ISBN 2100002201.
- [13]. DUMONT-FILLON, Jacques, «Contrôle non destructif (CND) », Paris : , 2006. R 1 400–1.
- [14]. WANIN, Maurice, «Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 2). Nancy :. M 4 131 – 16.
- [15]. ZORNI, Chiara, «Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction», Paris : , 2012.
- [16]. Principales limites des techniques d'examen non destructif note a l'attention des donneurs d'ordres», Paris : , 2013. RDT-ISI-1035.

- [17]. Le contrôle non destructif . une vue d'ensemble des différentes techniques», : MAG'MAT, 2006. 20.
- [18]. Bihan, Yann Le, «Modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault : approche basée sur la méthode des éléments finis », Paris .
- [19]. WANIN, Maurice, «Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 2) », Nancy :
- [20]. WANIN, Maurice, «Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 1) », Nancy :
- [21]. ديوان المطبوعات الجامعية : بن عكنون-الجزائر. الكهرباء و المغناطيسية الجزء الأول. عبد الله موسى. 1984. 87/05.
- [22]. ديوان المطبوعات الجامعية : بن عكنون-الجزائر. الكهرباء و المغناطيسية الجزء الثاني. عبد الله موسى. 1984. 87/05.
- [23]. CHOUA, Y., L. S ANTANDRÉA, Y. LE BIHAN et C. MARCHAND (2010), « Mesh Refinement in Eddy Current Testing With Separated T-R Probes », IEEE Trans. Mag. 46, 2795–2798.
- [24]. THEODOULIDIS, T. et J. B OWLER (2005), « Eddy-current interaction of a long coil with a slot in a conductive plate », IEEE Trans. Mag. 41(4), 1238–1247.
- [25]. Hamia R, Cordier C, Saez S, Dolabdjian C. Separability of multiple deep crack defects withan NDE eddy current system. IEEE Transactionson Magnetics 2013; 49(1):124–7.
- [26]. Hamia Rimond (2010), «Performances et apports des capteurs magnétiques à très haute sensibilité aux systèmes de Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault », IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 46, NO. 10, OCTOBER 2010
- [27]. HAMIA R., CORDIER C., SAEZ. S., et al. Giant Magneto Impedance Sensor for Non Destructive Evaluation EddyCurrent System ", Sensor Letters, 2009, 7, 3, 437–441.
- [28]. BUTIN L., WACHE G., PEREZ L. New NDE perspectives with magnetoresistance array technologies – from research to industrial applications, Magnetic Sensors, Insight, 2005, 47, 5.
- [29]. PEREZ L., LE HIR J., DOLABDJIAN C., et al. Investigation in detection of fatigue cracks under rivet head airframe using improved GMR magnetometer in an Eddy Current system. Journal of Electrical Engineering, 2004, 55, 10/s, 10-11.

Résumé du rapport bibliographique du projet de MDM

L'objectif visé par ce travail, en premier lieu, est de présenter les principales méthodes de 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 influer 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 of bibliographic report of the MM project

The first objective of this work, is presented the main NDT methods and particularly that of eddy currents (based on variation in impedance sensor part), then make a quick description of most sensors used in this context, and finally give the Maxwell equations govern the phenomenon of eddy current detection, boundary conditions and parameters that can influence on this detection.

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

ملخص تقرير المراجع لمشروع مذكرة الماجستير

الهدف من هذا العمل، أولاً، يتم تقديم مختلف التقنيات المستعملة في المراقبة غير المدمرة مع سرد مبدأ، مجالات الإستعمال، المزايا و التي تعتمد على تغيير الممانعة لكل من الملتقط و القطعة المراد مراقبتها)، (النقائص لكل تقنية و خاصة بالنسبة للمراقبة بتيارات فوكو ثم يليه وصفاً سريعاً لأكثر اللواقط المستعملة هذا السياق، وفي النهاية يتم إعطاء معادلات ماكسويل التي حكم على ظاهرة كشف، شروط الحدود والمعلمات التي يمكن أن تؤثر على هذا الكشف.

فهرس المصطلحات: المراقبة غير المدمرة، بتيارات فوكو، معادلات ماكسويل، ملتقطات