

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Électromécanique

Présenté par :

AMRIOU Nabil

HANNA Brahim

Thème : _____

Contrôle Non Destructif pour une Structure Multicouches utilisée en Aéronautique par Système de Multi-Capteurs à Courants de Foucault

Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Président
Dr. LADGHEMCHIKOUCHE Brahim	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Examineur
Dr. ABDOU Abdelhak	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Rapporteur
Dr. BOUCHALA Tarik	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Corapporteur

Année universitaire : 2020/2021

N° d'ordre :

Dédicaces & Remerciements

Dédicaces

Nous dédions le présent travail à

Nos parents,

Nos familles,

Et à tous nos amis.

Remerciements

En premier nous tenons à remercier LE BON DIEU pour le peu de savoir qu'on a acquis.

Par la même occasion nos sincères remerciements seront adressés à notre encadreur le **Dr. ABDOU Abdelhak** qui nous a fait bénéficier de ses conseils, sa patience, sa disponibilité et son dévouement pour que nous puissions élaborés ce travail.

Nos remerciement vont à l'encontre du **Prof Tarik BOUCHALA** , notre co-encadreur, pour l'aide, les conseils et directive le long de la préparation de ce mémoire

Nous tenons à remercier tous les enseignants qui ont accepté de juger ce travail d'une part, et d'autre notre gratitude envers tous les enseignants et personnel administratif du département d'électrotechnique pour leurs efforts et engagement pour nos offrir les meilleures conditions de formation durant nos années d'études.

On ne peut pas oublier de remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, ainsi que toute la promotion **ELECTROMECHANIQUE 2020/2021**

Résumé

Résumé

Le contrôle non destructif (CND) a pour but d'évaluer l'intégrité d'une pièce sans la détériorer. La détection précoce d'un défaut dans les domaines à risque tel que le nucléaire ou l'aéronautique peut éviter des grandes pertes humaines et matérielles.

À cet égard les travaux présentés dans ce mémoire ont permis le développement de modèle sous COMSOL-Muliphysics avec la méthode des éléments finis (MEF) d'imageries à courants de Foucault multiéléments et avec une alimentation multiplexées (ICFMM)

Les ICFMM sont destinés à l'évaluation non-destructive des défauts au voisinage des rivets sur des structures aéronautiques et permettront la caractérisation des défauts avec des images 3D représentant la variation de l'impédance. Ces résultats sont très satisfaisants du point de vue modélisation, ils nous ont permis de mettre en évidence les différents paramètres influent sur la détection des défauts tels que la fréquence, le lift-off et les caractéristiques géométriques des défauts.

Mots clés :

Imagerie par Contrôle non destructif multiéléments multiplexés, courants de Foucault, capteur inductif, équations de Maxwell.

Abstract

The purpose of non-destructive testing (NDT) is to assess the integrity of a part without damaging it. The early detection of a fault in risk areas such as nuclear or aeronautics can avoid great loss of life and material.

In this regard, the work presented in this thesis allowed the development of a model under COMSOL-Muliphysics with the finite element method (FEM) of phased array eddy current imaging and with a multiplexed power supply (ICFMM)

The ICFMMs are intended for the non-destructive evaluation of defects in the vicinity of rivets on aeronautical structures and will allow the characterization of the defects with 3D images representing the variation in impedance. These results are very satisfactory from a modeling point of view, they allowed us to highlight the various parameters influencing the detection of faults such as frequency, lift-off and geometric characteristics of faults.

Keywords :

Multiplexed phased array non-destructive testing imaging, eddy currents, inductive sensor, Maxwell equations.

ملخص

لغرض من الاختبار غير المتلف هو تقييم سلامة قطعة ما دون الإضرار بها. يمكن أن يؤدي الاكتشاف المبكر للخلل في مجالات الخطر مثل الأسلحة النووية أو الطيران إلى تجنب حدوث خسائر كبيرة في الأرواح والمواد.

في هذا الصدد ، سمح العمل المقدم في هذه الأطروحة بتطوير نموذج في إطار COMSOL-Muliphysics باستخدام طريقة العناصر المحدودة لتصوير التيار الدوامي المرحلي ومع مصدر طاقة متعدد الإرسال.

الغرض من التقييم غير المدمر للعيوب الموجودة بالقرب من المسامير الموجودة على هياكل الطيران وسوف تسمح بتوصيف العيوب باستخدام صور ثلاثية الأبعاد تمثل التباين في الممانعة. تعتبر هذه النتائج مرضية للغاية من وجهة نظر النمذجة ، فقد سمحت لنا بتبسيط الضوء على المعلمات المختلفة التي تؤثر على اكتشاف الأخطاء مثل التردد والرفع والخصائص الهندسية للأعطال.

الكلمات الدالة:

مصفوفة متعددة الأطوار غير مدمرة للتصوير ، تيارات إيدي ، مستشعر حثي ، معادلات ماكسويل.

Tables des Matières, Figures et Tableaux

Table des matières

Sommaire

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	iv
Liste des Figures.....	vi
Liste des Tableaux.....	viii
Nomenclature	ix
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Généralités sur le Contrôle Non Destructif (CND)	4
I.1.Introduction.....	4
I.2 Différentes techniques de contrôle.....	4
I.2.1 Examen Visual	4
I.2.2 Contrôle par laser	5
I.2.3 Ressuage.....	6
I.2.4 Magnétoscopie	7
I.2.5 Radiographie	9
I.2.6 Thermographie	10
I.2.7 Ultrasons	11
I.2.8 Contrôle par Courants des Foucault	13
I.3 Type des défauts.....	17
I.3.1 Hétérogénéités et défauts	17
I.3.2 Défauts de surface	17
I.3.3 Défauts internes.....	17
I.4 Conclusion	17
Chapitre II . Formulations et modélisation du CND par CF	20
II.1. Introduction.....	20
II.2. Principe des capteurs inductifs	20
II.3. Principes et caractéristiques de base des sondes à Courants de Foucault.....	21
II.3.1. Sondes à double fonction.....	21
II.3.2. Sondes à fonction séparées	22
II.3.3. Mesure absolue et différentielle.....	22
II.3.4. Types de sonde.....	22

II.3.5. Modes d'excitation	24
II.3.6. Plan d'impédance normalisée	25
II.3.7. Intérêt de la modélisation.....	26
II.3.8. Modélisation mathématique du système.....	27
II.3.9. Méthode des éléments finis.....	33
Conclusion :.....	35
Chapitre III . Imagerie à courants de Foucault multiéléments multiplexés théorie et résultats de simulations	37
III.1. Introduction	37
III.2. Capteurs multiéléments	37
III.2.1 Introduction	37
III.2.2 Capteurs multiéléments	37
III.2.3 Concepts généraux des courants de Foucault multiéléments	38
III.3. Développement de solution CFM pour le remplacement de méthodes conventionnelles.....	39
III.3.1.Optimisation d'un capteur CFM.....	39
III.3.2 Paramètres définissant un capteur CFM.....	39
III.3 Résultats de simulations	42
III.3.1 Modèle géométrique et description	42
III.3.2 Maillage du modèle propose	43
III.3.3 Caractéristiques géométriques et physiques	43
III.3.4 Courants induit	44
III. 3.5 Paramètres influant sur la variation d'impédance	46
III.4 Conclusion.....	83
Conclusion générale	85
Références bibliographiques :	87

Liste des Figures

Chapitre I. Généralités sur le Contrôle Non Destructif (CND)

Figure I. 1	Principe de l'Examen Visuel.....	5
Figure I. 2	Principe du ressuage.....	6
Figure I. 3	Principe de la magnétoscopie.....	8
Figure I. 4	Principe de La Radiographie.....	9
Figure I. 5	Principe de La Thermographie.....	10
Figure I. 6	Principe des Ultrasons.....	12
Figure I. 7	Principe du CND par courants de Foucault.....	13
Figure I. 8	Répartition des courants de Foucault sous une surface plane.....	14
Figure I. 9	Exemple de distribution de CF en fonction de plusieurs paramètres.....	15

Chapitre II . Formulations et modélisation du CND par CF

Figure II. 1	Capteur Magnétique ou CM. Figure II. 2	Capteur a courant de Foucault ou CCF.....	20
Figure II. 3	Sonde a double fonction.....		21
Figure II. 4	Sonde a fonction séparée.....		22
Figure II. 5	Sonde Interne.....		23
Figure II. 6	Sonde Encerclant.....		23
Figure II. 7	Sonde Surfaccique.....		24
Figure II. 8	Plan d'impédance (a) Non-normalisé ; (b) Plan d'impédance normalisé.....		26
Figure II. 9	Equation de magnétodynamique dans des différentes régions.....		32
Figure II. 10	Organigramme de calcul par élément finis.....		35

Chapitre III . Imagerie à courants de Foucault multiéléments multiplexés théorie et résultats de simulations

Figure III. 1	Balayage d'un capteur monoélément et multiéléments, [5].	38
Figure III. 2	Exemple de sonde multiéléments.....	38
Figure III. 3	Schématisation d'un capteur CFM définissant la couverture et la résolution, [5].	40
Figure III. 4	Uniformité de signal CF sur un montage multiélément, [5].	40
Figure III. 5	Alimentation par multiplexage de bobines CF multiélément, [6].	41
Figure III. 6	Exemples d'imageries obtenues lors d'un balayage linéaire et polaire, [5].	42
Figure III. 7	Modèle géométrique.....	43
Figure III. 8	Maillage du modèle.....	43
Figure III. 9	Variation des courants induits en fonction de la position de la bobine.....	45
Figure III. 10	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une fréquence 50KHz.....	47
Figure III. 11	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une fréquence 50KHz.....	48
Figure III. 12	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une fréquence 40KHz.....	49
Figure III. 13	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une fréquence 40KHz.....	50
Figure III. 14	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une fréquence 30KHz.....	51
Figure III. 15	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une fréquence 30KHz.....	52
Figure III. 16	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LIFT-OFF 0.5mm.....	54
Figure III. 17	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LIFT-off 0.5mm.....	55
Figure III. 18	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LIFT-off 0.75mm.....	56

Figure III. 19	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LIFT-off 0.75mm.....	57
Figure III. 20	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LIFT-off 1.0mm	58
Figure III. 21	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LIFT-off 1.0mm.....	59
Figure III. 22	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LARGEUR du défaut 0.2mm.....	61
Figure III. 23	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LARGEUR du défaut 0.2mm ..	62
Figure III. 24	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LARGEUR du défaut 0.5mm	63
Figure III. 25	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LARGEUR du défaut0.5mm ...	64
Figure III. 26	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une 1.0mm.....	65
Figure III. 27	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LARGEUR du défaut1.0mm ...	66
Figure III. 28	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une longueur du défaut 7.5mm	68
Figure III. 29	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une longueur du défaut 7.5mm.....	69
Figure III. 30	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une longueur du défaut 10.00mm	70
Figure III. 31	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une longueur du défaut 10.00mm...	71
Figure III. 32	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une longueur du défaut 12.50mm	72
Figure III. 33	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une longueur du défaut 12.50mm...	73
Figure III. 34	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une POSITION DEFAULT90° ,180° et 300°.....	75
Figure III. 35	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une POSITION DEFAULT 90° ,180° et 300°	76
Figure III. 36	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LARGEUR ET POSITION DEFAULT 0.2mm(90°),0.5mm(180°) et 1.0mm(300°).....	78
Figure III. 37	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LARGEUR ET POSITION DEFAULT 0.2mm (90°), 0.5 mm(180°) et 1.0 mm(300°).....	79
Figure III. 38	Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une POSITION ET LONGUEUR DU DEFAULT 7.5mm(90°),10.0mm(180°) et 12.5mm(300°)	81
Figure III. 39	Variation de la partie réelle de l'impédance pour une POSITION ET LONGUEUR DU DEFAULT 7.5mm(90°),10.0mm(180°) et 12.5mm(300°).....	82

Liste des Tableaux

Tableau III. 1 Caractéristiques géométriques et physiques 44

Nomenclature

Acronymes

CND	Contrôle Non Destructif
END	Evaluation Non Destructif
CF	Courants de Foucault
CND-CF:	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
CCF:	Capteur par Courants de Foucault.
ECA	Capteurs multiéléments (Eddy Current Array)
ICFMM	Imageries à Courants de Foucault Multiéléments Multiplexés
CM	Capteur Magnétique.
MEF	Méthode des Eléments Finis.
2D	Bidimensionnel.
3D	Tridimensionnel.

Symboles

A	Potentiel Vecteur magnétique	(T.m)
B	Induction magnétique	(T)
D	Induction électrique	(C/m ²)
E	Champ électrique	(V/m)
f	Fréquence	(Hz)
H	Champ magnétique	(A/m)
I :	Intensité de courant électrique	(A)
J	Densité de courant	(A/m ²)
J _s :	Densité de courants surfaciques	(A/m ²)
t	temps	(s)
U :	Tension aux bornes du capteur	(V)
V	Potentiel scalaire électrique	(V)
Φ	Potentiel scalaire magnétique	(T.m)
ω	Pulsation électrique	(rad/s)
σ	Conductivité électrique	(S/m)
σ_p :	Conductivité électrique de la pièce	(S/m)
ρ	Résistivité électrique	(Ω .m)
δ	Épaisseur de peau	(m)
μ_0	Perméabilité magnétique absolue du vide	$4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m)
μ_r	Perméabilité magnétique relative	
ϵ_0	Permittivité électrique absolue du vide	$36\pi 10^{-9}$ (F/m)
ϵ_r	Permittivité électrique relative	
R	Résistance électrique	(Ω)
ΔR	Variation de la résistance	(Ω)
L	Inductance propre	(H)
X	Réactance	(Ω)
X _n	Réactance normalisée	
ΔX :	Variation de la réactance	(Ω)
Z	Impédance	(Ω)
ΔZ :	Variation de l'impédance	(Ω)
S :	Surface	(m ²)

Introduction Générale

Introduction générale

Les Techniques de contrôle non destructif (CND) consistent à établir l'état d'intégrité d'une structure, appelée structure « cible », sans la dégrader. Cette problématique répond néanmoins à des enjeux majeurs de la société, tels que la sécurité des systèmes industriels et des personnes, [1].

Ces techniques vont du simple examen visuel à des méthodes complexes faisant appel à différents domaines de la physique (optique, électromagnétique, thermique, ultrasonores, rayons ionisants...). Elles sont exploitées dans de très nombreux secteurs industriels, dont les secteurs nucléaires et aéronautiques, pour des raisons de sécurité évidentes, mais également pour des raisons économiques, [2-3].

La détection de défauts dans les structures aéronautiques et spatiales suscite un grand intérêt, que ce soit durant la phase de fabrication ou bien lors des opérations de maintenance. Les moyens pour contrôler l'intégrité de ces structures doivent donc être rapides, précis, fiables, à faible coût, et le plus miniaturisés possible, [1-3].

Le CND par capteurs à courants de Foucault est bien adapté à la détection de défauts dans les structures multicouches en aluminium. Cette technique est basée sur l'analyse des changements de l'impédance globale de la bobine dans les environs du défaut principalement autour des rivets (zone où il y a le plus de contraintes mécaniques) niveau. La configuration du dispositif électromagnétique est constituée par capteur (bobine) absolue ou un capteur différentiel placé à l'extérieur ou à l'intérieur d'un tube conducteur, [1-3].

La technique des courants de Foucault (CF) est largement utilisée dans le domaine du CND, dès lors qu'il s'agit de matériaux électriquement conducteurs. Elle représente par exemple la moitié des contrôles dans le domaine de l'aéronautique. Cette méthode est en effet sensible à des défauts dans l'état géométrique ou électromagnétique d'une pièce, comme des inclusions, des fissures ou les effets de la corrosion. De plus, elle est aisée à mettre en œuvre, robuste dans le cadre des applications industrielles et relativement peu coûteuse. Cependant, le besoin grandissant de fiabilité et de rapidité pour les opérations d'inspection requiert le développement de nouveaux systèmes de contrôle, [1].

Dans ce contexte, des systèmes d'imagerie à courants de Foucault ont été récemment développés afin de produire des images CF avec bonnes performances en termes de caractérisation des défauts, [1]. Elle est obtenue par des procédures de balayage mécanique d'un ensemble de bobines individuelles, regroupées dans une seule sonde et formant le système de bobines multiéléments, [4-5]. L'utilisation d'un système de capteurs multiéléments permet de contrôler une surface importante et de ce fait réduire le nombre de balayage particulièrement coûteux en temps d'une part et d'autre part pour minimiser l'effet de mutualité entre les bobines adjacentes, on procède à une alimentation en multiplexage des éléments constituant le capteur multiéléments (c-à-d les bobines sont excitées séquentiellement), [4-5].

L'objectif visé par ce travail est une étude d'un système de détection par courants de Foucault multiéléments alimenté en mode harmonique multiplexé appliqué sur des structures multicouches utilisées en aéronautiques. Cette détection se fera par un réseau de capteurs disposé en anneau tout autour du rivet, formant ainsi des couches circulaires autour de ce dernier.

Ce mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre présentera des généralités sur le CND. Les principales méthodes de CND seront rappelées.

- Le second chapitre sera consacré à la formulation et la modélisation du problème de CND par CF et aux équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électriques et magnétiques dans le domaine d'étude.

- Le troisième chapitre sera réservé pour sa première partie à l'imagerie par CF, quant à la deuxième partie elle sera dédiée aux résultats de simulation obtenus et leurs interprétations.

- On terminera par une conclusion générale et des perspectives pour la continuité de ce travail.

Chapitre I

Généralités sur le contrôle non destructif (CND)

Chapitre I. Généralités sur le Contrôle Non Destructif (CND)

I.1.Introduction

Le Contrôle non destructif (CND) est l'utilisation des méthodes physiques qui testeront les matériaux, les composants et les assemblages pour détecter les défauts de leur structure sans nuire à leur utilité future. Le CND se préoccupe de révéler des défauts dans la structure d'un produit. Les méthodes de CND vont du simple au compliqué. L'inspection visuelle est la plus simple de toutes. Imperfections de surface invisible à l'œil peut être révélé par des méthodes pénétrantes ou magnétiques. Si des défauts de surface vraiment graves sont détectés, il est souvent inutile de procéder à des examens plus compliqués de l'intérieur par ultrasons ou radiographie.

Les méthodes CND qui sont couramment utilisées comprennent l'inspection visuelle ou optique, les tests de pénétration de liquide, les tests de particules magnétiques, les tests par courants de Foucault, les tests radiographiques et les tests ultrasoniques. Les méthodes CND sont celles utilisées uniquement pour des applications spécialisées et sont par conséquent limitées dans leur utilisation, comprennent la radiographie neutronique, l'émission acoustique, les tests thermiques et infrarouges, la détection des contraintes, les techniques micro-ondes, les tests d'étanchéité, l'holographie, etc.

Il faut également se rappeler qu'aucune de ces méthodes ne peut nous apporter de solutions à tous les problèmes possibles, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas des alternatives optionnelles mais plutôt complémentaires les unes des autres. [2] [3]

I.2 Différentes techniques de contrôle

Les techniques de CND utilisées sont diverses : la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, les courants de Foucault... Elles dépendent de la nature même du contrôle envisagé. Ces méthodes exploitent des phénomènes différents et sont le plus souvent complémentaires.

Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué. Pour la plupart de ces méthodes, les moyens d'acquisition ont été automatisés, permettant ainsi le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données, [3].

I.2.1 Examen Visual

I.2.1.1 Principe

Chronologiquement l'examen visuel est le plus ancien. Cette procédure techniquement très simple fait toutefois appel à une véritable expertise et à un sens aigu de l'observation des

agents qui l'effectuent (Figure I.1). L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. En examen préalable, l'inspection visuelle d'un objet, d'une structure ou d'un assemblage tel qu'une soudure permettra de guider un observateur expérimenté dans la définition d'une autre technique.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect inadmissibles pour des produits plats du types tôles, tissus, verres,...etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limites de différentes natures, que nous allons examiner et justifiant l'utilisation de toute une gamme de procédés de contrôle optique (éclairage, loupe, miroir, ...),[6], [18] .



Figure I. 1 Principe de l'Examen Visuel.

I.2.1.2 *Domaine d'application*

- Applicable pour tous les matériaux et pour défauts débouchant.

I.2.1.3 *Avantages et Inconvénients*

Les Avantages et Inconvénients de l'examen visuel sont :

a) *Avantages*

- Examen simple, rapide et peu coûteux.
- Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.

b) *Inconvénients*

- Détection limité aux défauts visibles.
- La surface doit être propre.

I.2.2 **Contrôle par laser**

I.2.2.1 *Principe*

La méthode de contrôle par laser est parmi les méthodes optiques les plus répandues en contrôle non destructif. Comme elle est aussi sans contact, les objets irréguliers et les surfaces non planes peuvent être inspectés sans problèmes d'usure. Le mot laser est un acronyme pour amplification légère de la radiation de l'émission stimulée. Cette lumière est

très intense, essentiellement monochromatique (longueur d'onde unique), plan polarisé (unidirectionnel) et très stable. Les méthodes de contrôle non destructif par laser sans populaires dans les industries aéronautique et automobiles ; [3]

1.2.2.2 Avantages et Inconvénients

Les Avantages et Inconvénients de contrôle par laser sont :

a) Avantages

- Inspection sans contact, ne nécessite pas la préparation de surface de la pièce à contrôler.
- Pas de constables : liquide de pénétration, martiaux de marquage ...etc.
- Avec les capteurs électro-optiques comme les cameras CCD, des mesures en temps réel sont possibles.

b) Inconvénients

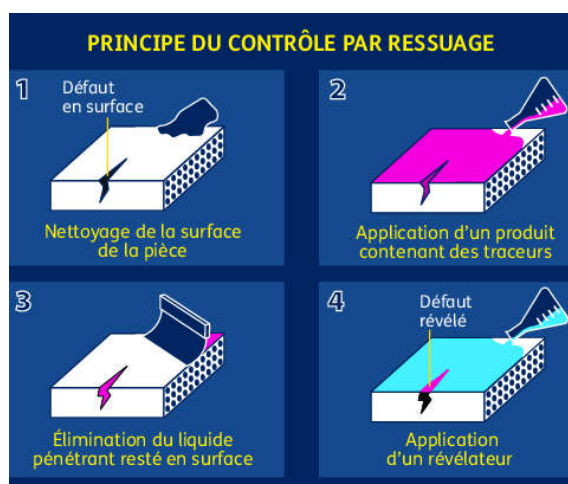
- Considération de sécurité particulières doivent être prises en compte.
- Une composante de chargement est nécessaire pour voir les résultants.
- Les résultats dépendent de la composante de cisaillement.
- L'interprétation des résultats est subjective ; [6]

1.2.3 Ressuage

1.2.3.1 Principe

C'est une technique destinée à révéler la présence de fissures en surface de pièces planes ou quasi-planes. Elle consiste à badigeonner la cible avec un liquide fluorescent, qui pénètre dans les fissures (Figure I.2), [18]

Après nettoyage de la cible, un révélateur est appliqué et en réagissant avec le liquide restant dans les fissures, va les révéler.



a. Les étapes de ressuage

a. Résultat du contrôle par ressuage

Figure I. 2 Principe du ressuage.

I.2.3.2 Domaine d'application

Le domaine d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement avec le pénétrant.

A titre indicatif, sa sensibilité est très bonne, puisqu'on peut estimer et obtenir une détection fiable de défauts de 80 μm de largeur pour 200 μm de profondeur pour un ressuage coloré pratiqué en atelier sur une surface usinée, alors que le ressuage fluorescent conduit dans les mêmes conditions à une limite de détection de l'ordre de 1 μm en largeur pour 20 à 30 μm en profondeur .

I.2.3.3 Avantages et Inconvénients

Les Avantages et Inconvénients de ressuage sont :

Avantages

- Simple à mettre en œuvre et relativement sensible aux fissures ouvertes (et en surface).
- Elle n'est pas automatisable et les résultats restent à l'appréciation de l'opérateur. De plus, elle peut être effectuée sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux de géométrie et dimensions quelconques.
- Facilité de mise en œuvre (pour pénétration pré émulsionnée).

Inconvénients

- Il est nécessaire de faire un décapage et un dégraissage soigné avant l'inspection.
- L'interprétation des résultats est subjective: Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.
- Nécessite l'utilisation de produits non récupérables, voire contaminés après utilisation (ex: centrale nucléaire où cette technique va être complètement abandonnée pour des raisons de normes de dépollution).
- Danger des solvants toxiques, corrosifs, inflammable ; [6].

I.2.4 Magnétoscopie

I.2.4.1 Principe

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 (Figure I.3). 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, [8].

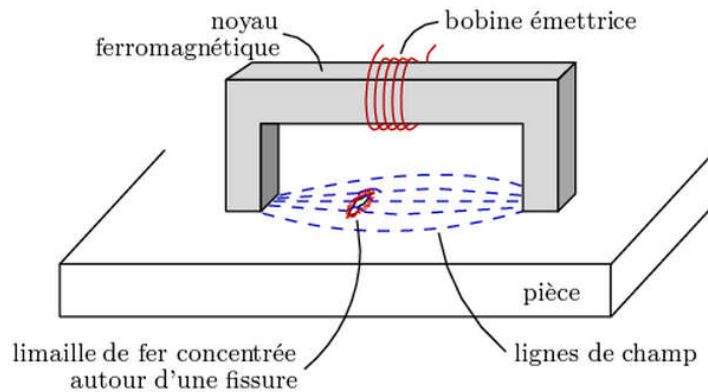


Figure I. 3 Principe de la magnétoscopie.

I.2.4.2 Domaine d'application

La magnétoscopie permet de détecter des défauts de densité débouchant en surface ou proches de la surface sur des matériaux ferromagnétiques tels que aciers ordinaire au carbone, aciers ferritiques ordinaires et au chrome (13 % de chrome), fontes, nickel, cobalt. Les aciers austénitiques ne sont pas ferromagnétiques. On considère qu'un matériau est ferromagnétique lorsque soumis à un champ continu de 2400 A/m, il présente une induction d'au moins 1 tesla. La magnétoscopie est utilisée pour le contrôle :

- Des pièces moulées : criques situés entre le raccordement, réseaux de fissures superficielles.
- Des pièces forgées : criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement.
- Les fissures de fatigue peuvent si les conditions sont favorables être détectées. Les fissures de corrosion sous tension sont généralement bien décelées ainsi que les fissures d'origine thermique des soudures, [6].

I.2.4.3 Avantages et Inconvénients

Les Avantages et Inconvénients de la magnétoscopie sont :

a) Avantages

- Facilité à mettre en œuvre manuellement.
- Economique.
- Résultats quasi immédiats.
- Détection des défauts débouchant et des défauts sous-jacents.

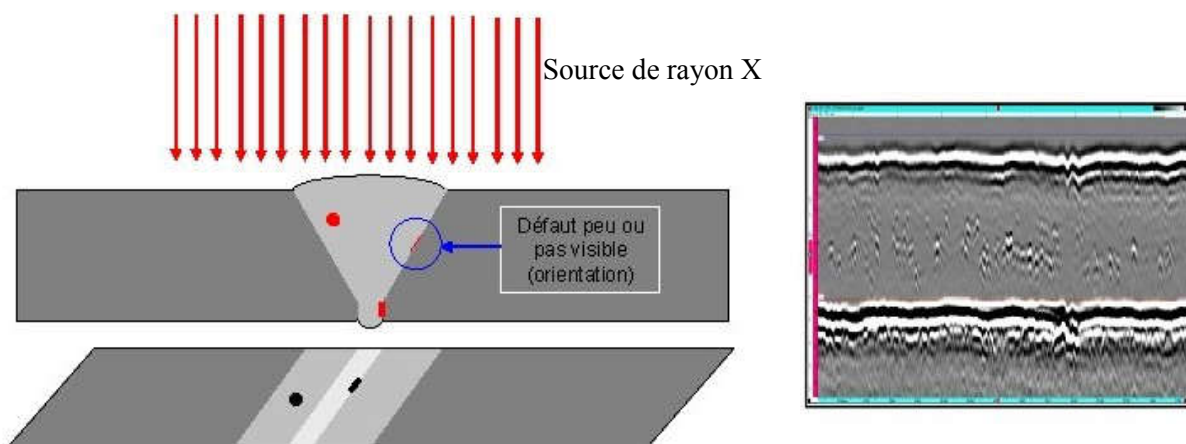
b) Inconvénients

- Cette méthode à champ magnétique continu ne s'applique qu'à des matériaux ferromagnétiques, et ne détecte pas le défaut interne ; [7].

I.2.5 Radiographie

I.2.5.1 Principe

Le contrôle par radiographie consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement ionisant (rayons X ou γ) et à recueillir le signal atténué sur un récepteur (film photographique ou capteur électronique) qui convertit ce rayonnement en une image visible. Les rayonnements subissent une absorption proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé (Figure I.4). 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, [8].



a. Principe

b. exemple de résultats de CND par radiologie

Figure I. 4 Principe de La Radiographie.

I.2.5.2 Domaine d'application

Traditionnellement, les domaines d'application du contrôle radiographique sont ceux de la fonderie et du soudage métallique avec la mise en évidence de porosités, soufflures, inclusions non métalliques, criques, manque de pénétration. Les nouvelles techniques de contrôle en temps réel sont en train d'élargir ce domaine d'application hors des industries métallurgiques ; [3]

I.2.5.3 Avantages et Inconvénients

Les Avantages et Inconvénients de cette technique sont :

Avantages

- Fournir une image constituant directement un document archivable du contrôle montrant l'absence présumée ou la présence d'un défaut dont on peut éventuellement apprécier la nature et la taille.
- Garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures.

b) Inconvénients

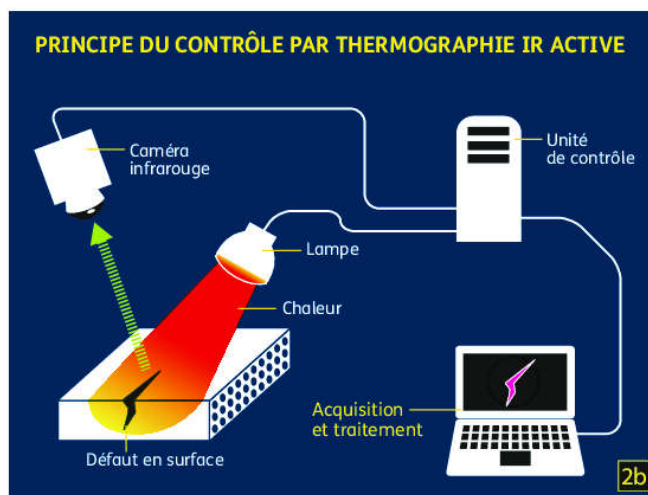
- L'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur. De plus, cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement, qui rendent son utilisation en industrie complètement inadaptée
- La nécessité de mettre en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel.
- Le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau.
- La faible productivité alliée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films ; [9].

I.2.6 Thermographie

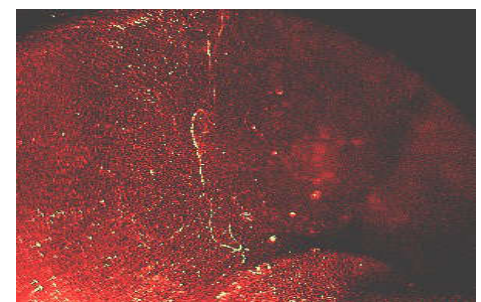
I.2.6.1 Principe

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 (Figure I.5).

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, [8].



a. Principe



b. exemple de résultats
de CND par thermographie

Figure I. 5 Principe de La Thermographie.

a) Thermographie pulsionnelle

Elle consiste à déposer à un instant T_0 , une impulsion spatialement uniforme de chaleur sur la surface de la pièce à contrôler et à observer l'évolution de la température de surface au cours du transfert de chaleur par conduction dans l'épaisseur. La présence d'une discontinuité dans le matériau perturbe le flux thermique ce qui se traduit par un écart de température appelé contraste thermique.

La mesure de ce contraste et de l'instant T pour lequel il est maximum renseigne sur la nature et la profondeur du défaut.

b) Thermographie modulée

Dans ce cas l'apport de chaleur est périodique et la présence d'une discontinuité se traduit par un déphasage entre l'évolution de la température de surface du matériau sain et celle du matériau défectueux.

c) Méthode surfacique

L'apport de chaleur et l'observation se font sur un élément de surface de la pièce à contrôler. On enregistre une séquence d'images qui décrit l'évolution de la température de surface au cours du temps en chaque point de la zone contrôlée ; [9].

I.2.7 Ultrasons

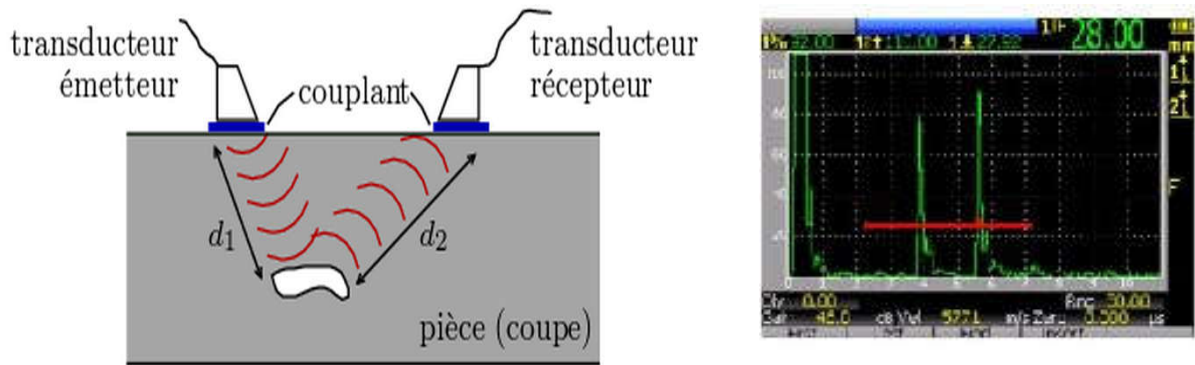
I.2.7.1 Principe

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

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

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.



a. Principe

b. exemple de résultats de CND par ultrasons

Figure I. 6 Principe des Ultrasons.

I.2.7.2 Domaine d'application

L'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques. Ce champ s'élargit de plus en plus au contrôle des matériaux et assemblages non métalliques, céramiques, polymères, matériaux composites, cela s'effectue lentement, eu égard aux difficultés pratiques rencontrées et dues à la nature même de ces produits à structure peu homogène et anisotrope. Les ultrasons sont très employées pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les profondeurs de traitements thermochimiques superficiels sur les aciers,...etc.

I.2.7.3 Avantages et Inconvénients

Les Avantages et Inconvénients de la ultrasonore sont :

a) Avantages

- Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge)
- Haute sensibilité de détection des défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore)
- Localisation et dimensionnement des défauts.
- Examen à partir d'une seule face souvent suffisant.
- Détection instantanée, se prête bien à l'automatisation.

b) Inconvénients

- Pour les contrôles "manuels" une grande expérience des opérateurs est nécessaire.
- Méthode impliquant un très haut niveau de technicité.
- Sensible à la géométrie (forme, rugosité).
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle) ; [3].

I.2.8 Contrôle par Courants des Foucault

I.2.8.1 Principe

Ce mode d'examen consiste à créer des courants induits par l'intermédiaire d'un champ magnétique alternatif (généré par un solénoïde) et variable dans le temps (basse ou haute fréquence). Ces courants induits et créés localement sont appelés courants de Foucault, leurs distributions et leurs répartitions dépendent du champ magnétique d'excitation (Figure I.7), de la géométrie et des caractéristiques de la conductivité électrique, de la perméabilité magnétique et de structure examinée, [10] , [11], [14]

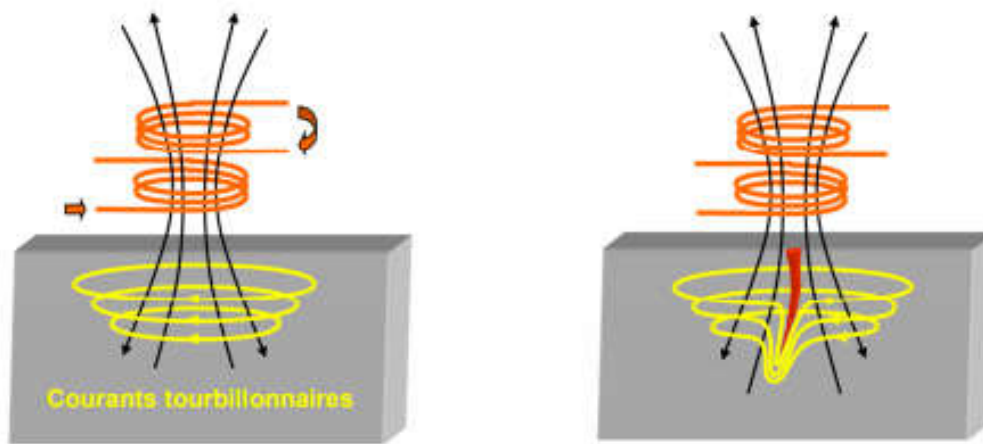


Figure I. 7 Principe du CND par courants de Foucault.

I.2.8.2 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 l a surface (relation I.1) ; [8]

La grandeur caractéristique de ce phénomène est la profondeur de pénétration donnée par:

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

f : Fréquence d'alimentation.

μ_r : Perméabilité magnétique relative du matériau.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

σ : Conductivité électrique.

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 :

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

Z: Profondeur considérée à l'intérieur de la cible[m].

J(z): Module de la densité de courant en fonction de la profondeur [A/m²].

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 I.8), [2].

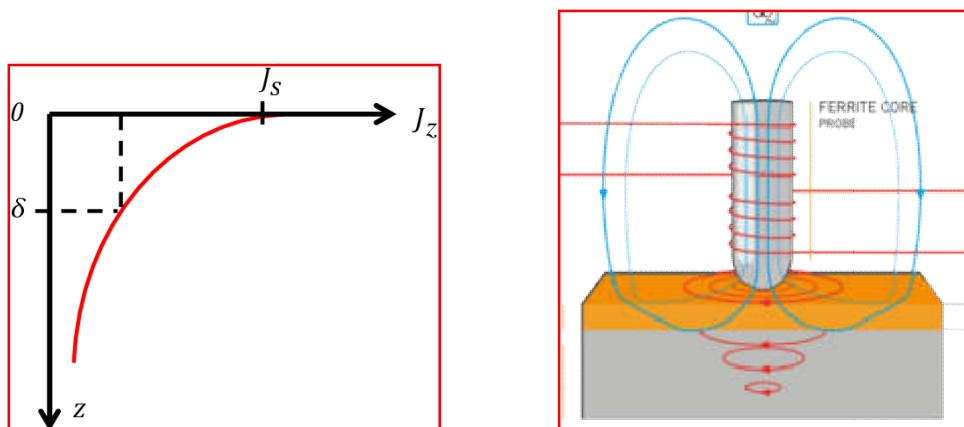


Figure I. 8 Répartition des courants de Foucault sous une surface plane.

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 ; [8].

La présence d'un défaut, perturbe la circulation des courants de Foucault, entraînant une variation de l'impédance du solénoïde. La technique est applicable à tous les matériaux conducteurs de l'électricité. Dans l'examen par les courants de Foucault citons deux méthodes:

1) Méthode directe

Cette méthode consiste à passer un courant dans un tube figure (1.8 a) où dans une plaque figure (1.8 b). Lorsqu'un défaut orienté selon l'axe entre électrodes, perturbe la

distribution du champ est donc détectée. Un défaut transversal par rapport à cet axe n'est pas détecté.

2) Méthode indirecte

L'examen par cette méthode basé sur la génération d'une induction par un solénoïde ou un aimant permanent, applicable pour les tubes et plaques. La présence d'un défaut transversal par rapport aux lignes du champ dévie celle-ci est détecté. Contrairement à un défaut orienté parallèlement aux lignes du champ.

Pour la détection des défauts, on utilise deux types de courants de Foucault dans le C.N.D :

- Les courants de Foucault basse fréquence (ordre du Hz/kHz) permettent de déterminer l'état global d'une pièce en la mettant au centre de la bobine. On distingue en général trois types de pièces (tendre, adéquat et dur).
- Les courants de Foucault haute fréquence (50 kHz à 500 kHz).

Les courants de Foucault à haute fréquence permettent de localiser en surface des bulles d'air dans le métal, en déplaçant une bobine au dessus du défaut. Il faut donc pouvoir mettre la pièce en rotation. Toutefois, il reste possible de créer une sonde rotative que l'on approche de la pièce mais le contrôle est plus complexe à réaliser (à cause de la variation d'entrefer plus importante) ; [2].

I.2.8.3 Paramètres influent sur le contrôle par courants de Foucault

La distribution des CF induits dépend de nombreux paramètres, dont, (Figure I. 9), [14]:

- Les propriétés du matériau inspecté (conductivité électrique et perméabilité magnétique)
- La géométrie de la pièce testée
- Les caractéristiques de la bobine utilisée (géométrie, nombre de spires, taille de fil)
- Les paramètres d'excitation de la bobine (fréquence, tension)
- La distance entre la bobine et la pièce (entrefer)
- La présence ou l'absence d'inhomogénéité(s).

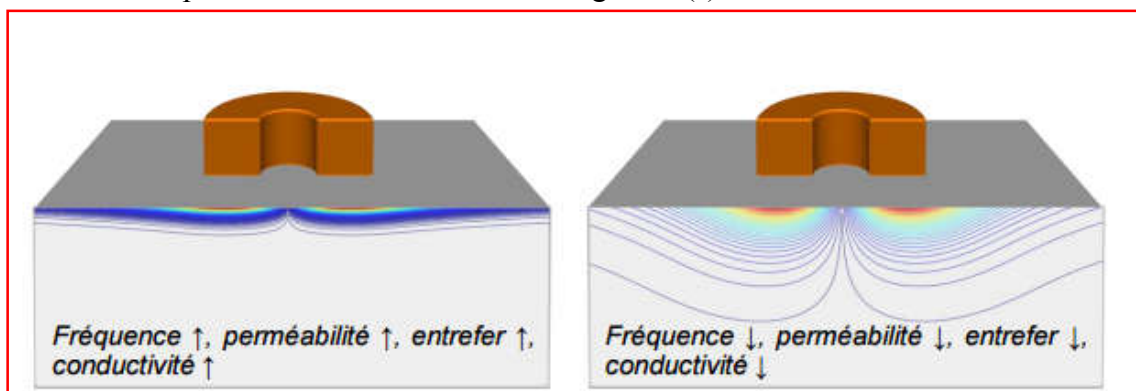


Figure I. 9 Exemple de distribution de CF en fonction de plusieurs paramètres, [5].

1.2.8.3 Domaine d'application

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

- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe de composants aéronautiques,
- Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau.
- Mesure d'épaisseur de revêtements (conducteurs non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur...).
- Recherche de défauts sur produits en sortie de fabrication (tubes, rails, barres...). Suivi d'installations et de matériels en service.
- Mesure d'épaisseur. [11].

1.2.8.4 Avantages et Inconvénient

Les Avantages et Inconvénients des courants de Foucault sont :

a) Avantages:

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

b) Inconvénients

- La profondeur d'inspection est dépend de la fréquence d'excitation.
- La détection des défauts se fait d'une manière locale.
- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs.
- La position du capteur,
- la compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection, [2].

c) Limites du CND par courants de Foucault

- Il s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs,
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur,
- L'interprétation des signaux est souvent complexe ; [8].

I.3 Type des défauts

Le défaut, se traduit soit par l'absence de matière (air), ou par une anomalie non conductrice, il peut être situé à la surface de la pièce, au milieu ou à l'intérieur de la pièce.

I.3.1 Hétérogénéités et défauts

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité, [En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Brièvement les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement les défauts de surface, les défauts internes, [6].

I.3.2 Défauts de surface

Ce sont des défauts accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect. La première catégorie (défauts ponctuels) correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

La seconde catégorie correspond aux défauts d'aspect, c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

I.3.3 Défauts internes

Ils sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger dans le produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'imagerie infrarouge, ... la majorité des techniques précédemment citées utilisent le capteur comme outil de détection des défauts. Les capteurs sont les premiers éléments rencontrés dans une chaîne de mesure, [6].

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif, les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un

éventuel défaut et les bases physiques qui gouvernent les procédés de contrôle. Nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, le contrôle par laser, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie et la technique des courants de Foucault, pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients.

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

Comme les matériaux utilisés en électrotechnique sont de type conducteur électrique au magnétique d'une part, et d'autre part la modélisation est outil essentiel pour la compréhension des phénomènes qui régissent le contrôle CND-CF, nous avons jugés utile de consacré le chapitre suivant à la modélisation du CND-CF.

Chapitre II

Formulation et modélisation

du CND - CF

Chapitre II . Formulations et modélisation du CND par CF

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, [12] [13] [14]. Dans notre travail ça sera l'équation de la magnétodynamique en régime quasi-stationnaire pour une formulation en potentiel vecteur magnétique A , [12] [15]. 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, [10] [15] [16].

II.2. Principe des capteurs inductifs

Un capteur inductif est principalement constitué d'un circuit magnétique ouvert de grande perméabilité, sur lequel sont bobinés un ou plusieurs enroulements parcourus par un courant alternatif. L'approche d'une cible conductrice et / ou magnétique dans l'entrefer du circuit modifie la répartition des lignes de champ et se traduit par une variation de réluctance et de pertes électromagnétiques dues à la pénétration du champ à l'intérieur de la cible. [17]

Lorsque la cible est purement conductrice, le champ incident induit des courants surfaciques dénommés courants de Foucault, qui à leur tour génèrent un champ magnétique opposant au champ excitateur. On parle dans ce cas de "Capteurs à courants de Foucault" ou "CCF".

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

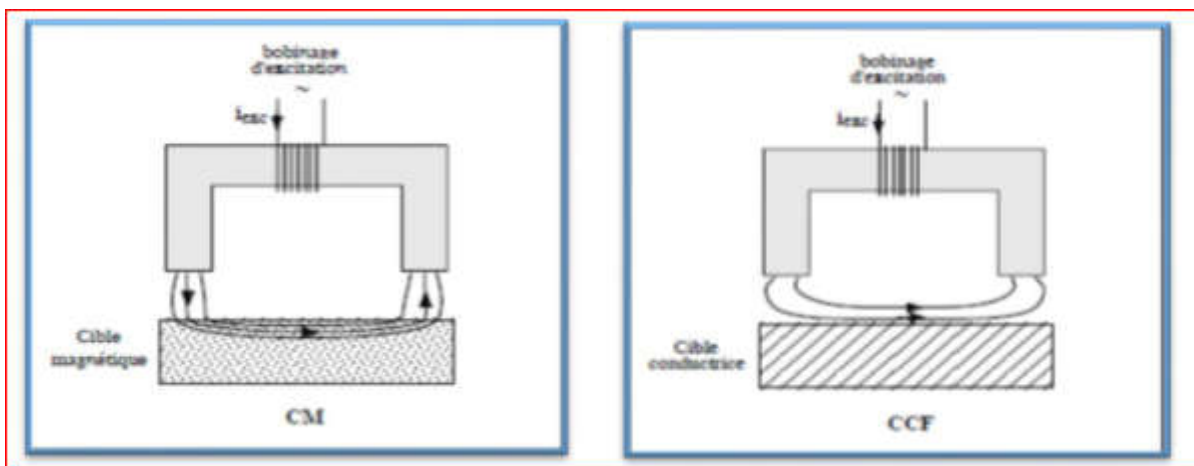


Figure II. 1 Capteur Magnétique ou CM. Figure II. 2 Capteur a courant de Foucault ou CCF

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

Les sondes à courants de Foucault sont basées sur des principes relativement simples et consistent généralement en un ensemble contenant une ou plusieurs bobines dans une configuration appropriée. La forme de la bobine, sa section transversale, sa taille et sa configuration sont des paramètres qui doivent être pris en compte pour produire une sonde particulière adaptée à une application ou à une gamme d'applications spécifiques. Cette bobine est excitée par un courant alternatif de fréquence et d'amplitude connues qui donne naissance au champ magnétique qui est alternatif. Lorsque cette bobine est rapprochée d'un matériau de test conducteur, une tension induite est générée dans l'échantillon.

Il existe deux méthodes pour détecter les changements dans les caractéristiques des courants de Foucault:

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

II.3.1. Sondes à double fonction

Dans la méthode d'impédance, la bobine d'excitation est surveillée. Comme les changements de tension de bobine ou d'un courant de bobine sont dus à des changements d'impédance dans la bobine, il est possible d'utiliser la méthode pour détecter tous les paramètres de matériau qui entraînent des changements d'impédance. L'impédance résultante est la somme de l'impédance de la bobine (dans l'air) plus l'impédance générée par les courants de Foucault dans le matériau de test. La méthode d'impédance des tests par courants de Foucault consiste à surveiller la chute de tension à travers une bobine de test. L'impédance a des composants résistifs et inductifs. L'amplitude de l'impédance est calculée à partir de l'équation:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (\text{II. 1})$$

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

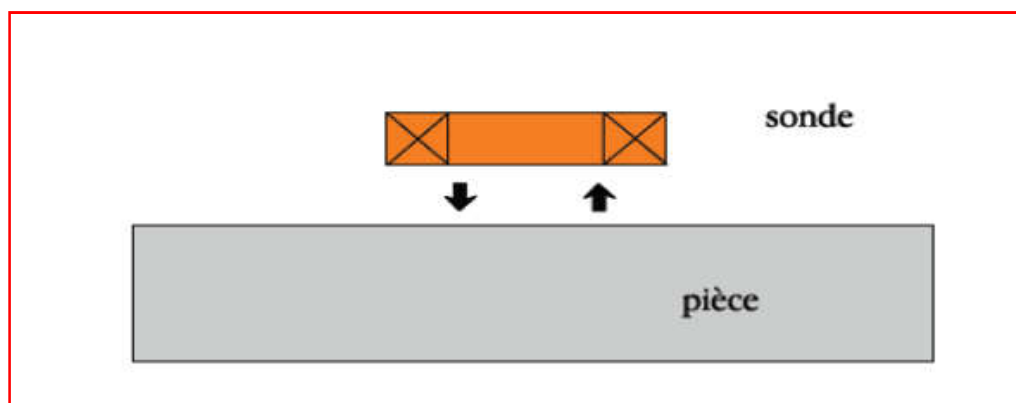


Figure II. 3 Sonde a double fonction.

II.3.2. Sondes à fonction séparées

Cette méthode consiste en une ou plusieurs bobines d'excitation séparées et une bobine de réception (ou des bobines). Dans ce cas, la tension induite aux bornes de la bobine de détection est mesurée. Le flux des courants de Foucault est surveillé en observant l'effet de leurs champs électromagnétiques associés sur la tension induite dans une ou plusieurs bobines de réception indépendantes.

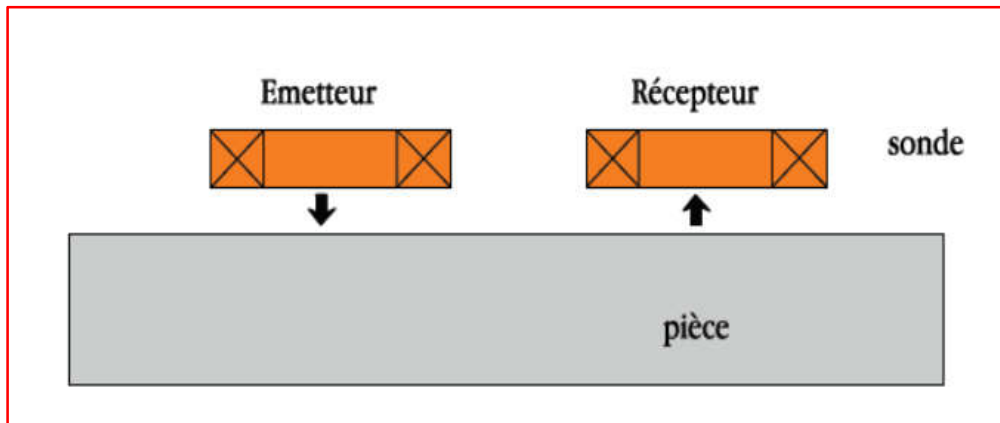


Figure II. 4 Sonde a fonction séparée.

II.3.3. Mesure absolue et différentielle

II.3.3.a. Sondes absolues.

Les sondes à courants de Foucault absolues consistent en une seule bobine ou son équivalent. Un enroulement séparé en deux ou plusieurs sections serait toujours considéré comme absolu s'il fonctionne comme tel. Dans ce type de sonde, l'impédance ou la tension induite dans la bobine est mesurée directement (leurs valeurs absolues plutôt que les changements d'impédance ou de tension induite).

II.3.3.b. Sondes différentielles.

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

II.3.4. Types de sonde

Les sondes à courants de Foucault peuvent prendre diverses formes. Le choix du type dépend de la situation de test. Voici les trois principaux types de sondes principalement utilisées dans les tests de courants de Foucault:

- Sonde interne (de type bobine).

- Sonde encerclant.
- Sonde surfacique

II.3.4.a. Sonde interne

Les sondes internes sont constituées de bobines circulaires utilisées pour tester l'intérieur des tubes ou des trous circulaires. Figure. 2.4 illustre un type de bobine qui peut être insérée dans un tube pour inspecter les discontinuités sur la circonférence interne du tube. Comme pour la bobine encerclant, la bobine interne induit des courants qui encerclent toute la circonférence du tube de sorte que toute la section entourant la bobine est inspectée.

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

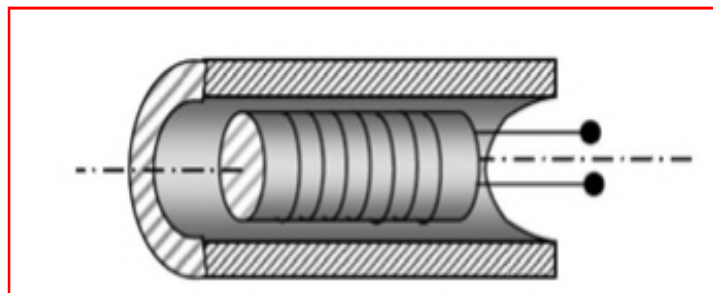


Figure II. 5 Sonde Interne.

II.3.4.b. Capteurs encerclants

Les capteurs encerclant ont une structure similaire aux sondes internes, à l'exception du fait que le matériau de test passe à l'intérieur des bobines. Ils sont principalement utilisés pour inspecter la surface extérieure des matériaux ronds tels que les tubes et les tiges. FIG 2.2. montre une bobine encerclant. Le champ magnétique induit des courants de Foucault dans la barre qui encerclent toute la circonférence du tube ou de la tige de sorte que toute la section sous la bobine soit inspectée à tout moment.

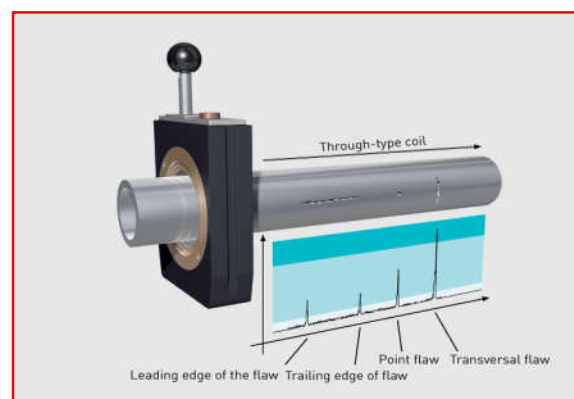
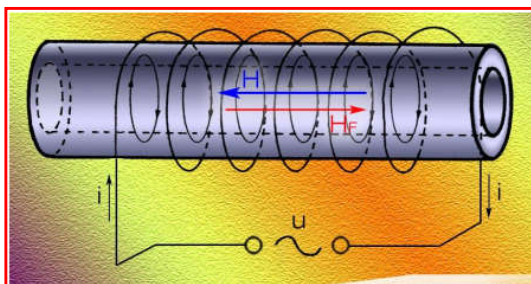


Figure II. 6 Sonde Encerclant.

II.3.4.c. Sondes surfacique

Les sondes de surface sont l'une des sondes à courants de Foucault les plus utilisées pour inspecter les surfaces, plates ou profilées, pour détecter les défauts ou les propriétés des matériaux. Les défauts peuvent être de surface ou de sous-surface. Celles-ci sont également

appelées bobines de sonde. figure. 2.6 montre une sonde de surface typique. La sonde de surface peut être portable ou montée dans un équipement de balayage automatisé. La bobine montée à l'extrémité de la sonde est pourvue d'un revêtement protecteur d'époxy pour servir de surface d'usure. Le champ magnétique produit par une bobine est approximativement de la taille de la bobine. Les autres variantes de conception de sonde de surface sont la sonde pancake, la sonde plate, la sonde «en fer à cheval», la sonde à ressort et la sonde crayon.

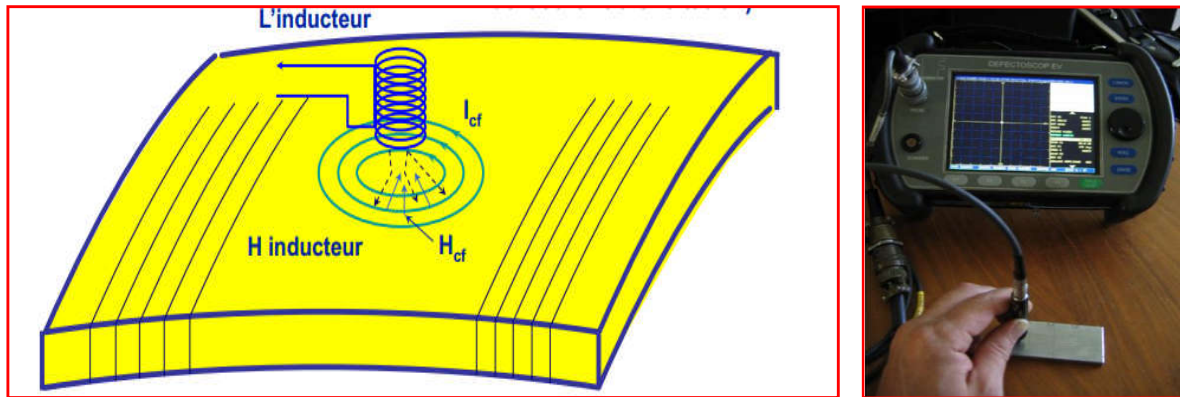


Figure II. 7 Sonde Surfaique.

II.3.5. Modes d'excitation

Les modes d'excitation dépendent de la fréquence qui est l'une des rares variables contrôlées par l'opérateur dans les tests par courants de Foucault. L'intérêt principal de la variation de la fréquence est de contrôler la profondeur de pénétration, la densité et la phase des courants de Foucault induits.[18][19]

En termes généraux, des fréquences plus élevées sont utilisées pour détecter les discontinuités de rupture de surface et des fréquences plus basses pour les tests sous la surface. On peut distinguer trois modes d'excitation:

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

II.3.5.a. Contrôle mono-fréquence

Les courants de Foucault sont induits par une excitation sinusoïdale, de fréquence fixe. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés.

Elle devra cependant se situer dans une gamme raisonnable.

Pour une fréquence trop basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits. [19]

Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes parasites capacitifs, engendrés notamment par les capacités inter-spores de la sonde.

Cette méthode simple et parfois suffisante présente cependant des limitations car elle permet difficilement d'éliminer l'influence de l'ensemble des grandeurs perturbatrices. [19] .

II.3.5.b. Contrôle multi-fréquences

Les courants de Foucault multifréquence, utilise des signaux de courant d'excitation à plusieurs fréquences en même temps.

En raison des différentes profondeurs de pénétration des signaux d'excitation à différentes fréquences dans le conducteur, les courants de Foucault multifréquence peuvent obtenir des informations sur les défauts à plusieurs profondeurs d'une part et améliorer la précision de la détection des tests de courants de Foucault, d'autre part. L'analyse contribue à l'élimination des facteurs d'interférence, améliorant considérablement la capacité de détection de la technologie de test par courants de Foucault. Cependant, les courants de Foucault multifréquences ne peuvent

fournir que des informations de détection limitées et il est parfois difficile d'obtenir une mesure précise des défauts. [20].

II.3.5.c. Contrôle par courants de Foucault pulsés

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

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

II.3.6. Plan d'impédance normalisée

L'inspection des matériaux consiste à mesurer les variations d'impédance de la bobine. En général, on utilise une méthode comparative, dont l'objet est de mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine en présence de la pièce à inspecter et l'impédance Z_0 de la bobine dans l'air. En absence du matériau à contrôler, l'impédance Z_0 du capteur est: [21], [29].

$$\bar{Z}_0 = R_0 + jX_0 \quad (\text{II. 2})$$

R_0 Et X_0 sont respectivement la résistance et la réactance à vide de la bobine du capteur. En présence du matériau à contrôler, le champ réactif provoque une modification de l'impédance du capteur. L'impédance complexe en charge \bar{Z} est

$$\bar{Z} = R + jX \quad (II.3)$$

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

Xest la composante inductive qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le capteur. [21].

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

$$\bar{Z}_n = \frac{\bar{Z} + R_0}{X_0} = R_n + jX_n \quad (II.4)$$

$$R_n = \frac{R - R_0}{X_0} \quad (II.5)$$

$$X_n = \frac{X}{X_0} \quad (II.6)$$

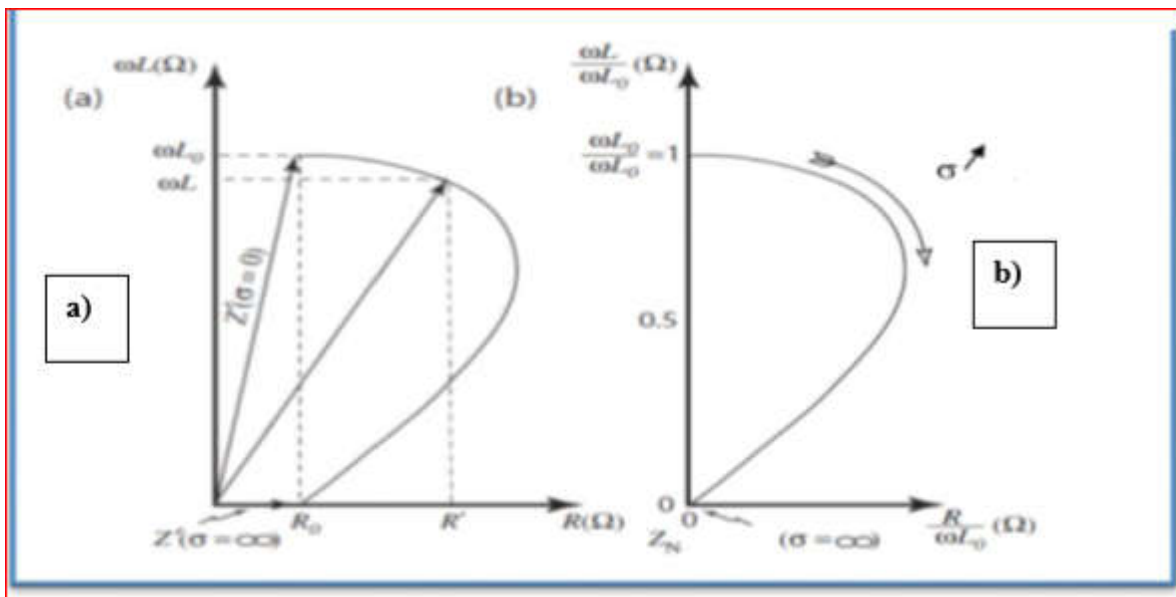


Figure II. 8 Plan d'impédance (a) Non-normalisé ; (b) Plan d'impédance normalisé.

II.3.7. Intérêt de la modélisation

Le CND par courants de Foucault est largement employé pour inspecter les matériaux électriquement conducteurs. Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier les interactions sonde-pièce et jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances.

La modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction sonde-pièce testée et de définir une structure de sonde adaptée à un problème donné. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix de matériaux,...) sans avoir à réaliser de prototypes multiples. Dans le domaine du CND par courants de Foucault, la modélisation numérique est ainsi devenue, grâce à la performance du matériel informatique, un acteur important dans la conception de sondes.

II.3.8. 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. [10].

Loi d'induction de Faraday

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.7})$$

Loi d'Ampère

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{II.8})$$

Loi de Gauss

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{II.9})$$

Loi de Gauss pour le magnétisme

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.10})$$

\vec{E} [V/m], \vec{H} [A/m] : Champs électrique, champs magnétique respectivement

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

\vec{J} [A/m²], ρ [A/m³] : Densité de courant et la densité de la charge volumique

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

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

\vec{J}_{exc} : Densité de courant de l'excitation

Ces équations sont liées entre eux par les lois constitutives qui traduisent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considéré. [10], [27-28].

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.11})$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

μ [H/m] : Perméabilité magnétique

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

μ_r Perméabilité magnétique relative du milieu

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II. 12})$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

ϵ [H/m] : permittivité électrique

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ [F/m] Permittivité électrique du vide

ϵ_r Permittivité électrique relative du milieu

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II. 13})$$

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

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

Dans un milieu conducteur σ est de l'ordre de $10^6 S \cdot m^{-1}$, et ϵ_0 de l'ordre de $8.85 \times 10^{-12} F/m$ jusqu'à des fréquences qui avoisinent les Mégahertz nous avons $\omega \cdot \epsilon_0 \ll \sigma$ ce qui nous permet d'avoir :

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

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

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

Loi d'induction de Faraday

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II. 14})$$

Loi d'Ampère

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \mu_0 \vec{J} \quad (\text{II. 15})$$

Loi de Gauss

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{II. 16})$$

Loi de Gauss pour le magnétisme

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.17})$$

II.3.8.a. Formulation en potentiel vecteur $A - V$

Il existe deux familles de formulations pour la résolution des équations de Maxwell. L'une repose sur le calcul du champ électrique et l'autre sur le calcul du champ magnétique. [22]

Cependant du fait des fortes discontinuités de certaines variables aux interfaces entre deux régions de propriété différentes, la résolution directe des équations de Maxwell est délicate. Pour faciliter la résolution, ces équations sont transformées en équations de potentiels. Ceci conduit à la définition des formulations duales en potentiels combinés. La formulation la plus connue est la formulation en $\vec{A} - V$.

Cette formulation utilise le potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique V uniquement dans les régions conductrices. [21]

II.3.8.b. Relations de continuité et Conditions aux interfaces

Lorsqu'une bobine à courants de Foucault est rapprochée d'une surface métallique, le champ électromagnétique dû à la bobine pénètre dans le conducteur et le champ existe dans plus d'un matériau (air et métal) en même temps. La surface du conducteur est une frontière ou une interface entre les deux milieux dissemblables, et le champ électromagnétique y obéit à certaines conditions. Ces conditions sont appelées conditions aux limites ou conditions d'interface. Afin de résoudre les équations gouvernantes et d'obtenir une description mathématique du champ électromagnétique dans une région de l'espace occupée par plus d'un milieu, nous avons besoin de connaître les conditions d'interface auxquelles les champs doivent obéir.

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

$$\vec{A}_1 = \vec{A}_2 \quad (\text{II.18})$$

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. [3]

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (\text{II.19})$$

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

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

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

Où :

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

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

La forme de la loi de Gauss telle qu'écrute en (II.17) invite à la définition du potentiel vecteur magnétique A tel que

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (\text{II. 20})$$

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{II. 21})$$

En remplaçant (II.20) dans (II.14), on obtient :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

L'opérateur vectoriel rotationnel étant associatif on aura :

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II. 22})$$

Remarquons que la quantité $\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ est conservée, donc peut être dérivé d'un potentiel V qui est le potentiel scalaire électrique.

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (\text{II. 23})$$

On Remplace (II.19) dans la loi d'Ohm (II.13)

$$\vec{J} = \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V) \right) \quad (\text{II. 24})$$

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

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

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

En remplaçant (II.22) dans (II.15) on obtient:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \mu_0 \cdot \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V) \right) \quad (\text{II. 25})$$

D'après les équations (II.20) et (II.11)

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (\text{II. 26})$$

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

$$\vec{\nabla} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = \vec{J}_S \quad (\text{II. 27})$$

ω : La pulsation électrique de l'excitation

j : L'unité imaginaire

$$\text{Et } \vec{J}_{\text{exc}} = -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V)$$

L'équation (II.27) représente l'équation de la magnétodynamique transitoire en terme de potentiel vecteur magnétique \vec{A} avec un terme de source.

Dans la plupart des problèmes de modélisation des phénomènes électromagnétiques d'une manière générale, et principalement dans le domaine du contrôle non destructif par courants de Foucault en prend en considération une bobine inductrice ou le courant est imposé, une région ferromagnétique ou conductrice qui représente la cible à contrôler et une région qui représentera l'air qui entoure le domaine d'étude

L'ajustement de l'équation (II.27) aux différentes régions constituera le dispositif d'étude et nous permet d'écrire :

- **Dans l'air :**

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

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = 0 \quad (\text{II. 28})$$

• **Dans la bobine inductrice :**

La bobine est constituée des fils fins de cuivre, l'équation (II.25) s'écrit sur la forme suivante:

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \mathbf{j}_s \quad (\text{II. 29})$$

• **Dans la cible à contrôler :**

La pièce à contrôler est nécessairement conductrice, l'équation magnétodynamique dans ce domaine s'écrit alors :

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) + \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{II. 30})$$

La Figure (2.8) montre une configuration typique d'un CND par courants de Foucault qui illustre l'équation du vecteur potentiel dans des différentes régions dans le domaine d'étude

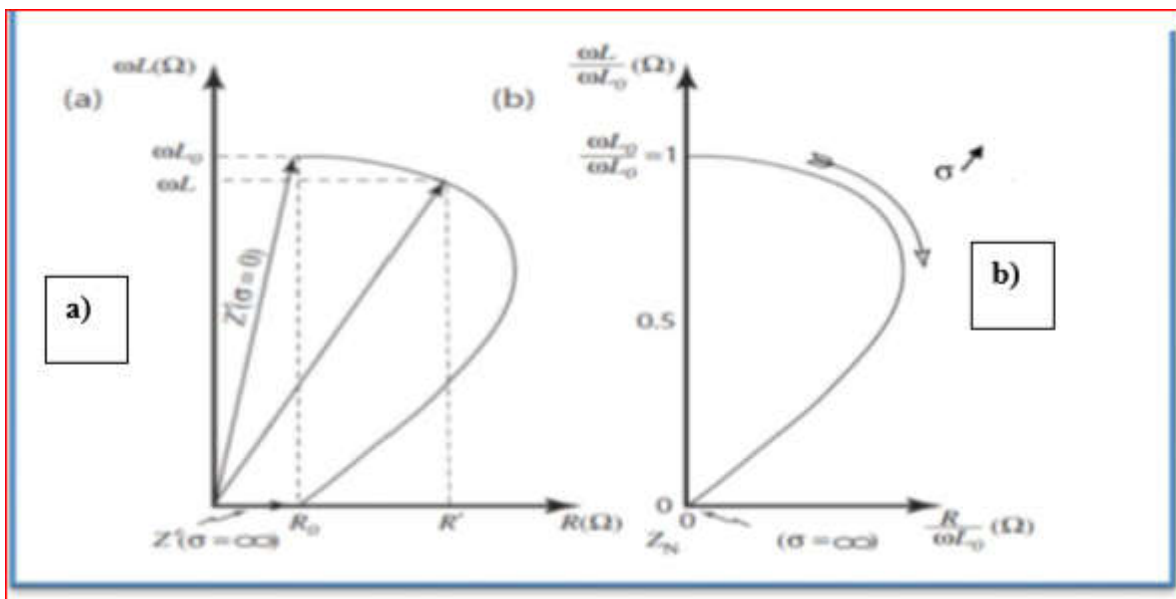


Figure II. 9 Equation de magnétodynamique dans des différentes régions.

II.3.8.c. 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, [3] .

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

$$\Delta A = f \quad x \in \Omega \quad (\text{II. 31. a})$$

$$A = A_0 \quad x \in \partial \quad (\text{II. 31. b})$$

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

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

$$\frac{\partial A}{\partial n} = A_n \quad (\text{II. 31. c})$$

Condition de mixte (ou condition de Dirichlet Neumann) : on cherche une solution qui vérifie la troisième condition de bord qui est :

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

Où :

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

Δ : est l'opérateur Laplacien

f : est un terme source

Ω : est le domaine d'étude

$\partial\Omega$: est le bord de domaine d'étude

II.3.9. Méthode des éléments finis

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

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

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation des solutions d'équations différentielles aux dérivées partielles qui est construite à partir d'une formulation équivalente du problème.

Elle est soit une formulation variationnelle ou une formulation résidus pondéré. Dans ce qui suit nous utiliserons la méthode des éléments finis pour la résolution de l'équation magnétodynamique. [3].

II.3.9.a. 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 :

$$f(A) = \int_{\Omega} \mathcal{L} d\Omega \quad (\text{II.32})$$

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

Ω : est le domaine d'étude.

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

II.3.9.b. Principe de Formulation résidus pondérés

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

$$R_i = (A) - f \quad (\text{II.33})$$

R_i : est le résidu de l'approximation. $L(A)$: opérateur différentiel.

f : fonction définie sur le domaine d'étude Ω

A : l'inconnue à chercher.

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

$$\int_{\Omega} R_i \Phi_i \cdot \partial\Omega \quad (\text{II.34})$$

Φ_i : Fonction de pondération ou de projection. Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

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

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

- Méthode des moindres carrés qui est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites.
- La méthode de Galerkin qui consiste à choisir des fonctions de projections identiques aux fonctions d'approximation, qui donne à la fin un système algébrique symétrique facile à résoudre. [3]

II.3.9.c. Organigramme de résolution des EDP's par la méthode des éléments finis

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

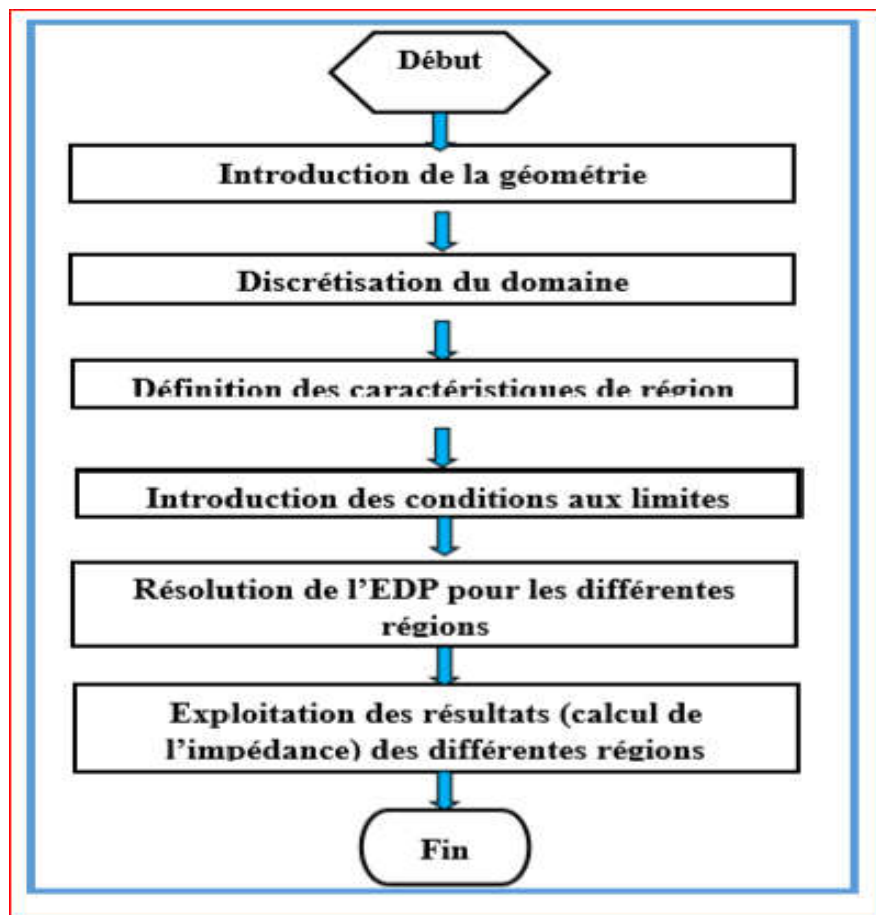


Figure II. 10 Organigramme de calcul par élément finis.

Conclusion :

Ce chapitre a été essentiellement consacré au rappel des équations de l'électromagnétisme, et à 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, [12] [15].

Le chapitre suivant sera dédié à l'imagerie par courants de Foucault du point de vue théorique et résultats de simulations.

Chapitre III .

Imagerie à Courants de Foucault Multiéléments Multiplexés

-Théorie et Résultats de Simulation-

Chapitre III . Imagerie à courants de Foucault multiéléments multiplexés théorie et résultats de simulations

III.1. Introduction

Le progrès de ces dernières de l'électronique à permis le développement de techniques d'inspection plus nouvelles telles que les courants de Foucault multiéléments (CFM), ce qui permet d'augmenter la fiabilité et la répétabilité des inspections de surface par rapport aux méthodes plus traditionnelles (ressuage et magnétoscopie, [18-20]). En effet, la possibilité d'adapter les configurations de bobines et les modèles de séquençage permet aux utilisateurs d'optimiser la chaîne d'acquisition à leur application. De plus, en multipliant les éléments actifs et en exploitant les capacités avancées de traitement de données, les solutions CFM permettent d'effectuer des inspections plus rapidement, souvent avec moins de préparation de surface. Ils offrent également des avantages supplémentaires tels que l'imagerie de type cartographie (par exemple, les affichages C-Scan 2D et 3D), une meilleure couverture de surface, une facilité de déploiement et l'archivage des données. Enfin, en plus de la détection des défauts, la technologie CFM peut également parfois fournir un dimensionnement quantitatif, [4-5].

III.2. Capteurs multiéléments

III.2.1 Introduction

Les techniques mettant en œuvre des capteurs multiéléments ou capteurs ECA (Eddy Current Array) permettent de passer du stade de la détection local à celui de la détection surfacique par analogie avec les méthodes de ressuage et magnétoscopie. En cela les sondes ECA présentent un intérêt ne serait-ce qu'en terme de productivité, [5].

III.2.2 Capteurs multiéléments

Les capteurs courants de Foucault multiéléments peuvent être de conceptions différentes selon les fournisseurs, les géométries contrôlées et les défauts recherchés. La technologie des courants de Foucault multiéléments permet d'exciter et de lier électroniquement plusieurs bobines CF disposées côte à côte dans un même assemblage. Les bobines sont excitées séquentiellement de façon à éliminer l'interférence causée par l'inductance mutuelle (c'est ce qu'on appelle le multiplexage). De cette façon, les bobines travaillent de concert afin de balayer une surface beaucoup plus grande que ne le ferait un capteur mono-élément (Figure III. 1), [5].

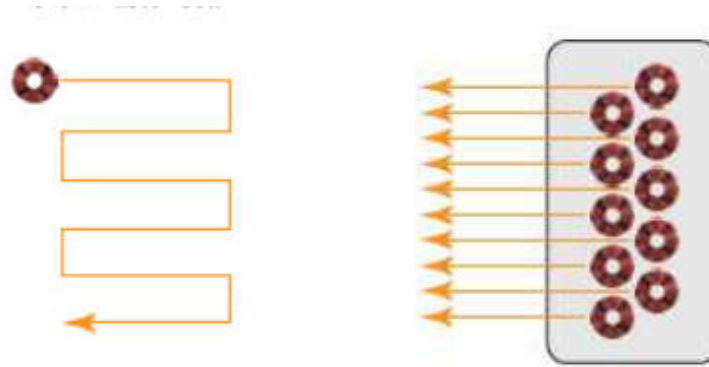


Figure III. 1 Balayage d'un capteur monoélément et multiéléments, [5].

III.2.3 Concepts généraux des courants de Foucault multiéléments

La technique de contrôle par CFM est basée sur les mêmes principes généraux que la méthode CF dite conventionnelle. En effet, il s'agit de générer un champ magnétique dans un conducteur induisant des courants qui permettent d'obtenir des informations sur la santé de la pièce inspectée.

Toutefois, avec les CFM (ECA), la génération du champ et la mesure sont faites à l'aide d'une ou plusieurs bobines électroniquement activées dans un motif donné et répété sur l'ensemble des éléments / bobines composant le capteur. C'est ce que l'on appelle le séquençement (la chronologie de l'activation de chaque motif). Ceci permet donc d'ajuster la méthode de contrôle à l'application en dédiant le motif au matériau testé et aux défauts recherchés, et en offrant une couverture plus importante avec des capacités d'imagerie accrues pour un contrôle plus rapide et moins affecté par l'opérateur, [4-5].

Les avantages majeurs des CFM sont donc :

- Zone de contrôle plus grande en un seul passage du capteur (en opposition aux balayages multiples nécessaires avec les CF)
- Amélioration et simplification de la détection des défauts avec l'imagerie C-scan
- Déploiement simplifié pour les géométries complexes à l'aide de capteurs dédiés au profil de la pièce inspectée
- Automatisation - besoin réduit de robotique complexe pour déplacer le capteur.

La figure ci-dessous montre un exemple de sonde à courants de Foucault multiéléments. Il s'agit d'une sonde souple à 63 éléments fonctionnant en multi mode absolu et différentiel.

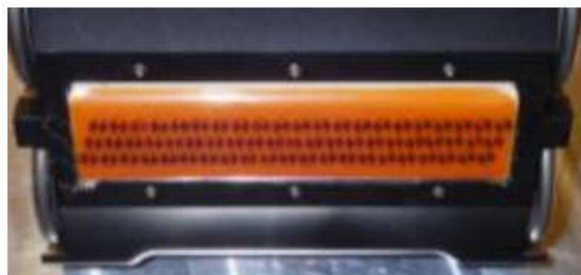


Figure III. 2 Exemple de sonde multiéléments.

III.3. Développement de solution CFM pour le remplacement de méthodes conventionnelles

Les CFM permettent d'obtenir des informations à la fois qualitatives grâce à l'imagerie et quantitative grâce aux signaux CF bruts. Ils donnent donc à l'utilisateur des résultats d'imagerie similaires aux méthodes comme le ressuage et la magnétoscopie, combinés aux signaux CF. Il est donc naturel de voir en eux une alternative intéressante à ces méthodes pour un bon nombre d'applications, [5].

III.3.1. Optimisation d'un capteur CFM

Un capteur CFM est défini par sa mécanique et sa solution CF. La partie mécanique est liée au composant et au plan d'inspection. La partie CF est optimisée en fonction du matériau, du type de défaut, du fini de surface ou du besoin de travailler avec de l'entrefer. Elle comprend le design de la bobine et donc sa fréquence d'opération mais aussi du motif avec lequel le capteur est utilisé, [5].

Ces deux paramètres combinés au type de balayage définissent l'imagerie finale obtenue.

III.3.1.1. Déplacement

Pour produire des CFM, plusieurs bobines placées de manière spécifique (ex. côte à côte, avec un motif particulier) dans un même assemblage, sont électriquement activées selon un séquençement dédié. Ceci permet d'obtenir une zone active plus large et donc de diminuer efficacement le nombre de balayage nécessaire à l'inspection d'un composant donnée comparé au CF conventionnels. Par exemple, un balayage mono-élément en peigne est maintenant remplacé par un balayage linéaire de capteur multiéléments (Figure 4). A noter qu'il est aussi possible d'effectuer des balayages en peigne avec des capteurs multiéléments, augmentant encore plus la zone d'inspection et donc la rapidité du contrôle, [5].

III.3.1.2. Topologie

Appelée aussi motif, correspond au montage physique des bobines dans un même capteur ainsi qu'à l'activation électronique unitaire de celles-ci. Les motifs de capteur CFM sont en principe établis sur des montages de base développés pour les capteurs mono élément tels que les montages absolus, différentiels, et en transmission.

De manière générale, les motifs utilisés sont principalement de type absolu ou émission / réception (E-R). Le motif absolu permet la détection de défaut dans toutes les orientations quel que soit le déplacement du capteur. Il est cependant très impacté par l'état de surface, [5].

III.2. Paramètres définissant un capteur CFM

Les autres paramètres permettant de définir un capteur CFM liés au motif sont la couverture, la résolution du capteur et l'uniformité des signaux de l'ensemble des éléments qui le constituent.

III.2.1 La couverture

Correspond à la zone dite active du capteur. Selon le motif, le capteur doit donc contenir suffisamment de bobines pour fournir une couverture qui s'étend au-delà de la zone d'intérêt pour une inspection par passe unique. Des scans multiples peuvent être nécessaires pour couvrir une surface complète. Dans ce cas un soin particulier doit être pris pour assurer un chevauchement des scans afin de ne pas omettre d'inspecter certaines surfaces, Figure (III.03), [5].

III.2.2 La résolution

C'est la distance centre à centre entre deux éléments adjacents. Plus un capteur a de ligne plus la résolution sera haute. Elle est définie par le plus petit défaut recherché et doit donc être toujours plus petite que celui-ci, Figure (III.03).

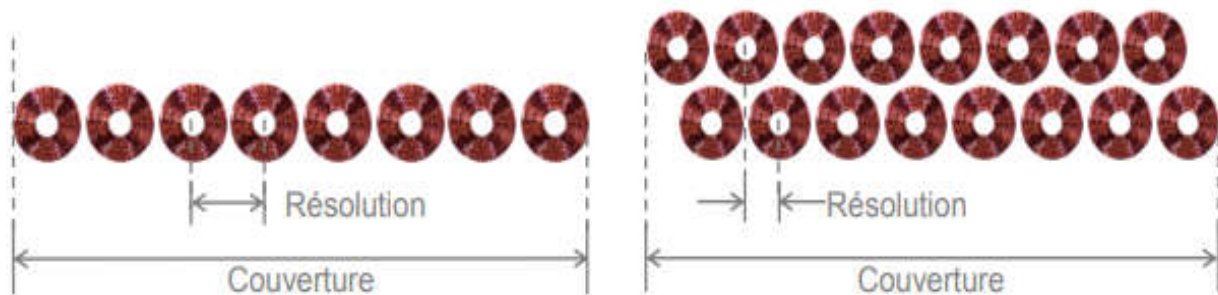


Figure III. 3 Schématisation d'un capteur CFM définissant la couverture et la résolution, [5].

III.2.3 L'uniformité du signal d'un capteur

C'est sa capacité à obtenir la même signature CF pour un défaut donné quel que soit l'élément du capteur le détectant. Ce paramètre est primordial pour maximiser la probabilité de détection du défaut recherché. Il est affecté par le design physique des éléments et le motif du capteur. De manière générale, les éléments d'un capteur CFM sont agencés de manière à atteindre un niveau de sensibilité adéquat et uniforme (ex. rangées multiples avec éléments en quinconce), [5].

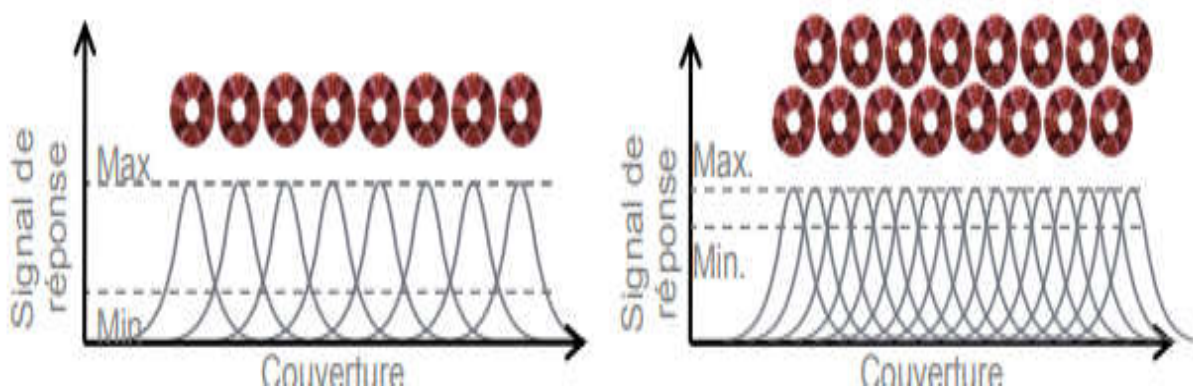


Figure III. 4 Uniformité de signal CF sur un montage multiélément, [5].

III.2.4 Canaux de multiplexage

Dans les CFM, le multiplexage permet une optimisation de la réponse des éléments et donc d'accroître la résolution du capteur, la sensibilité des éléments (grâce à la réduction de l'inductance mutuelle) et de réduire le niveau de bruit, [6].

Le multiplexage de canaux dans les sondes CFM (ECA) est obtenu lorsque des groupes de bobines sont excités à intervalles réguliers pour éliminer les interférences dues à l'inductance mutuelle, leur permettant de travailler ensemble dans le balayage de zones d'inspection plus larges que les sondes conventionnelles. Les bobines sont considérées comme multiplexées lorsque l'intervalle de temps actif d'une ou d'une combinaison de bobines expire et que l'intervalle de temps actif des autres bobines commence. Le multiplexage des canaux présente plusieurs avantages :

- Minimise l'interférence d'un premier signal avec un second entre les bobines adjacentes
- Augmente la résolution du canal et la sensibilité de la bobine
- Améliore le rapport signal/bruit de la sonde.

Le multiplexage des canaux est réalisé à l'aide d'un appareil qui connecte et acquiert les signaux de plusieurs groupes de bobines via une seule entrée d'instrument. Ce dispositif s'appelle intuitivement un multiplexeur (MUX) et fonctionne essentiellement comme un commutateur à grande vitesse qui connecte successivement chaque signal à l'instrument de test, [6], Figure (III.5).

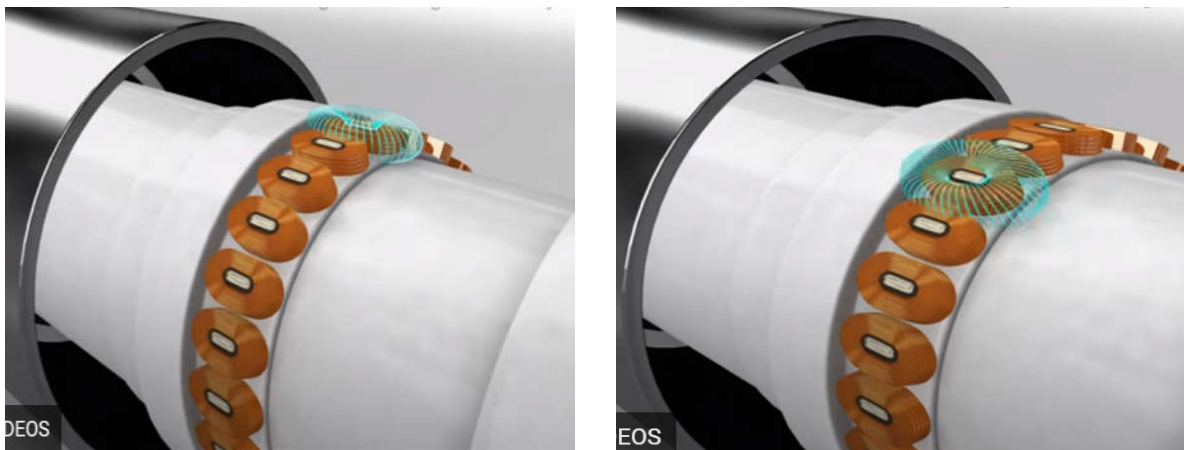


Figure III. 5 Alimentation par multiplexage de bobines CF multiélément, [6].

III.2.5 Imagerie

Avec le développement des CFM et notamment grâce au séquençage (multiplexage), de nouvelles représentations des signaux ont été développées. En effet, un capteur CFM permet de faire des mesures quasi-simultanément sur l'ensemble des éléments qui le composent et donc d'offrir une cartographie, appelée C-Scan. Les cartographies (2D et 3D) sont une représentation en couleur de l'amplitude (verticale ou horizontale) de chacun des signaux CF obtenus par les éléments du capteur CFM, [6].

Ces cartographies simplifient la visualisation et la compréhension des signaux en offrant une représentation de la surface inspectée similaire aux méthodes de surface telles que le ressuage et la magnétoscopie. En effet, leur affichage est paramétré en fonction du type de déplacement (ex. linéaire, simple polaire, hélicoïdal) effectué (Figure III. 6) , [5].

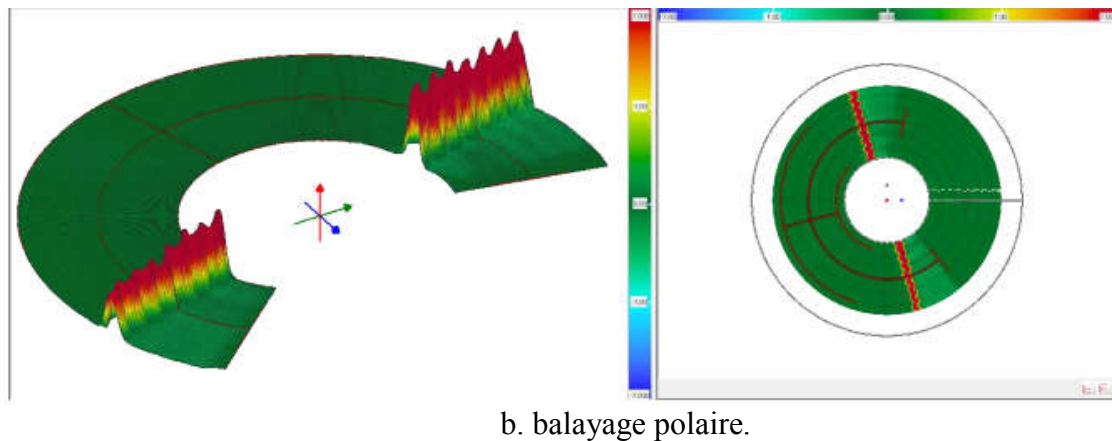
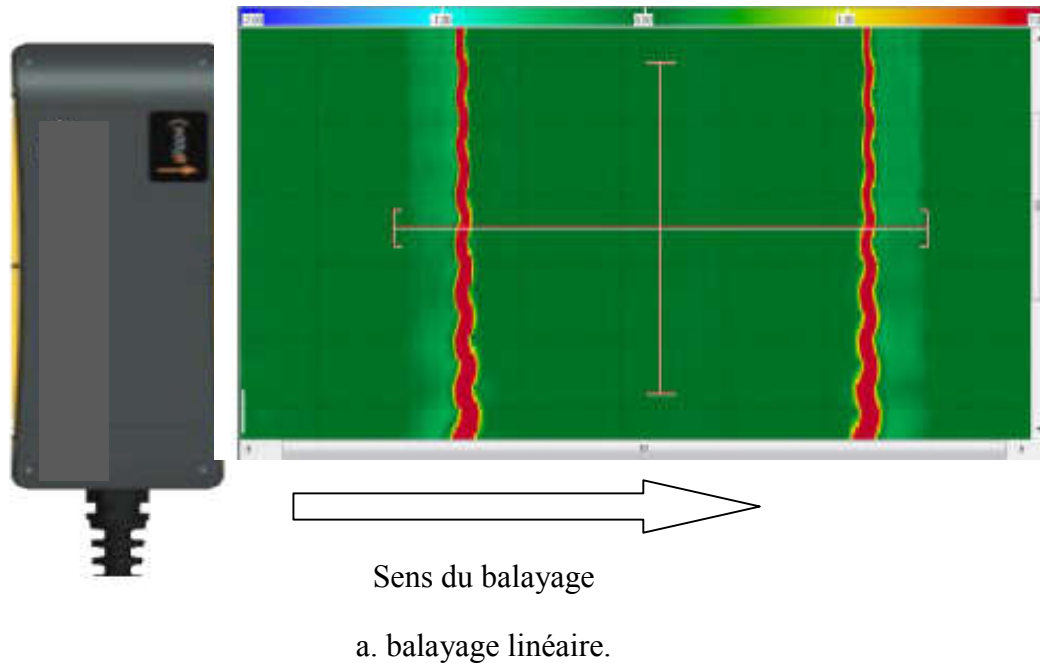


Figure III. 6 Exemples d'imageries obtenues lors d'un balayage linéaire et polaire, [5].

III.3 Résultats de simulations

III.3.1 Modèle géométrique et description

Le domaine de travail a été modélisé par une boîte d'air (Figure III.6) qui englobe les 3 cales d'aluminium ainsi que la sonde multiéléments. Cette dernière est composée de 48 bobines disposées en 4 autour du rivet et espacée l'une de l'autre de 30° .

Les dimensions de cette boîte sont choisies suffisamment grandes par rapport à celles de la plaque, de manière à ce que les conditions appliquées sur ses frontières n'altèrent pas la solution, Figure (III. 7).

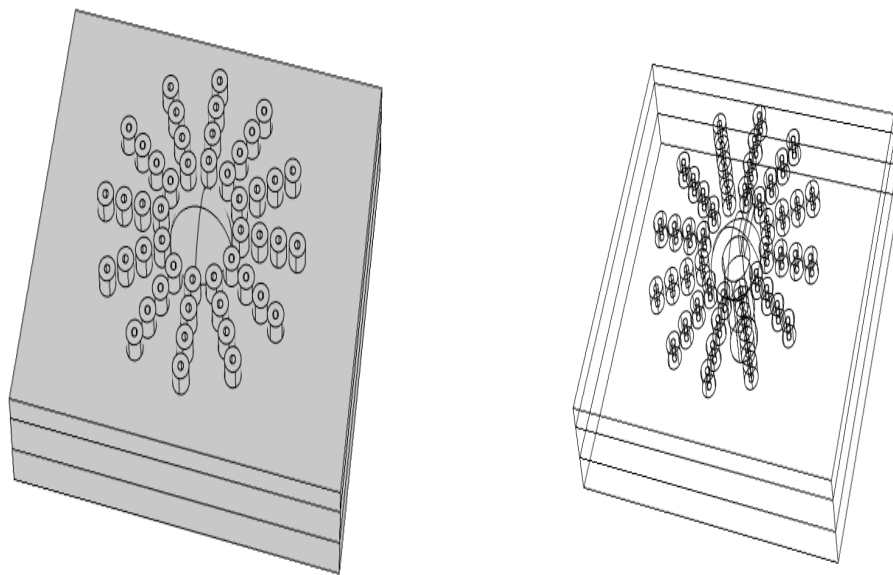


Figure III. 7 Modèle géométrique

III.3.2 Maillage du modèle proposé

Chaque volume constituant le domaine d'étude doit être discrétisé avec des éléments géométriques qui forment un maillage sur les nœuds desquels les grandeurs physiques vont être déterminées numériquement. Plusieurs types d'éléments de discrétisation (tétraédrique, hexaédrique ou prisme,) sont proposées par COMSOL Multiphysics. Le type d'élément utilisé conditionne en partie le nombre de degrés de liberté nécessaire au final pour la résolution numérique du problème. Dans notre cas, nous avons adopté un maillage avec des éléments tétraédriques car ce choix permet de mailler automatiquement des géométries différentes, Figure (III. 8).

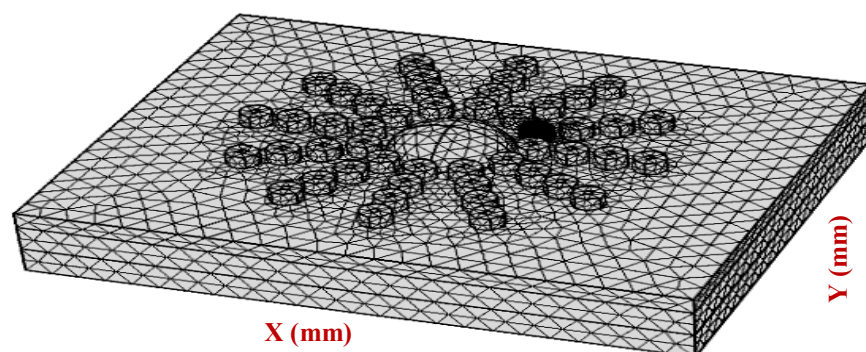


Figure III. 8 Maillage du modèle

III.3.3 Caractéristiques géométriques et physiques

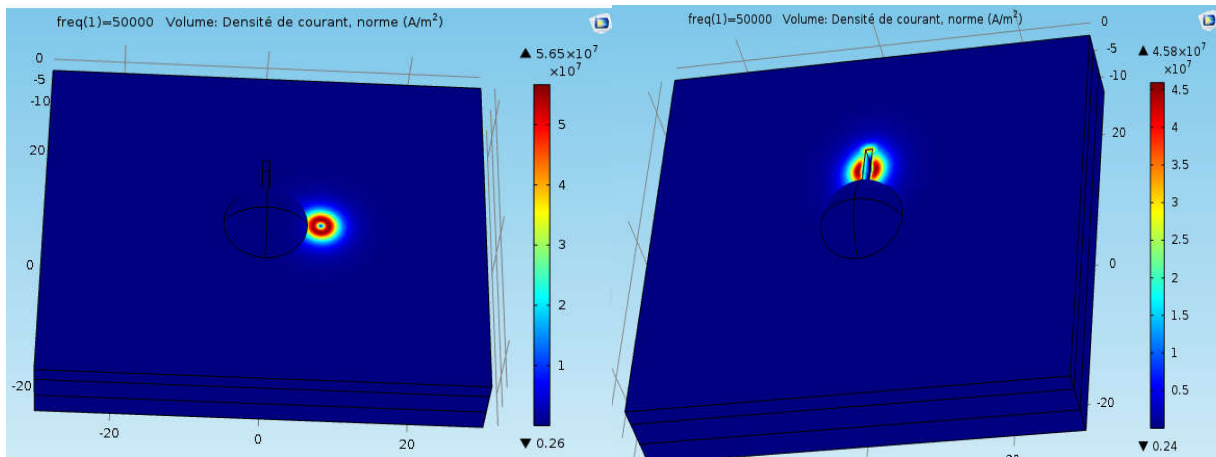
Les caractéristiques géométriques et physiques sont données par le tableau III.1.

Tableau III. 1 Caractéristiques géométriques et physiques

La plaque			Défaut		Domaine	
Couche1	Longueur(mm)	200	Longueur(mm)	5	Longueur(mm)	3000
	Largueur(mm)	120				
	Hauteur (mm)	2.5				
	Conductivité (s/m) Sigm	17.10^6				
Couche2	Longueur(mm)	200	Largueur(mm)	0.21	Largueur(mm)	3000
	Largueur(mm)	120				
	Hauteur (mm)	4				
	Conductivité (s/m) Sigm	17.10^6				
Couche3	Longueur(mm)	200	Hauteur (mm)	2.5	Hauteur (mm)	500
	Largueur(mm)	120				
	Hauteur (mm)	4				
	Conductivité (s/m) Sigm	17.10^6				
Bobine			Riveté		Pot en ferrite	
Hauteur (mm)	3.46	Hauteur cone (mm)	1.88	H(mm)	5.33	
Rayon externe (mm) r1B	7.325	Rayon (tête de rivet) (mm)	6	Rayon1(mm)	9	
Rayon interne (mm) r2B	3.74	Rayon (corps de rivet) (mm)	3.175	Rayon2(mm)	7.49	
nombre de spires	926			Rayon3(mm)	3.74	
Lift-off (mm)	2			Rayon4(mm)	1.55	
Conductivité s (s/m)	60.10^6	Conductivité o (s/m)	1.10^6	Conductivité (Ms/m(1.10^{-12}	
Intensité (A)	0.8			Perméabilité magnétique du vide (μ_0)	$\text{Pi} \cdot 4e^{-7}$	
section bobine SB (m2)	(r1B-r2B)*hau B/Ns			D(mm)	3.6	
Fréquence (Hz)	$1.6.10^3$			D(mm)	0	
				D(mm)	0(mm)	

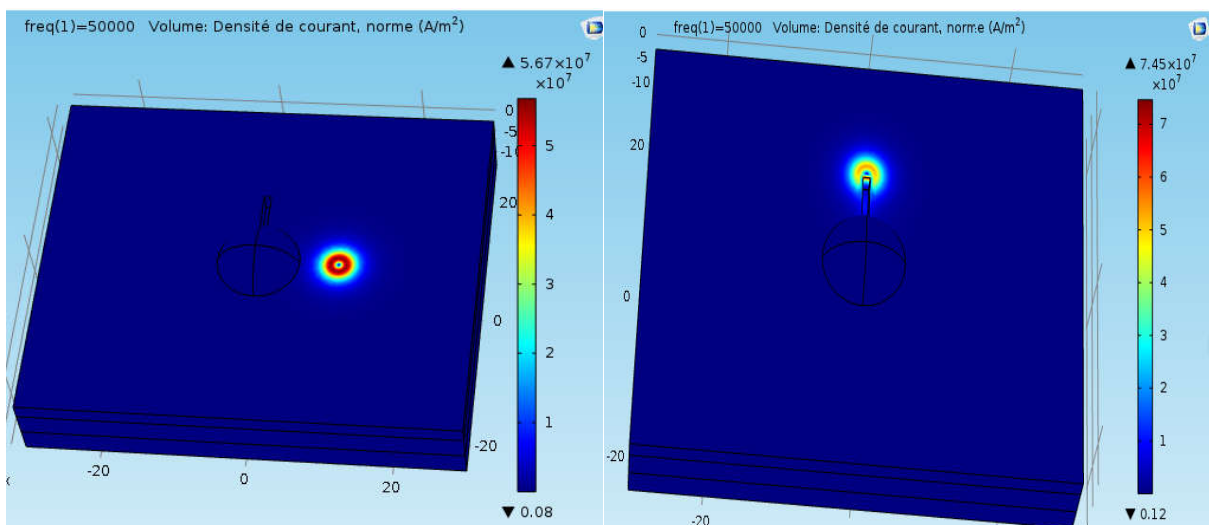
III.3.4 Courants induit

Afin de vérifier le modèle de simulation, on doit d'abord comparer les résultats obtenus des courants induit dans la plaque d'aluminium pour une seule bobine pour différentes positions du capteur dans la première couche et loin du défaut , puis près du défaut puis dans d'autres couche de bobines, Figure (III. 9).



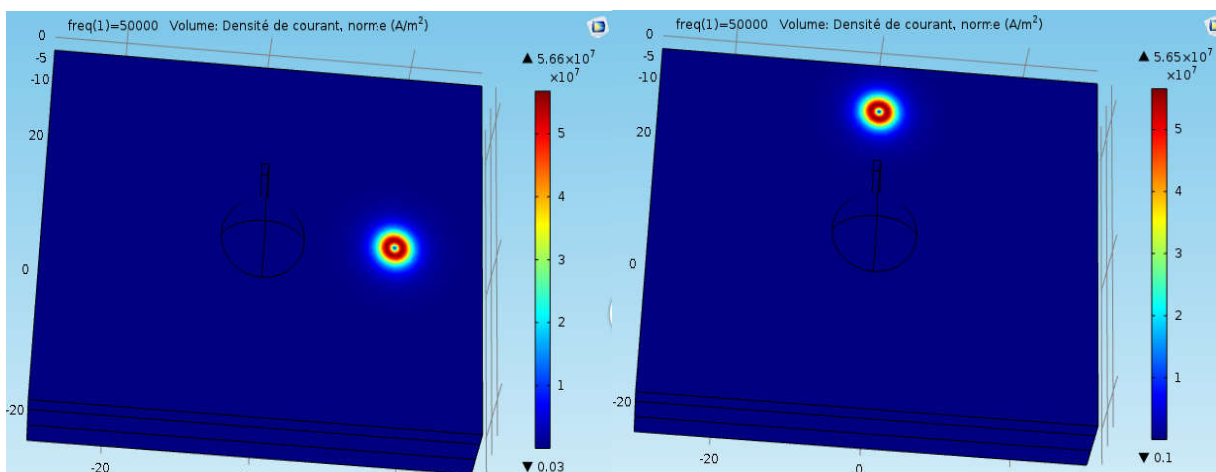
a). Position 1^{ère} couche à 0°/défaut

b). Position 1^{ère} couche à 90°(sur le défaut)



c). Position 2^{ème} couche à 0°/défaut

d). Position 2^{ème} couche à 90°(sur le défaut)



e). Position 4^{ème} couche à 0°/défaut

f). Position 4^{ème} couche à 90°(en face du défaut)

Figure III. 9 Variation des courants induits en fonction de la position de la bobine.

Pour la première couche Figure (III.9. a et b) , on peut constaté que le maximum des courants induits diminue lors de la présence du défaut , il passe de $J_{ind} = 5,65.10^7 \text{ A/m}^2$ sans

défaut à $J_{ind}=4,58.10^7$ A/m² avec défaut, cela est justifier par l'existence du défaut qui provoque l'augmentation de la trajectoire d'où diminution de l'intensité de ces derniers.

Entre la première et la deuxième couche, (Figure III.9. a et c) , premièrement pour la même position de la bobine (angle 0°)mais pour les couches 1 et 2 , on peut voir que le maximum des courants induits augmente légèrement, malgré qu'il n'y pas de défaut, il passe de $J_{ind}=5,65.10^7$ A/m² $J_{ind}=5,67.10^7$ A/m², cela est dû l'éloignement du capteur de la tête du rivet (et le trou de rivet), ces derniers conduisent à petite augmentation de la trajectoire d'où diminution de l'intensité de ces derniers.

Deuxièmement pour la deuxième couche, (Figure III.9. c et d), on peut constater que l'intensité à démunie (toute la couronne des courants induits est jaune elle est inferieur à $5. 10^7$ A/m² .

En fin pour la quatrième couche la différence est minimale elle est de l'ordre de $0.01.10^7$ A/m² , ce qui est logique car la position à 90° la bobine en face du défaut toute en étant loin de ce dernier.

Ces résultats confirment bien que notre modèle est très satisfaisant ce qui permet de valider ce dernier et de l'utiliser pour la suite de notre travail afin d'obtenir les imageries voulu d'un système multiéléments et multiplexés

III. 3.5 Paramètres influant sur la variation d'impédance

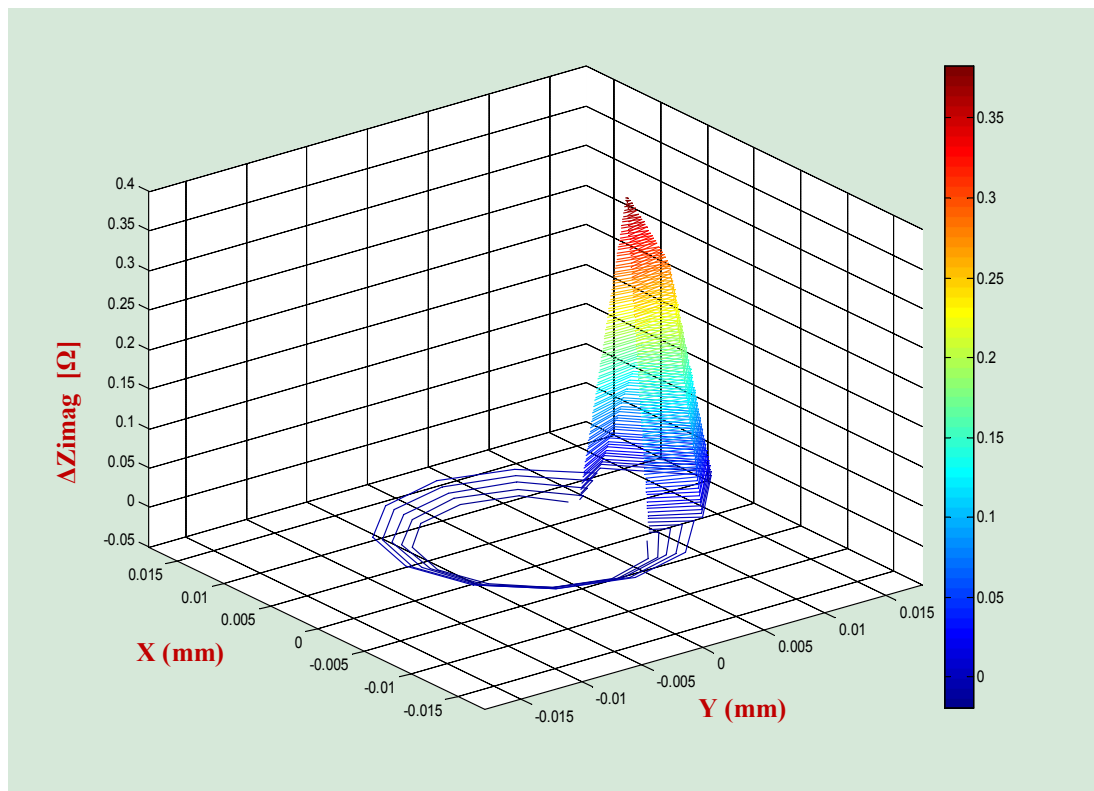
Les paramètres qui peuvent influés sur la valeur de l'impédance sont :

- La fréquence,
- Le lift-off,
- La conductivité du matériau à contrôler,
- Les dimensions géométriques du défaut.

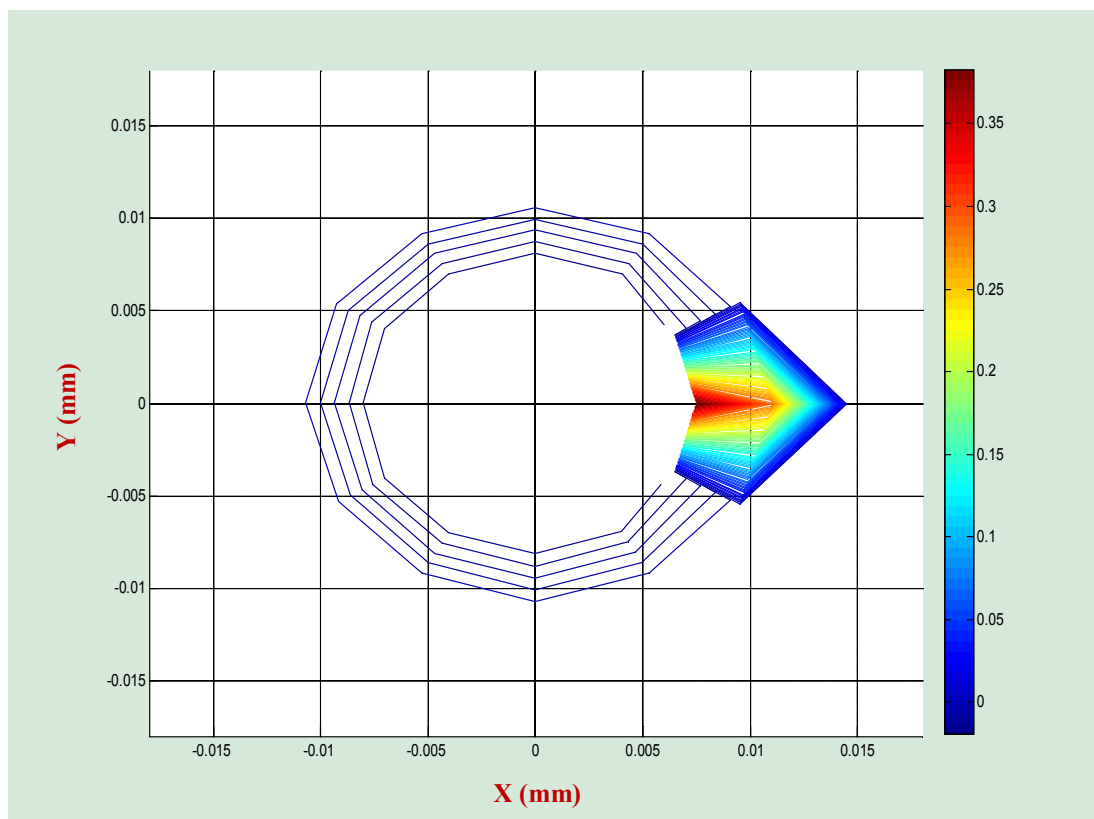
III.3.5.1. Effet de la variation de la fréquence

➤ Fréquence 50KHz

Les Figures (III.10 et III.11) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une fréquence de 50KHz.

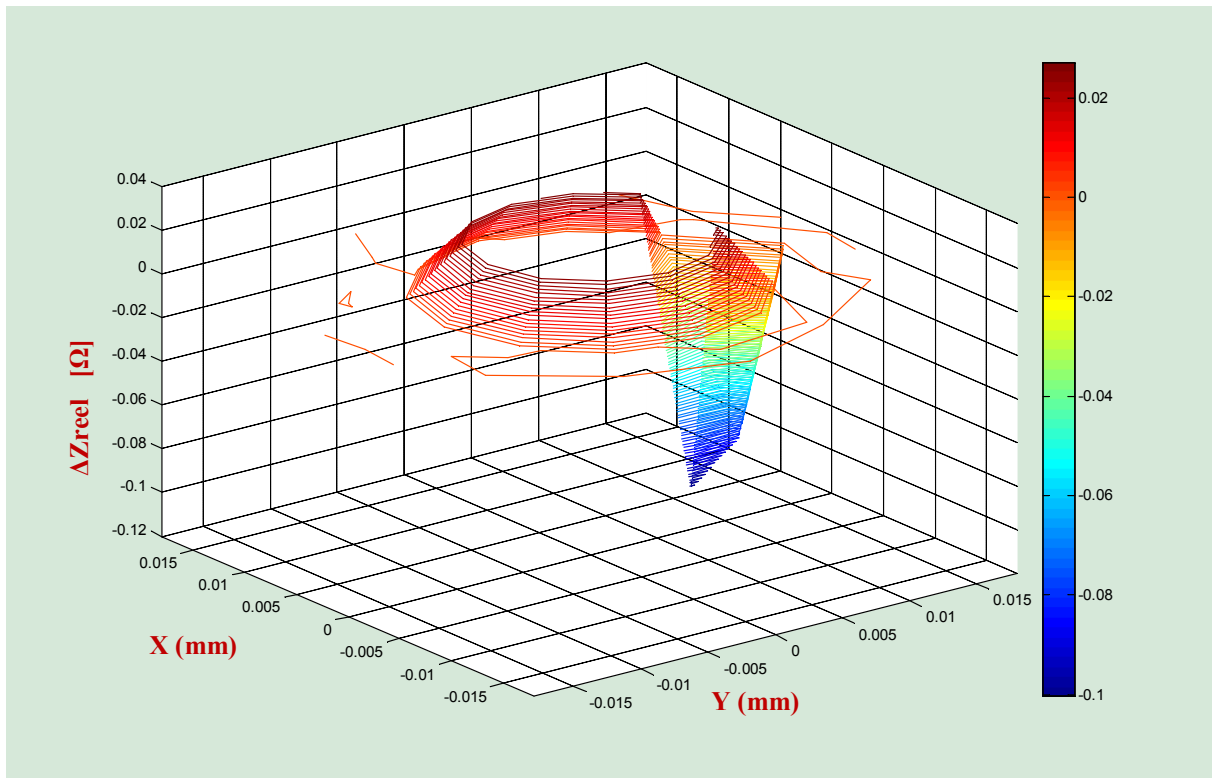


a. ΔZ_{imag} pour $F=50\text{KHz}$ (Vue en 3D).

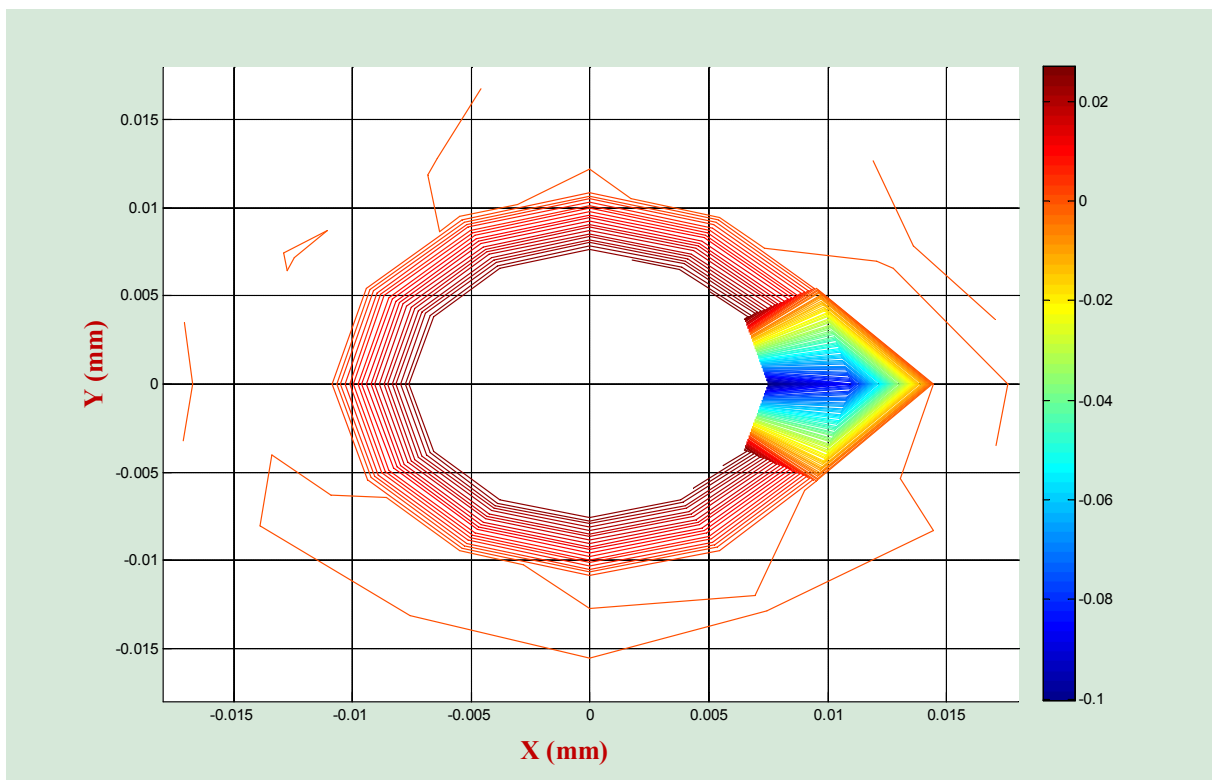


b. ΔZ_{imag} pour $F=50\text{KHz}$ (Vue de dessus 2D).

Figure III. 10 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une fréquence 50KHz



a. ΔZ_r pour $F=50\text{KHz}$ (Vue en 3D)

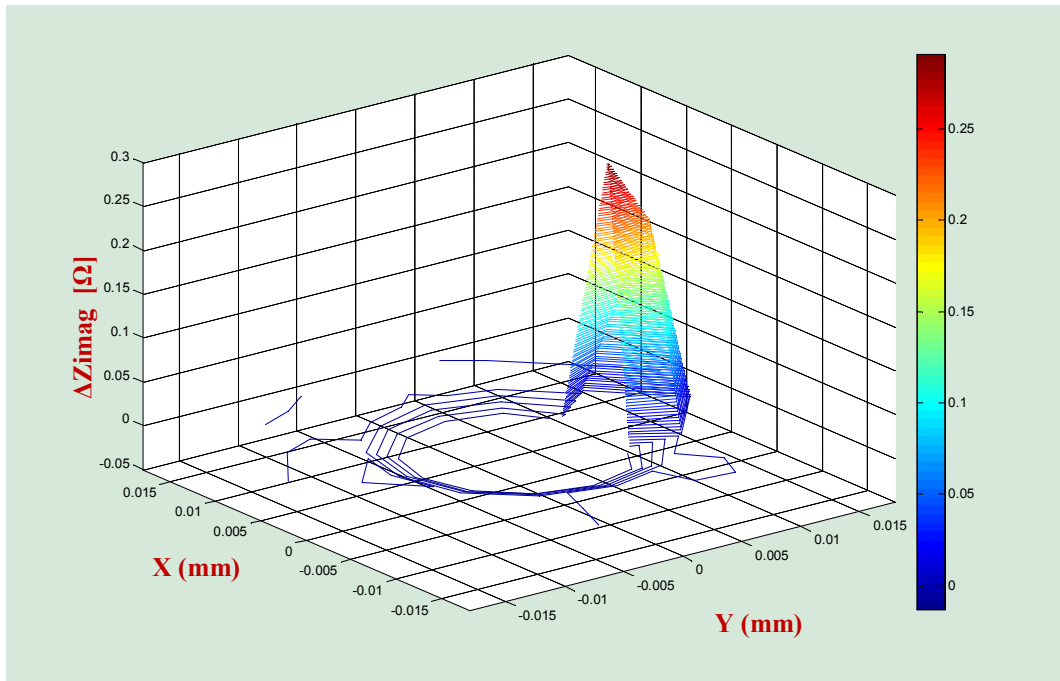


b. ΔZ_r pour $F=50\text{KHz}$ (Vue de dessus 2D)

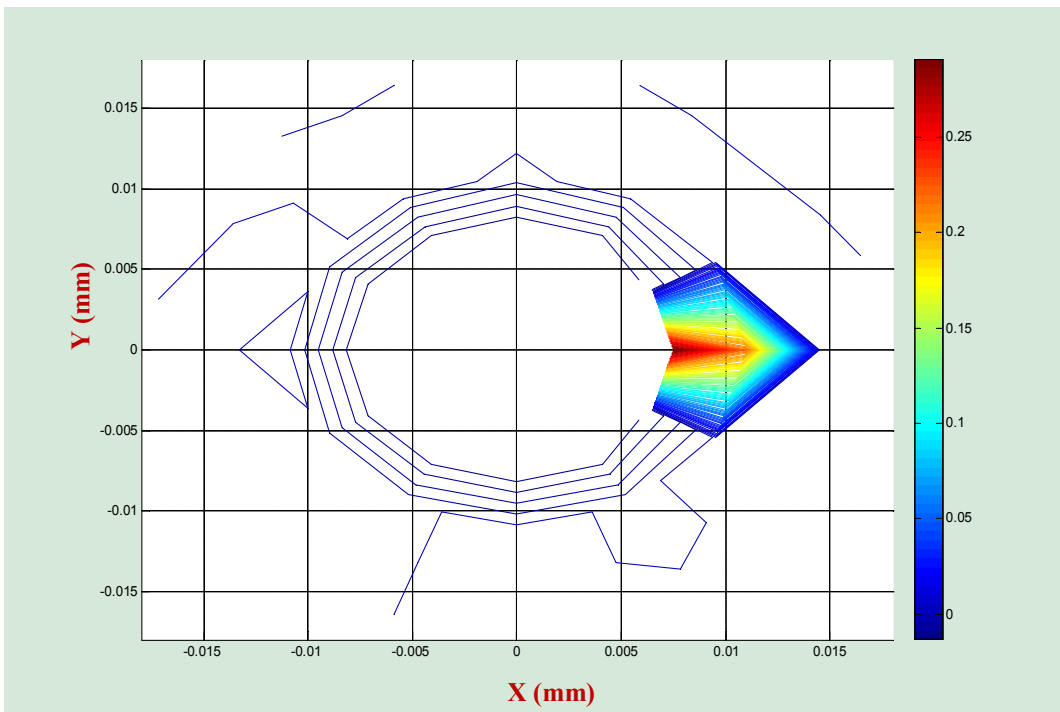
Figure III. 11 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une fréquence 50KHz

➤ **Fréquence 40KHz**

Les Figures (III.12 et III.13) illustrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une fréquence de 40KHz.

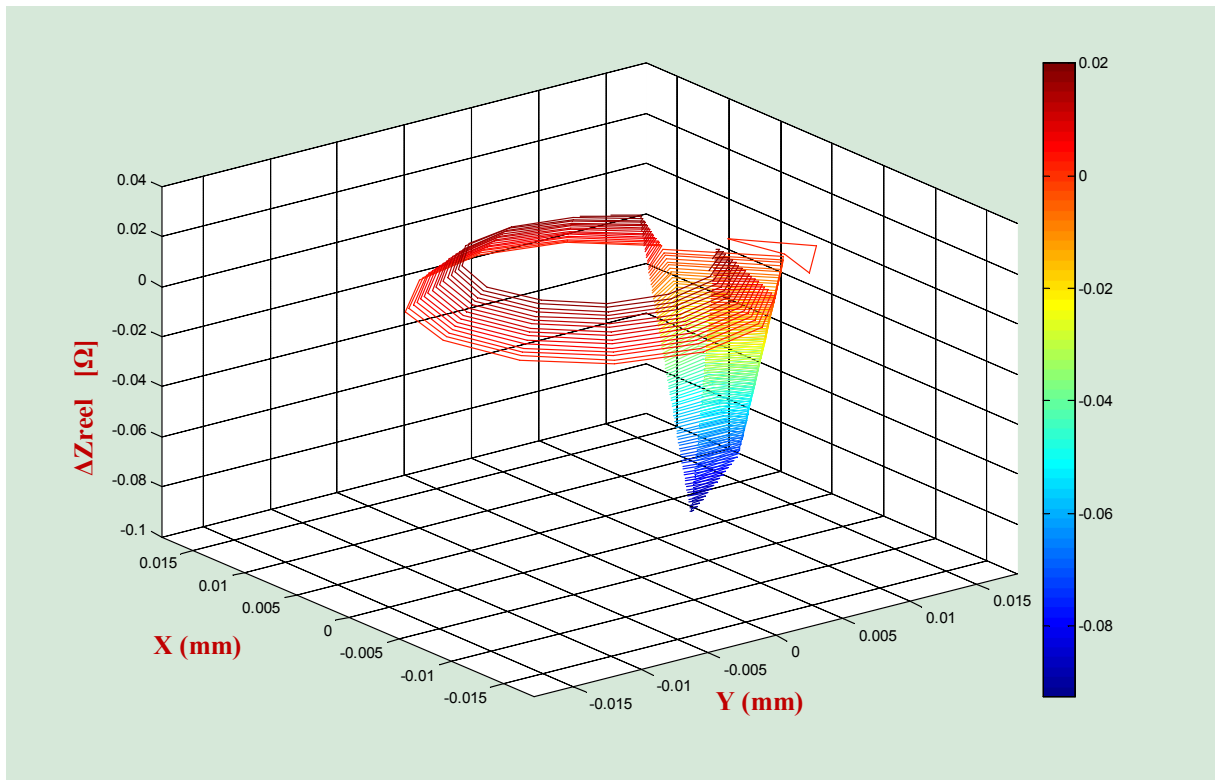


a. ΔZ_{imag} pour $F=40\text{KHz}$ (Vue en 3D).

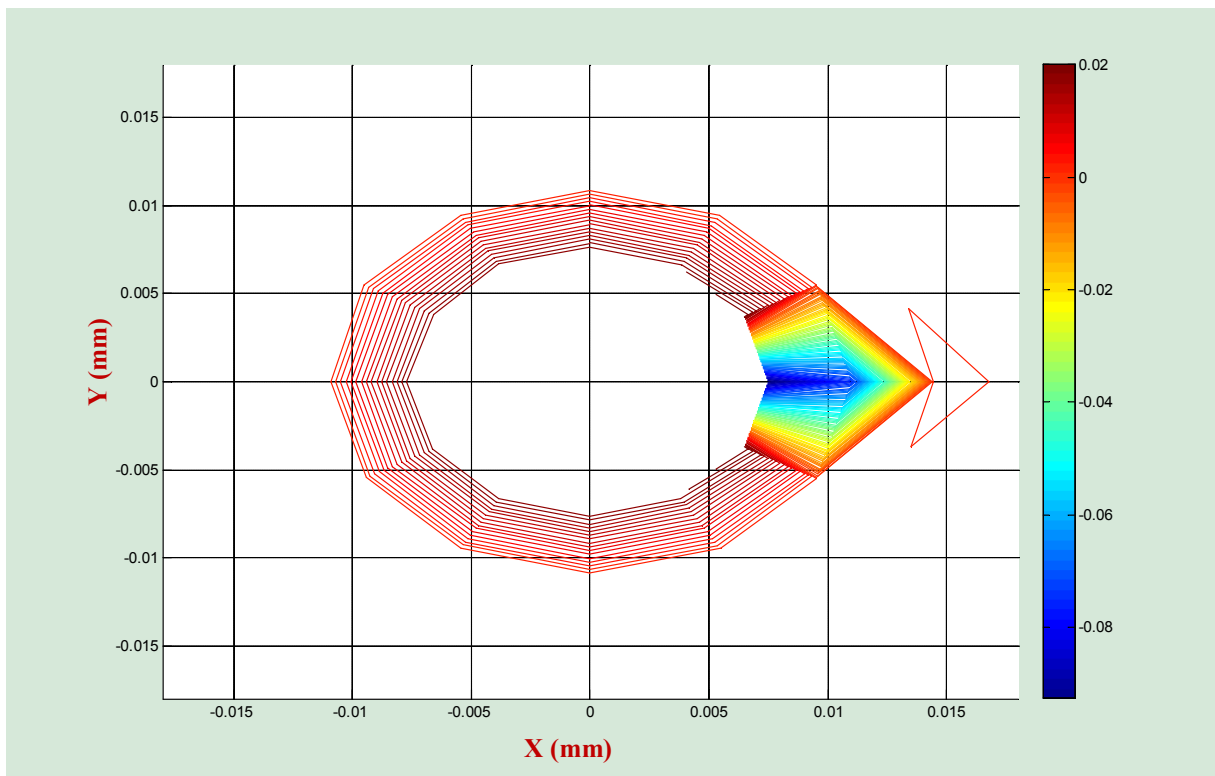


b. ΔZ_{imag} pour $F=40\text{KHz}$ (Vue de dessus).

Figure III. 12 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une fréquence 40KHz



a. ΔZ_r pour $F=40\text{KHz}$ (Vue en 3D)

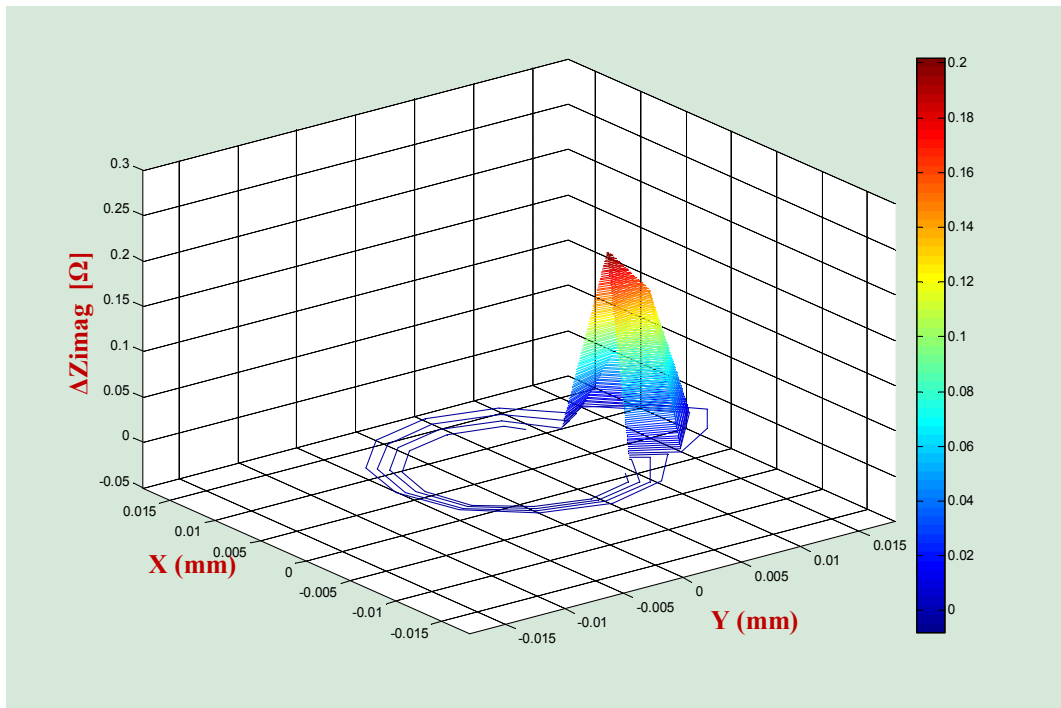


b. ΔZ_r pour $F=40\text{KHz}$ (Vue de dessus)

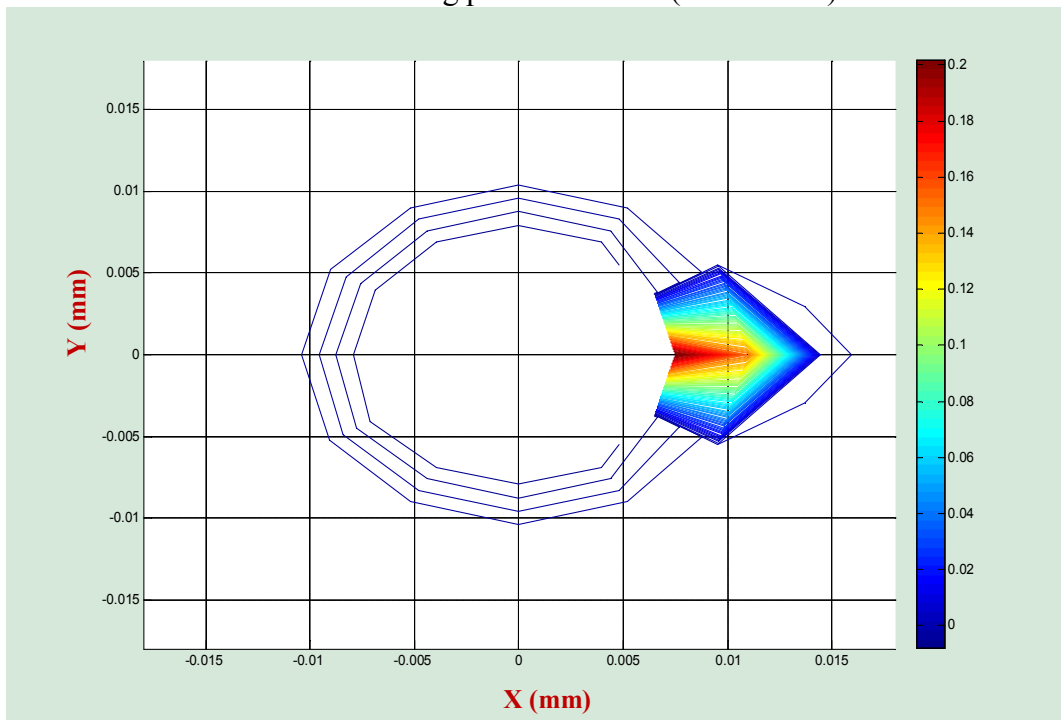
Figure III. 13 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une fréquence 40KHz

➤ **Fréquence 30KHz**

Les Figures (III.8 et III.9) illustrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une fréquence de 30KHz.

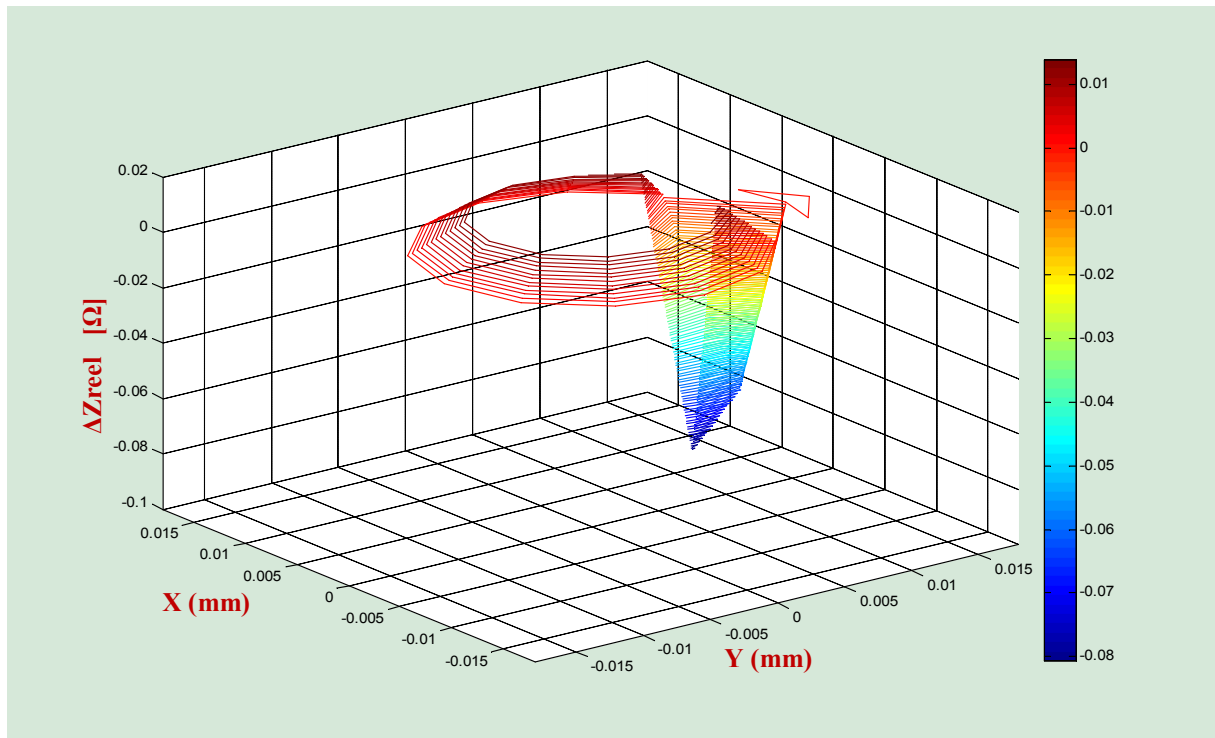


a. ΔZ_{imag} pour $F=30\text{KHz}$ (Vue en 3D).

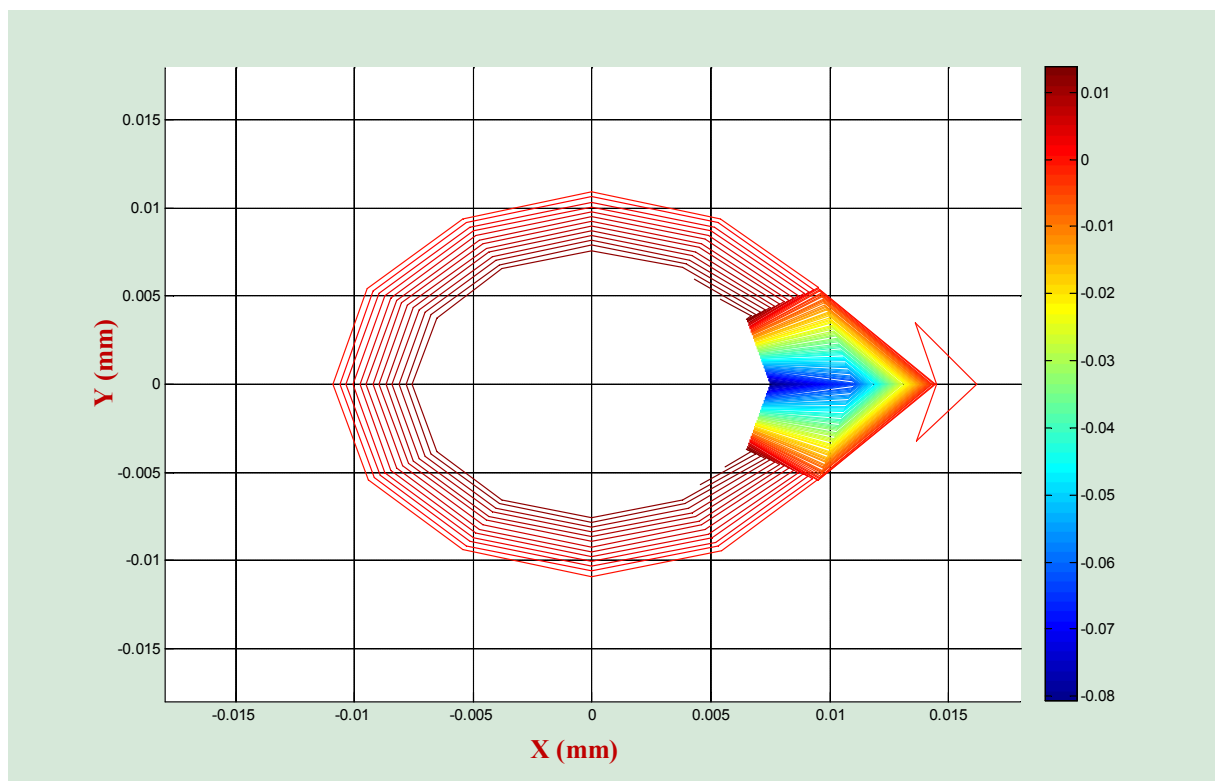


b. ΔZ_{imag} pour $F=30\text{KHz}$ (Vue de dessus).

Figure III. 14 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une fréquence 30KHz



a. ΔZ_r pour $F=30\text{KHz}$ (Vue en 3D)



b. ΔZ_r pour $F=30\text{KHz}$ (Vue de dessus)

Figure III. 15 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une fréquence 30KHz

D'après les Figures (III.10 a), (III.12 a) et (III.14 a) on peut constater que la variation ΔZ_{imag} est nulle autour du rivet (il n'y a pas de défaut), par contre cette variation elle est maximale au milieu du défaut, de l'ordre de 0.32Ω pour une fréquence 50KHz , 0.28Ω pour une fréquence 40KHz et 0.19Ω pour une fréquence 30KHz .

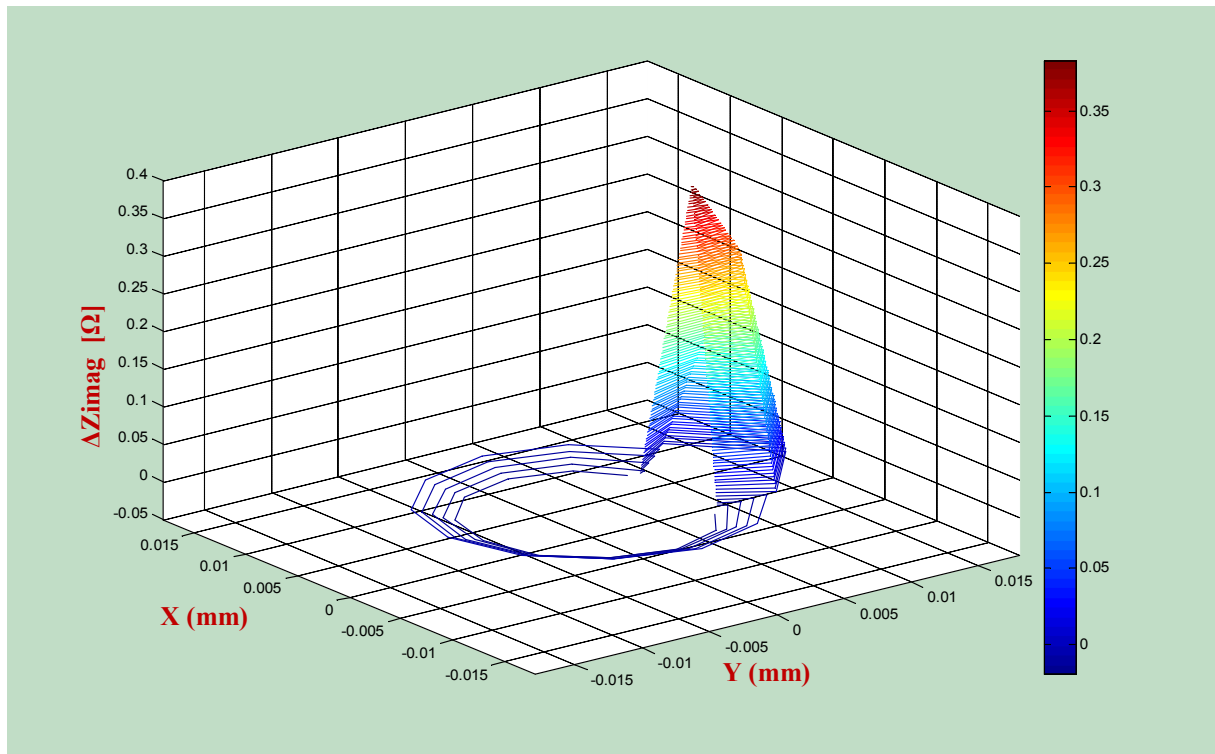
Mais pour la variation réelle ΔZ_r (III.11 b), (III.13 b) et (III.15 b) elle est négative et elle a une valeur maximale de l'ordre 0.1Ω au milieu du défaut et elle nulle tout autour du rivet. la valeur de ΔZ_r peut atteindre -0.1Ω pour une fréquence 50 KHz , -0.9Ω pour une fréquence 40 KHz et -0.8Ω pour une fréquence 30KHz .

Les résultats obtenus Figures (III.10 à 15) confirment que la variation de l'impédance est proportionnelle à la fréquence.

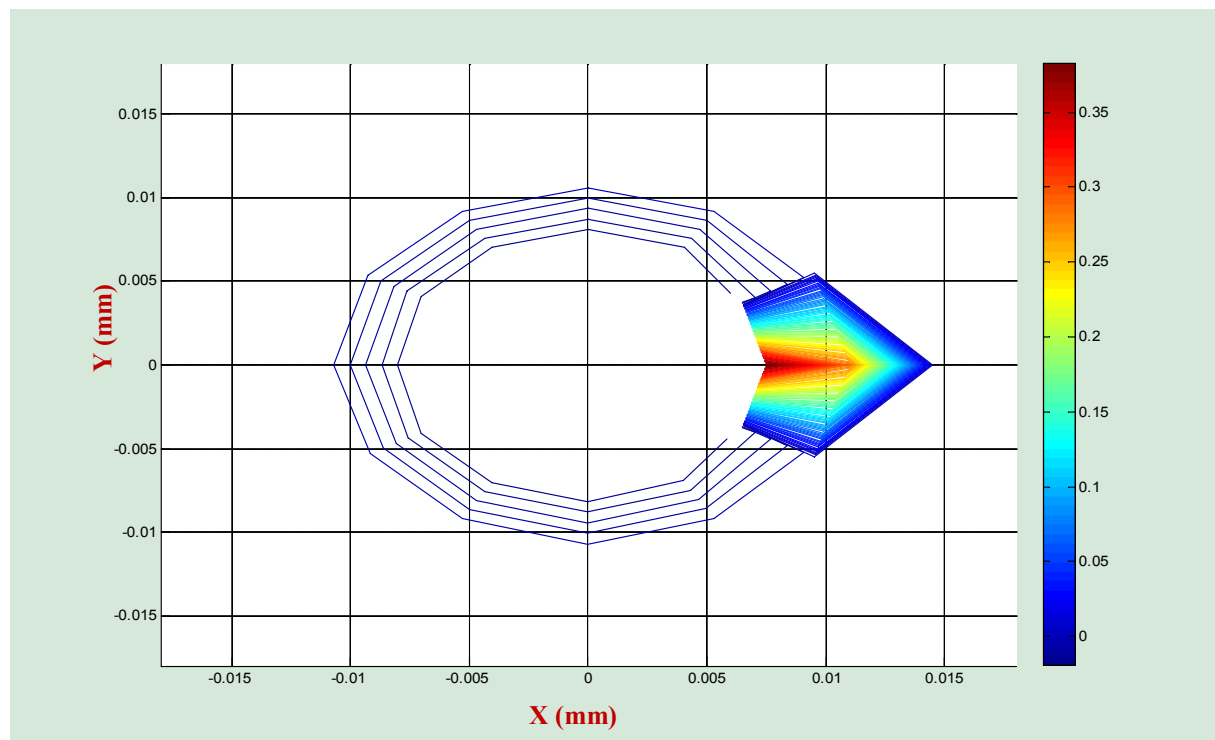
III.3.5.2. Effet de la variation du lift-off

➤ Lift-off 0.5 mm

Les Figures (III.16 et III.17) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une LIFT-off de 0.5 mm

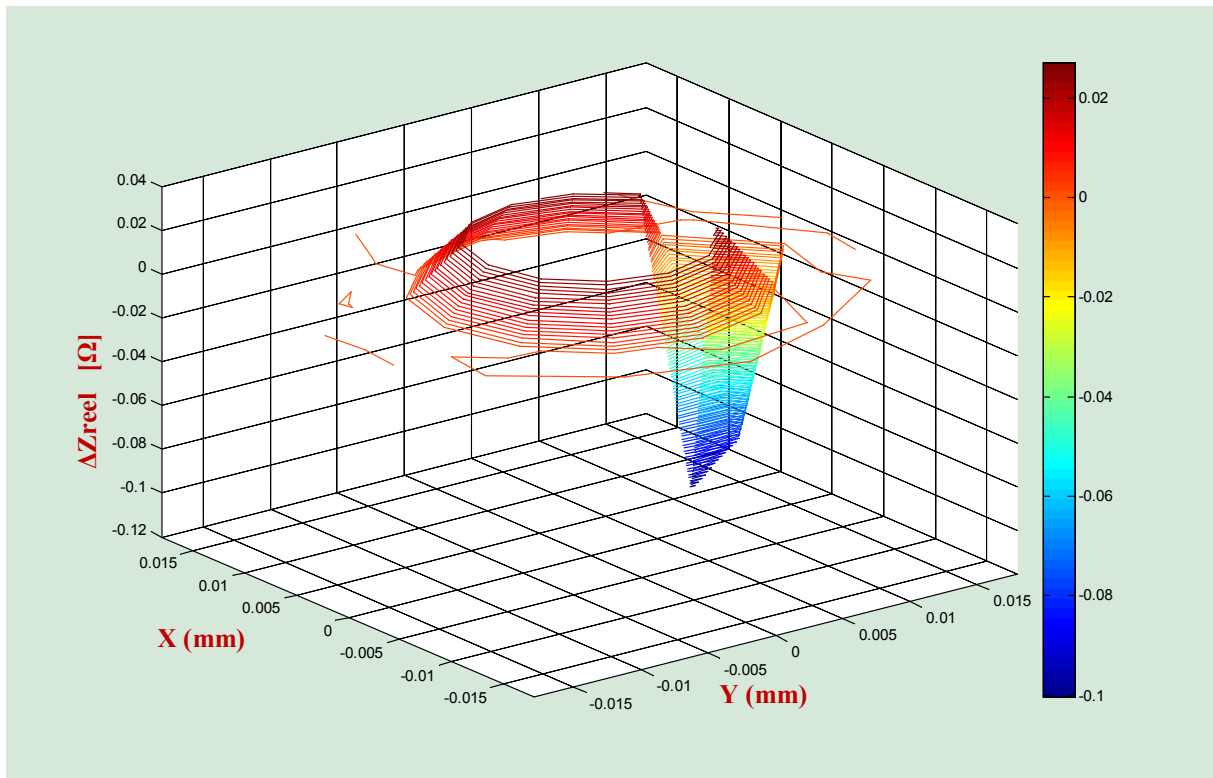


a. ΔZ_{imag} pour LIFT-off=0.5mm (Vue en 3D).

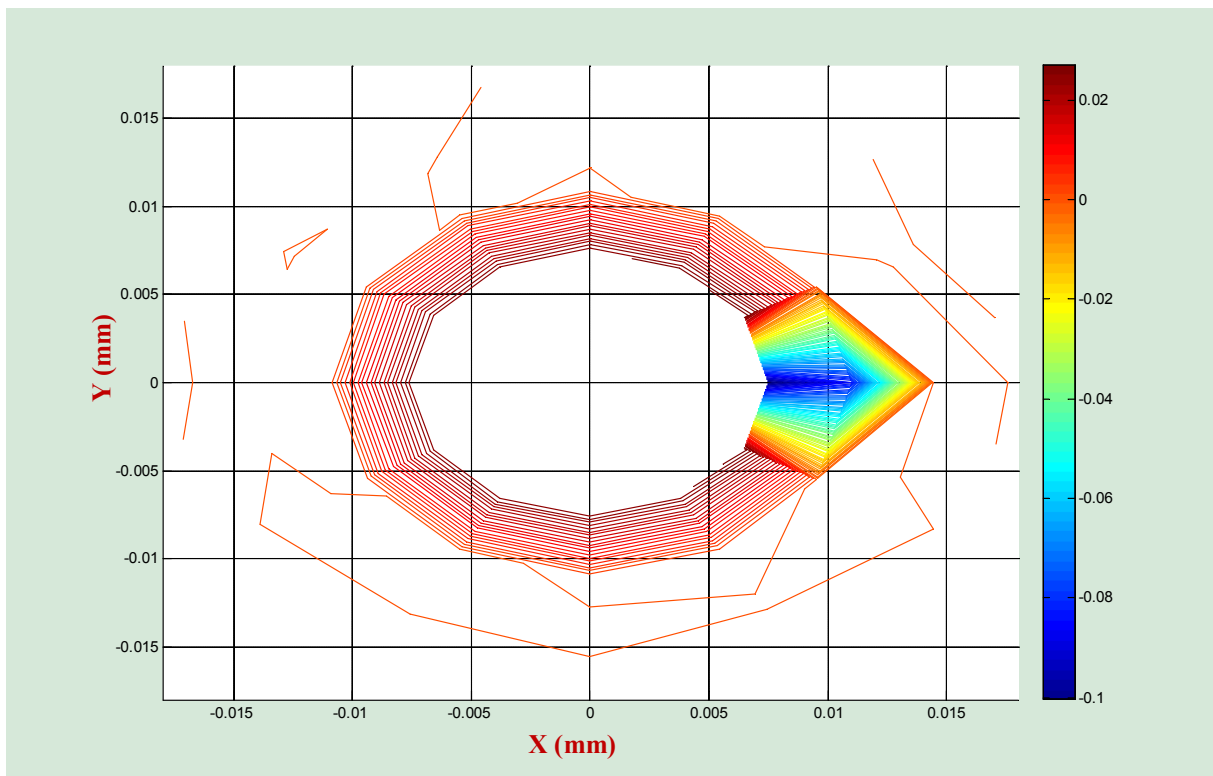


b. ΔZ_{imag} pour LIFT-OFF =0.5mm (Vue de dessus).

Figure III. 16 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LIFT-OFF 0.5mm



a. ΔZ_r pour LIFT-off = 0.5 mm (Vue en 3D)

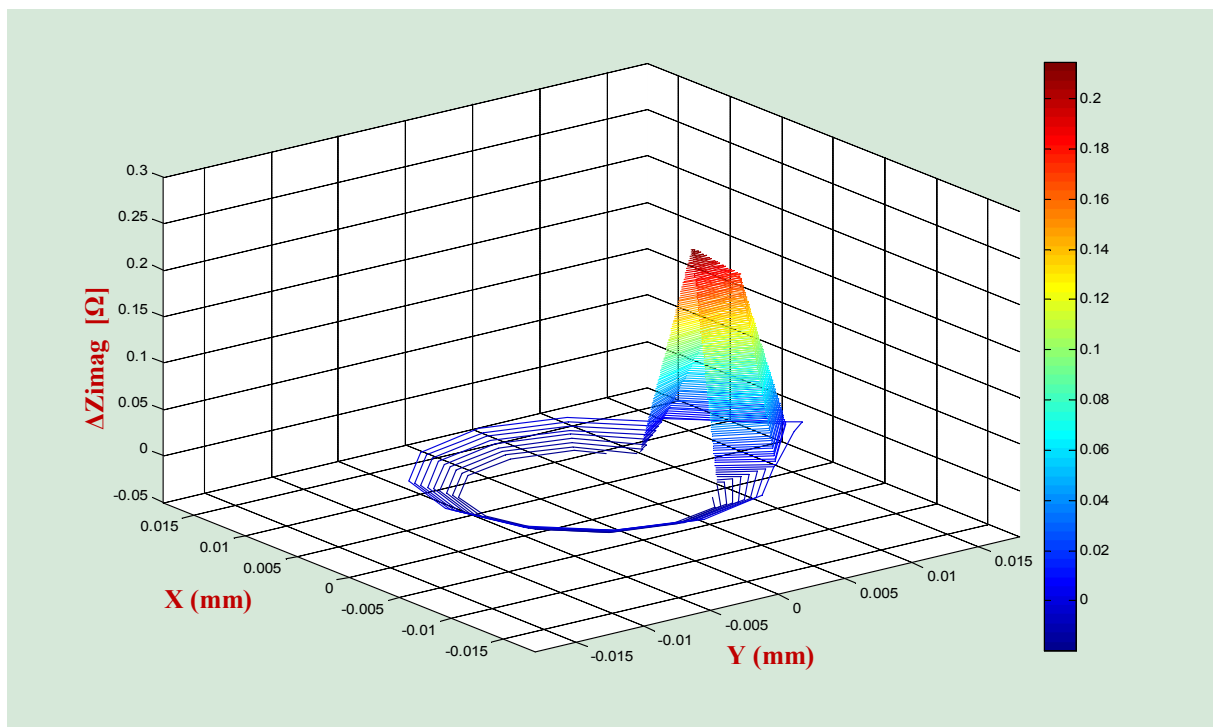


b. ΔZ_r pour LIFT-off = 0.5 mm (Vue de dessus)

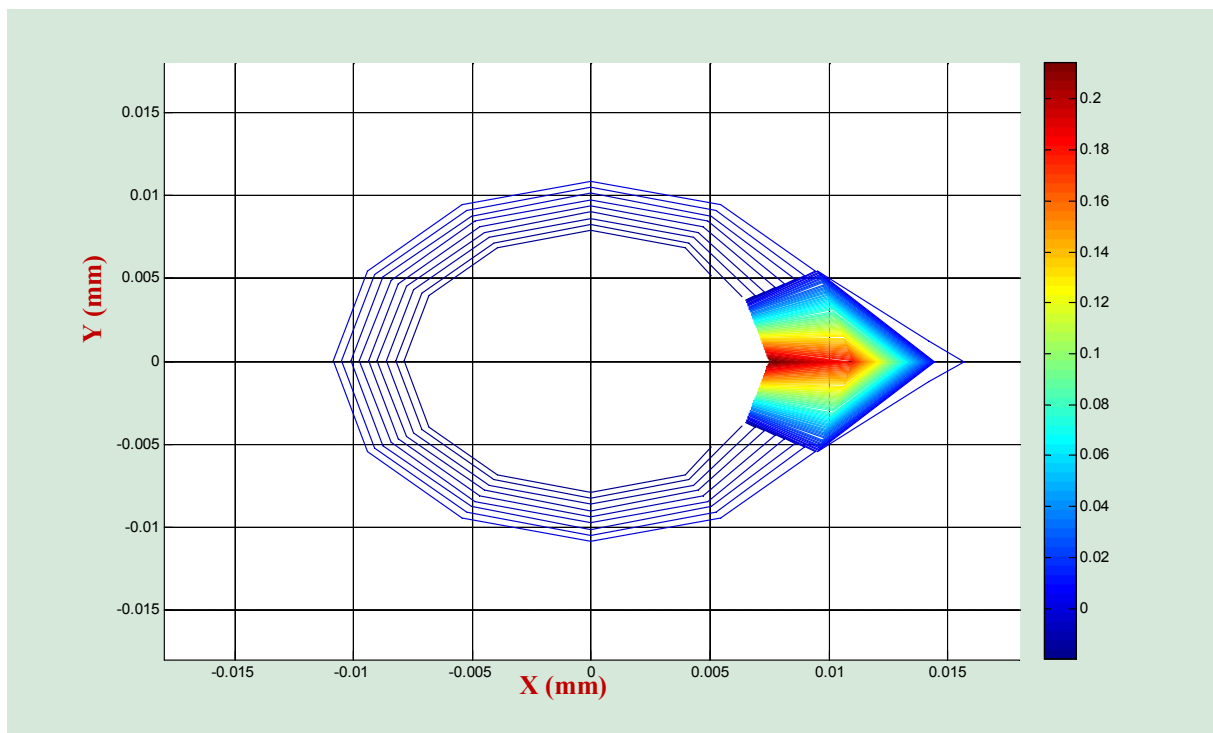
Figure III. 17 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LIFT-off 0.5mm

➤ **Lift-off 0.75mm**

Les Figures (III.20 et III.21) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une LIFT-off de 0.75mm

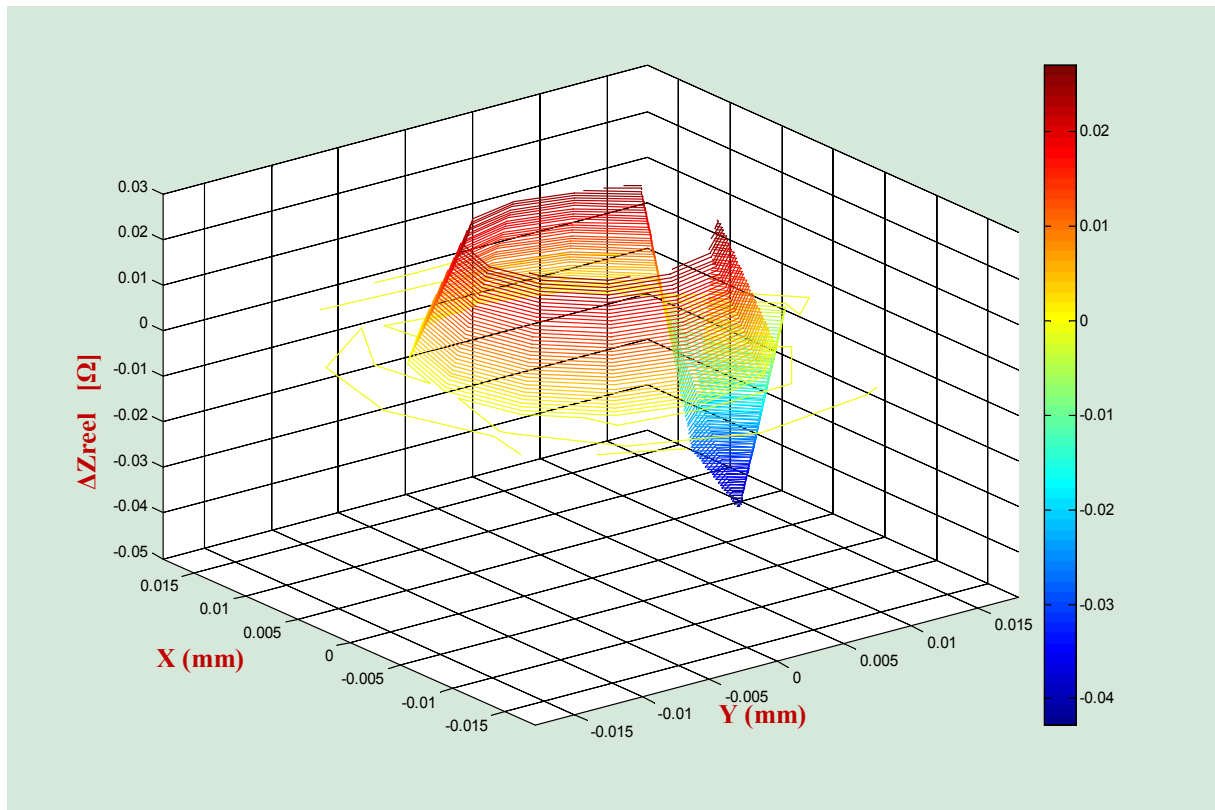


a. ΔZ_{imag} pour LIFT-off =0.75mm (Vue en 3D).

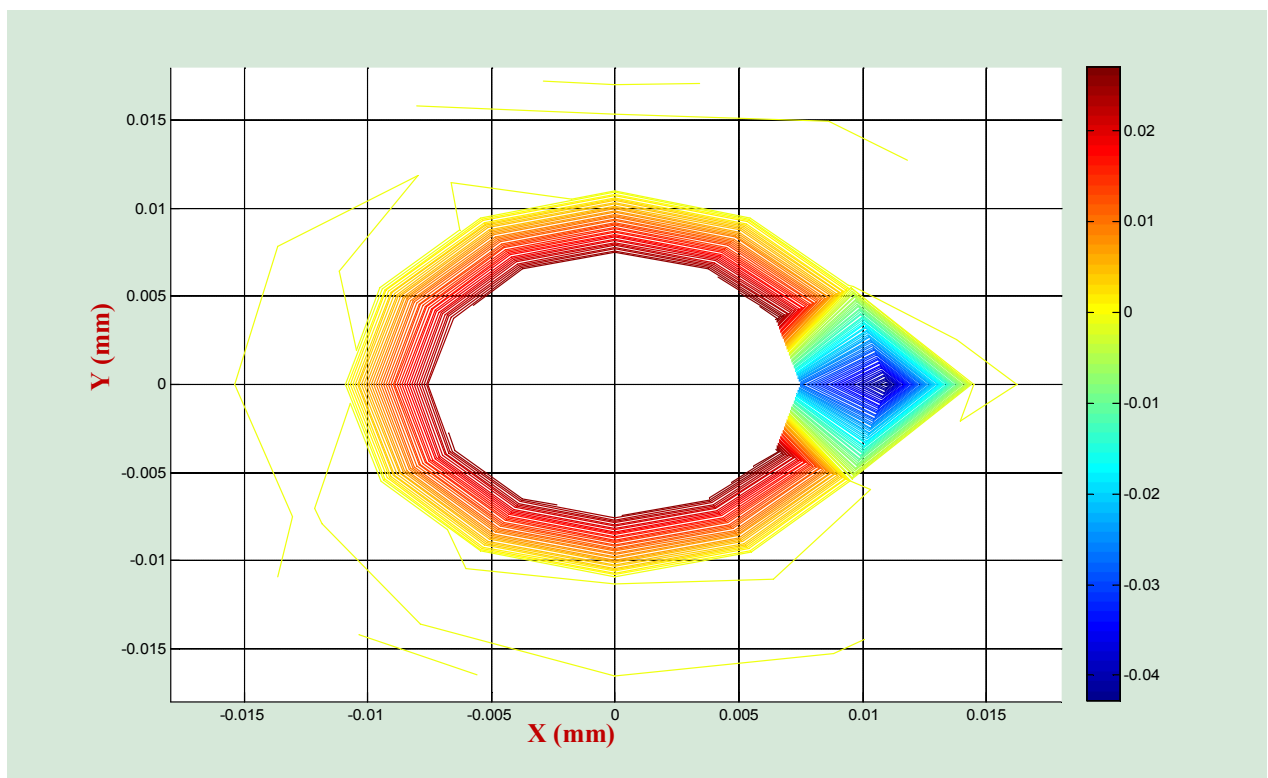


b. ΔZ_{imag} pour LIFT-off =0.75mm (Vue de dessus).

Figure III. 18 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LIFT-off 0.75mm



a. ΔZ_r pour LIFT-off =0.75mm (Vue en 3D)

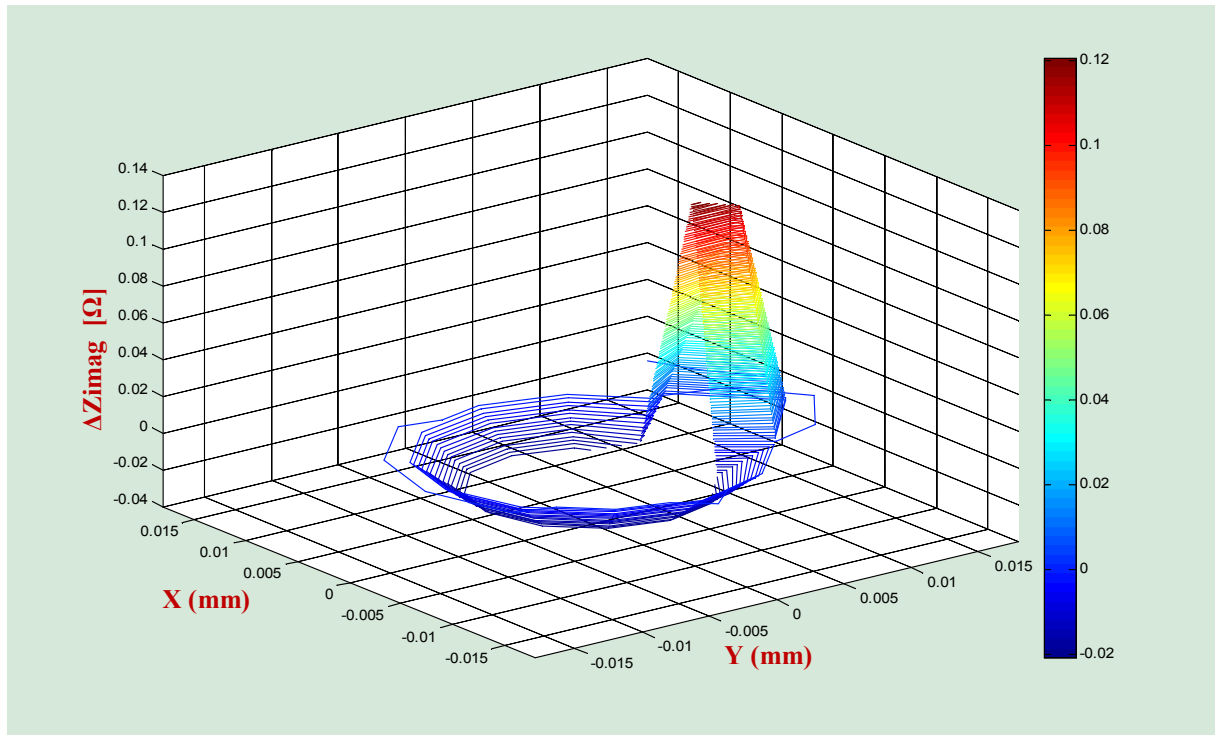


b. ΔZ_r pour LIFT-off =0.75mm(Vue de dessus)

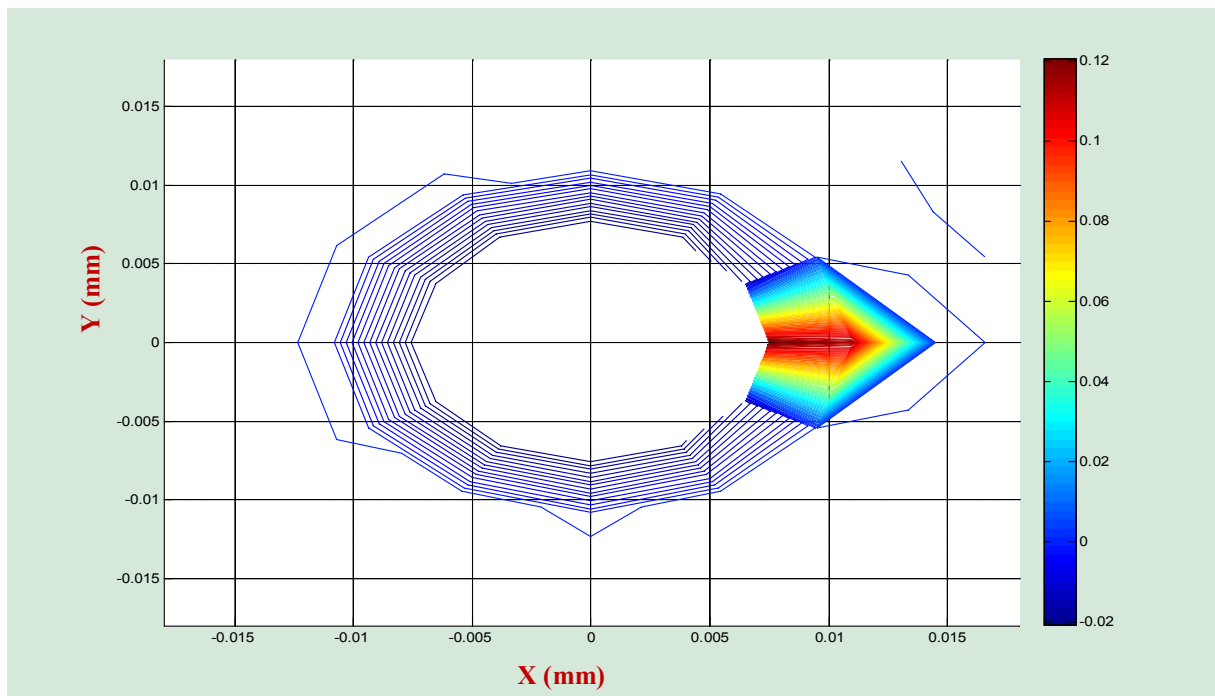
Figure III. 19 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LIFT-off 0.75mm

➤ **Lift-off 1.0 mm**

Les Figures (III.18 et III.19) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une LIFT de 1.0mm

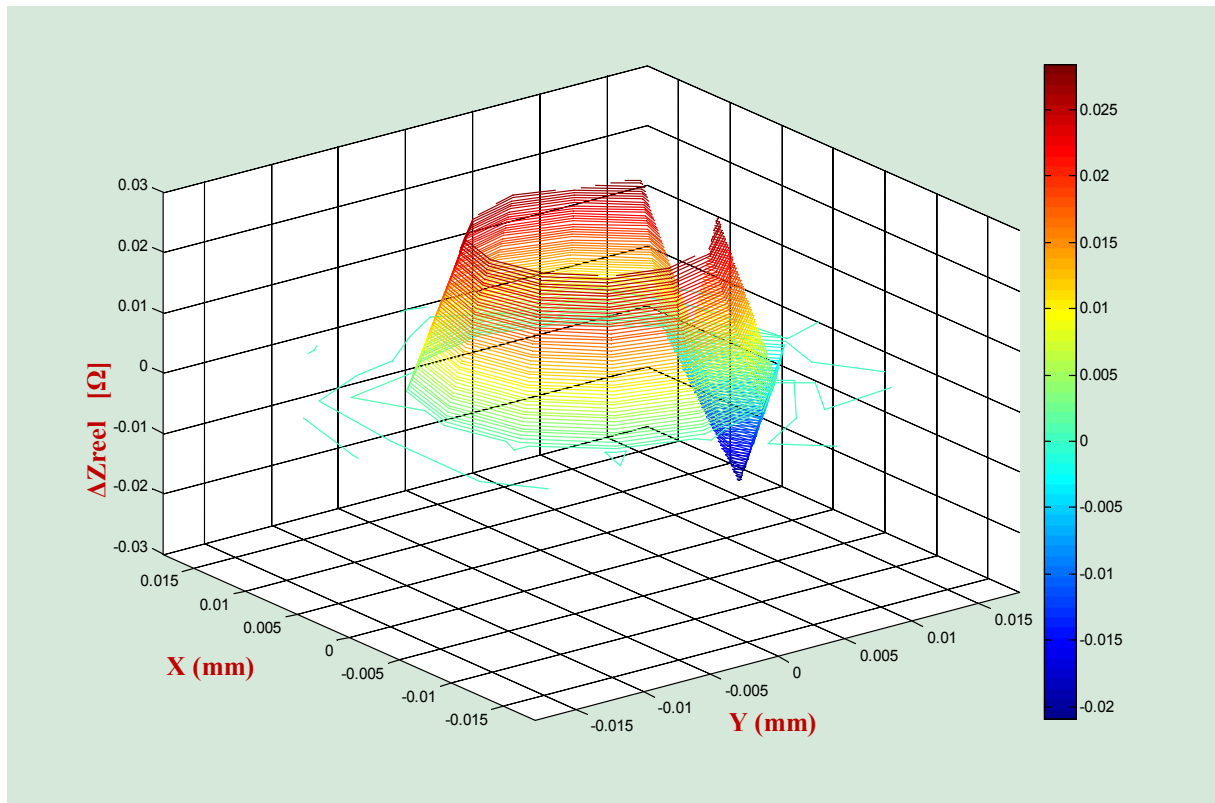


a. ΔZ_{imag} pour LIFT-off = 0.1mm (Vue en 3D).

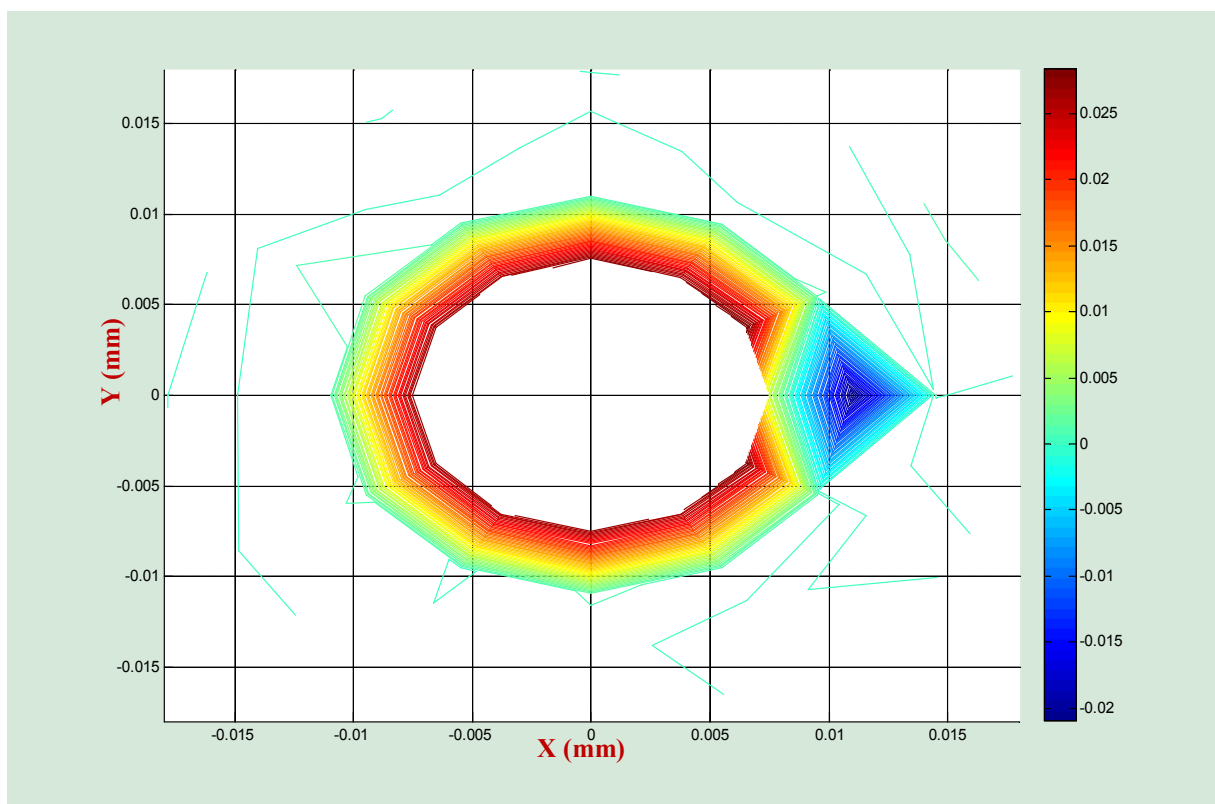


b. ΔZ_{imag} pour LIFT-off = 1.0 mm (Vue de dessus).

Figure III. 20 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LIFT-off 1.0mm



a. ΔZ_r pour LIFT-off=1.0mm (Vue en 3D)



b. ΔZ_r pour LIFT-off=1.0mm (Vue de dessus)

Figure III. 21 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LIFT-off 1.0mm

D'après les Figures (III.16 a), (III.18 a) et (III.20 a) on peut constater que la variation ΔZ_{imag} est nulle autour du rivet c(il n'y a pas de défaut), par contre cette variation elle est maximale au milieu du défaut, de l'ordre de 0.37Ω pour un lift-off de 0.5mm , 0.22Ω pour un lift-off de 0.75mm et 0.12Ω pour un lift-off de 1.0 mm .

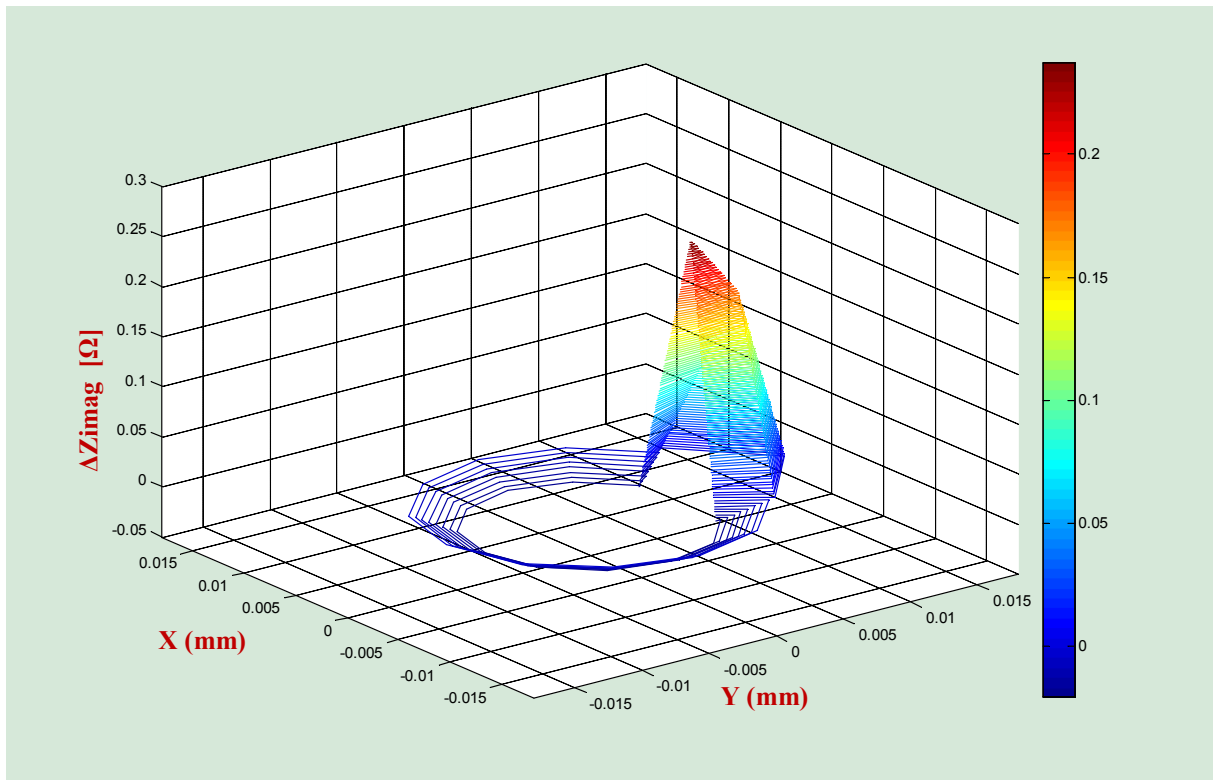
Par contre la variation réelle ΔZ_r est négative et elle a une valeur maximale de l'ordre -0.1Ω au milieu du défaut pour un LIFT-off 0.5mm et elle est nulle tout autour du rivet, Figure (III.17 b), (III.19 a) et (III. 21a). La valeur de ΔZ_r peut atteindre -0.04Ω pour un LIFT-off 0.75mm et -0.02Ω pour un LIFT-off de 1.0 mm .

Les résultats obtenus Figures (III.16 à 21) montrent bien que la variation de l'impédance est inversement proportionnelle au lift-off.

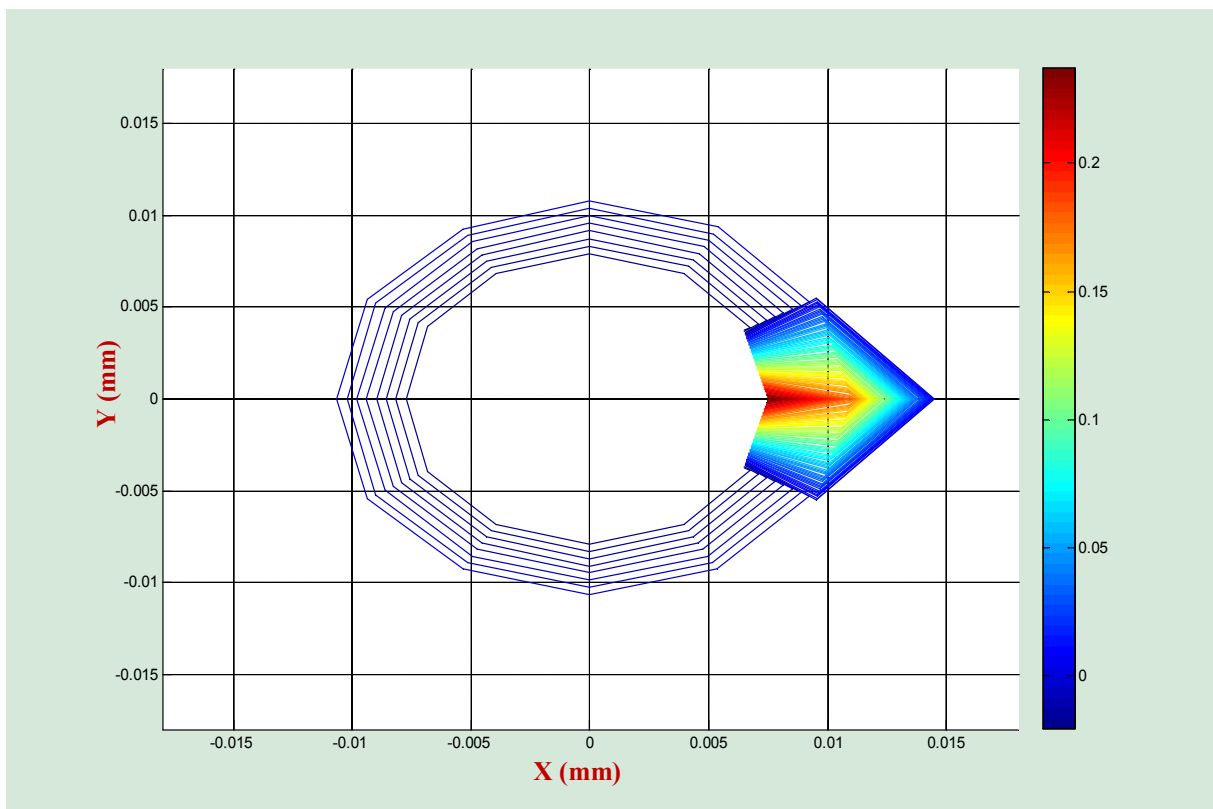
III.3.5.3. Effet de la variation de la largeur du défaut

➤ Largeur du défaut 0.2mm

Les Figures (III.16 et III.17) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une LARGEUR du défaut de 0.2mm .

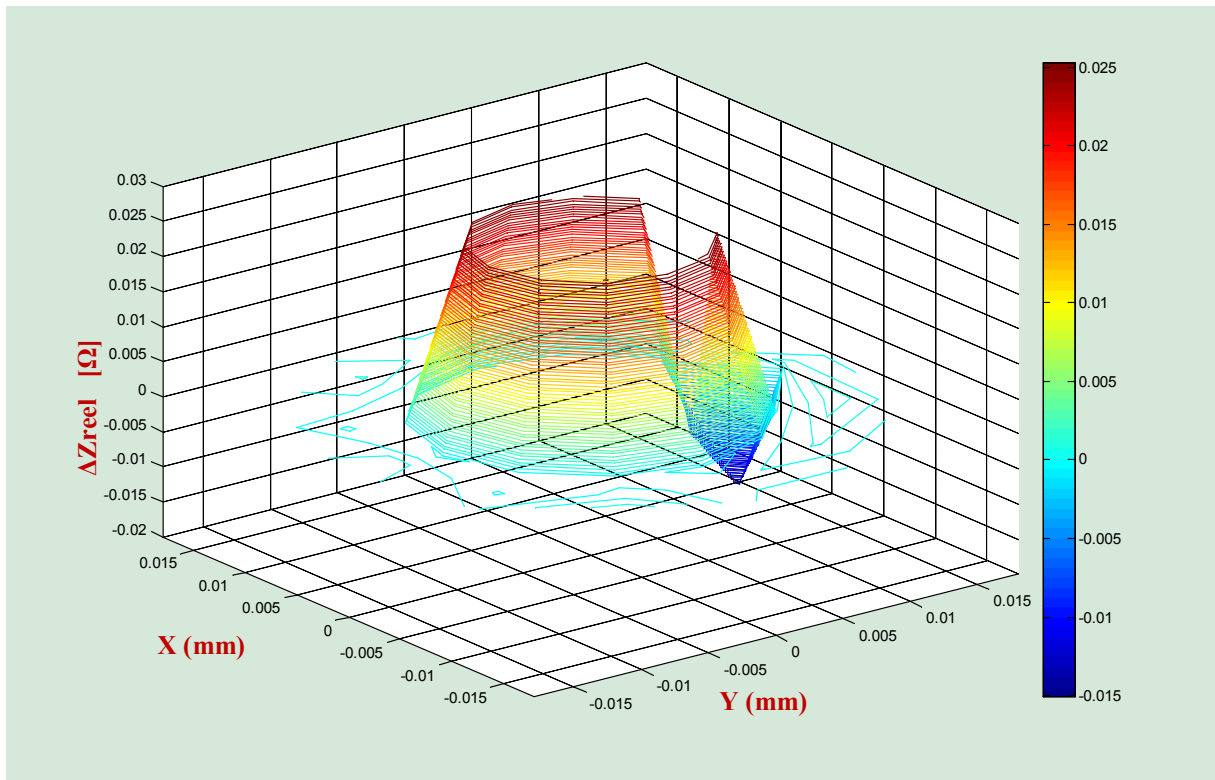


a. ΔZ_{imag} pour LARGEUR du défaut =0.2mm (Vue en 3D).

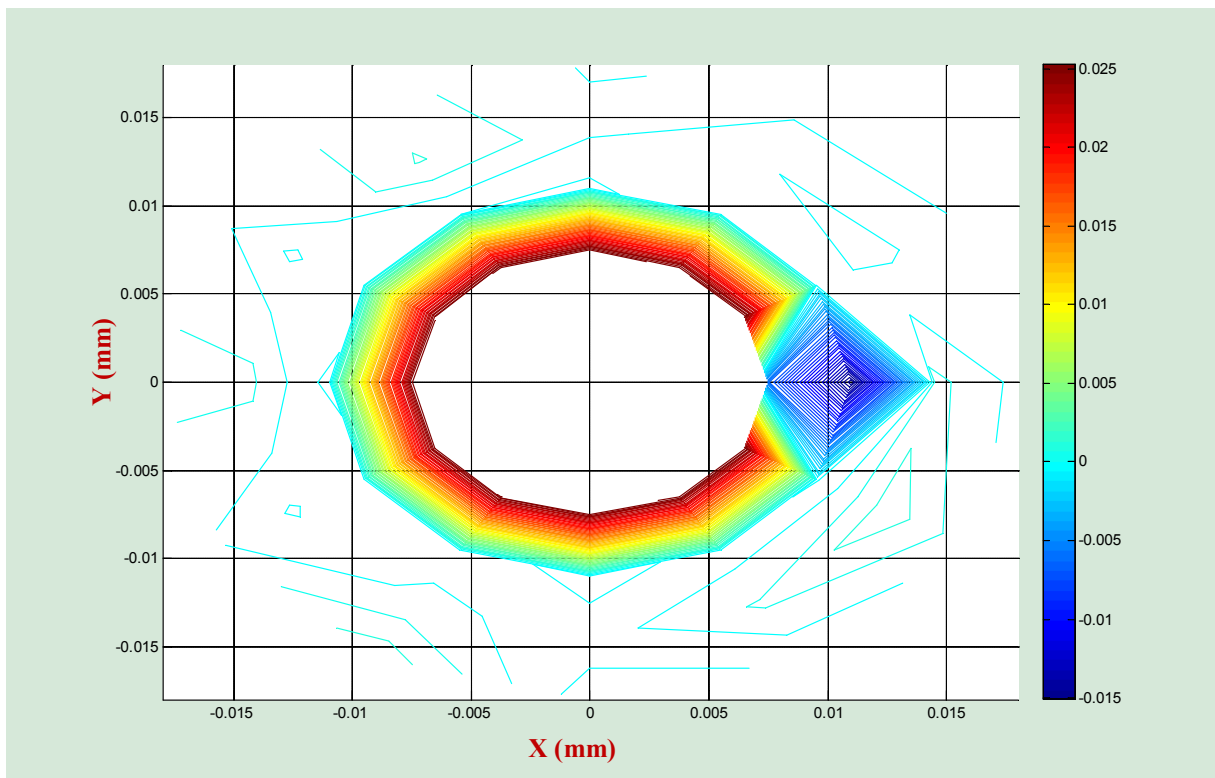


b. ΔZ_{imag} pour LARGEUR du défaut =0.2mm (Vue de dessus).

Figure III. 22 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LARGEUR du défaut 0.2mm



a. ΔZ_r pour LARGEUR du défaut =0.2mm(Vue en 3D)

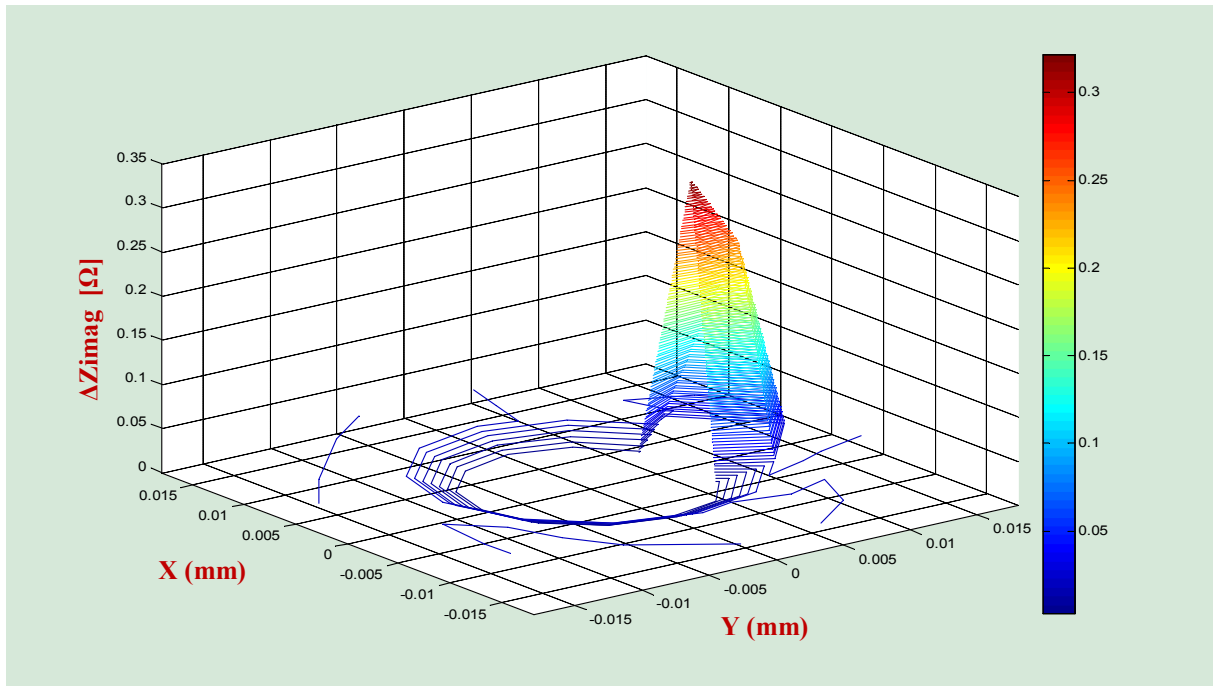


b. ΔZ_r pour LARGEUR du défaut =0.2mm (Vue de dessus)

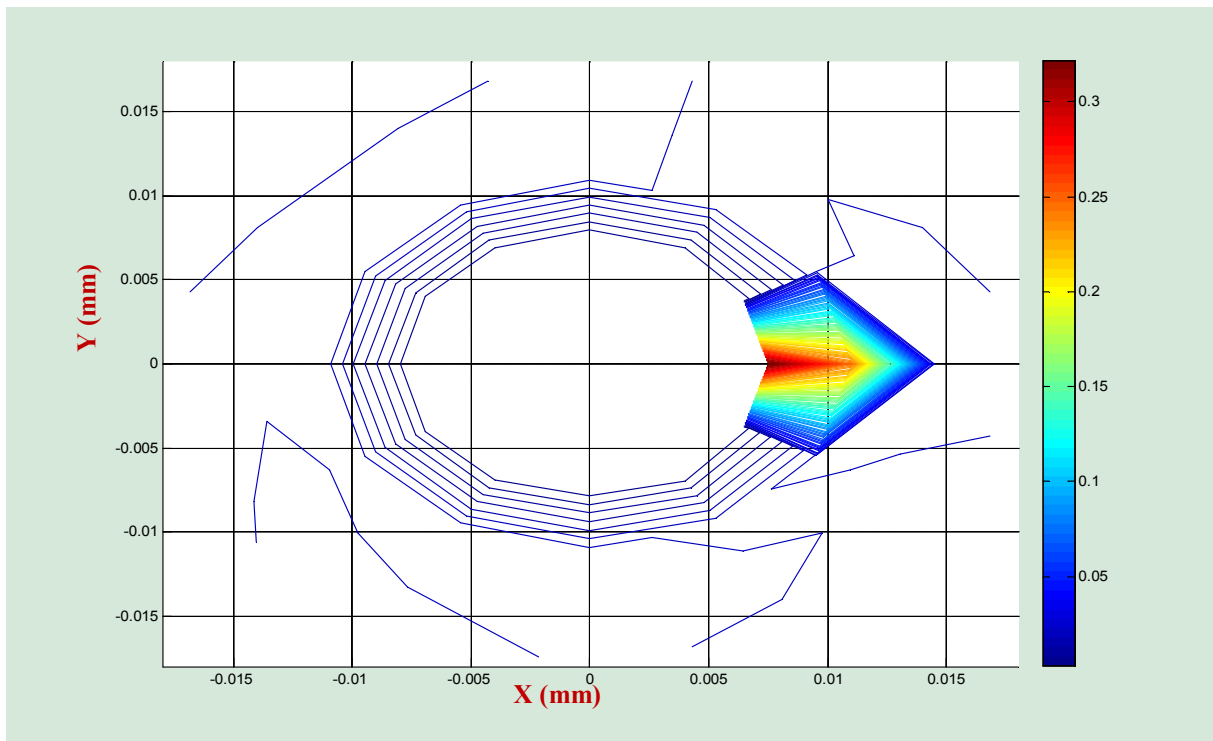
Figure III. 23 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LARGEUR du défaut 0.2mm

➤ **Largeur du défaut 0.5mm**

Les Figures (III.18 et III.19) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une LARGEUR du défaut de 0.5mm

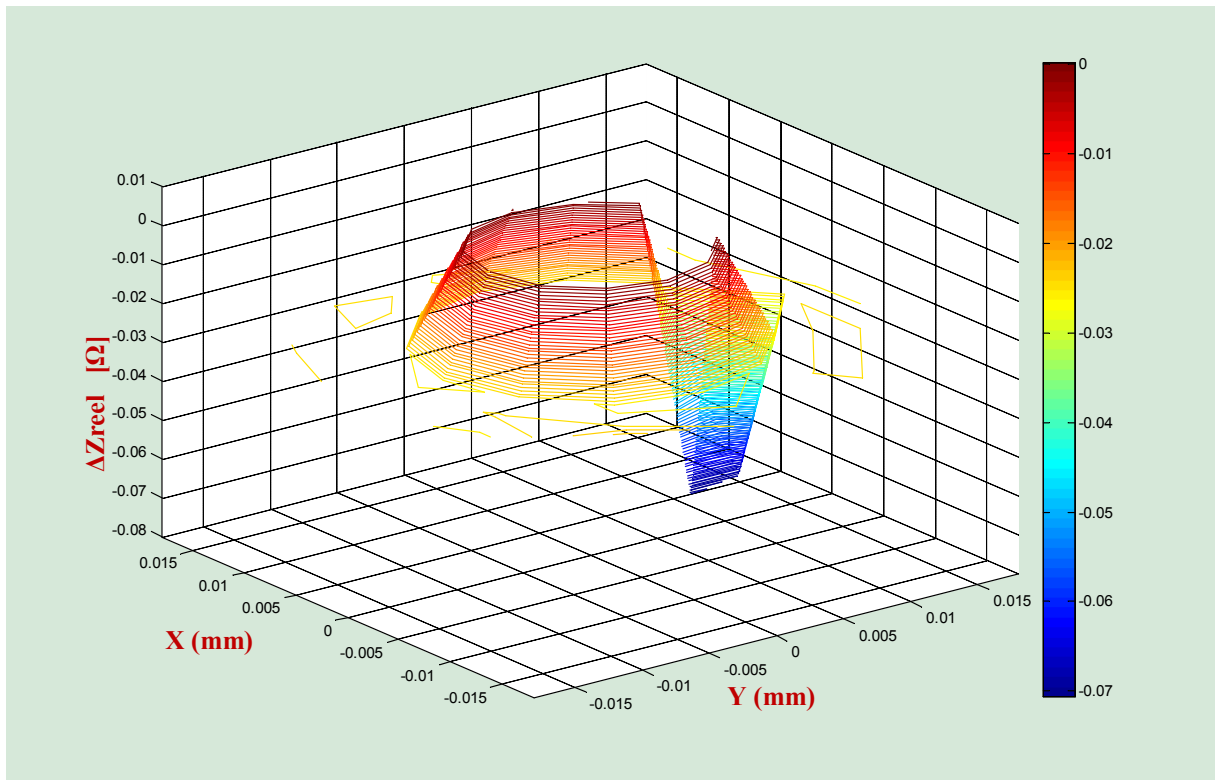


a. ΔZ_{imag} pour LARGEUR du défaut=0.5mm(Vue en 3D).

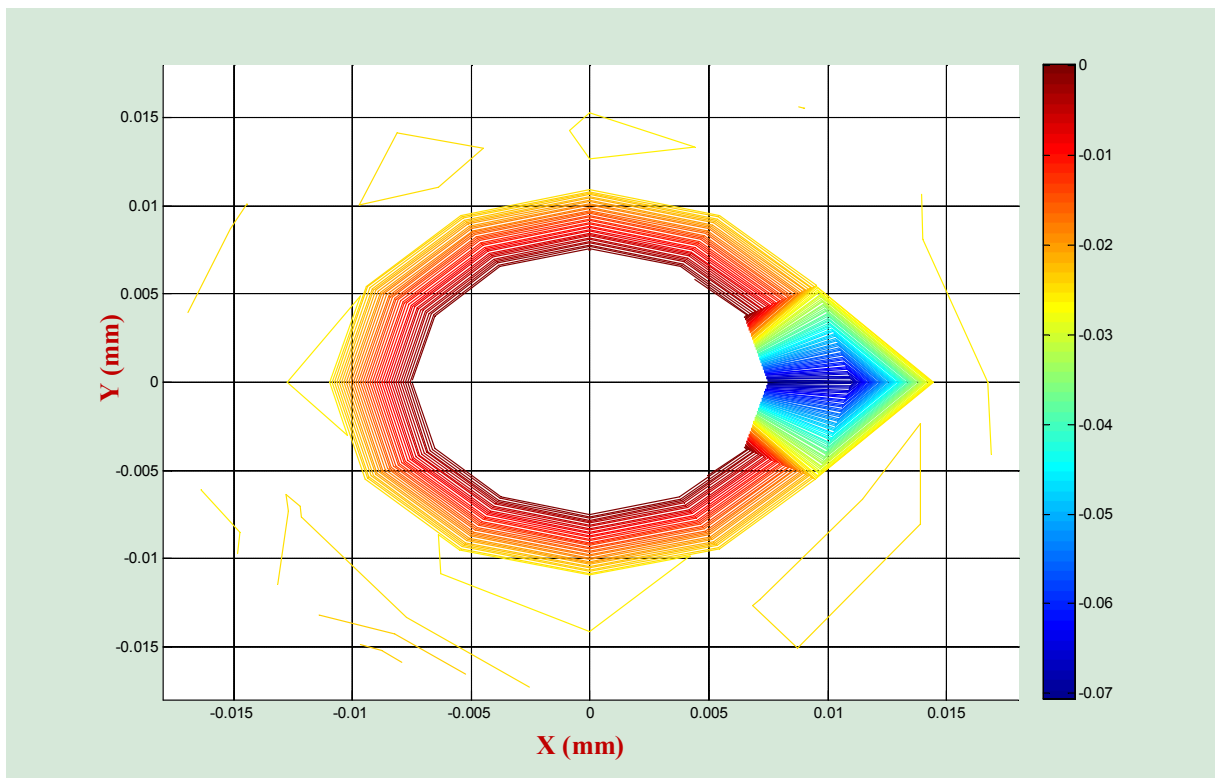


b. ΔZ_{imag} pour LARGEUR du défaut =0.5mm (Vue de dessus).

Figure III. 24 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LARGEUR du défaut 0.5mm



a. ΔZ_{reel} pour LARGEUR du défaut =0.5mm (Vue en 3D)

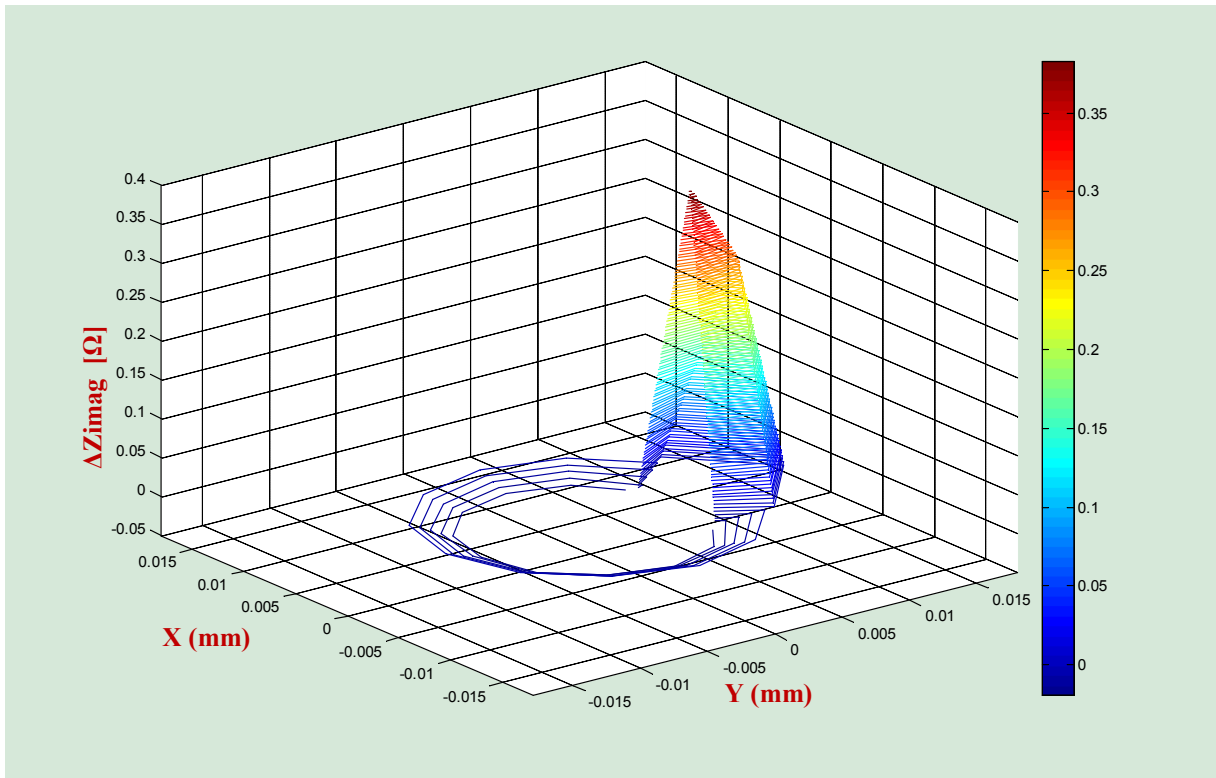


b. ΔZ_{reel} pour LARGEUR du défaut =0.5mm (Vue de dessus)

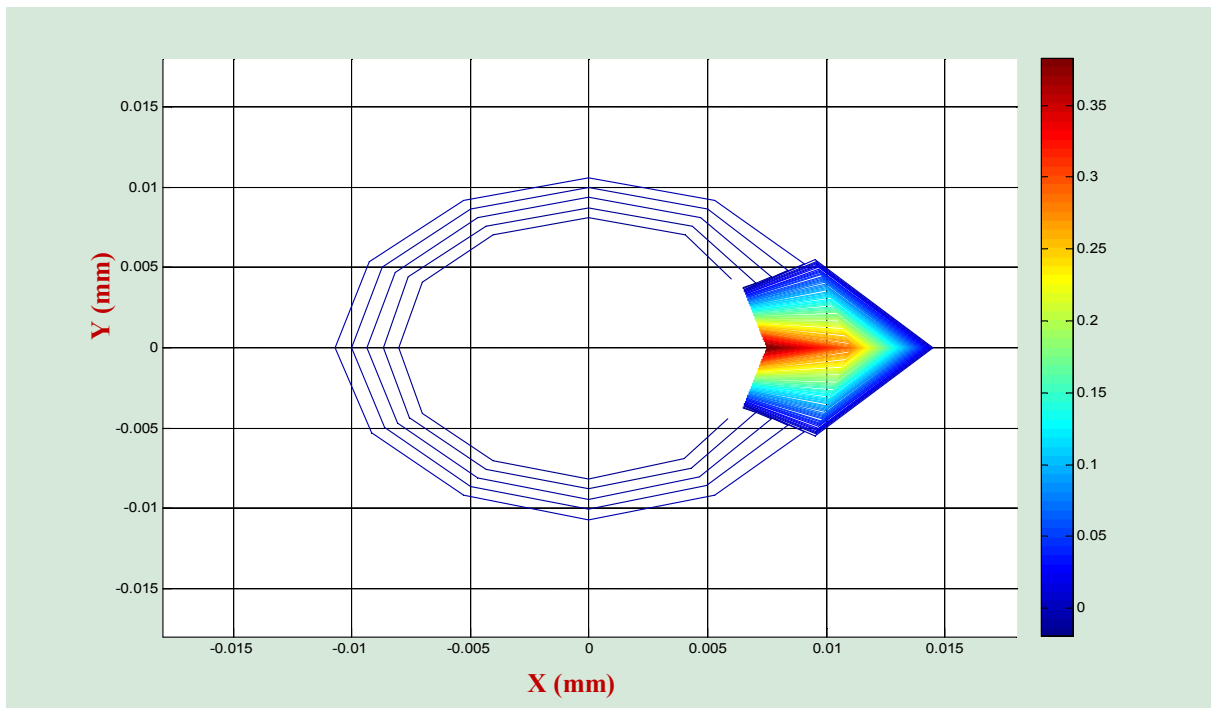
Figure III. 25 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LARGEUR du défaut 0.5mm

➤ **Largeur du défaut 1.0mm**

Les Figures (III.20 et III.21) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une LARGEUR du défaut de 1.0mm

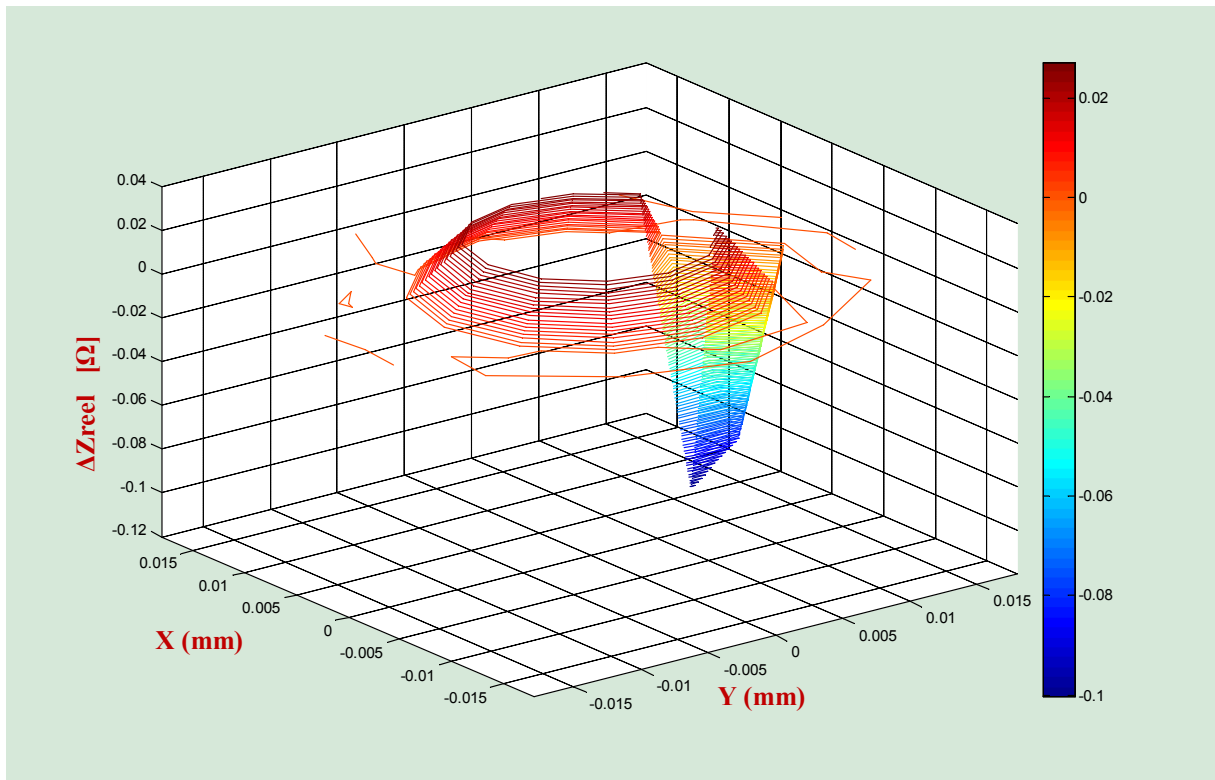


a. ΔZ_{imag} pour LARGEUR du défaut =1.0mm (Vue en 3D).

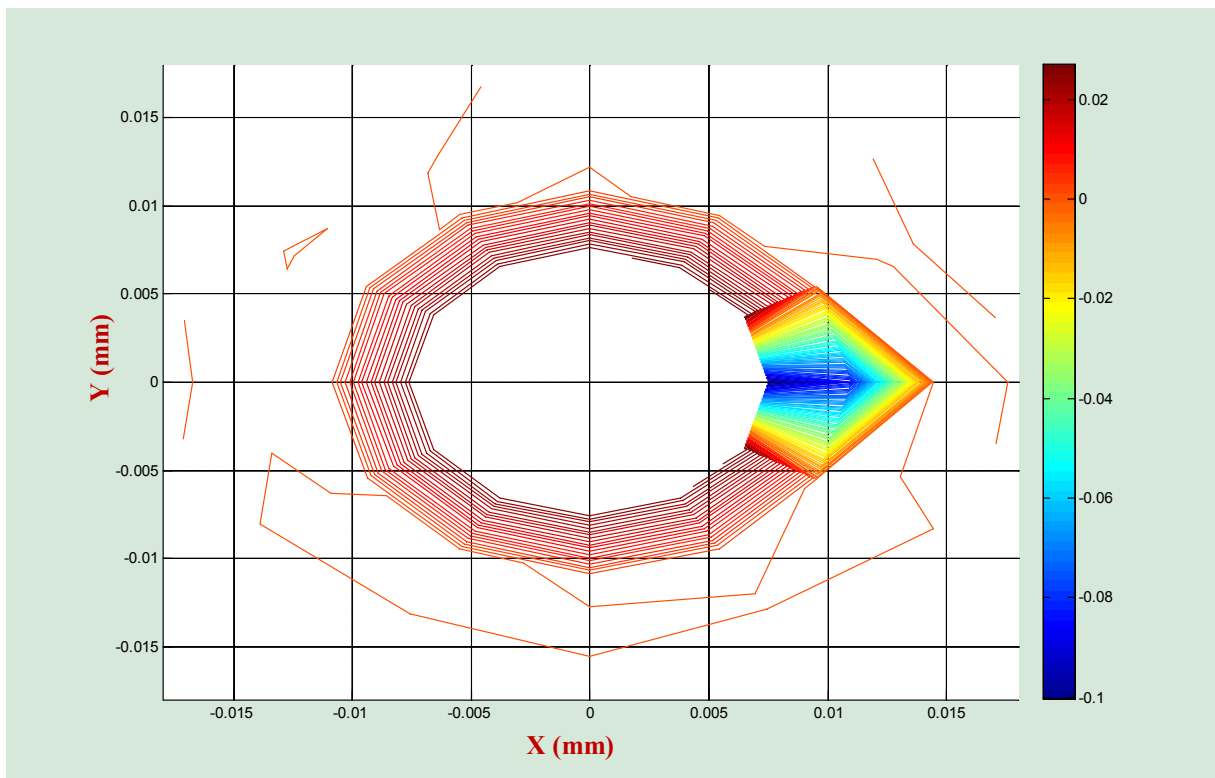


b. ΔZ_{imag} pour LARGEUR du défaut =1.0mm (Vue de dessus).

Figure III. 26 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une 1.0mm



a. $\Delta Z_{r \text{ pour}} = 1.0 \text{ mm}$ (Vue en 3D)



b. $\Delta Z_{r \text{ pour LARGUR du défaut}} = 1.0 \text{ mm}$ (Vue de dessus)

Figure III. 27 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LARGEUR du défaut 1.0mm

D'après les Figures (III.16 a), (III.18 a) et (III.20 a) on peut observer que la variation ΔZ_{imag} est nulle autour du rivet (il n'y a pas de défaut), par contre cette variation elle est maximale au milieu du défaut, de l'ordre de 0.022Ω pour une largeur de défaut de 0.2 mm , 0.31Ω pour une largeur de défaut de 0.5 mm et 0.36Ω pour une largeur de défaut de 1.0 mm .

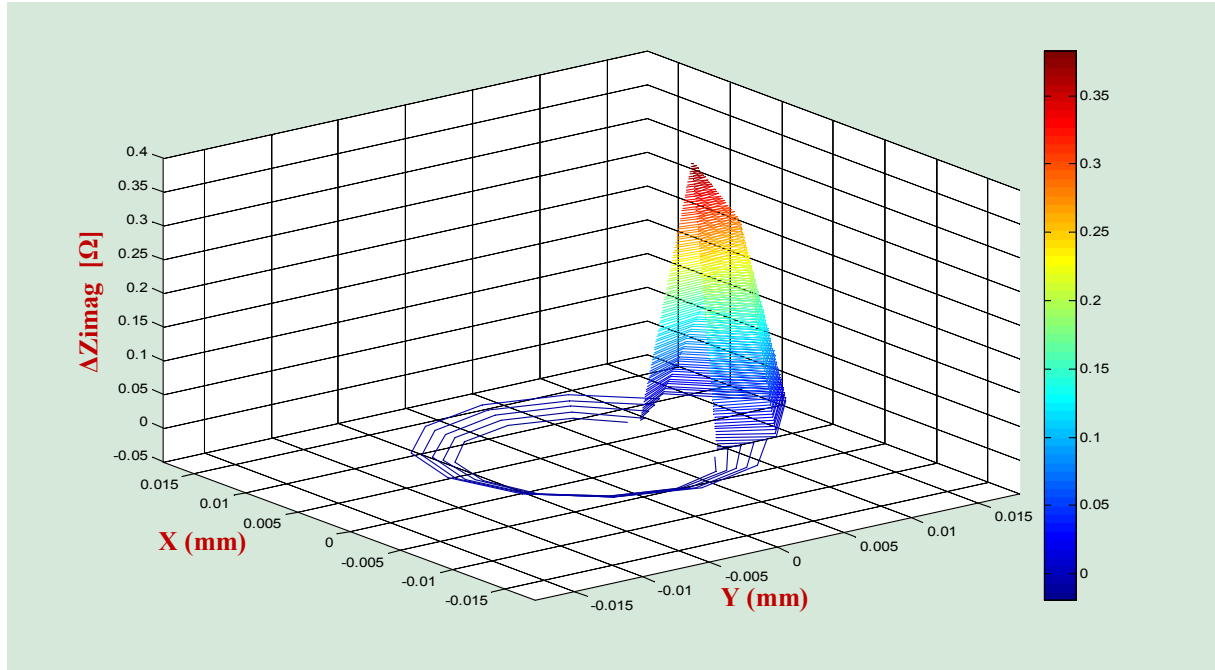
Les Figures (III.17a), (III.19a) et (III.20a) de la variation réelle ΔZ_r , montrent qu'elle est négative et elle a une valeur maximale de l'ordre 0.01Ω au milieu du défaut et elle nulle tout autour du rivet. la valeur de δz_r peut atteindre -0.015Ω pour une largeur de défaut de 0.2 mm , -0.015Ω pour une largeur de défaut et 0.07Ω et -0.1Ω pour une largeur de défaut 1.0 mm .

Les résultats obtenus Figures (III.16 à 21) montrent que la variation de l'impédance est proportionnelle à celle de la largeur du défaut.

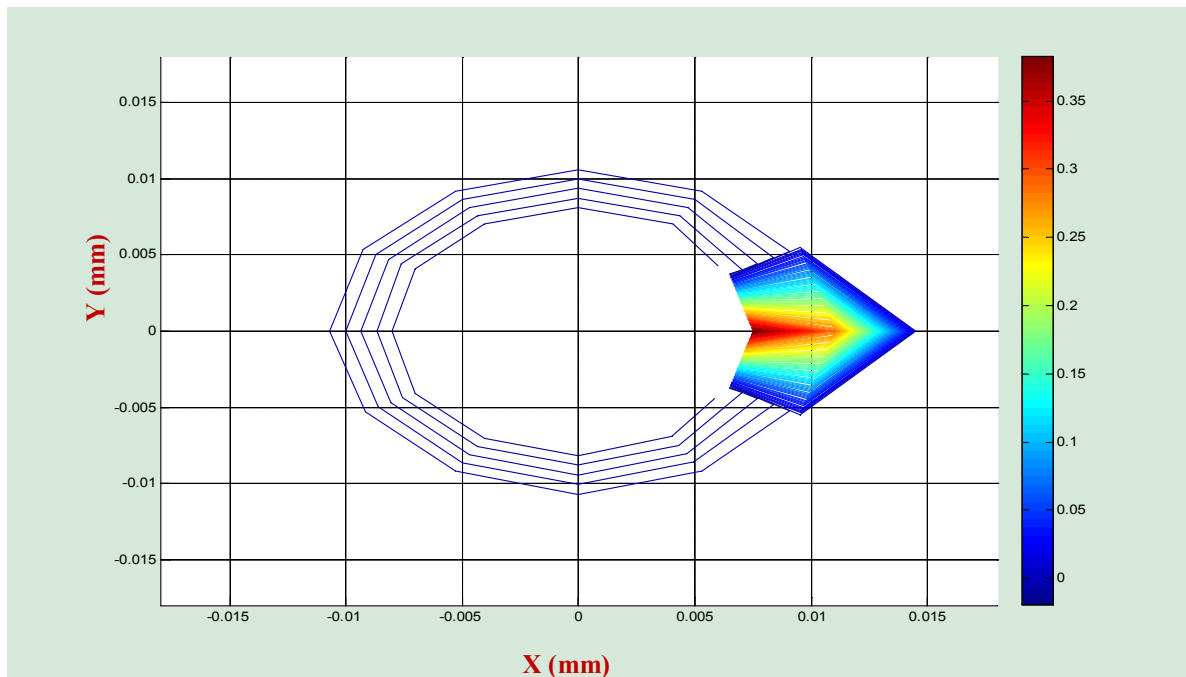
III.3.5.4. Effet de la variation de la longueur du défaut

➤ Longueur du défaut 7.5mm

Les Figures (III.28 et III.29) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une Longueur du défaut de 7.5mm

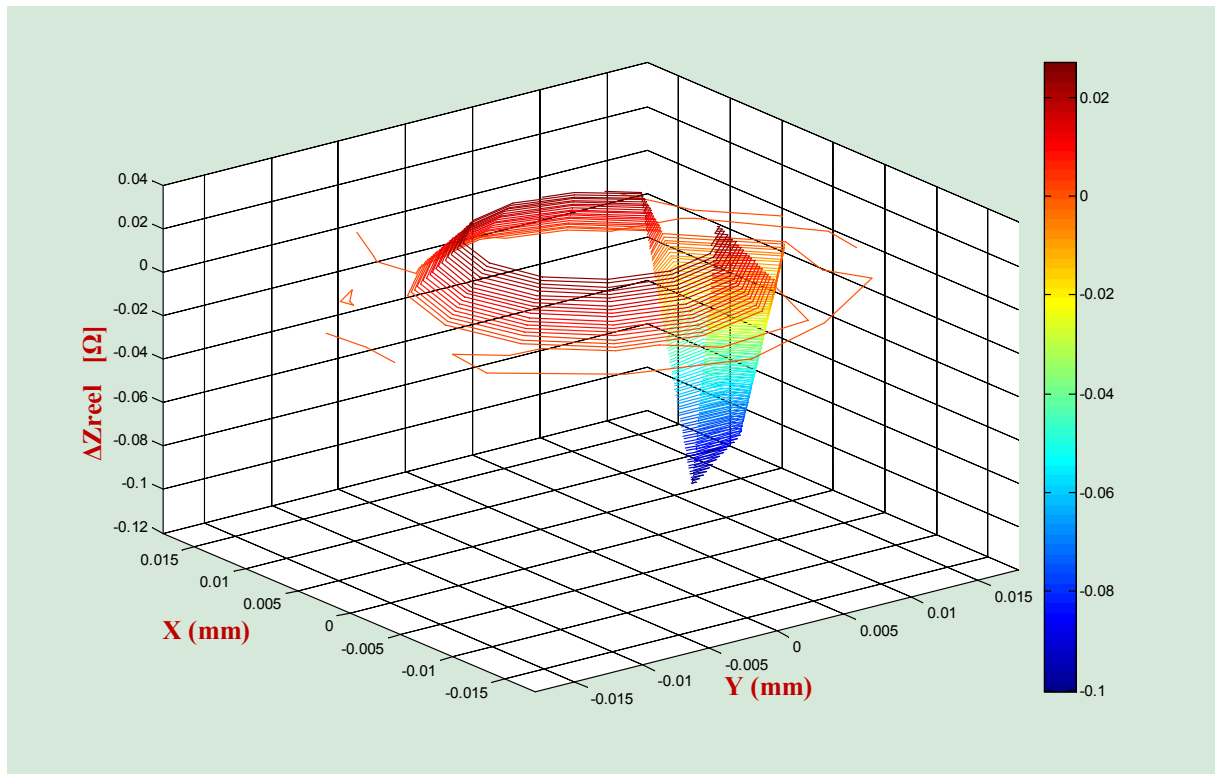


a. ΔZ_{imag} pour longueur du défaut =7.5mm (Vue en 3D).

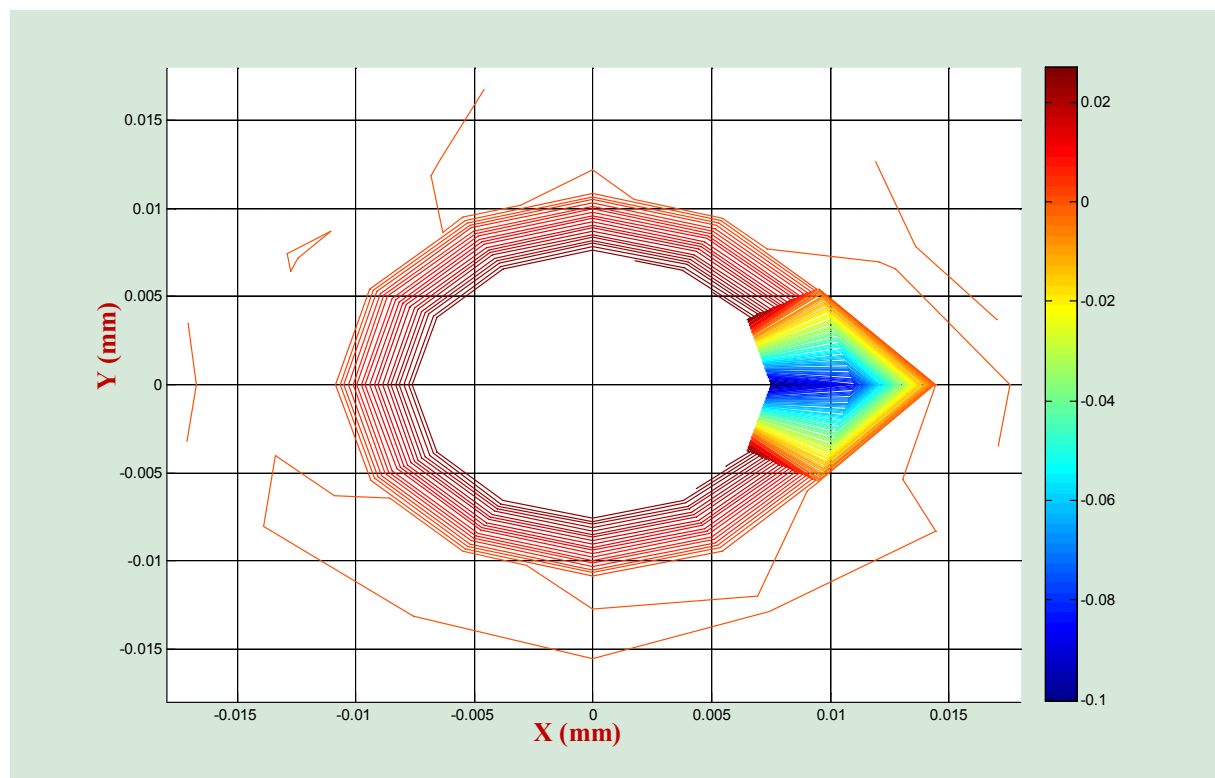


b. ΔZ_{imag} pour Longueur du défaut=7.5mm (Vue de dessus).

Figure III. 28 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une longueur du défaut 7.5mm



a. ΔZ_{reel} pour longueur du défaut =7.5mm (Vue en 3D)

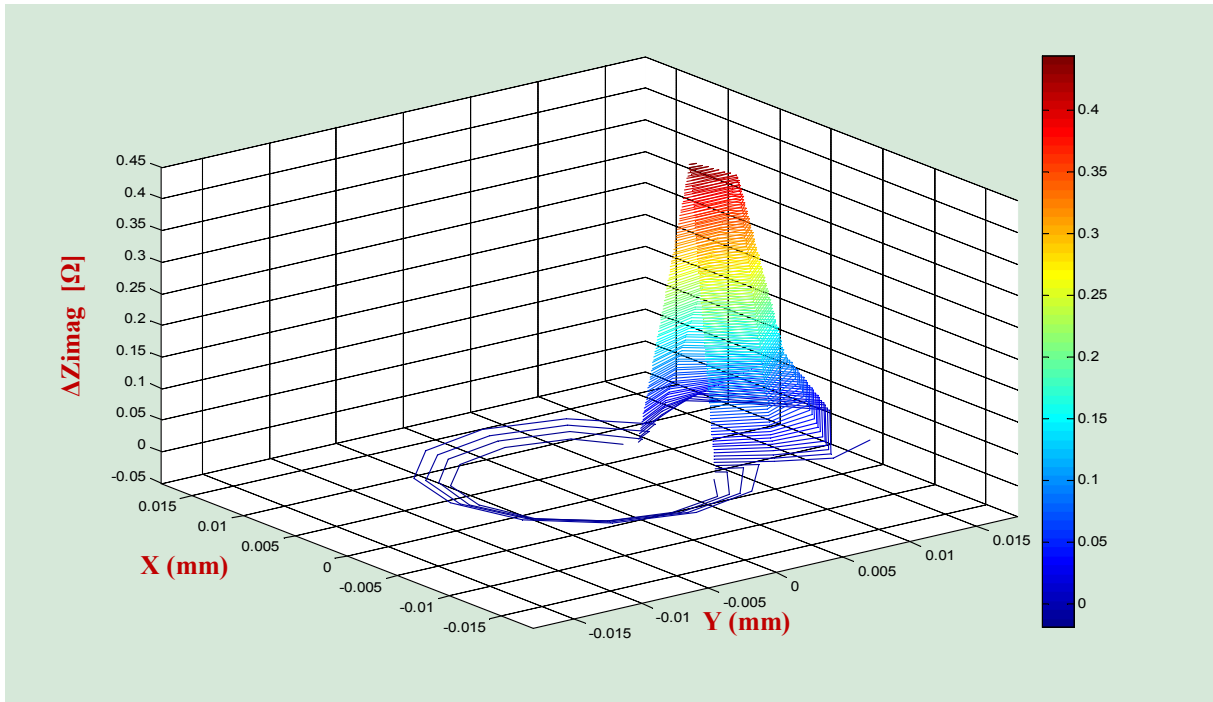


b. ΔZ_{reel} pour longueur du défaut =7.5mm (Vue de dessus)

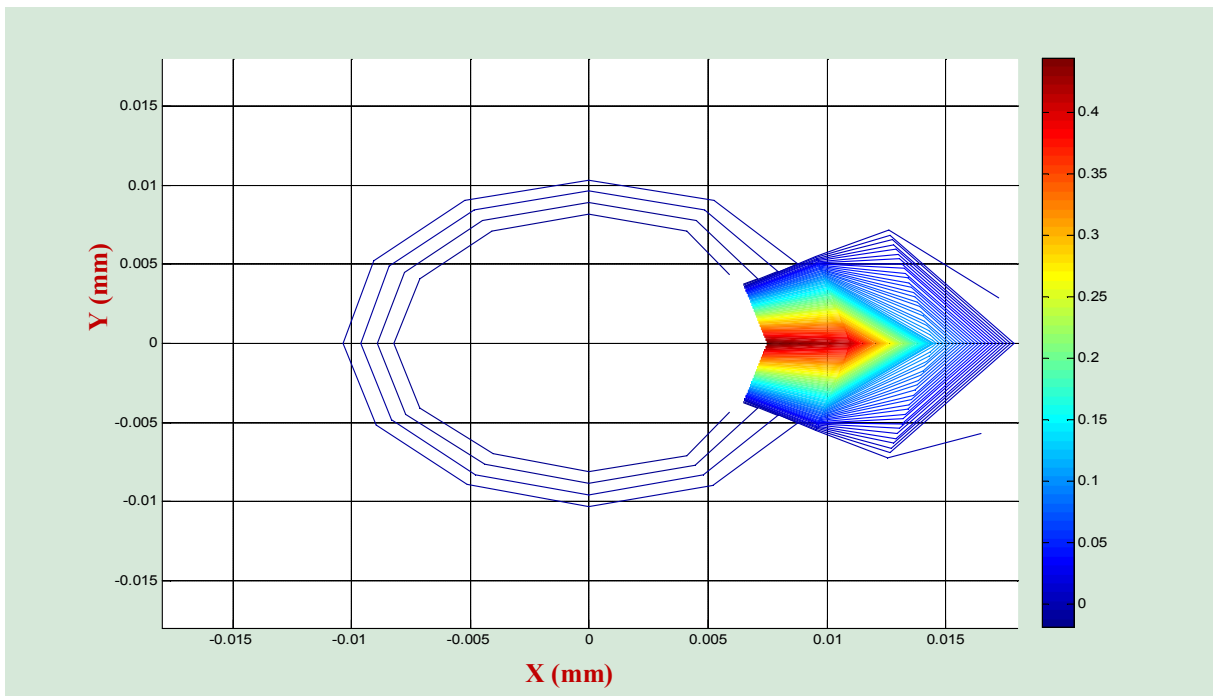
Figure III. 29 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une longueur du défaut 7.5mm

➤ **Longueur du défaut 10.00mm**

Les Figures (III.30 et III.31) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une longueur du défaut de 10.00mm

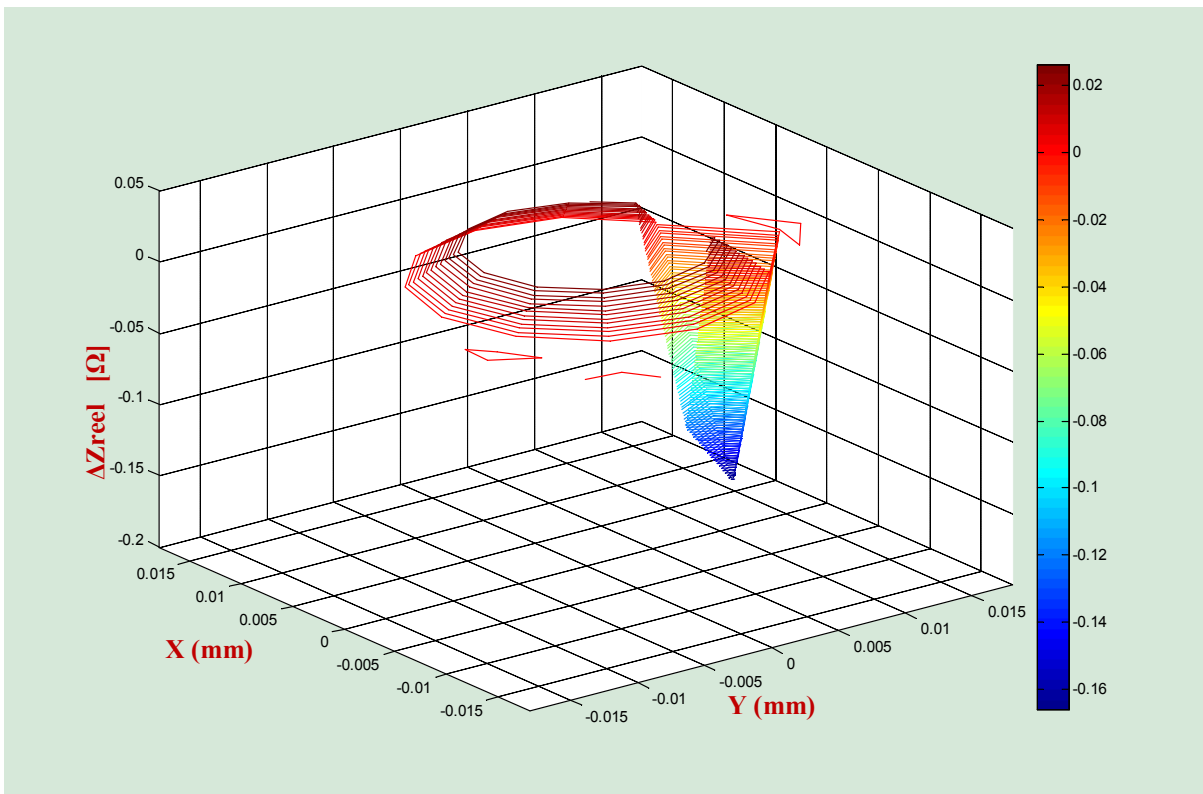


a. ΔZ_{imag} pour longueur du défaut =10.00mm (Vue en 3D).

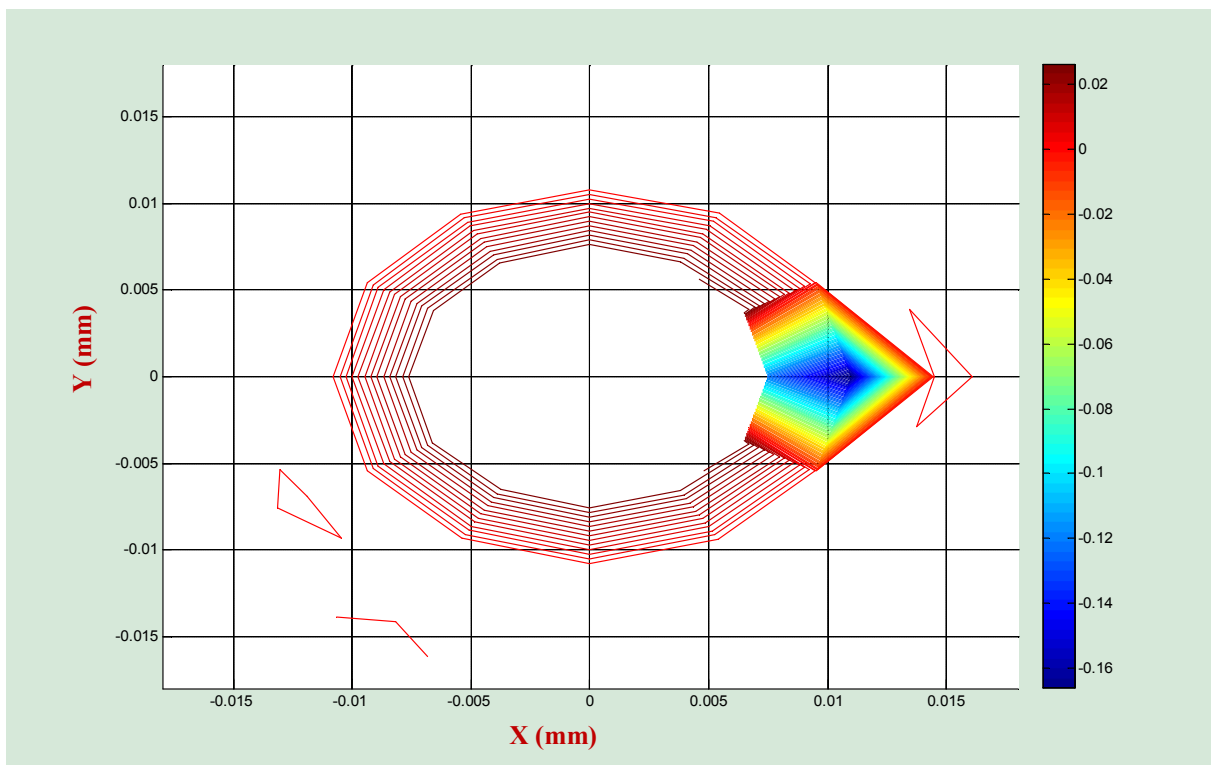


b. ΔZ_{imag} pour longueur du défaut =10.00mm (Vue de dessus).

Figure III. 30 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une longueur du défaut 10.00mm



a. ΔZ_r pour longueur du défaut =10.00mm (Vue en 3D)

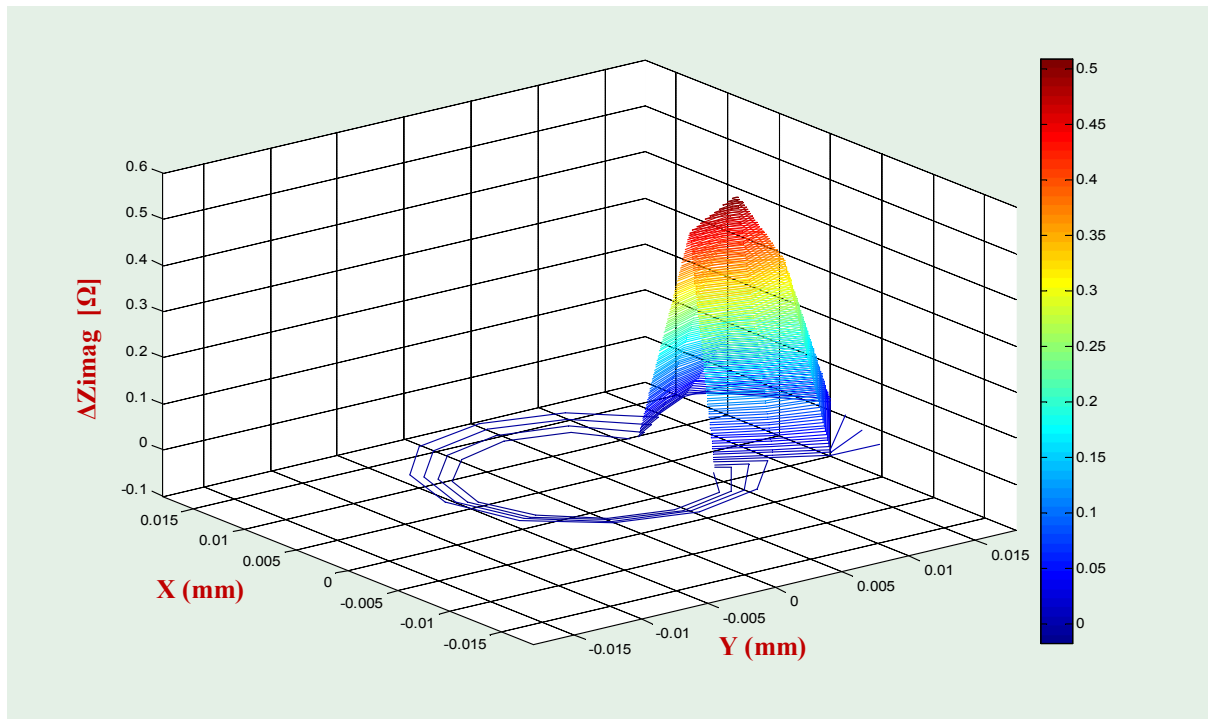


b. ΔZ_r pour longueur du défaut =10.00mm (Vue de dessus).

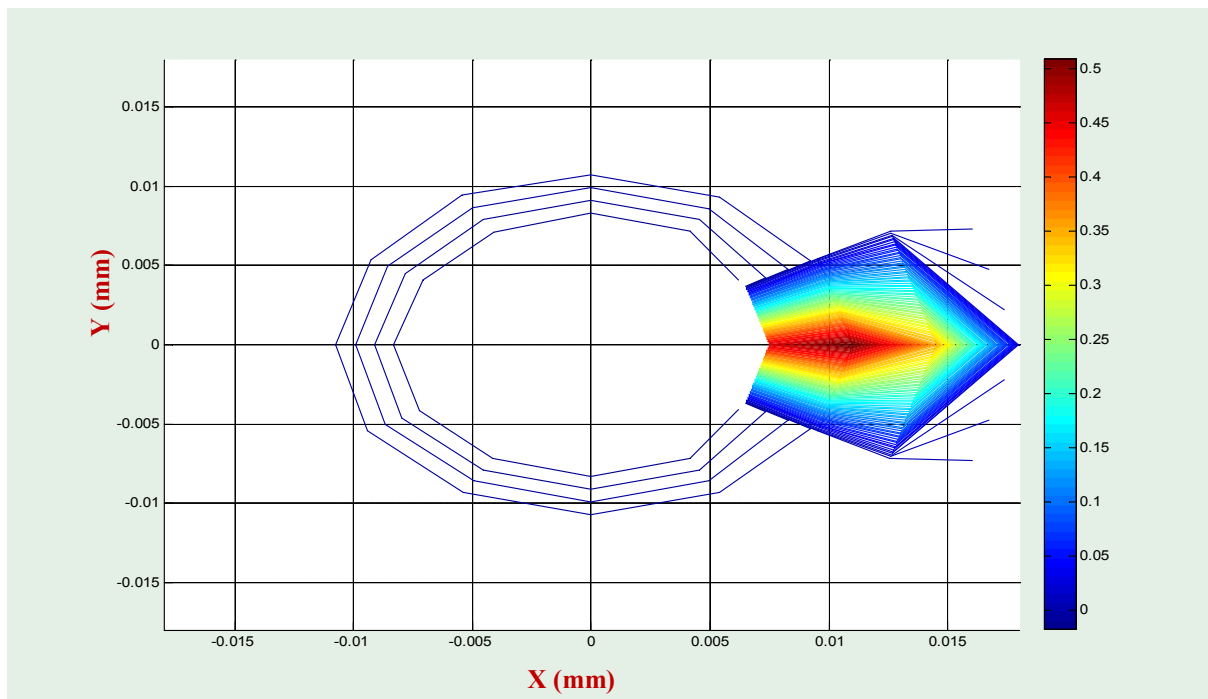
Figure III. 31 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une longueur du défaut 10.00mm

➤ **Longueur du défaut 12.50mm**

Les Figures (III.32 et III.33) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une longueur du défaut de 12.50 mm.

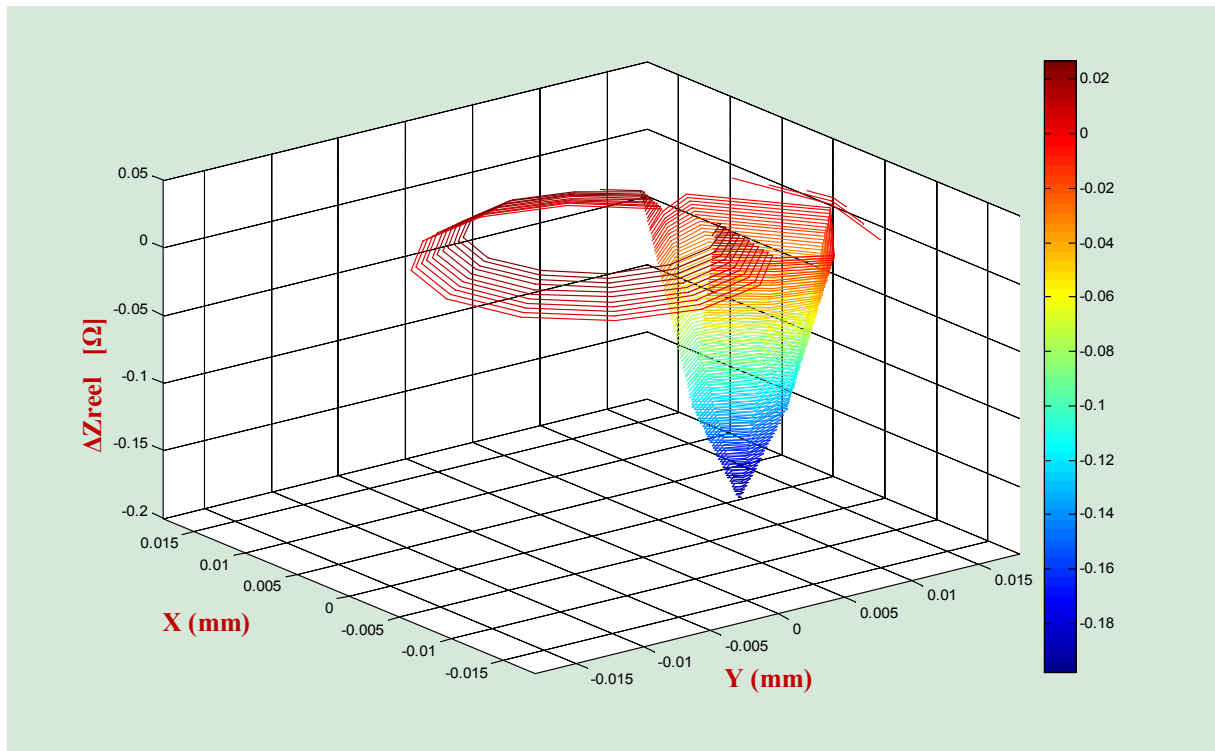


a. ΔZ_{imag} pour longueur du défaut =12.50mm (Vue en 3D).

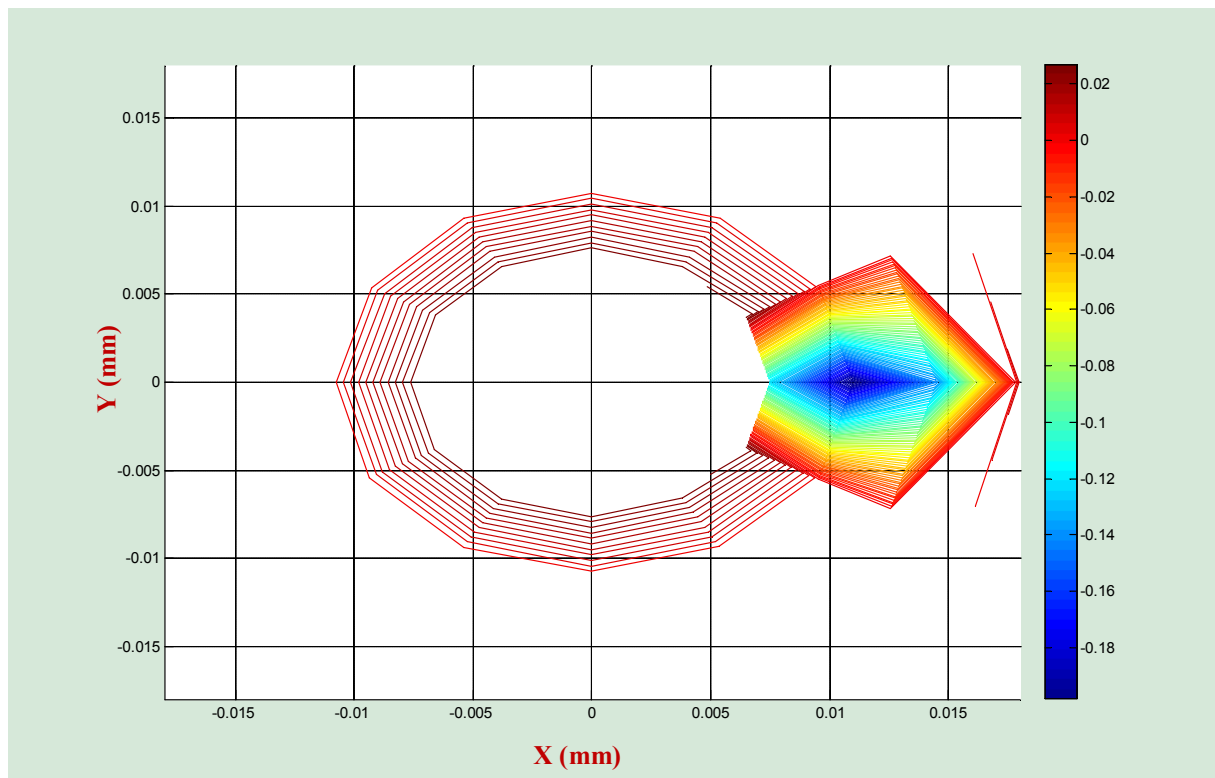


b. ΔZ_{imag} pour longueur du défaut =12.50mm (Vue de dessus).

Figure III. 32 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une longueur du défaut 12.50mm



a. ΔZ_{reel} pour longueur du défaut =12.50mm (Vue en 3D)



b. ΔZ_{reel} pour longueur du défaut =12.50mm (Vue de dessus)

Figure III. 33 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une longueur du défaut 12.50mm

Les Figures (III.28 a), (III.30 a) et (III.32 a) montrent que la variation ΔZ_{imag} est nulle autour du rivet (pas de défaut), mais cette variation est maximale au milieu du défaut, de l'ordre de 0.36Ω pour une Longueur 7.5mm , 0.42Ω pour une Longueur10.0mm et 0.5Ω pour une Longueur12.5mm .

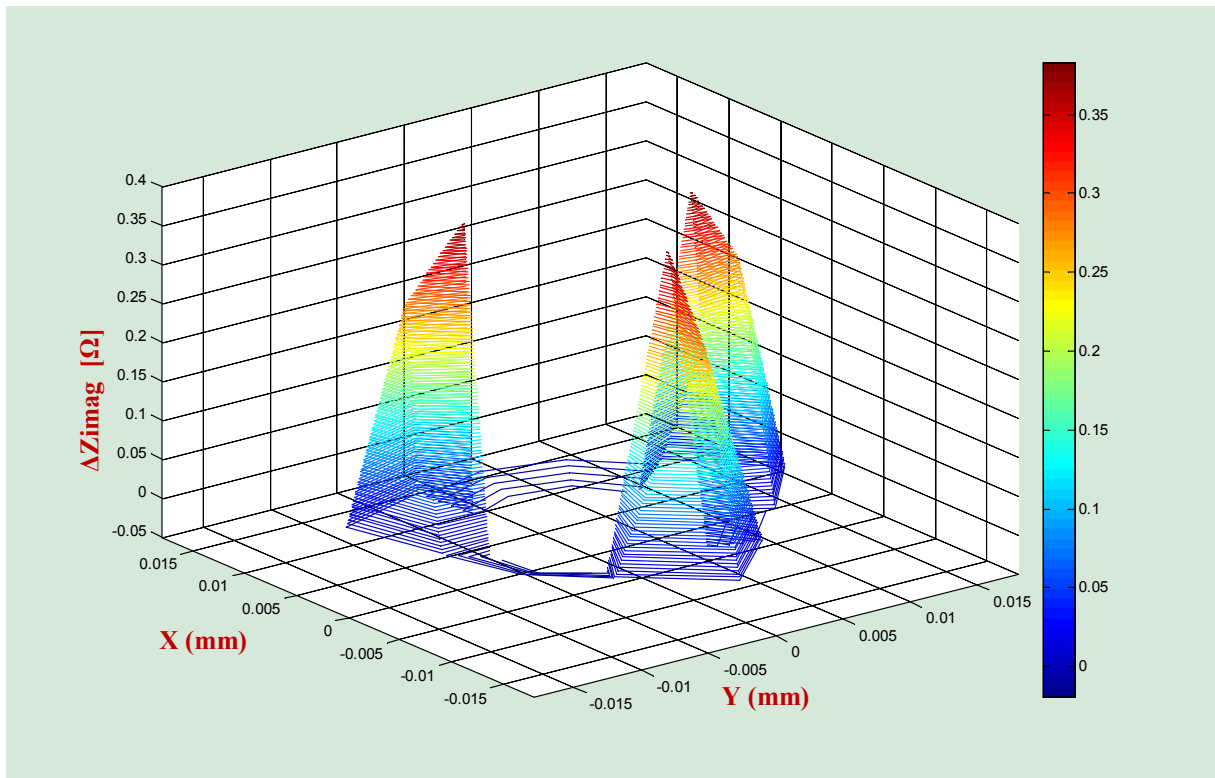
Selon les Figures (III.29a), (III.31a) et (III.33b) , la variation réelle ΔZ_r est négative au voisinage du défaut et elle est nulle tout autour du rivet, et elle a une valeur maximale de -0.1Ω au milieu du défaut pour une Longueur 7.5mm, ΔZ_r est de l'ordre de -0.16Ω pour une Longueur 10.0mm et elle est de -0.18Ω pour une Longueur12.5mm.

On peut conclure que la variation de l'impédance est proportionnelle à la Longueur du défaut, Figures (III.28 à 33).

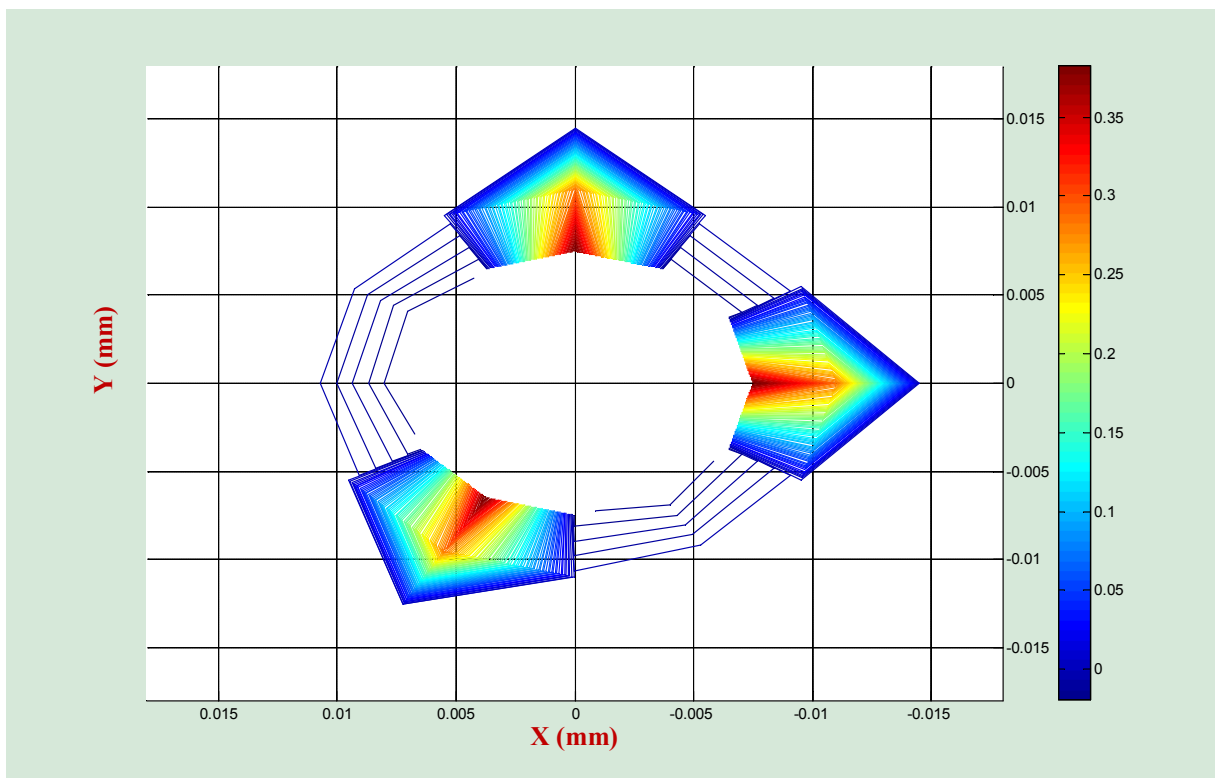
III.3.5.5. Effet de la variation de la position du défaut

➤ Positions du défaut 90° , 180° et 300°

Les Figures (III.34 et III.35) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une POSITION DEFAUT de 90° , 180° et 300°

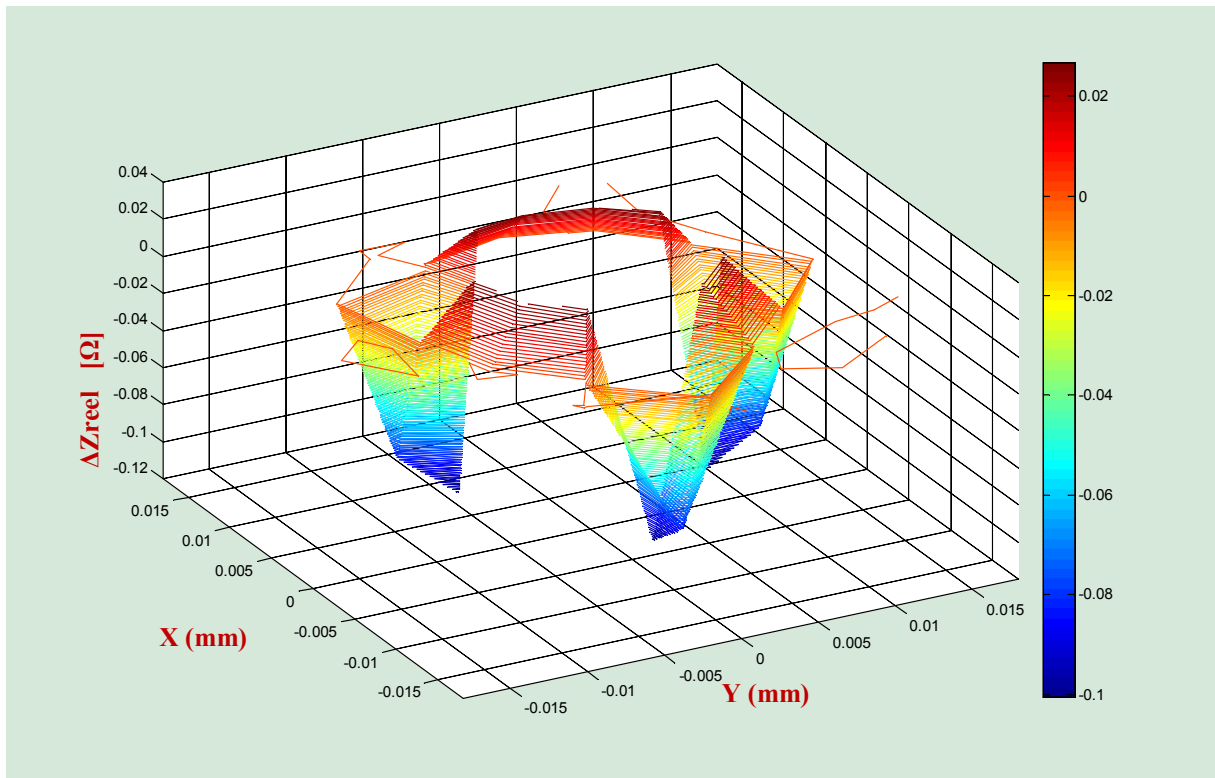


a. ΔZ_{imag} pour POSITION DEFAULT =90°,180° et 300° (Vue en 3D).

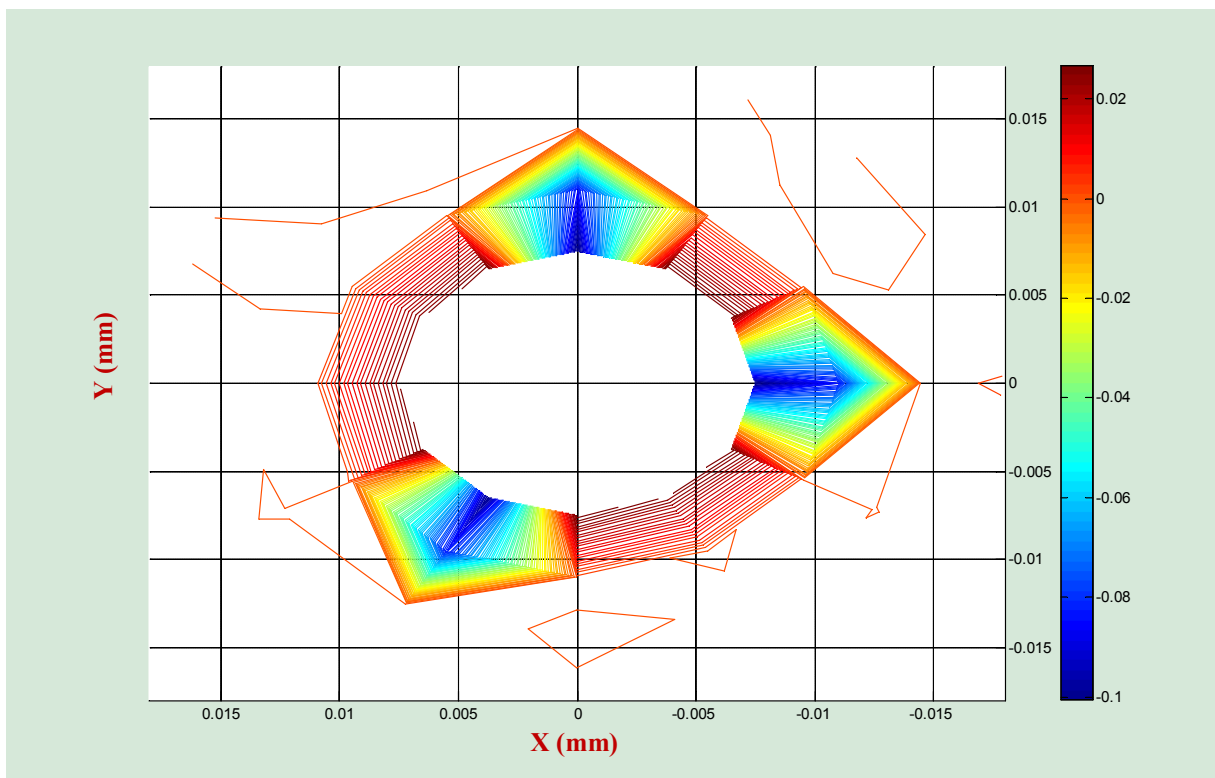


b. ΔZ_{imag} pour POSITION DEFAULT =90°,180° et 300° (Vue de dessus).

Figure III. 34 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une POSITION DEFAULT 90°,180° et 300°



a. ΔZ_r pour POSITION DEFAULT = 90° , 180° et 300° (Vue en 3D)



b. ΔZ_r pour POSITION DEFAULT = 90° , 180° et 300° (Vue de dessus)

Figure III. 35 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une POSITION DEFAULT 90° , 180° et 300°

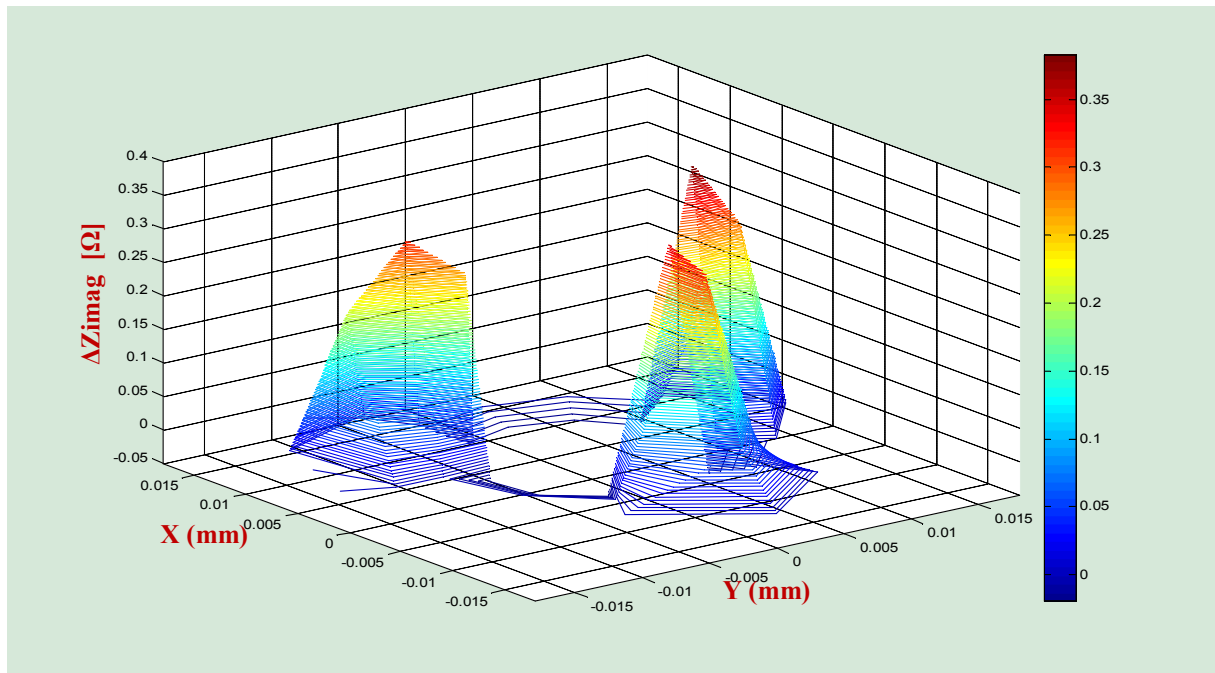
Le sommet de la variation de ΔZ_{imag} est le même pour les trois défauts, car ces derniers ont les mêmes caractéristiques géométriques (Figure (III.34 a), alors que cette variation est nulle où il n'y a pas de défauts . la variation ΔZ_{imag} est maximale au milieu des défaut, de l'ordre de plus 0.35Ω pour les trois défauts qui sont décalés de, 90° , 180° et 300° .

on se référant à la Figure (III.35b) , la variation réelle ΔZ_r elle est négative et elle a une valeur maximale de l'ordre -0.01Ω au milieu des trois défauts .

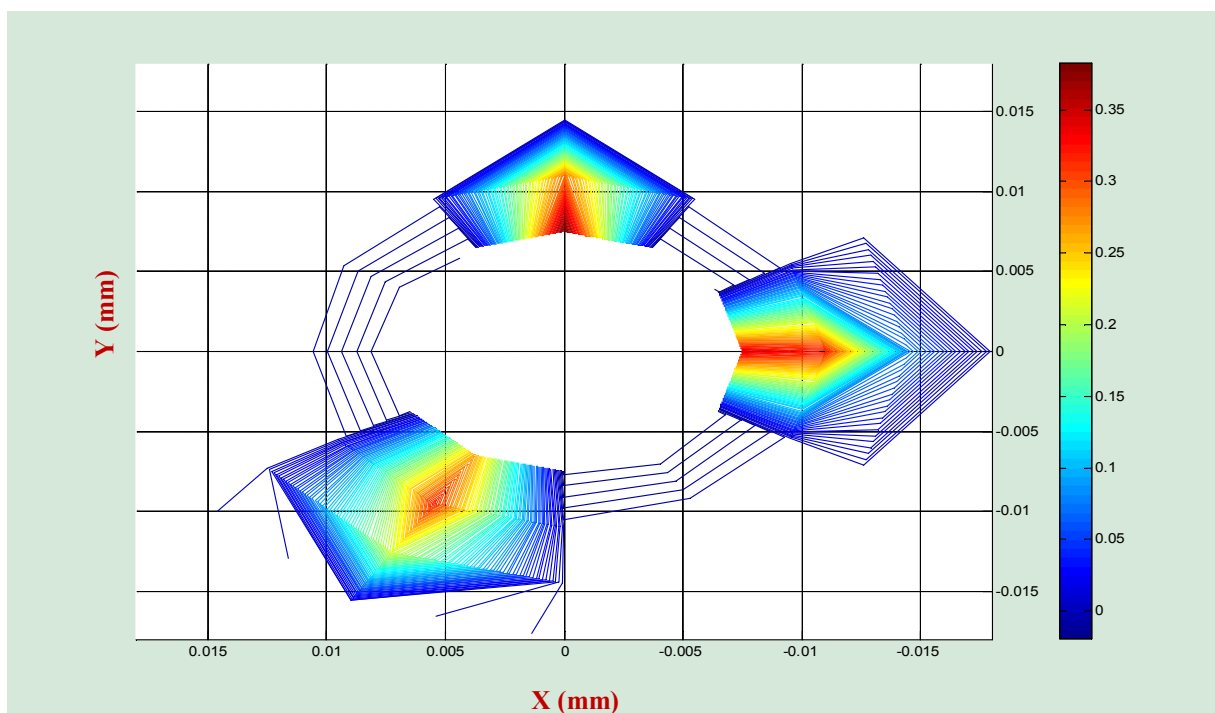
III.3.5.6. Effet de la variation de la largeur et la position du défaut

➤ Largeur et position du défaut 0.2mm (à 90°), 0.5mm (à 180°) et 1.0mm (à 300°)

Les Figures (III.36 et III.37) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une largeur et position défaut de 0.2mm (à 90°), 0.5mm (à 180°) et 1.0mm (à 300°)

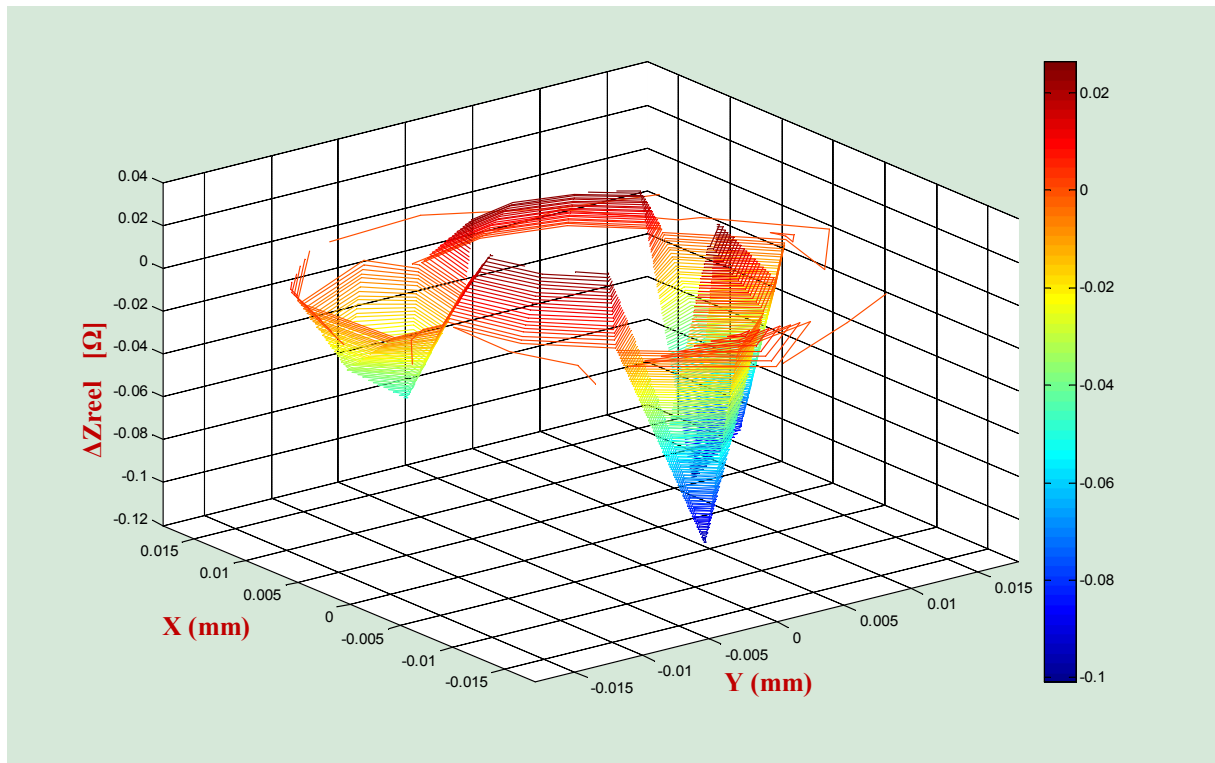


a. ΔZ_{imag} pour LARGEUR ET POSITION DEFAUT =0.2mm (à 90°), 0.5mm (à 180°) et 1.0mm (à 300°) (Vue en 3D).

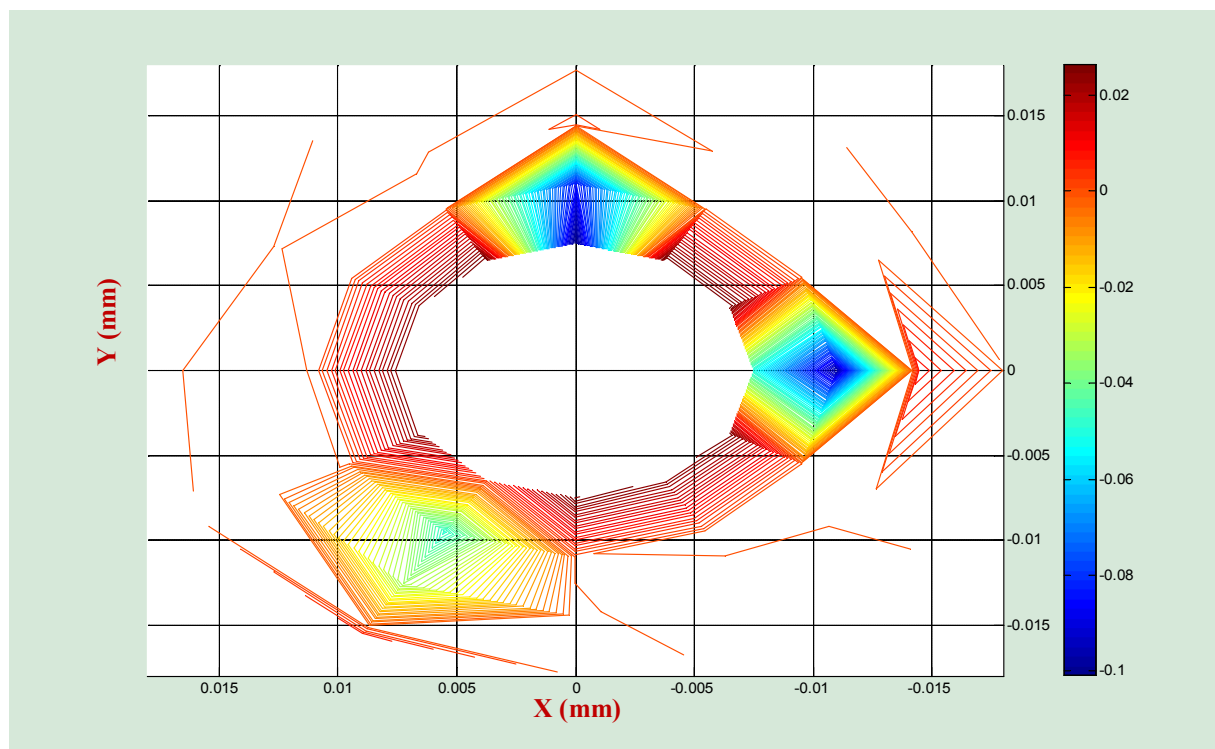


b. ΔZ_{imag} pour LARGEUR ET POSITION DEFAUT =0.2mm(90°), 0.5mm(180°) et 1.0mm(300°) (Vue de dessus).

Figure III. 36 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une LARGEUR ET POSITION DEFAUT 0.2mm(90°), 0.5mm(180°) et 1.0mm(300°)



a. ΔZ_r pour LARGEUR ET POSITION DEFAUT =0.2mm(90°) ,0.5mm(180°) et 1.0mm(300°) (Vue en 3D)



b. ΔZ_r pour LARGEUR ET POSITION DEFAUT =0.2 mm(90°),0.5mm (180°) et 1.0mm (300°) , (Vue de dessus)

Figure III. 37 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une LARGEUR ET POSITION DEFAUT 0.2mm (90°), 0.5 mm (180°) et 1.0 mm (300°)

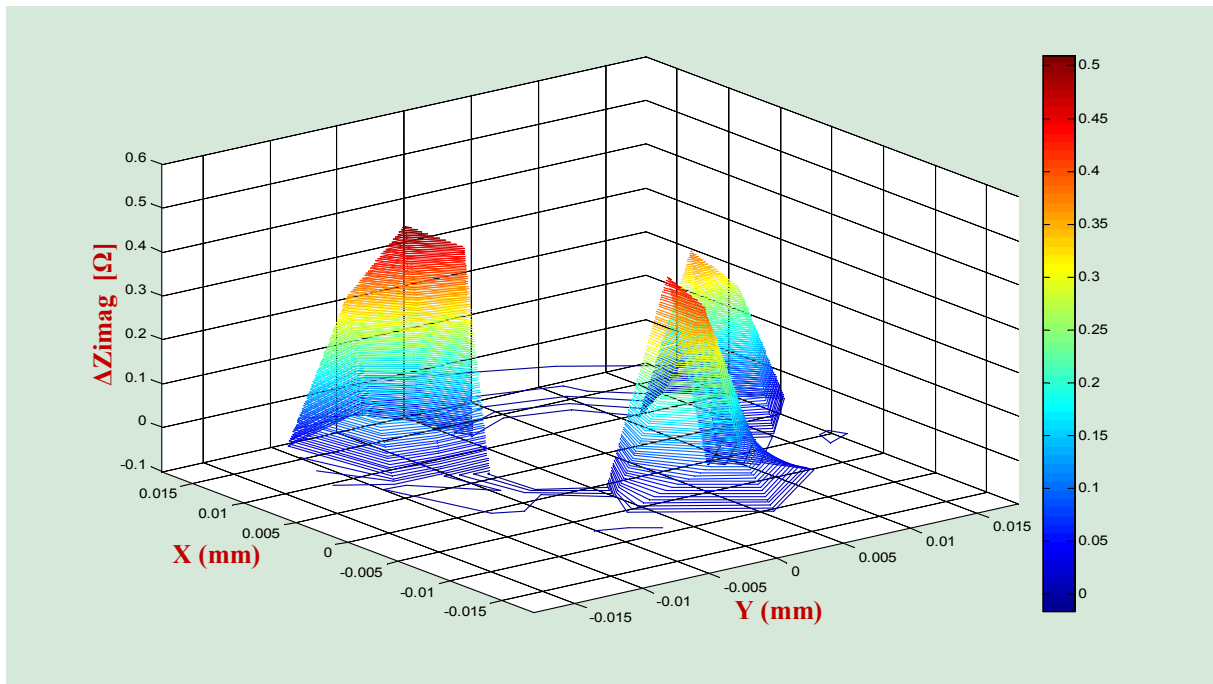
On peut constater que la variation ΔZ_{imag} est nulle autour du rivet où il n'y a pas de défauts, Figures (III. 36 a et b), le maximum de ces variations sont proportionnelles aux différentes largeurs de défauts.

Ce pendant la variation réelle de l'impédance ΔZ_r est négative, Figures (III. 337 a et b) et elle est nulle au-delà des défauts, et on constate que le minimum de ces dernières est variable selon la variation de la largeur des défauts.

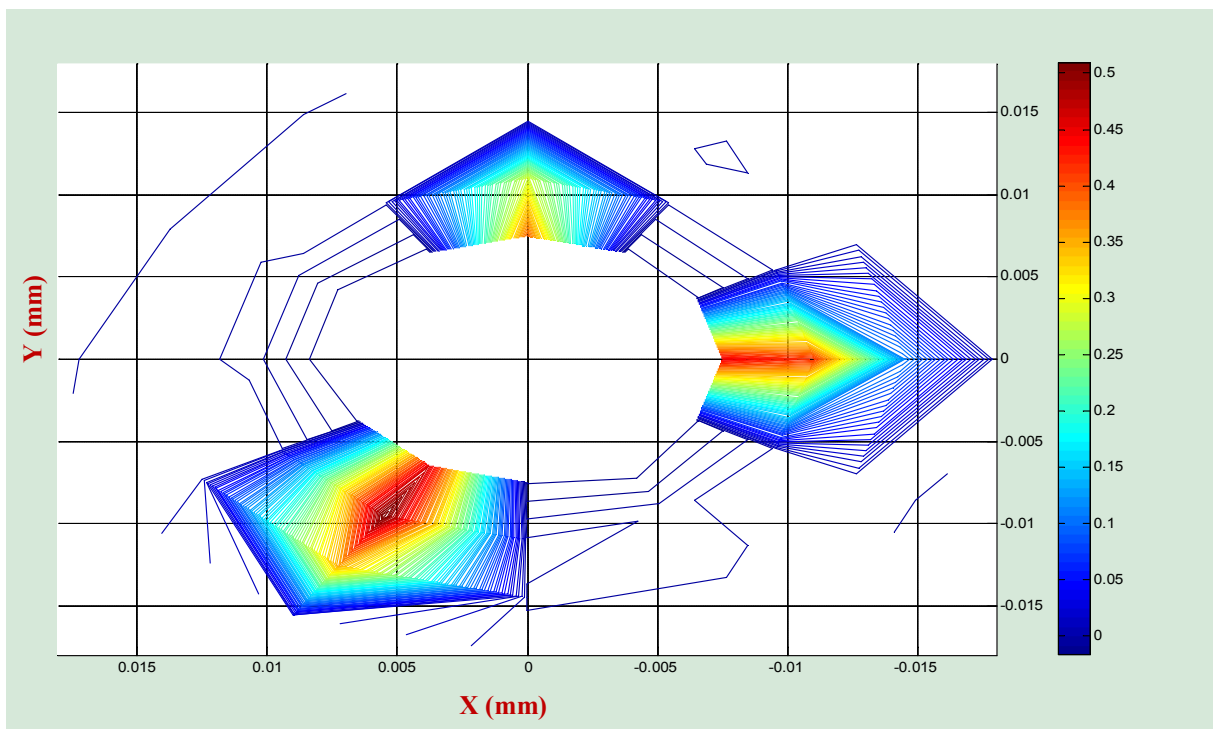
III.3.5.7. Effet de la variation de la longueur et la position du défaut

➤ Position et longueur du défaut 7.5mm (90°), 10.0mm (180°) et 12.5mm (300°).

Les Figures (III.38 et III.39) montrent les résultats de la variation de la partie imaginaire et réelle de l'impédance pour une variation de position et de longueur du défaut de 7.5mm (90°), 10.0mm (180°) et 12.5mm (300°).

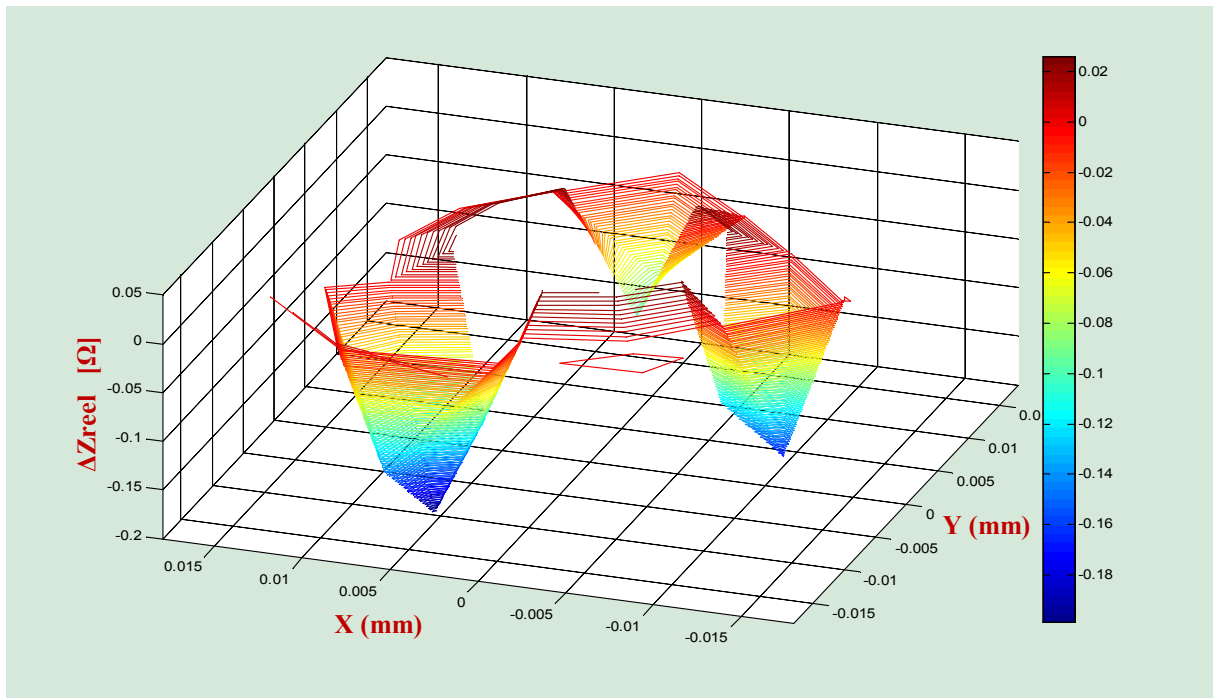


a. ΔZ_{imag} pour POSITION ET LONGUEUR DU DEFAUT =7.5mm(90°),10.0mm(180°) et 12.5mm (300°)(Vue en 3D).

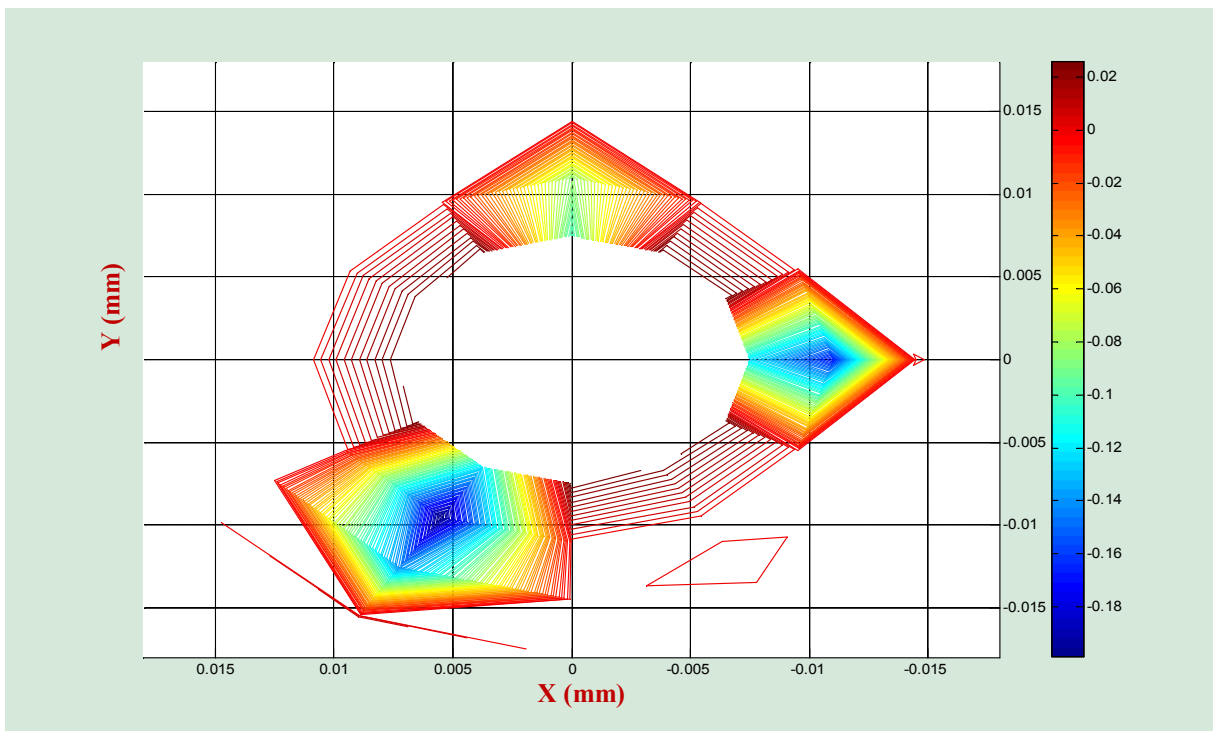


b. ΔZ_{imag} pour POSITION ET LONGUEUR DU DEFAUT =7.5mm(90°),10.0mm(180°) et 12.5mm(300°) (Vue de dessus).

Figure III. 38 Variation de la partie imaginaire de l'impédance pour une POSITION ET LONGUEUR DU DEFAUT 7.5mm(90°),10.0mm(180°) et 12.5mm(300°)



a. ΔZ_r pour POSITION ET LONGUEUR DU DEFAUT = 7.5mm(90°), 10.0mm(180°) et 12.5mm(300°) (Vue en 3D)



b. ΔZ_r pour POSITION ET LONGUEUR DU DEFAUT = 7.5mm(90°), 10.0mm(180°) et 12.5mm(300°) (Vue de dessus)

Figure III. 39 Variation de la partie réelle de l'impédance pour une POSITION ET LONGUEUR DU DEFAUT 7.5mm (90°), 10.0mm (180°) et 12.5mm (300°)

Les Figures (III. 38 et III.39) montrent que la variation Δz_{imag} et Δz_r dépend de la position et de la longueur du défaut.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des différents cas de simulation pour une structure multicouches rivetée (3 couches, avec trou et rivet).

Avant d'entamer les différentes simulations, nous avons pu valider le modèle proposé par les résultats des courants induit pour une seule bobine mais pour différentes positions par rapport au défaut réalisé à 90° du point de départ, et aussi par rapport au différentes couche de bobines (4 couches).

Puis on a pu mettre en évidence l'effet des différents paramètres influant sur la variation de l'impédance de l'imagerie par courants de Foucault en mode multiéléments multiplexé

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objectif l'étude et l'analyse des performances des systèmes de CND par CF par imagerie pour structure multicouches rivetées utilisées en aéronautique.

En premier lieu, nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif (CND), nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les ultrasonores, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie, et enfin le procédé la technique des courants de Foucault. Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients.

Quant à la deuxième partie, nous avons rappelés la modélisation du CND-CF par la méthode des éléments finis (MEF).

Pour la dernière partie, nous avons opté pour la modélisation CND-CF d'une structure multicouche rivetée utilisée en aéronautique qui est un domaine à risque , où la détection précoce peut éviter des pertes humaines et matériels. Cette modélisation n'est pas basée sur l'utilisation classique d'un seul capteur (monoélément) , mais en utilisant les techniques mettant en œuvre des capteurs multiéléments ou capteurs ECA (Eddy Current Array), permettent d'une part de balayer une superficie importance des pièces à contrôler, et d'autre part de passer du stade de la détection local à celui de la détection surfacique.

Pour éviter l'effet de mutualité entre bobine adjacentes nous avons utilisés l'alimentation multiplexée.

Les résultats obtenus par imagerie CND-CF multiéléments avec une alimentation multiplexée par la méthode des éléments finis (MEF) sous COMSOL Multiphysics, montrent que cette technique est particulièrement adaptée au renouvellement des méthodes de CND à CF classiques.

En effet, elle permet d'envisager un contrôle rapide avec une résolution spatiale excellente et ouvre des perspectives particulièrement intéressantes en termes de caractérisation des défauts de structure rencontrés.

En outre, les résultats obtenus sont très satisfaisants pour la détection et la caractérisation des défauts, nous avons pu mettre en évidence, avec des Figures en 3D du netteté très acceptable, la sensibilité de la détection en fonction des paramètres influent sur cette dernière comme, la fréquence, le lift-off et les dimensions géométrique des défauts.

Perspectives

Ce travail conduit tout naturellement à envisager un certain nombre de prolongements:

- ✓ *La réalisation d'un essai pratique;*

- ✓ *La détection de défaut surfacique des couches profondes (2 et 3) par la même technique ;*

- ✓ *Prendre en considération des défauts de forme aléatoire ;*

- ✓ *Utilisation des micro-capteurs sou bobines imprimées afin d'aboutir à la forme circulaire de l'imagerie autour du rivet.*

Références bibliographiques :

- [1] **Yohan Le Diraison**, « *Imagerie à courants de Foucault pour l'évaluation non-destructive de structures rivetées aéronautiques* », Thèse de doctorat, école normale supérieure de cachan, 2008.
- [2] **Bensalah. Oussama** , «*Contrôle non destructif par courants de Foucault,*» Mémoire de Mastère, Université de Msila, 2012.
- [3] **Khebbab, Mohamed**, «*Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND)* », Mémoire de Magistère en Électrotechnique, Université de Constantine , 2007.
- [4] **Angélique Raude, Hugo Lemieux, Michael Sirois** ; « *Courants de Foucault Multiéléments : Une alternative aux méthodes conventionnelles de contrôle non destructif de surface* », JOURNEES COFREND 2017
- [5] **Eddyfi Technologies**, « *Courants de Foucault multi-éléments (ECA)* », <https://www.eddyfi.com/fr/technologie/courants-de-foucault-multielements-eca>
- [6] **Adib, Safer Omar**, « *Etude Et Modélisation De Capteur A Courants De Foucault Pour Le Contrôle Non Destructif (CND)* », Mémoire master en génie électrique Université de M'sila , 2014.
- [7] **Isabelle Dufour, Moolraj Busawon, Denis Premel and Dominique Placko**, «*General Analysis of Inductive Sensor Based Systems.* », Journal de Physique III, Volume 4, Numéro 8, France , 1994.
- [8] **Yahya, Choua**, «*Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault,*» Thèse de doctorat, Orsay, Université Paris Sud - Paris XI, Français.2009.
- [9] **Helifa, Bachir**, « *Contribution à La Simulation du Cnd par Courants de Foucault en vue de la Caractérisation des Fissures Debouchantes.* », . Thèse de Doctorat, université de NANTES école doctorale, Nantes 2012.
- [10] **Abbassi, A., Bouchala, T., Abdou, A., & Abdelhadi, B**, « *Eddy current characterization of 3D crack by analyzing probe signal and using a fast algorithm search* », Russian Journal of Nondestructive Testing, 56(5), 426-434, (2020).
- [11] **Ala-Eddine Lakhdari** , « *Etude Et Modélisation De Capteurs En Cnd Par Courants De Foucault :Application A La Détection Des Fissures* », Mémoire de Magister, Electricité industrielle , Université de Biskra ,2011.
- [12] **Tarek, Bouchala** , « *Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. – Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite* », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Batna , 2008.
- [13] **Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala, Bachir Abdelhadi, Amor Guettafi, Azzedine Benoudjit**, « *Nondestructive Eddy Current Measurement of Coating Thickness of*

- Aeronautical Construction Materials*», Instrumentation Mesure Métrologie”. Vol. 18, No. 5, October, 2019, pp. 451-457
- [14] **Dumont-Fillon, Jacques**, «*Contrôle non destructif (CND)* », article techniques de l’ingénieur, R 1400–1, Paris, 2006.
- [15] **Yahya, Choua**, «*Application de la méthode des éléments finis*», Orsay : s.n., 2009. 9535.
- [16] **Choua, Y., L. S Antandréa, Y. Le Bihan Et C. Marchand**, « *Mesh Refinement in Eddy Current Testing With Separated T-R Probes* », IEEE Trans. Mag. 46, 2795–2798. (2010),
- [17] **A. Benhalima Et A. Saoudi**, «*Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques)*,» Mémoire de master, Université de M’sila, 2018.
- [18] **A. Abdou**, «*Contrôle non Destructif (CND) :Étude et Modélisation d’un Capteur Inductif à Courant de Foucault,*», Thèse de doctorat, Université de Batna 2 , Batna, 2018.
- [19] **N. Bowler**, «*Eddy-Current Nondestructive Evaluation,*», Springer Series in Measurement Science and Technology, 2019.
- [20] **Abdelhak Abdou, Omar adib safer, Tarik Bouchala, Abdelmalik Bendaikha, Bachir Abdelhadi, Amor guettafi, Azzedine benoudjit**, « *An Eddy Current Nondestructive Method for Crack Detection in Multilayer Riveted Structures* », Instrumentation Mesure Métrologie Vol.18, No.5, October, 2019, pp. 485-490.
- [21] **H. Meziane**, «*Etude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive,*» Mémoire de master Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2018.
- [22] **N. M. Nathan Ida**, «*Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation,*» Springer International Publishing, 2019.
- [23] **Houda, Zaidi. 2012.** «*Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples*». Thèse de Doctorat Université paris-sud école doctorale, Paris ,2012.
- [24] **Paillard, Séverine.** « *Développement D’un Modèle Pour Le Contrôle Non Destructif par Courants De Foucault De Structures Rivetées En Aéronautique* », Thèse de doctorat, Université e Paris Sud 11 France , 2008
- [27] **A Abdou, T Bouchala, N Benhadda, B Abdelhadi, A Benoudjit**, « *Influence of Conductive Pollution on Eddy Current Sensor Signals*», Journal of Nondestructive Testing , Springer, 54, 1–03, (2018).

- [28] **Anouaressadate Aouf , Tarik Bouchala , Abdelhak Abdou, Bachir Abdelhadi ,** «*Eddy Current Probe Configuration for Full Rail Top Surface Inspection*», Instrumentation Mesure Métrologie, Vol 20, No 2, pp:65-72, (2021).
- [29] **Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala, Bachir . Abdelhadi, Amor. Guettafi, Azzedine Benoudjit.** «*Real-Time Eddy Current Measurement of Aeronautical Construction Material Coating Thickness*». Instrumentation Mesure Métrologie , Vol 18, No 5, pp:451-457. (2019).