

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

FACULTE DE TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° : ELM-13



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par:

ABDELKRIM EMMAD

CHERAHRAH YUCEF

Intitulé

Contrôle Non Destructifs par Capteurs à Courants de Foucault à Champs Magnétique Tournant

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. ABDOU Abdelhak	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr. BOUCHALA Tarik	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur
Dr. SAFER Omar Adib	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Co-Rapporteur

Année universitaire : 2019/ 2020

Dédicaces & Remerciements

Dédicaces

À nos parents,

À nos frères et nous sœurs

À tous nos Amis

Remerciements

*Nous remercions **LE BON DIEU** de nous avoir donné la force pour accomplir ce travail. Nous tiens à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire.*

Nous voulons dans un premier temps remercier, nos encadreurs de mémoire

***Mr. ABDOU Abdelhak** et **Mr. SAFER Omar Adib**, pour la patience, la disponibilité et surtout les judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion,*

*Nous tenons également à adresser nos remerciements au **Dr. BELKHIRI Salah**, Maître de conférences à l'Université de M'sila pour avoir accepté de siéger et présidé le jury de notre mémoire. Nous remercions très vivement le **Dr. BOUCHALA Tarik**, Maître de conférences à l'Université de Msila pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de juger ce modeste travail.*

Nous remercions également toute l'équipe pédagogique de département génie électrique de l'université de m'sila,

Nous remercions nos parents pour leur soutien constant et leurs encouragements. Ainsi que tous nos amis et proches

Résumé

Résumé

Résumé du rapport bibliographique du projet de Mémoire de Master

L'objectif ambitionné par ce travail, est de présenter les principales méthodes de CND et en spécifique celle des courants de Foucault en utilisant un champ magnétique tournant, subséquemment donner les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par courants de Foucault (la perturbation de l'impédance de capteur), les conditions aux limites et les paramètres qui peuvent agir sur cette détection et enfin avoir un aperçu sur la technique numérique utilisée qui est la méthode des éléments finis MEF .

Mots clés : Contrôle Non Destructif (CND), Courants de Foucault, équations de Maxwell, capteur, Champ Magnétique Tournant, MEF.

Summary of the bibliographic report of the Master Thesis project

The aim of this work is to present the main NDT methods and in particular that of eddy currents using a rotating magnetic field, subsequently to give Maxwell's equations which govern the phenomenon of detection by eddy currents (the disturbance of the sensor impedance), the boundary conditions and the parameters which can act on this detection, and finally to have an overview on the numerical technique used which is the finite element method FEM.

Keywords: Non Destructive Testing (NDT), Eddy currents, Maxwell's equations, sensor, Rotating Magnetic Field, FEM.

ملخص التقرير الببليوغرافي لمشروع رسالة الماجستير

الهدف من هذا العمل هو تقديم الطرق الرئيسية للاختبارات غير التدميرية وخاصة تلك الخاصة بتيارات فوكو باستخدام مجال مغناطيسي دوار ، ومن ثم بعد ذلك إعطاء معادلات ماكسويل التي تحكم ظاهرة الكشف عن طريق تيارات فوكو (اضطراب مقاومة المستشعر) الشروط الحدودية والخصائص التي يمكن أن تؤثر على هذا حساسية المستشعر ، وأخيراً الحصول على نظرة عامة على تقنية حل المعادلات التفاضلية الجزئية وهي طريقة العناصر المحددة. FEM

الكلمات المفتاحية: الاختبار غير المدمر (NDT)، تيارات فوكو ، معادلات ماكسويل ، المستشعر ، المجال المغناطيسي الدوار ، FEM.

Tables des Matières, Figures et Tableaux

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	v
Liste des Figures.....	viii
Liste des Tableaux	x
Nomenclature.....	xi
Introduction générale.....	1
Chapitre I . Généralités sur le Contrôle Non Destructif.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Types de Défaut à détecter par le Contrôle Non Destructif.....	3
I.2.1. Principe de détection des défauts	4
I.2.2. Méthodologie d’application des méthodes CND	4
I.3. Type de méthode CND	5
I.3.1. Examen visuel	5
I.3.2. Ressuage	5
I.3.3. Méthode de test Radiographique	7
I.3.4. Tests Ultrasoniques	8
I.3.5. Test de Particules Magnétiques	10
I.4. Contrôle non destructif par Courants de Foucault	11
I.4.1. Effet de peau.....	12
I.4.2. Avantages et inconvénients de CND par Courant de Foucault	13
I.5. Comparaison des différentes méthodes CND	14
I.6. Conclusion	16
Chapitre II . Capteurs et Modélisation pour le CND par Courant de Foucault.....	17
II.1. Introduction.....	17
II.2. Principe des capteurs inductifs	17
II.3. Principes et caractéristiques de base des sondes à courants de Foucault.....	18
II.3.1. Sondes à double fonction.....	18
II.3.2. Sondes à fonction séparées	19
II.3.3. Mesure absolue et différentielle	19
II.3.4. Types de sonde	20

II.3.5. Modes d'excitation	22
II.3.6. Plan d'impédance normalisée.....	23
II.3.7. Intérêt de la modélisation	24
II.3.8. Modélisation mathématique du système	24
II.3.9. Méthode des éléments finis	31
II.4. Conclusion	34
Chapitre III . Simulation d'un Système de CND- CF par Champ Tournant.....	35
III.1. Introduction	35
III.2. Déroulement de Simulation sous COMSOL Multiphysics	36
III.3. Calcul de l'impédance de capteur	36
III.4. Résultats des simulations	37
III.4.1. Validation du modèle alésage sur plaque conductrice.....	37
III.4.2. Simulation du comportement du système alésage sur plaque conductrice	42
III.4.3. Simulation du comportement du système tube conducteur	49
III.5. Conclusion:.....	61
Conclusion générale	35
Bibliographie	Error! Bookmark not defined.

Liste des Figures

Figure I-1	Processus de détection et traitement des défauts	4
Figure I-2	Examen visuel.	5
Figure I-3	Principe de détection par Ressuage	7
Figure I-4	Principe de contrôle non destructif par Radiographie	8
Figure I-5	Principe de contrôle non destructif par L'Ultrason	9
Figure I-6	Principe de détection par Test de Particule Magnétiques.....	11
Figure I-7	Distribution des courants de Foucault	13
Figure I-8	Décroissance exponentielle des courants de Foucault à partir de la surface.....	13
Figure I-9	Principe de CND par courant de Foucault.....	14
Figure II-1	Capteur Magnétique ou CM.....	18
Figure II-2	Capteur a courant de Foucault ou CCF	18
Figure II-3	Sonde a double fonction.....	19
Figure II-4	Sonde a fonction séparée.....	19
Figure II-5	Sonde Interne	20
Figure II-6	Sonde Encerclant.....	21
Figure II-7	Sonde Surfaccique	21
Figure II-8	Plan d'impédance (a) Non-normalisé ; (b) Plan d'impédance normalisé.	24
Figure II-9	Equation de magnétodynamique dans des différentes régions	30
Figure II-10	Organigramme de calcul par élément finis.	33
Figure III. 1	Vue de domaine d'étude.	37
Figure III. 2	Vue 3D de la plaque, défaut (fissure) et les trois capteurs.....	37
Figure III. 3	Maillage de domaine.	39
Figure III. 4	Maillage des domine de la plaque et les capteurs.	39
Figure III. 5	Maillage de la région du défaut.....	39
Figure III. 6	Système triphasé équilibré des courants d'alimentation I1, I2 et I3.	40
Figure III. 7	Système triphasé équilibré des tensions mesurées V1, V2 et V3.	41
Figure III. 8	Position du défaut en face de bobine 1.....	41
Figure III. 9	Variation de la tension V1 (défaut en face de bobine 1).....	42
Figure III. 10	Courants induits sur contour et volume – cas sans défaut-	43
Figure III. 11	Courants induits sur contour et volume – cas alésage avec défaut-.....	43
Figure III. 12	Variation de la réactance de la bobine 1	44
Figure III. 13	Variation de la résistance de la bobine 1.....	44
Figure III. 14	Positions angulaires du défaut	45
Figure III. 15	Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 1.	45
Figure III. 16	Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 1.	46
Figure III. 17	Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 2.	46
Figure III. 18	Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 2.	46
Figure III. 19	Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 2.	47
Figure III. 20	Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 3.	47
Figure III. 21	Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 3.	47
Figure III. 22	Variation de la réactance des trois bobines pour même défaut à 180°par rapport à bobine 1.	48

Figure III. 23 Variation de la résistance des trois bobines pour même défaut à 180° par rapport à bobine 1	48
Figure III. 24 Vue de domaine d'étude.....	49
Figure III. 25 Vue de tube en aluminium, les bobines, le défaut.....	49
Figure III. 26 maillage de domaine d'étude	51
Figure III. 27 maillage des domaines de tube, bobines , défaut	51
Figure III. 28 maillage de domaine de défaut.....	52
Figure III. 29 Système triphasé équilibré des courants d'alimentation I1, I2 et I3.	53
Figure III. 30 Système triphasé équilibré des tensions mesurées V1, V2 et V3.	53
Figure III. 31 Vue de position de défaut en face de bobine 01	54
Figure III. 32 Comparaison de la tension V1, V2, V3 (défaut en face de bobine 1).....	54
Figure III. 33 Courant induits sur contour et sur volume – cas sans défaut	55
Figure III. 34 Courants induits sur contour et sur volume – cas avec défaut	55
Figure III. 35 les positions angulaires de défaut autour de tube.....	56
Figure III. 36 variation de la partie réelle $\Delta R(\text{Ohm})$ des impédances des bobines 1,2 et3 en fonction de position angulaire de défaut.....	57
Figure III. 37 variation de variation de la partie imaginaire $\Delta X(\text{Ohm})$ des impédances des bobines 1,2 et 3 en fonction de position angulaire de défaut	57
Figure III. 38 les positions angulaires de défaut.....	58
Figure III. 39 Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 1.	58
Figure III. 40 Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 1.	59
Figure III. 41 Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 2.	59
Figure III. 42 Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 2.	60
Figure III. 43 Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 3.	60
Figure III. 44 Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 3.	61

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 Comparaison différentes méthodes CND.....	15
Tableau III-1 Caractéristique de dispositif	38
Tableau III-2 Caractéristique de dispositif	50

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.
CM	Capteur Magnétique.
MEF	Méthode des Eléments Finis.
MCC	Méthode des Circuits Couplés.
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	$4\pi 10^{-7}$ (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

On désigne par contrôle non destructif (CND) l'ensemble des procédés permettant de caractériser l'intégrité de structures ou de matériaux sans les altérer. Le recours à ces procédés intervient à différentes étapes de la vie d'un produit, que ce soit au cours de sa fabrication, de son utilisation ou dans le cadre d'opérations de maintenance, le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut toujours être effectué à trois stades différents de son cycle de vie, en cours de fabrication, en recette et en service. [1]

Toute rupture d'un équipement en fonctionnement, due à une fissure, est un accident qui peut avoir des répercussions graves. Le degré de gravité de ces accidents peut varier, de la dégradation du matériel suivi d'une mise hors service des machines ou des installations temporaire ou définitive et par conséquent des pertes financières d'une part, et d'autre ce degré de gravité peut être plus grave car il peut engendrer en plus des accidents des pertes humaines principalement dans les secteurs à haut risque comme le nucléaire ou l'aéronautique. La possibilité des accidents dus aux fissures non détectés au préalable font que le recours aux techniques de CND est plus que nécessaire.

Dans l'industrie, les techniques de contrôle non destructif (CND) sont passées de la maintenance préventive à la caractérisation des matériaux d'une part, et au contrôle de qualité des produits fournis aux consommateurs d'autre part, car "la qualité" est devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle de plus en plus exigeante. Tout ceci justifie l'intérêt des recherches intensives menées en contrôle non destructif. [2]

Comme une grande partie des équipements industriels sont composés de matériaux conducteurs électriquement, l'utilisation du CND par courants de Foucault (CND-CF) est une étape nécessaire pour la détection des défauts.

De plus, les performances du CND-CF dépendent la qualité de la conception des capteurs et qu'ils doivent refléter avec précision la variation de l'impédance "capteur-pièce" par un signal électrique. La méthode classique d'inspection est de procéder à un déplacement des capteurs, généralement plus longue en terme de temps de contrôle et perturbation du signal électrique à cause du déplacement mécanique. Pour résoudre ce problème nous proposons une étude sans déplacement des capteurs lors d'un contrôle d'alésage ou de tubes par l'utilisation d'un système de trois bobines identiques décalées dans l'espace l'une de l'autre d'un angle 120° et chacune est alimentées par un système de courants sinusoïdaux triphasés équilibrés de même module et déphasés dans le temps de $\pi/3$ les unes des autres, ceci se traduit par la création d'un champ tournant.

C'est dans ce cadre s'inscrit la problématique de ce travail, par une modélisation et simulation au moyen du logiciel COMSOL Multiphysics.

Ce mémoire comportera trois chapitres structurés comme suit:

- *Le premier chapitre sera dévoué à une recherche bibliographique concernant les techniques du CND ainsi que leurs avantages, inconvénients et leurs domaines d'application. On terminera cette partie par un Tableau récapitulatif sur les différentes techniques et leurs applications.*
- *Au deuxième chapitre, la partie sera dédiée au capteur inductif, les paramètres qui influent sur le contrôle, la mise en œuvre, c'est-à-dire aux différents types de sondes, leurs branchements électriques et leurs modes de contrôle, par contre la deuxième partie sera consacrée aux rappels des principales lois qui gouvernent chaque phénomène électromagnétique (équation de Maxwell) pour formuler les équations en régime de la magnétodynamique, ces équations sont des équations différentielles aux dérivées partielles dont la solution dépend entièrement des conditions aux limites.*
- *Quant au troisième chapitre, on présentera les dispositifs à étudier, plaque avec alésage pour une inspection interne et tube pour une inspection externe, ainsi que les caractéristiques géométriques et physiques. pour clôturer ce chapitre nous présentons les résultats de simulation avec les interprétations appropriées.*
- *Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués*

Chapitre I :

Généralité sur les Techniques de CND

Chapitre I . Généralités sur le Contrôle Non Destructif

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] [3]

I.2. Types de Défaut à détecter par le Contrôle Non Destructif

Différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe,...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service).

Les défauts recherchés peuvent être classés en deux grandes catégories : les défauts surfaciques et les défauts internes.

- Les défauts surfaciques sont les plus problématiques sur le plan technologique. Ils incluent les criques, les fissures, les piqures, les craquelures pouvant provoquer à terme la rupture de la pièce, ou d'aspect, c'est-à-dire la variation de paramètres géométriques et/ou physiques de la pièce tels que sa rugosité, son épaisseur, l'homogénéité de la surface, qui rendent la pièce inutilisable.

- Les défauts internes sont des hétérogénéités de nature, forme et dimensions variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Ils sont susceptibles d'affecter la santé de la pièce et peuvent se présenter sous la forme d'une crique interne, des porosités, des soufflures, d'inclusions diverses. [3]

I.2.1. Principe de détection des défauts

Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. On exploite donc un phénomène physique pour détecter une hétérogénéité dans un matériau. Les phénomènes physiques comme l'atténuation des ultrasons, perturbations du courant de Foucault peut servir à caractériser matériaux,

Le contrôle non destructifs ne s'agit pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'une contrôle d'homogénéité. [4].

I.2.2. Méthodologie d'application des méthodes CND

Les méthodes développées se différencient essentiellement par le type d'onde utilisé pour sonder le matériau, par exemple les méthodes ultrasonores, les courants de Foucault, les rayons X ou la thermographie infrarouge. Quelle que soit la méthode, les objectifs sont les mêmes : la fiabilité de l'examen, la reproductibilité, localisation des défauts, leur caractérisation et classement. Voir fig-1.0

Les étapes d'un contrôle sont les suivantes :

- mise en œuvre d'un processus physique énergétique,
- modulation ou atténuation de ce processus par les défauts,
- détection de ces modifications par un capteur approprié,
- Traitement des signaux et interprétation des résultats. [3]

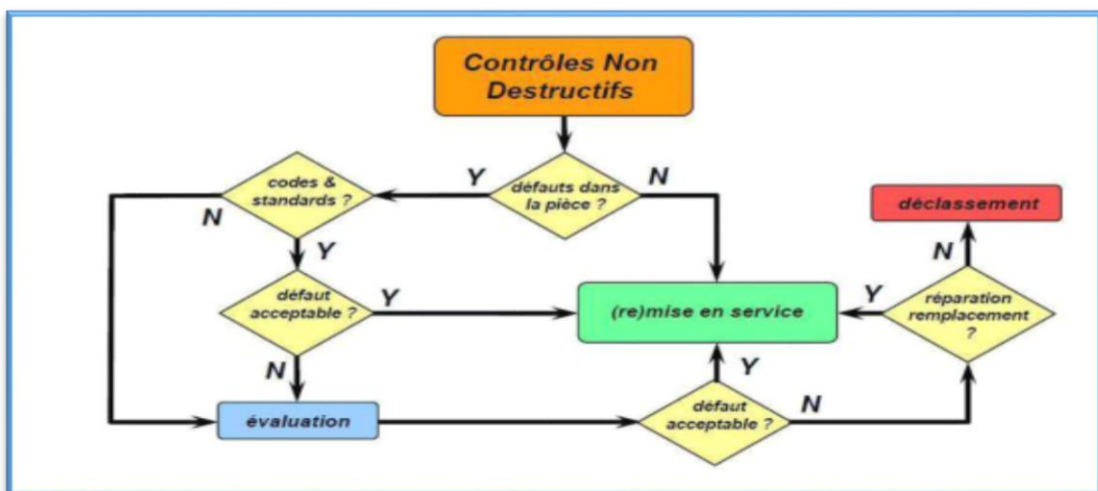


Figure I-1 Processus de détection et traitement des défauts

I.3. Type de méthode CND

I.3.1. Examen visuel

L'Examen visuelle est l'un des moyens les plus courants et les plus puissants de contrôle non destructif. Les tests visuels nécessitent un éclairage adéquat de la surface de test et une bonne vision du testeur. Cependant, pour être plus efficace, l'inspection visuelle mérite une attention particulière car elle nécessite une formation et dispose de sa propre gamme d'équipements et d'instruments

Souvent, l'équipement nécessaire est une simple lampe portative, un miroir sur tige, une lentille à main 2 × ou 4 ×, une loupe éclairée avec un grossissement 5 × ou 10x. Pour l'inspection interne, des systèmes de lentilles légères tels que des endoscopes permettent d'examiner des surfaces éloignées. Des dispositifs plus sophistiqués de cette nature utilisant des fibres optiques permettent l'introduction du dispositif dans de très petits trous et canaux d'accès.

La plupart de ces systèmes prévoient la fixation d'une caméra pour permettre un enregistrement permanent.

Les procédures d'Examen visuel comprennent:

- Vérification de l'état de surface de l'éprouvette.
- Vérification de l'alignement des surfaces de contact.
- Vérification de la forme du composant.
- Vérification des signes de fuite.
- Vérification des défauts latéraux inter



Figure I-2 Examen visuel.

I.3.2. Ressuage

Il s'agit d'une méthode qui peut être utilisée pour la détection de discontinuités ouvertes à la surface dans tout produit industriel qui est fabriqué à partir d'un matériau non poreux. Cette méthode est largement utilisée pour tester les matériaux non magnétiques.

Dans ce procédé, un pénétrant liquide est appliqué à la surface du produit pendant un certain temps prédéterminé, après quoi l'excès de pénétrant est retiré de la surface. La surface est ensuite séchée et un révélateur y est appliqué. Le pénétrant qui reste dans la discontinuité est absorbé par le révélateur pour indiquer la présence ainsi que l'emplacement, la taille et la nature de la discontinuité.

Les pénétrants utilisés sont soit un pénétrant de colorant visible, soit un pénétrant de colorant fluorescent. L'inspection de la présence d'indications de colorant visibles est effectuée sous une lumière blanche tandis que l'inspection de la présence d'indications par un pénétrant de colorant fluorescent est effectuée sous une lumière ultraviolette (ou noire) dans des conditions sombres. Les processus de pénétration de liquide sont en outre subdivisés selon la méthode de lavage de l'échantillon. Les pénétrants peuvent être: (i) lavables à l'eau, (ii) post-émulsionnables, c'est-à-dire qu'un émulsifiant est ajouté à l'excès de pénétrant sur la surface de l'échantillon pour le rendre lavable à l'eau, et (iii) dissolvant au solvant, c'est-à-dire l'excès le pénétrant doit être dissous dans un solvant pour le retirer de la surface de l'éprouvette.

Par ordre décroissant de sensibilité et de coût, les processus de pénétration des liquides peuvent être classés comme:

1. Colorant fluorescent post-émulsionnable.
2. Pénétrant fluorescent amovible au solvant.
3. Pénétrant fluorescent lavable à l'eau.
4. Colorant visible post-émulsionnable.
5. Pénétrant de colorant visible amovible au solvant.
6. Colorant visible lavable à l'eau.

Certains des avantages des tests de ressuage sont les suivants:

- Coût relativement faible.
- Méthode CND hautement portable.
- Très sensible aux discontinuités fines et serrées.
- Méthode assez simple.
- Peut être utilisé sur une variété de matériaux.
- Toutes les discontinuités de surface sont détectées en une seule opération, quelle que soit l'orientation.

Certaines des limites des tests de ressuage sont les suivantes:

- La surface d'essai doit être exempte de tout contaminant (saleté, huile, graisse, peinture, rouille, etc.).
- Détecte uniquement les discontinuités de surface.
- Ne peut pas être utilisé sur des échantillons poreux et est difficile à utiliser sur des surfaces très rugueuses.
- L'enlèvement de tous les matériaux pénétrants, après le test, est souvent nécessaire.
- Il n'y a pas de méthode simple pour produire un enregistrement permanent

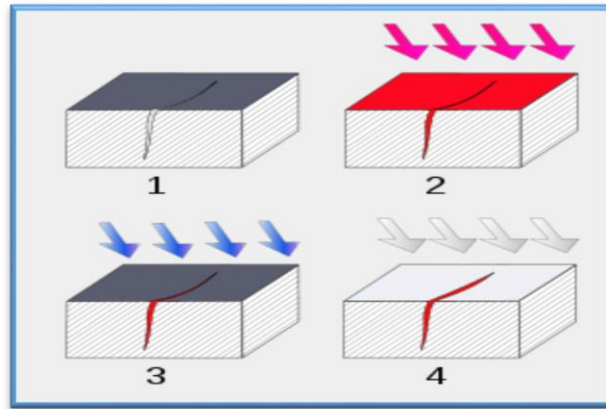


Figure I-3 Principe de détection par Ressuage

I.3.3. Méthode de test Radiographique

La méthode de test radiographique est utilisée pour la détection des défauts internes dans de nombreux matériaux et configurations différents. Un film radiographique approprié est placé derrière l'éprouvette et est exposé en y faisant passer des rayons X ou des rayons gamma (radio-isotopes Co-60 et Ir-192). L'intensité des rayons X ou des rayons gamma en traversant le produit est modifiée en fonction de la structure interne de l'échantillon et donc le film exposé, après traitement, révèle l'image de l'ombre, connue sous le nom de radiographie, du produit. Il est ensuite interprété pour obtenir des données sur les défauts présents dans l'échantillon. Cette méthode est utilisée sur une grande variété de produits tels que les pièces forgées, les pièces moulées et les soudures. [1].

Certains des avantages des tests radiographiques comprennent:

- Il peut être utilisé pour inspecter de grandes surfaces à la fois.
- Il est utile sur une grande variété de matériaux.
- Il peut être utilisé pour vérifier la structure interne, le mauvais montage ou le désalignement.
- Il fournit un enregistrement permanent.
- Aucun étalonnage nécessaire sur le chantier.
- Des dispositifs pour vérifier la qualité de la radiographie sont disponibles.
- L'interprétation des radiographies peut se faire dans des conditions confortables.

Certaines des limites de cette méthode sont:

- Les rayons X et les rayons gamma sont dangereux pour la santé humaine.
- Il ne peut pas détecter facilement les défauts plans.
- L'accès aux deux côtés de l'échantillon est requis.
- La plage d'épaisseur pouvant être inspectée est limitée.
- Certaines zones de nombreux éléments ne peuvent pas être radiographiées en raison de considérations géométriques.
- La sensibilité de l'inspection diminue avec l'épaisseur de l'éprouvette.

- C'est plus cher.
- Il ne peut pas être facilement automatisé.
- Cela nécessite une compétence considérable pour l'interprétation des radiographies.
- Profondeur de discontinuité non indiqué

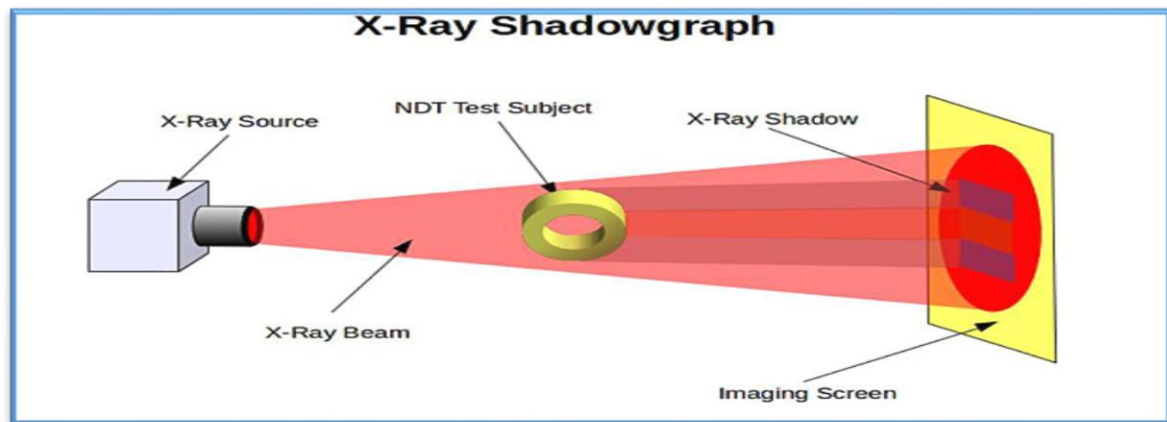


Figure I-4 Principe de contrôle non destructif par Radiographie

I.3.4. Tests Ultrasoniques

L'inspection par ultrasons est une méthode non destructive par laquelle des ondes sonores à haute fréquence sont introduites dans le matériau inspecté. La plupart des inspections ultrasoniques sont effectuées à des fréquences comprises entre 0,5 et 20 MHz, au-dessus de la plage de l'audition humaine qui est d'environ 20 Hz à 20 kHz.

Les ondes sonores traversent le matériau avec une certaine perte d'énergie (atténuation) en raison des caractéristiques du matériau. L'intensité des ondes sonores est soit mesurée, après réflexion (écho d'impulsion) aux interfaces (ou défaut), soit mesurée à la surface opposée de l'échantillon (transmission d'impulsion). Le faisceau réfléchi est détecté et analysé pour définir la présence et l'emplacement des défauts. Le degré de réflexion dépend en grande partie de l'état physique de la matière du côté opposé de l'interface et, dans une moindre mesure, des propriétés physiques spécifiques de cette matière, par exemple, les ondes sonores sont presque entièrement réfléchies aux interfaces métal-gaz. Une réflexion partielle se produit aux interfaces métal-liquide ou métal-solide.

Les tests par ultrasons ont un pouvoir de pénétration supérieur à la radiographie et peuvent détecter des défauts profondément dans l'éprouvette (disons jusqu'à environ 6 à 7 mètres d'acier). Il est assez sensible aux petits défauts et permet de déterminer avec précision l'emplacement et la taille des défauts. [1]

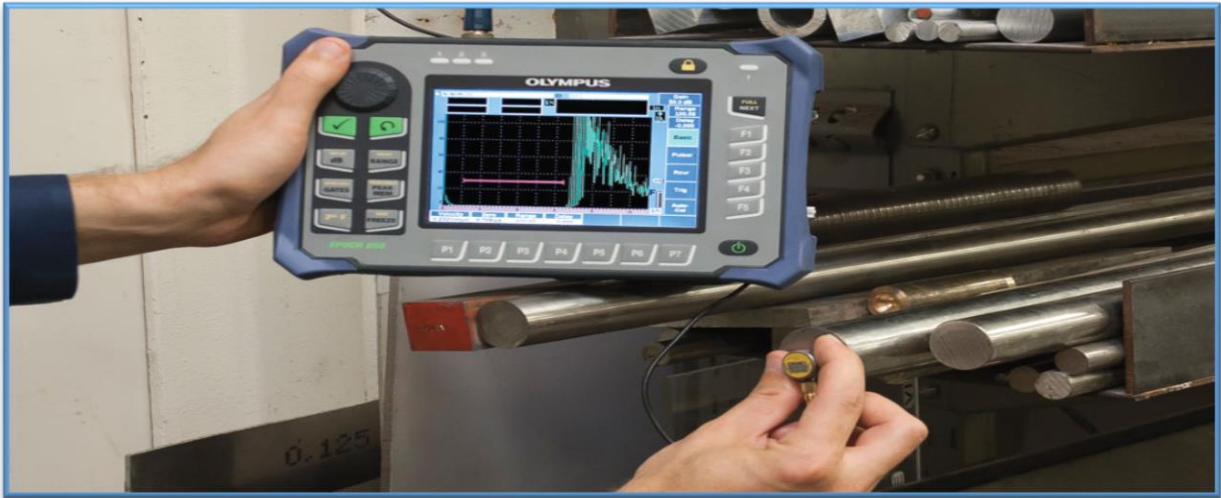


Figure I-5 Principe de contrôle non destructif par L'Ultrason

La méthode de test par ultrasons est:

- Surtout utilisé pour la détection de défauts dans les matériaux.
- Largement utilisé pour la mesure d'épaisseur.
- Utilisé pour la détermination des propriétés mécaniques et de la structure des grains des matériaux.
- Utilisé pour l'évaluation des variables de traitement sur les matériaux

Certains des avantages des tests ultrasoniques sont:

- Il a une sensibilité élevée qui permet la détection de minuscules défauts.
- Il possède un pouvoir pénétrant élevé (de l'ordre de 6 à 7 mètres en acier) qui permet l'examen de profilés extrêmement épais.
- Il a une grande précision de mesure de la position et de la taille des défauts.
- Il a une réponse rapide qui permet une inspection rapide et automatique.
- Il n'a besoin d'accéder qu'à une seule surface de l'échantillon.

Certaines des limites de cette méthode sont:

- Une géométrie défavorable de l'éprouvette pose des problèmes lors de l'inspection.
- L'inspection des matériaux ayant une structure interne indésirable est difficile.
- Il nécessite l'utilisation d'un couplant.

- La sonde doit être correctement couplée pendant le balayage.
- L'orientation des défauts affecte la détectabilité des défauts.
- L'équipement est assez cher.
- Une main-d'œuvre hautement qualifiée est requise.
- Étalons de référence et étalonnage requis.
- Les surfaces rugueuses peuvent être un problème et une préparation de surface est nécessaire.

I.3.5. Test de Particules Magnétiques

Le test des particules magnétiques est utilisé pour tester les matériaux qui peuvent être facilement magnétisés. Cette méthode est capable de détecter les défauts ouverts à la surface et juste en dessous de la surface.

Dans cette méthode, l'échantillon d'essai est d'abord magnétisé soit en utilisant un électro-aimant permanent ou en faisant passer un courant électrique à travers ou autour de l'échantillon. Le champ magnétique ainsi introduit dans l'échantillon est composé de lignes de force magnétiques.

Chaque fois qu'il y a un défaut qui interrompt le flux des lignes de force magnétiques, certaines de ces lignes doivent sortir et rentrer dans l'échantillon. Ces points de sortie et de rentrée forment des pôles magnétiques opposés. Chaque fois que de minuscules particules magnétiques sont saupoudrées sur la surface de l'échantillon, ces particules sont attirées par ces pôles magnétiques pour créer une indication visuelle se rapprochant de la taille et de la forme du défaut. [1].

Selon l'application, différentes techniques de magnétisation sont utilisées dans les tests de particules magnétiques. Ces techniques peuvent être regroupées dans les deux catégories suivantes:

- Techniques à courant continu: ce sont les techniques dans lesquelles le courant circule à travers l'éprouvette et le champ magnétique produit par ce flux de courant est utilisé pour la détection des défauts.
- Techniques de flux magnétique: Dans ces techniques, le flux magnétique est induit dans l'échantillon soit par l'utilisation d'un aimant permanent, soit par la circulation d'un courant à travers une bobine ou un conducteur

Les avantages du Test des Particules Magnétiques sont les suivants:

- Il ne nécessite pas d'opération de pré-nettoyage très rigoureuse.

- Meilleure méthode pour la détection de fissures de surface fines et peu profondes dans un matériau ferromagnétique.
- Méthode CND rapide et relativement simple.
- Généralement bon marché.
- Fonctionnera à travers un revêtement mince.
- Peu de limitations concernant la taille / forme des éprouvettes.
- Méthode CND hautement portable.
- C'est plus rapide.

Certaines des limites du test des particules magnétiques sont les suivantes:

- Le matériau doit être ferromagnétique.
- L'orientation et la force du champ magnétique sont essentielles.
- Détecte les discontinuités de surface et près de la surface uniquement.
- De grands courants sont parfois nécessaires.
- possibilité de brûlure les pièces à tester.
- Les pièces doivent souvent être démagnétisées, ce qui peut être difficile.

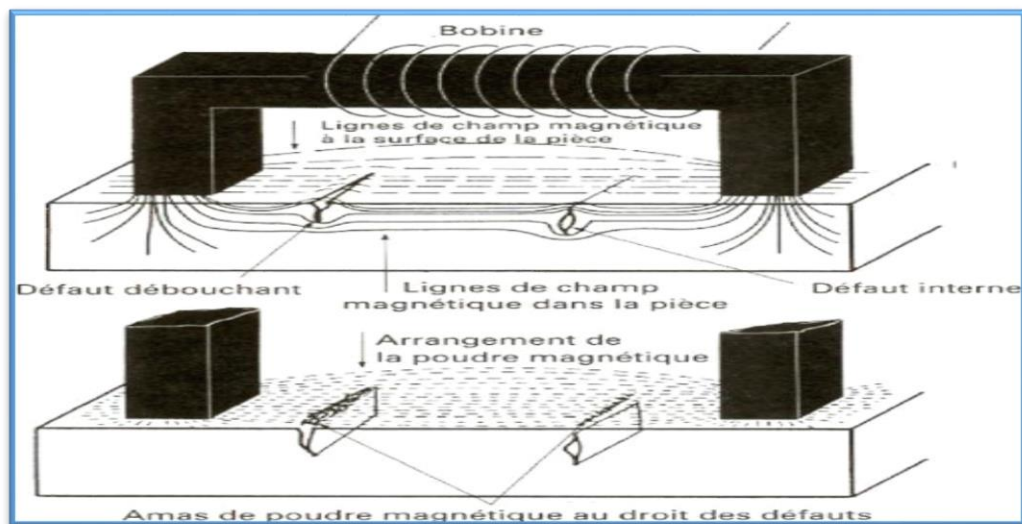


Figure I-6 Principe de détection par Test de Particule Magnétiques

I.4. Contrôle non destructif par Courants de Foucault

Cette méthode est largement utilisée pour détecter les défauts de surface, pour trier les matériaux, pour mesurer des parois minces à partir d'une seule surface, pour mesurer des revêtements minces et dans certaines applications pour mesurer la profondeur. [1]

Cette méthode ne s'applique qu'aux matériaux électriquement conducteurs. Dans la méthode, des courants de Foucault sont produits dans l'objet conducteur. Ces courants, appelés courants de Foucault (CF), créent un champ magnétique induit opposé au champ d'excitation. Ainsi, une

bobine parcourue par un courant variable crée un champ magnétique variable et, placée en vis-à-vis d'un objet conducteur, donne lieu au phénomène des CF. Le flux magnétique créé par les courants induits modifie la force électromotrice de la bobine et l'analyse de cette variation fournit les informations exploitables pour le contrôle de l'objet. Dès qu'ils rencontrent une fissure, une inhomogénéité, un changement de géométrie, les lignes de courants induits sont déviées, ce qui entraîne une modification du champ de réaction.

La difficulté réside dans le fait que les courants de Foucault ne sont pas directement mesurables; seul le champ magnétique qu'ils génèrent l'est. Cette méthode, comme les autres d'ailleurs, nécessite donc une analyse mathématique poussée pour lier/corréler les caractéristiques du défaut à ce champ magnétique de façon à réaliser une imagerie du défaut et non pas une imagerie de champs.

I.4.1. Effet de peau

La densité de courant à l'intérieur d'un fil transportant du courant continu est spatialement uniforme, mais à mesure que la fréquence augmente, un phénomène connu sous le nom d'effet électromagnétique de la peau entre en jeu.

Ce phénomène a pour effet de confiner le courant sur une peau mince à proximité de la surface du conducteur. L'effet est observé dans chaque conducteur transportant du courant alternatif, que ce soit les fils dans les enroulements de la bobine de courant de Foucault, ou l'éprouvette métallique dans laquelle les courants de Foucault sont induits. À mesure que la fréquence du courant alternatif circulant dans la bobine de sonde augmente, la densité de courants de Foucault induite dans l'éprouvette se limite à une couche de plus en plus mince (ou «peau») près de sa surface. En d'autres termes, la profondeur de pénétration des courants de Foucault dans l'éprouvette peut être contrôlée en ajustant la fréquence de l'inspection. [5]

Le fait que la profondeur de pénétration puisse être modifiée de cette manière fournit un outil pour optimiser une inspection électromagnétique à une profondeur particulière dans l'éprouvette. Pour les défauts de rupture de surface, il est préférable de travailler à des fréquences plus élevées pour lesquelles les courants de Foucault induits sont concentrés près de la surface de l'échantillon. La sensibilité d'inspection est augmentée en concentrant les courants de Foucault au voisinage du défaut. Pour les défauts profonds, des fréquences plus basses sont nécessaires pour que les courants de Foucault pénètrent suffisamment loin dans l'échantillon pour interagir avec le défaut.

La profondeur de pénétration du courant électrique circulant dans un conducteur est connue comme la profondeur de peau électromagnétique, δ (m), est donnée par la formule suivant

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

La profondeur de pénétration δ , est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence du courant alternatif excitant la bobine de courant de Foucault f , la conductivité électrique de l'éprouvette σ et sa perméabilité magnétique μ . [5]

Cette définition émerge de l'analyse d'un système dans lequel les courants de Foucault sont excités dans un conducteur infiniment profond à surface plane. Dans ce cas, l'amplitude de la densité de courants de Foucault dans l'éprouvette diminue de façon exponentielle avec la profondeur de la surface:

$$J(z) = J_0 e^{\frac{z}{\delta}}, \quad z < 0 \quad \text{Ou } J(0) = J_0 \text{ comme le montre, la Fig-1.8}$$

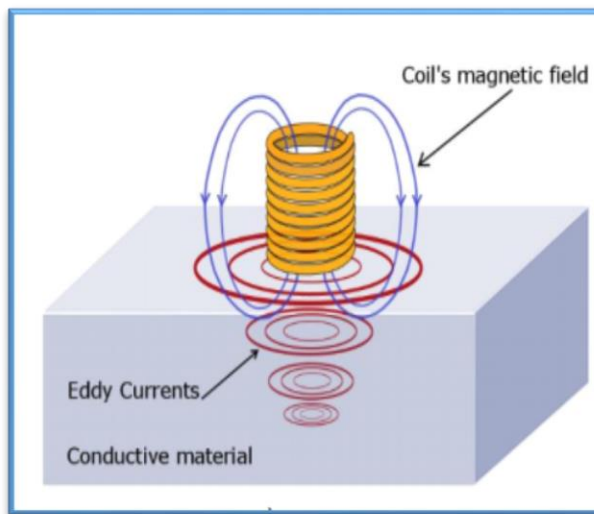


Figure I-7 Distribution des courants de Foucault

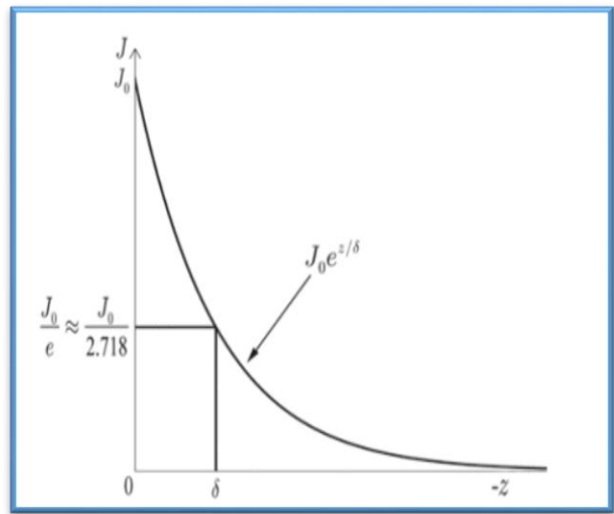


Figure I-8 Décroissance exponentielle des courants de Foucault à partir de la surface

I.4.2. Avantages et inconvénients de CND par Courant de Foucault

Cette méthode peut être utilisée pour:

- Pour la détection de défauts dans les tubes.
- Pour caractériser les matériaux.
- Pour mesurer l'épaisseur de paroi mince à partir d'une seule surface.
- Pour mesurer des revêtements minces.
- Pour mesurer la profondeur.

Certains des avantages des tests par courants de Foucault comprennent:

- Ne nécessite pas de couplant.
- Il donne une réponse instantanée.

- A des étapes simples lors de la configuration.
- Est extrêmement sensible aux défauts.
- Est très reproductible.
- Des vitesses de numérisation élevées peuvent être utilisées.
- Est très précis pour l'analyse dimensionnelle des défauts ou de l'épaisseur du revêtement.

Certaines des inconvénients des tests par courants de Foucault sont les suivantes:

- La théorie nécessite une bonne formation académique en électricité et en mathématiques.
- Extrêmement sensible aux variations de surface et nécessite donc une bonne surface.
- Elle s'applique uniquement aux matériaux conducteurs.
- Peut être utilisé sur des matériaux non magnétiques et magnétiques mais n'est pas fiable sur l'acier au carbone pour la détection des défauts souterrains.
- Sa profondeur de pénétration est limitée.
- Orientation du courant de Foucault vers une fissure ou une discontinuité linéaire affectera la détectabilité.

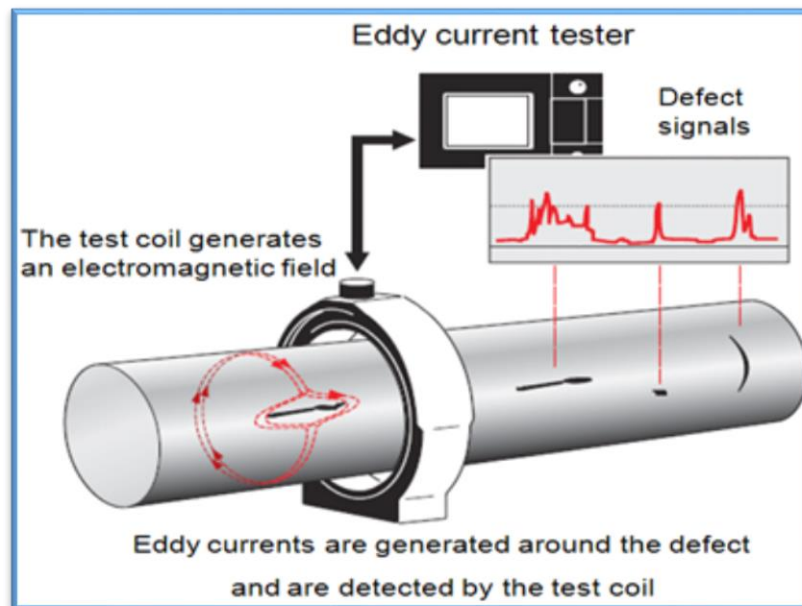


Figure I-9 Principe de CND par courant de Foucault

I.5. Comparaison des différentes méthodes CND

Souvent, il peut être nécessaire d'utiliser une méthode de CND pour confirmer les résultats d'une autre. Par conséquent, diverses méthodes doivent être considérées comme complémentaires et non compétitives, ou comme alternatives optionnelles.

Chaque méthode a ses avantages et ses limites particuliers et ceux-ci doivent être pris en compte lors de la planification d'un programme de test. Le tableau I.1 présente un résumé des méthodes CND les plus utilisées, (4: coût le plus élevé, 1: coût le plus bas).

Tableau I. 1 Comparaison différentes méthodes CND

Technique	Conditions d'accès	Coût de l'équipement	Coût d'inspection	Remarques
Examen visuel	Peut être utilisé pour visualiser l'intérieur d'équipements complexes. Un point d'accès peut suffire.	3/1	1	Très polyvalent Peu de compétences requises
Radiographie	Doit pouvoir atteindre les deux côtés.	4	3/2	Malgré un coût élevé, une grande surface peut être inspectée en même temps. Beaucoup de compétences requises en interprétation.
Ultrasons	Un ou les deux côtés (ou extrémités) doivent être accessibles.	3	3/2	Nécessite une recherche point par point, d'où un travail important sur les grandes structures; Personnel qualifié requis.
Test de particules Magnétique	Nécessite une surface propre et raisonnablement lisse.	2	2/1	Utile uniquement sur les matériaux magnétiques tels que l'acier; Peu de compétences requises; Détecte uniquement les fissures de surface ou les fissures proches de la surface.
Ressuage	Nécessite que le défaut soit accessible au pénétrant	1	2/1	Pour tous les matériaux; Certaines compétences requises; Détecte uniquement les défauts de rupture de surface; Plutôt désordonné.
				Pour les matériaux électriquement

<p>Courant de Foucault</p>	<p>La surface doit généralement être raisonnablement lisse et propre</p>	<p>3/2</p>	<p>2/1</p>	<p>conducteurs uniquement; Pour les défauts de rupture de surface; Variations d'épaisseur des revêtements ou comparaison des matériaux; une compétence considérable est généralement requise.</p>
-----------------------------------	--	------------	------------	---

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé rapidement la définition et l'objectif du contrôle non destructif, les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un défaut et les bases physiques qui régissent les procédés de contrôle.

Nous avons ensuite décrit les principes des techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les tests ultrason, la radiographie, les tests de particules magnétiques, la technique des courants de Foucault, Pour chaque technique d'inspection nous avons rappelé 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 et diverses méthodes doivent être considérées comme complémentaires et non compétitives. [12]

Le CND par courants de Foucault s'adapte bien pour les matériaux soit de type conducteur électrique au magnétique ces types de matériaux forment une grande partie des équipements industriels, c'est pour cela que nous avons jugé utile de lui consacré le chapitre suivant.

Chapitre II :

Capteur et Modélisation pour le CND par Courant de Foucault

Chapitre II . Capteurs et Modélisation pour le CND par Courant de Foucault

II.1. Introduction

Le contrôle non destructif par les courants de Foucault est fondé sur les phénomènes d'électromagnétisme. La compréhension de ces phénomènes est très importante pour développer des modèles mathématiques précises afin de faire des simulations et des améliorations dans la conception des capteurs efficace et minimiser les problèmes rencontrés dans le contrôle non destructifs.

La mise en évidence des différentes technologies des capteurs inductifs et des signaux qui sont indispensable au le CND par courant de Foucault est présenté au début de ce chapitre. Après ça on va définir l'équation qui régit notre système qui est l'équation de la magnétodynamique en régime quasi stationnaire pour une formulation en potentiel vecteur magnétique et le potentiel électrique scalaire $\vec{A} - V$.

En suite la résolution de cette équation qui est une équation différentielle aux dérivées partielles se fait avec des méthodes numériques en l'occurrence la méthode des éléments finis.

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. [6]

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".

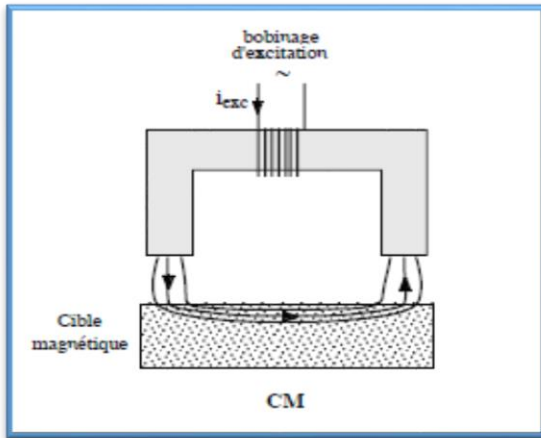


Figure II-1 Capteur Magnétique ou CM

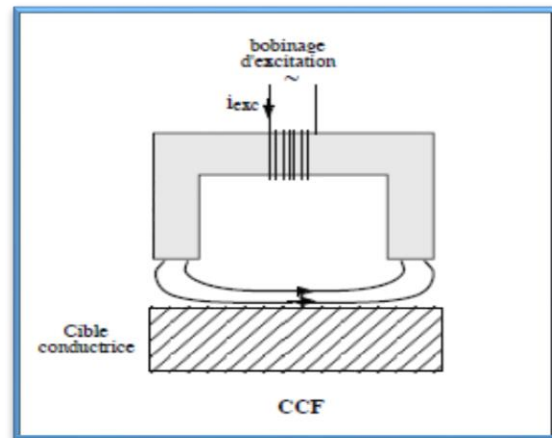


Figure II-2 Capteur à courant de Foucault ou CCF

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]

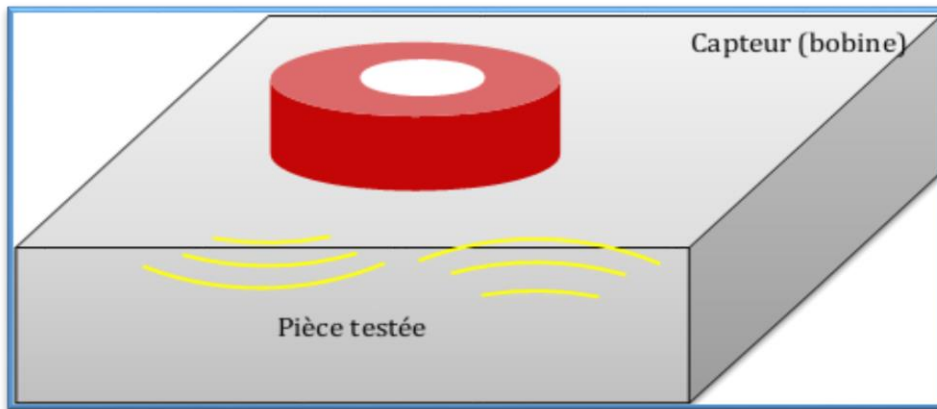


Figure II-3 Sonde a double fonction

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.

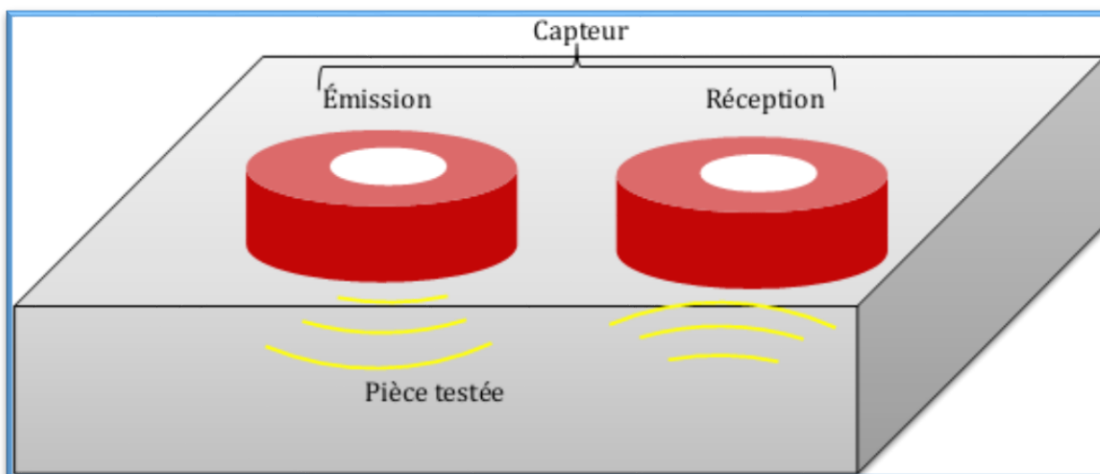


Figure II-4 Sonde a fonction séparée

II.3.3. Mesure absolue et différentielle

II.3.3.a. Sondes absolues.

Les sondes à courants de Foucault absolus 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.

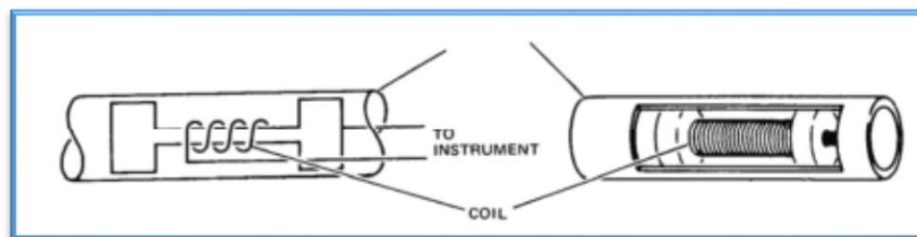


Figure II-5 Sonde Interne

II.3.4.b. Sondes encerclant

Les sondes 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.

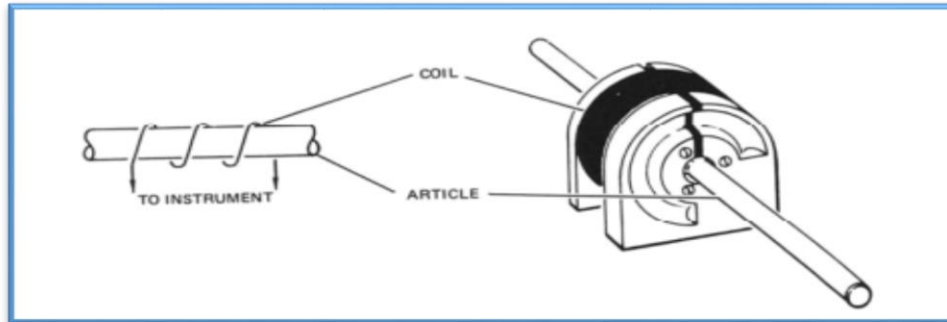


Figure II-6 Sonde Encerclant

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.

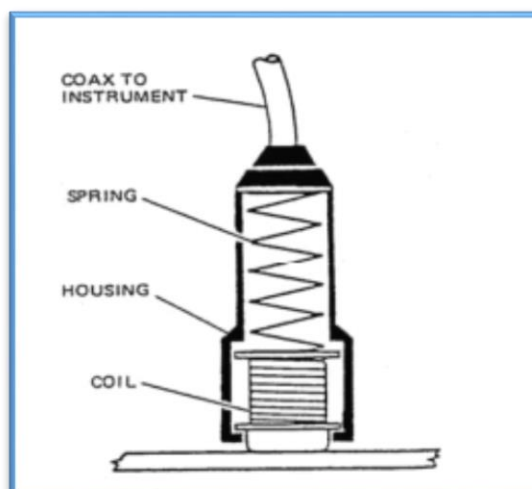


Figure II-7 Sonde Surfacique

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.[1][7]

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. [7]

Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes parasites capacitifs, engendrés notamment par les capacités inter-spires 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. [7] .

II.3.5.b. Contrôle multi-fréquences

Les courant 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. [8].

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: [9]

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

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 :

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

R est 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.

X est la composante inductive qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le capteur. [9].

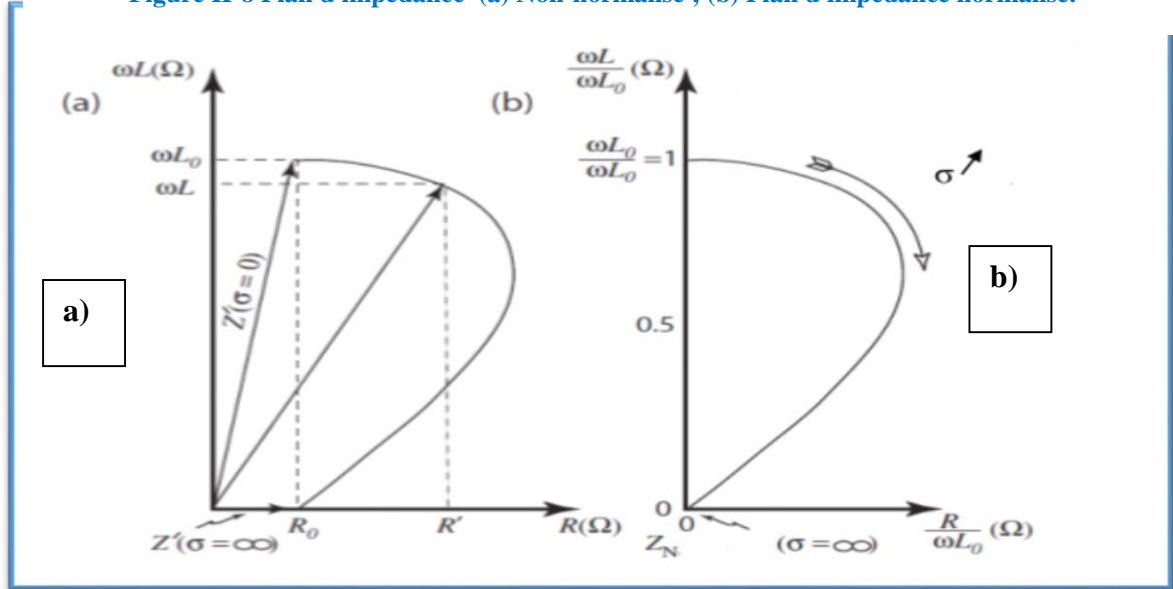
Pour éliminer les composantes de l'impédance à vide R_0 et X_0 (pertes à vide, l'inductance propre du capteur) et garder uniquement la géométrie du capteur, sa position relative au matériau (lift-off) et les caractéristiques géométriques et physiques du matériau, on procède à la normalisation de l'impédance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

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

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

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

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

\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]

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

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

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]

$$\text{Loi d'induction de Faraday} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Loi d'Ampère} \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \mu_0 \vec{j} \quad (\text{II.15})$$

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

$$\text{Loi de Gauss pour le magnétisme} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.17})$$

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. [11]

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. [9]

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 :

$$\vec{A}_1 = \vec{A}_2$$

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. [10]

$$\begin{aligned}\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) &= 0 \\ \vec{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) &= 0 \\ \vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) &= \rho_s \\ \vec{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) &= \vec{K}\end{aligned}$$

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

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (\text{II.18})$$

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{II.19})$$

En remplaçant (II.18) 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 :

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.20})$$

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

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (\text{II.21})$$

On Remplace (II.21) dans la loi d'Ohm (II.13)

$$\vec{j} = \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V) \right) \quad (\text{II.22})$$

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

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

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

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

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \mu_0 \cdot \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V)\right) \quad (\text{II.23})$$

D'après les équations (II.18) et (II.11)

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (\text{II.24})$$

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 :

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A}\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = \vec{J}_s \quad (\text{II.25})$$

ω : La pulsation électrique de l'excitation

j : L'unité imaginaire

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

L'équation (II.25) 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 dans le domaine du contrôle non destructif par courant de Foucault en prenant 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.25) 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 :

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A}\right) = 0 \quad (\text{II.26})$$

Dans la bobine inductrice :

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

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J}_s \quad (II.27)$$

Dans la cible à contrôler s'écrit sous la forme :

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

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = 0 \quad (II.28)$$

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

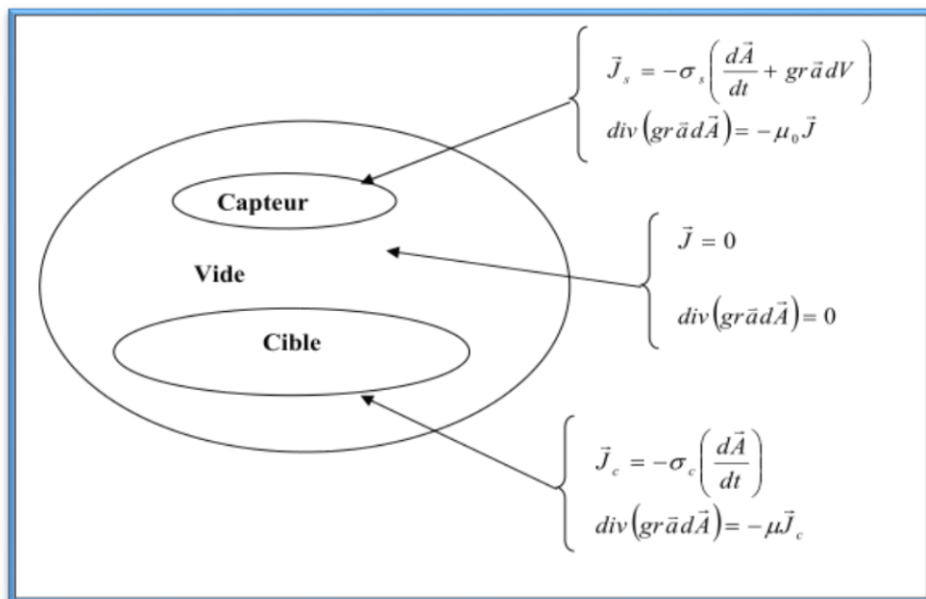


Figure II-9 Equation de magnétodynamique dans des différentes régions

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, [10]

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

$$\Delta A = f \quad x \in \Omega \quad (II.29.a)$$

$$A = A_0 \quad x \in \partial\Omega \quad (\text{II.29.b})$$

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 normal unitaire dirigée vers l'extérieur de Ω , on cherche donc à résoudre le problème. [10]

$$\begin{aligned} \Delta A &= f \quad x \in \Omega \\ \frac{\partial A}{\partial n} &= A_n \quad x \in \partial\Omega \end{aligned} \quad (\text{II.29.c})$$

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

$$\begin{aligned} \Delta A &= f \quad x \in \Omega \\ a \cdot A + b \cdot \frac{\partial A}{\partial n} &= c \quad x \in \partial\Omega \end{aligned} \quad (\text{II.29.d})$$

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. [10]

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 :

$$F(A) = \int_{\Omega} \mathcal{L} d\Omega \quad (\text{II.30})$$

\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. [10]

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 .

$$R_i = L(A) - f \quad (\text{II.31})$$

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 .

$$\int_{\Omega} R_i \Phi_i \cdot \partial\Omega \quad (\text{II.32})$$

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. [10]

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).

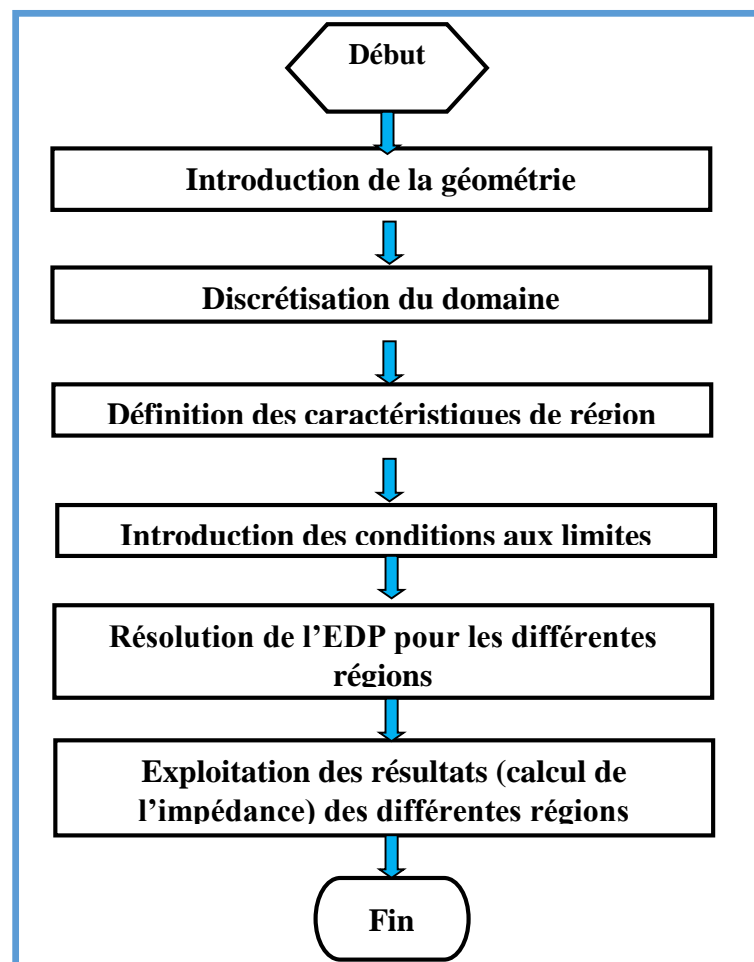


Figure II-10 Organigramme de calcul par élément finis.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différentes technologies des capteurs inductifs, les différents types des sondes et leur montage qui est soit différentiel ou absolu, à double fonction ou à fonction séparée, leur forme qu'elle soit encerclant, plate ou interne

Les principales types d'excitation mono fréquence multifréquence, ou pulsée aussi a été présenté, ensuite on a introduit la notion de l'impédance normalisé pour mieux comprendre la relation entre le signal de l'impédance et la détection des défauts, aussi on a présenté la formulation qui utilise le potentiel vecteur magnétique et le potentiel scalaire électrique \vec{A} - V pour génères l'équation magnétodynamique en régime quasi stationnaire qui gouverne notre système.

Pour résoudre ces types des équations qui sont des équations à dérivées partielles on a recours à des méthodes de solution numérique notamment la méthode des éléments finis FEM qui est la méthode que nous utiliserons.

Le logiciel COMSOL Multiphysics est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire et un outil logiciel de simulation en ingénierie qui facilite le processus de modéliser à tous les niveaux - définition de la géométrie, maillage, spécification de la physique, optimisation, et visualisation des résultats c'est à dire de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel. C'est pour ces particularités qu'on a décidé d'utiliser ce logiciel comme outil de simulation pour le contrôle non destructif par capteurs à courants de Foucault à champs magnétiques rotatifs qui sera le sujet du chapitre suivant.

Chapitre III :

Simulation d'un Système de CND- CF par Champ tournant

Chapitre III . Simulation d'un Système de CND- CF par Champ Tournant

III.1. Introduction

Après avoir formulé les équations régissant notre modèle d'étude dans le chapitre précédant on va dans ce qui suit présenter les résultats des simulations effectuées sous environnement COMSOL Multiphysics. La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis.

La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. Ce logiciel est un outil de conception et de modélisation dont l'avantage principal est de ne pas être dédié à un domaine d'application particulier. Il rassemble un ensemble d'outils et une bibliothèque de modèles prédéfinis permettant la simulation de tout processus physique pouvant être décrit par des EDP, y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF, et il peut même simuler des géométries 3D complexes,[10].

Le modèle considéré dans ce mémoire est une simulation en 3D d'un système CND-CF avec capteurs de courant de Foucault qui repose sur le principe de créer des courants de Foucault (courants induits) dans une plaque conductrice

Le système considéré est constitué de trois capteurs à courant de Foucault à doubles fonctions alimentés par des courants alternatifs triphasés sinusoïdaux déphasés entre eux dans le temps et dans l'espace de 120 degrés.

En utilisant le modèle éléments finis implémenté sous COMSOL Multiphysics nous proposerons à résoudre, deux configurations de systèmes de détection de défauts basées sur le champs tournant, la première est une simulation pour la détection de défaut interne dans alésage d'une pièce conductrice en aluminium et la deuxième configuration est un système de détection sur cylindre creux en aluminium pour la détection de défaut surfacique externe

Dans ce chapitre nous présenterons pour chacune des configurations, en premier lieu, le dispositif à étudier ainsi que les caractéristiques géométriques et physiques, puis l'étude de l'effet de la variation des paramètres du défaut et son emplacement sur les signaux des trois capteurs.

III.2. Déroulement de Simulation sous COMSOL Multiphysics

Une simulation électromagnétique avec COMSOL se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. Une simulation avec COMSOL se décompose en trois étapes principales : le prétraitement, le calcul et le post-traitement.

L'étape de prétraitement inclut la description géométrique et physique du domaine de travail, la détermination des conditions aux limites et la discrétisation du domaine sur un maillage. Lorsque le problème est complètement défini, l'étape du calcul est consacrée à la résolution numérique en utilisant les différents solveurs proposés par COMSOL. Définitivement, le post-traitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement, [12].

III.3. Calcul de l'impédance de capteur

Le CND par courants de Foucault repose sur l'analyse des différentes grandeurs électriques du capteur lors de son déplacement par rapport aux défauts, ces grandeurs sont influencées par de nombreux paramètres.

L'impédance d'une bobine à courants de Foucault, Z est la quantité mesurée lors d'une inspection par courant de Foucault.

Aux fins de CND par CF, l'inductance est la plus importante car c'est la quantité de circuit qui représente la présence du champ magnétique dans la bobine, et dans CND-CF, c'est ce champ magnétique qui se couple avec la pièce à tester et y induit des courants de Foucault.

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

$$W_j = RI^2 \rightarrow R = \frac{W_j}{I^2} \quad (\text{III.1})$$

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

$$W_m = \frac{1}{2}LI^2 \rightarrow L = \frac{2W_m}{I^2} \quad (\text{III.2})$$

Ce qui permet de déduire l'impédance du système :

$$Z = R + jX = \frac{1}{I^2}(W_j + j \cdot \omega \cdot 2 \cdot W_m) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

R : La résistance vue par le capteur.

L : La réactance vue par le capteur.

I : Le courant traversant le capteur.

W_j : Énergie correspondant aux pertes joule dans le conducteur.

W_M : Énergie magnétique emmagasinée dans tous l'espace.

III.4. Résultats des simulations

III.4.1. Validation du modèle alésage sur plaque conductrice

III.4.1.a. Modèle géométrique et description du système proposé

Ce modèle est constitué d'une plaque en aluminium munie d'un alésage, à l'intérieur de ce dernier, un système de trois bobines (1, 2 et 3) en cuivre formant la source du champ tournant et le tout entouré par un domaine d'air en forme cubique.

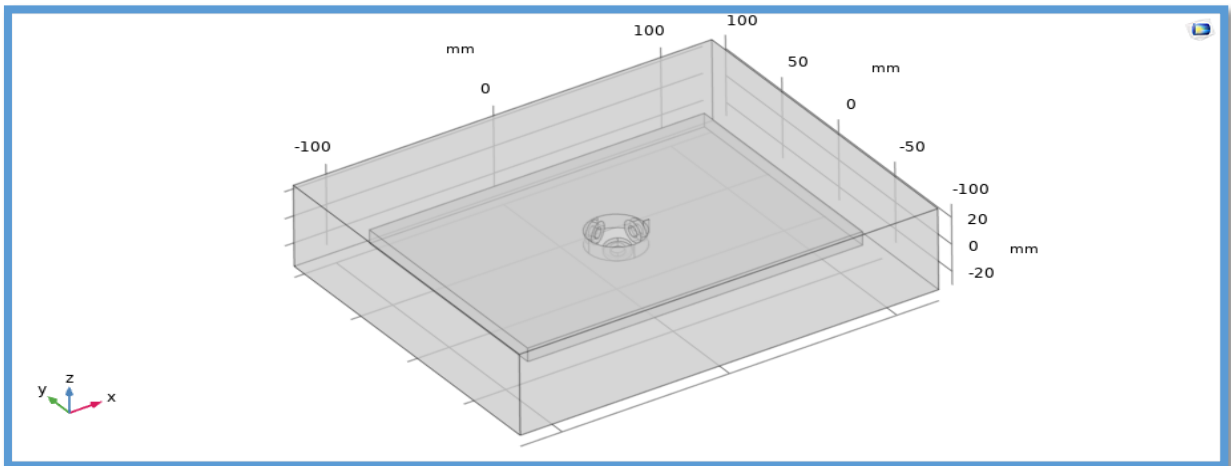


Figure III. 1 Vue de domaine d'étude.

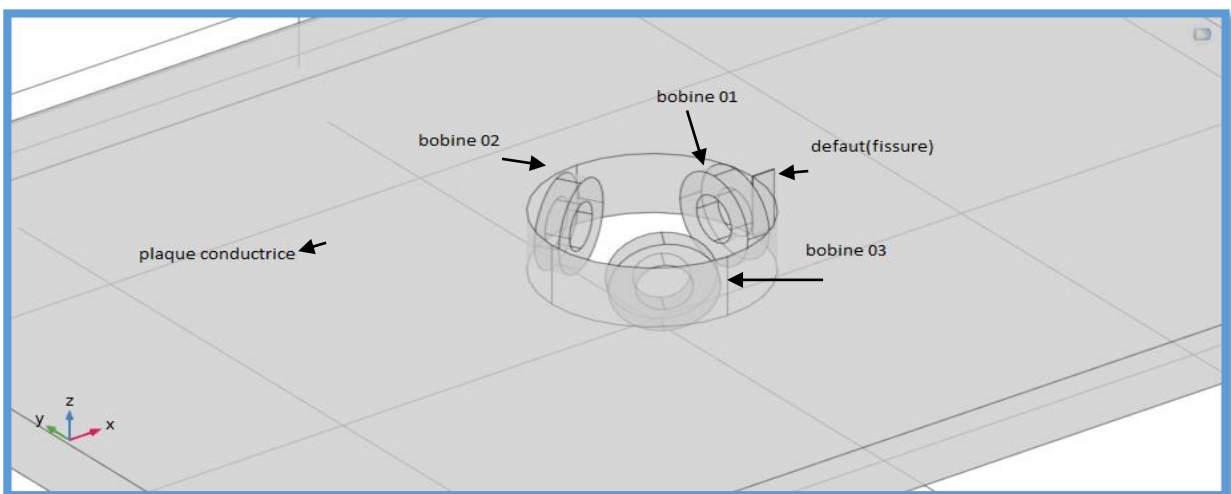


Figure III. 2 Vue 3D de la plaque, défaut (fissure) et les trois capteurs.

Le bloc d'air peut être caché de la vue globale de dispositif, l'air dans la nature a une conductivité nulle ($\sigma = 0$), mais dans les études comme le nôtre on doit choisir une valeur numérique non-nulle pour assurer une solution convergente des équations qui régissent notre dispositif.

III.4.1.b. Caractéristiques géométriques du modèle

Les caractéristiques géométriques et physiques du modèle proposé sont données par le tableau ci-dessous.

Tableau III-1 Caractéristique de dispositif

	Le capteur	La plaque	Le défaut
Caractéristique physique	Courant d'excitation : 0.8 A Fréquence d'alimentation : 1600Hz Nombre de spire : 997 spires Perméabilité relative : 1	Type de matériau : Aluminium de : Perméabilité relative : 1 Conductivité électrique : $3.774 \times 10^7 \frac{S}{m}$	Rayon Alésage 9.5 cm
Caractéristique Géométrique	Rayon interne : 20.0 mm Rayon externe : 40.0 mm Hauteur : 50 mm Lift-off : 5.00 mm	Langueur : 180 cm Largeur : 140 cm Hauteur : 10 cm	Langueur : 15 cm Largeur : 0.15 cm Hauteur : 10 cm

Les trois bobines sont excitées par un courant alternatif sinusoïdal triphasé déphasé ou :

$$I_1 = I_{eff} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (III.4)$$

$$I_2 = I_{eff} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + 2\pi/3) \quad (III.5)$$

$$I_3 = I_{eff} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + 4\pi/3) \quad (III.6)$$

Où I_1 , I_2 et I_3 sont les courants d'alimentation imposés des trois bobines et $I_{eff} = 0.8$ A.

III.4.1.c. Maillage du domaine d'étude

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, [12].

Le choix de la taille des éléments conditionne fortement la précision de la solution numérique obtenue.

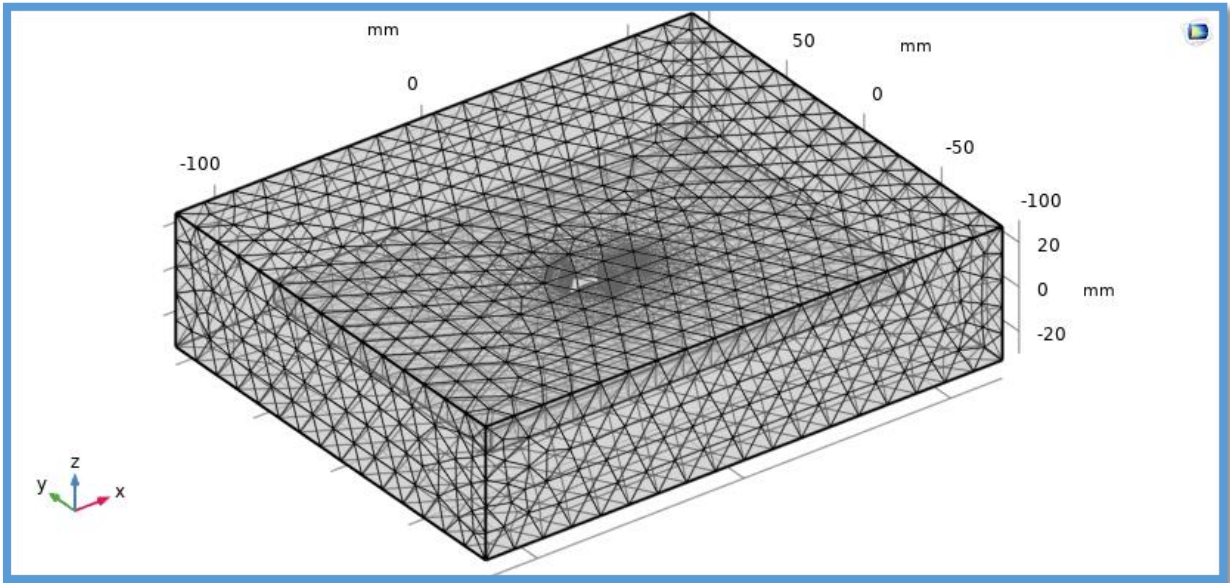


Figure III. 3 Maillage de domaine.

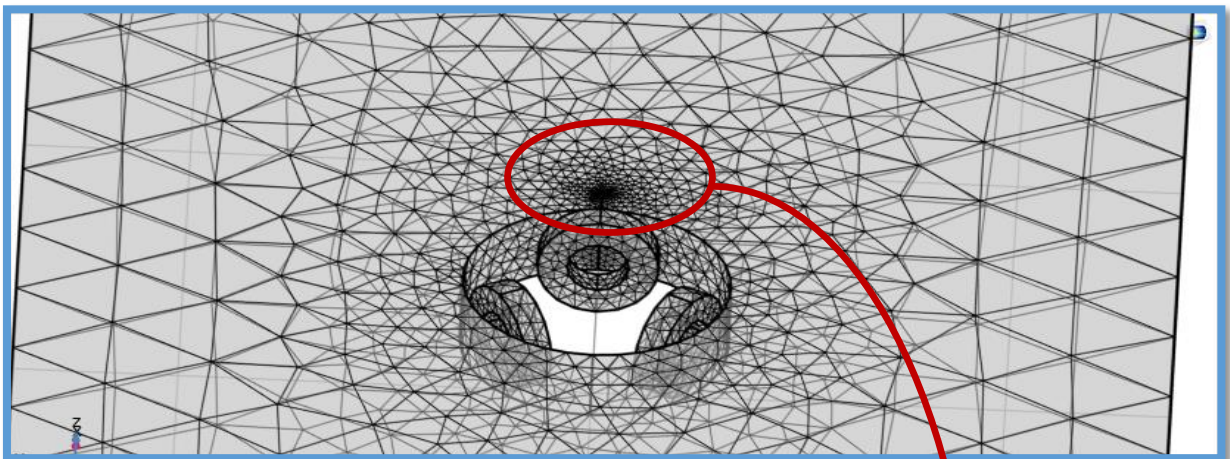


Figure III. 4 Maillage des domine de la plaque et les capteurs.

Zoom

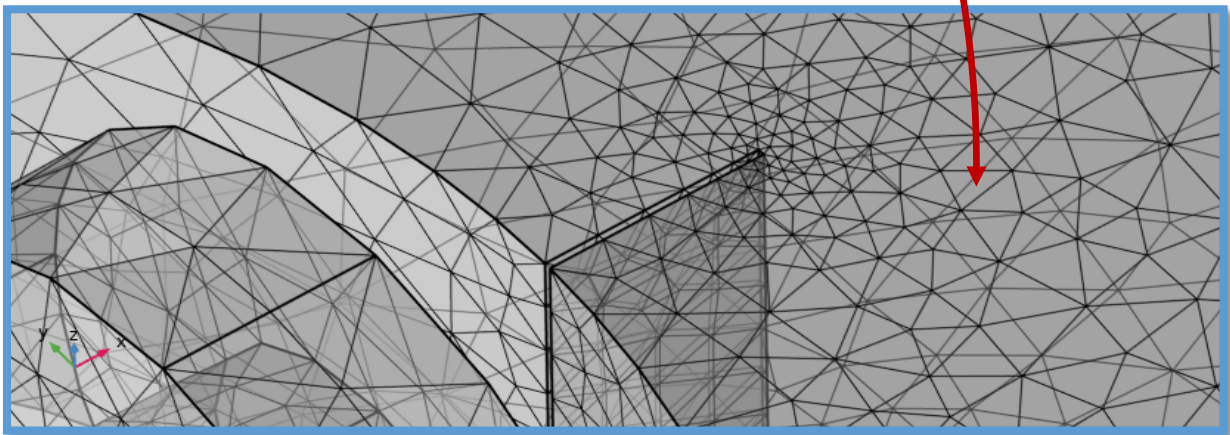


Figure III. 5 Maillage de la région du défaut.

Le modèle complet est constitué de 5 domaines, le maillage complet consiste en 49842 éléments de domaine, 6776 éléments de frontière et 718 éléments d'arête et une qualité minimale des éléments de 0.08441.

III.4.1.d. Tests de validations

Avant d'entamer la simulation du comportement du système de CND-CF par champs tournant créé par les trois bobines décalées dans l'espace et déphasées de 120° l'une de l'autre, il faut vérifier que les tensions et les courants des trois bobines sont bien décalés de 120° .

➤ Vérification des courants I1, I2 et I3 sans défaut à l'intérieur de l'alésage.

La figure III.6 illustre bien que le système triphasé d'alimentation des trois bobines est équilibré en courants, ces derniers sont imposés car on a utilisé une source de courant comme moyen d'alimentation, à $t=0$ on a :

$$I_1 = 0.8 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0) = 0.8(A) \quad (\text{III.7})$$

$$I_2 = 0.8 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0 + \frac{2\pi}{3}\right) = 0.4(A) \quad (\text{III.8})$$

$$I_3 = 0.8 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0 + 4\pi/3) = 0.4(A) \quad (\text{III.9})$$

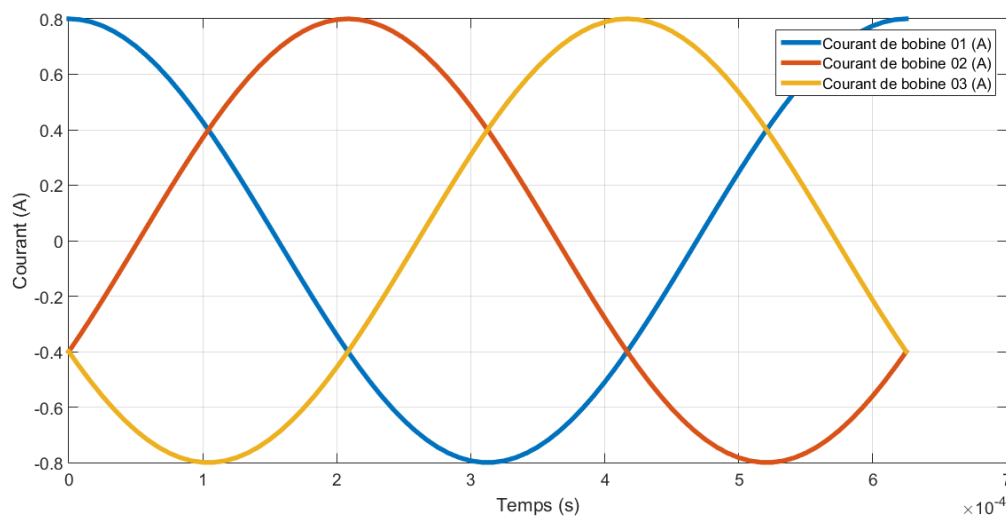


Figure III. 6 Système triphasé équilibré des courants d'alimentation I1, I2 et I3.

➤ Vérification des tensions de mesure V1, V2 et V3 sans défaut à l'intérieur de l'alésage.

Pour un système sans défaut à l'intérieur de l'alésage, on doit avoir des tensions de mesure au niveau des trois bobines déphasées dans le temps et égales en amplitude, cela est confirmé par la figure III.7.

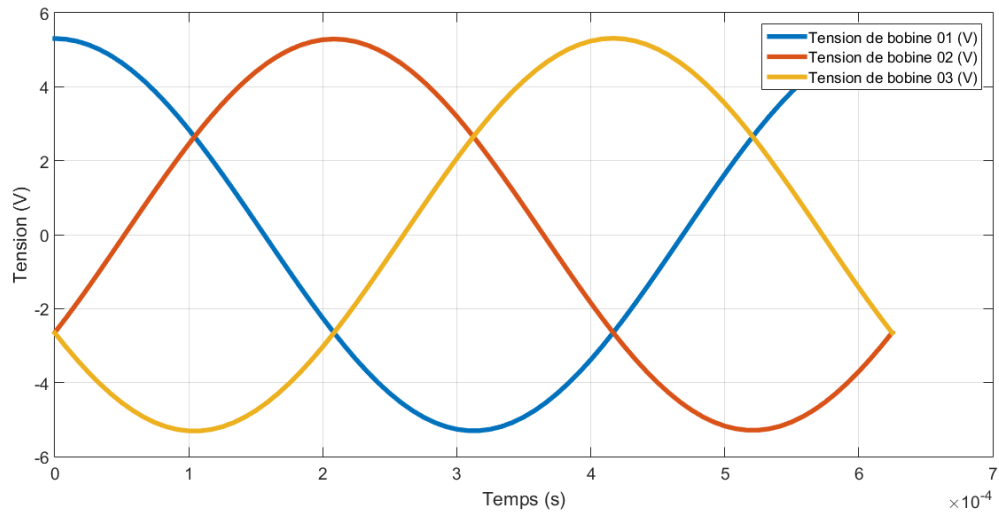


Figure III. 7 Système triphasé équilibré des tensions mesurées V1, V2 et V3.

➤ **Vérification de la détection de défaut par variation de tension.**

Etant donné que les courants sont imposés, la présence de défaut doit avoir des répercussions sur la valeur de la tension de mesure des bobines, et principalement sur celle qui se trouve proche du défaut.

Pour un défaut en face de la bobine 1 (Figure III.8), on peut constater que la tension aux bornes de cette dernière est passée, à t_0 s, de 5 V (sans défaut) à la valeur de 6 V, d'où on peut conclure que notre système a pu détecter la présence de défaut.

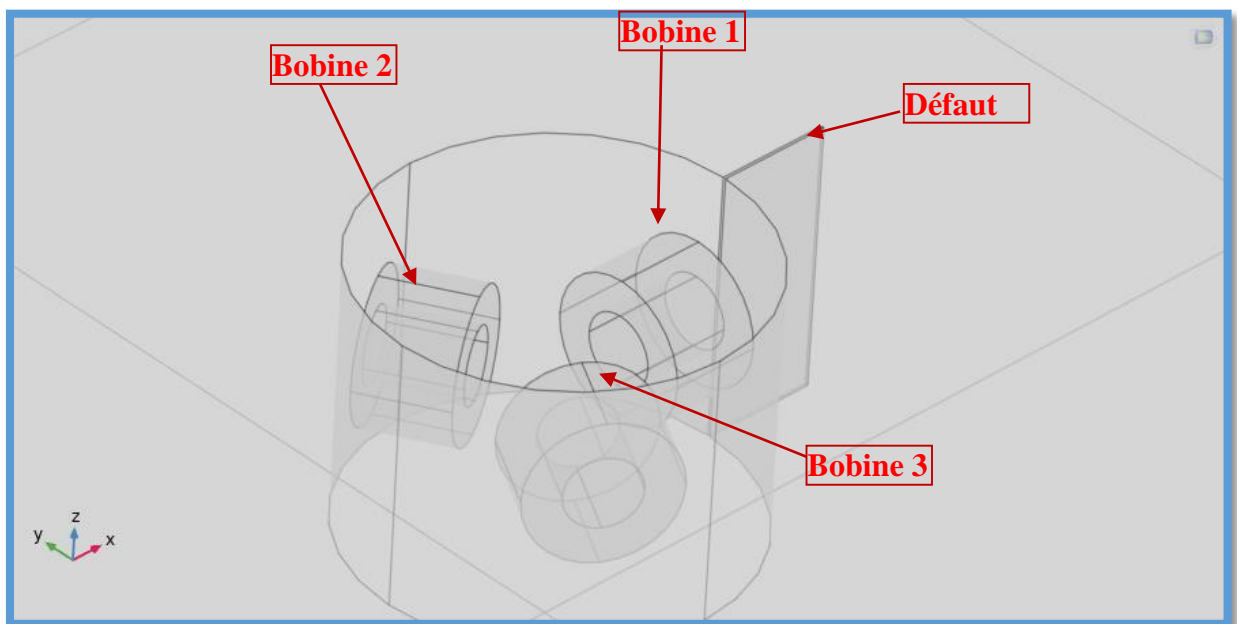


Figure III. 8 Position du défaut en face de bobine 1.

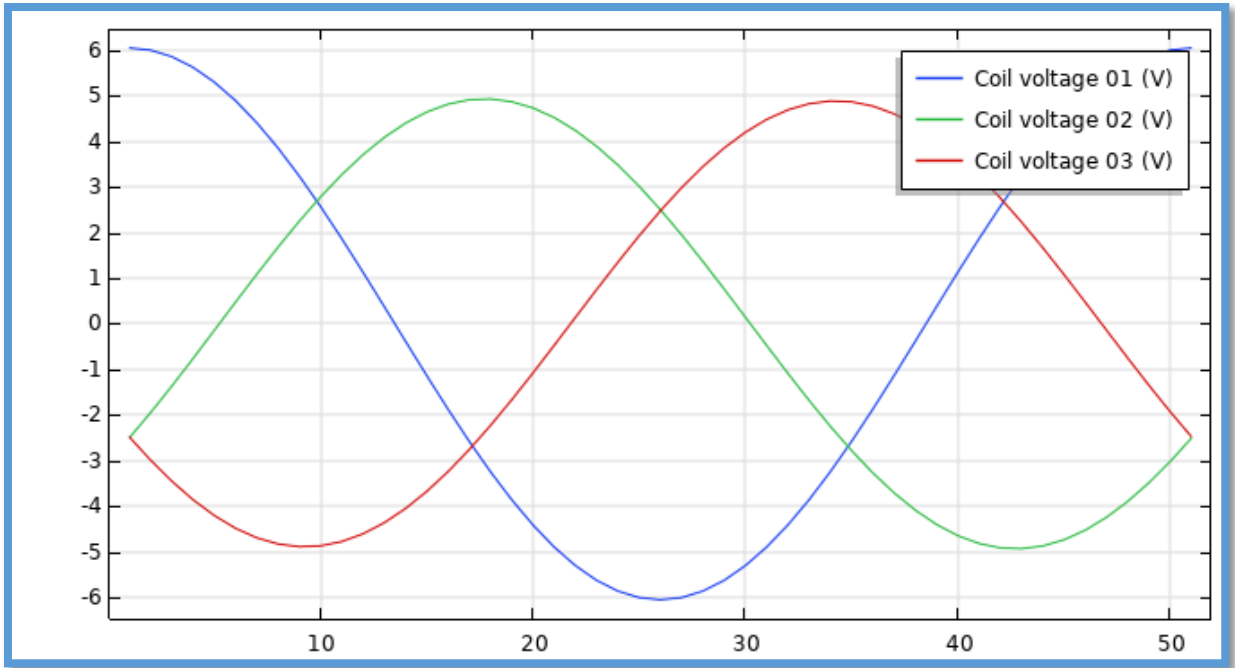


Figure III. 9 Variation de la tension V1 (défaut en face de bobine 1).

III.4.2. Simulation du comportement du système alésage sur plaque conductrice

III.4.2.a. Répartition de la densité des courants induits.

Soit à étudier le même système décrit plus haut, alésage avec défaut internes contrôlé par un système de trois bobines à champ tournant.

On comparant le maximum de la densité des courants induits sur le volume ou sur le contour, on peut constater qu'il est passé respectivement de $1,48 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ et $2,8 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ pour le cas sans défaut (Figure III.10) à $1,74 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ et $3,6 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ pour le cas avec défaut (Figure III.11). Cela nous amène à déduire que le système de simulation est fiable car il y a variation des courants induits lors d'apparition de défaut.

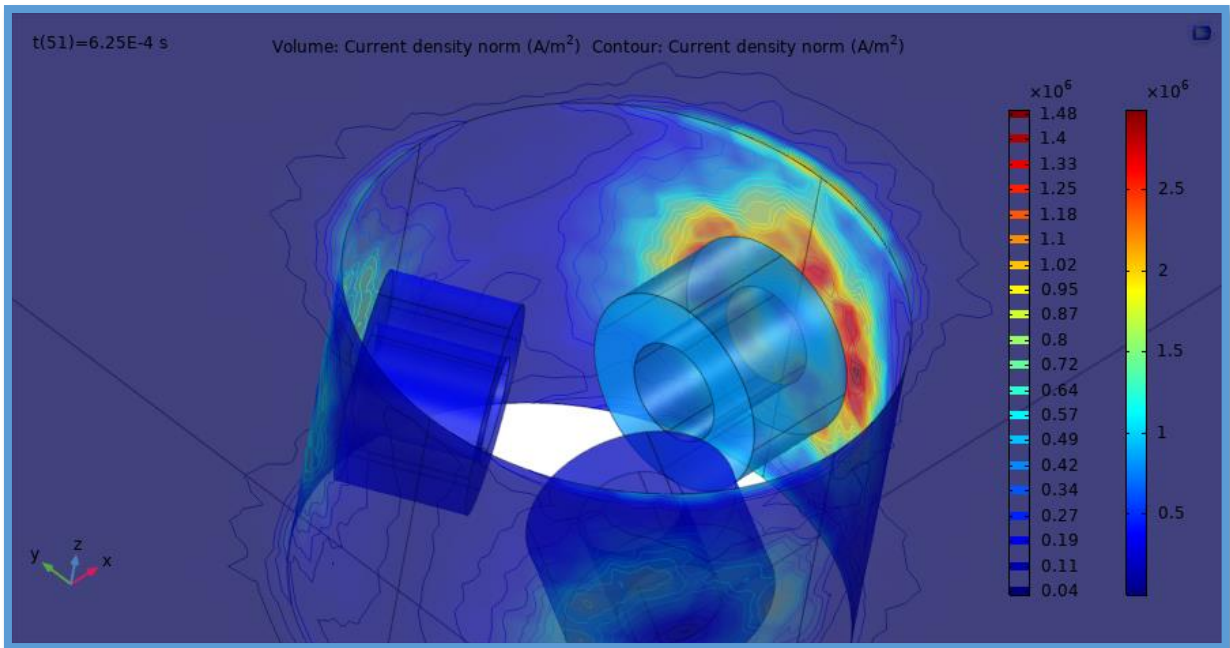


Figure III. 10 Courants induits sur contour et volume – cas sans défaut- .

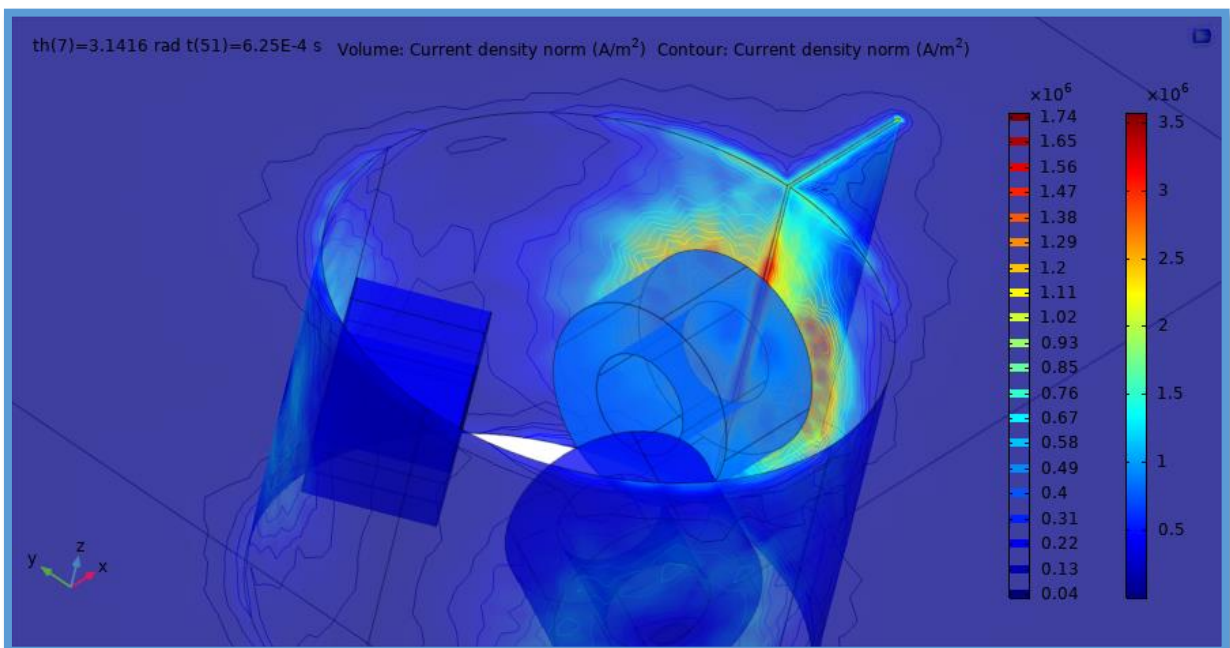


Figure III. 11 Courants induits sur contour et volume – cas alésage avec défaut-.

Nous pouvons observer à travers les figures III.10et III.11 que la répartition de la densité des courants induits s'affaiblit avec la présence du défaut, car il y a déformation de la trajectoire des courants induit qui vont se répartir à l'intérieur de ce dernier.

III.4.2.b. Variation de l'impédance des capteurs.

Les Figures (III. 12-13) montrent la variation de réactance et de résistance de la bobine 1.

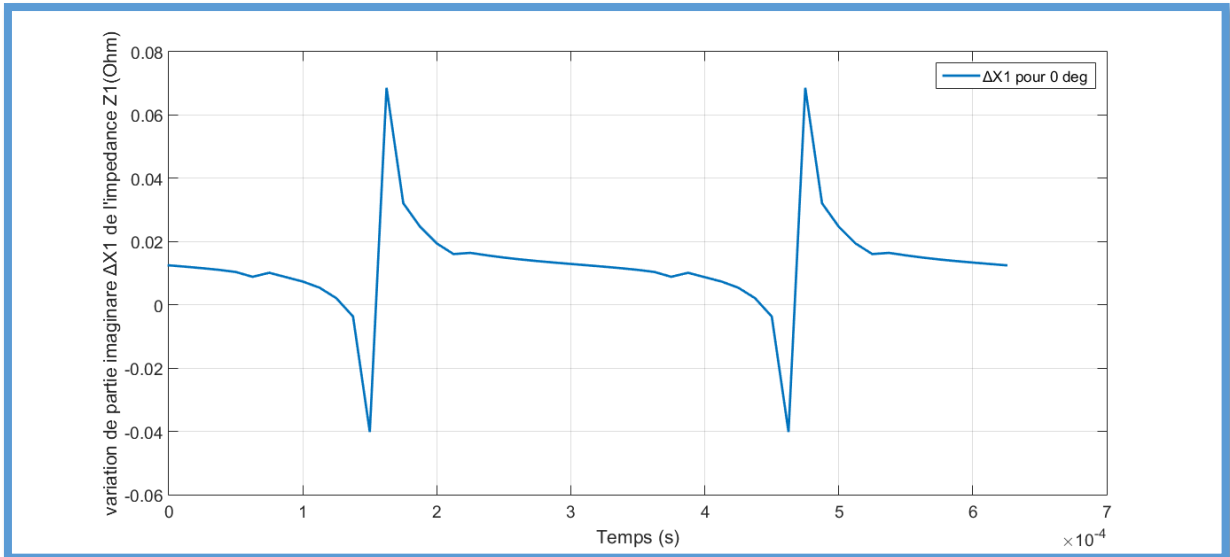


Figure III. 12 Variation de la réactance de la bobine 1 .

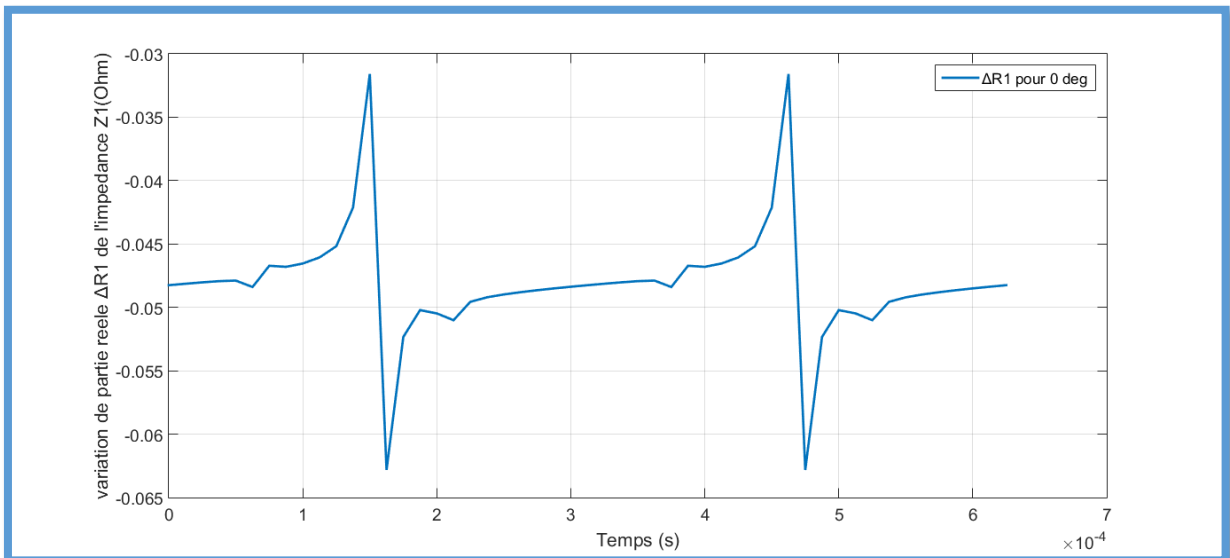


Figure III. 13 Variation de la résistance de la bobine 1.

Etant donné que le signal est périodique on peut étudier le phénomène sur une demi-période seulement, les figures III. 12-13 montre clairement que la variation d'amplitude est plus importante au voisinage du défaut.

III.4.2.c. Effet de la position angulaire du défaut

Pour étudier l'effet de la position angulaire du défaut, on doit le déplacer sur la demi-circonférence interne de l'alésage comme il est sur la Figure III.14.

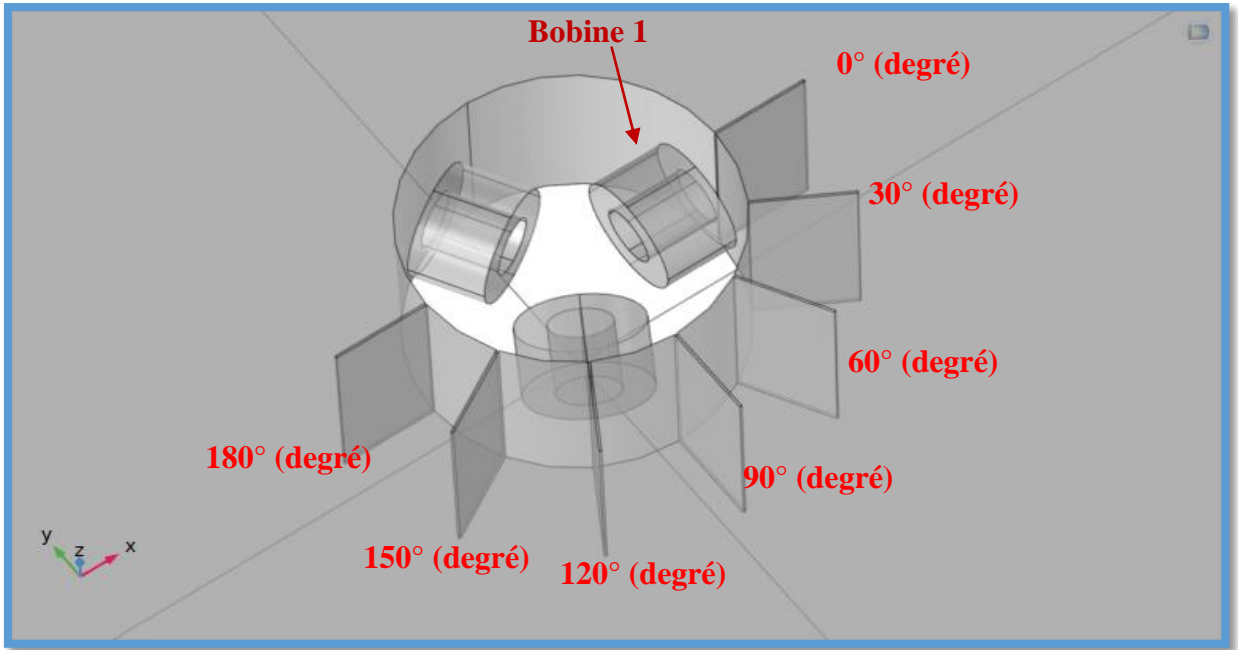


Figure III. 14 Positions angulaires du défaut .

Les Figures (III. 15-16) représentent l'effet de position angulaire du défaut sur la circonférence interne de l'alésage.

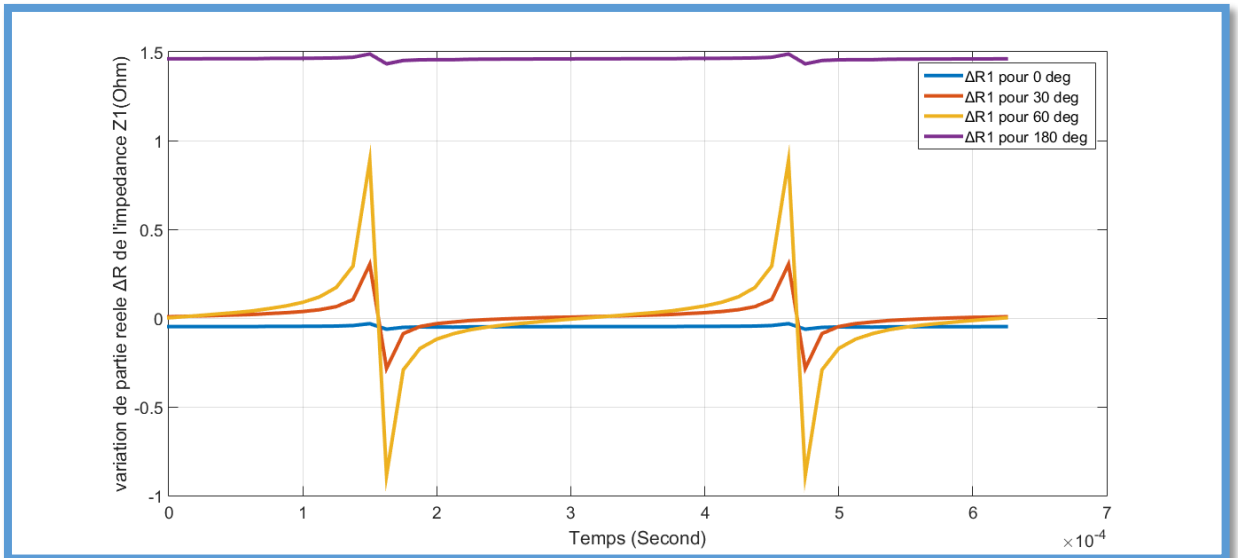


Figure III. 15 Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 1.

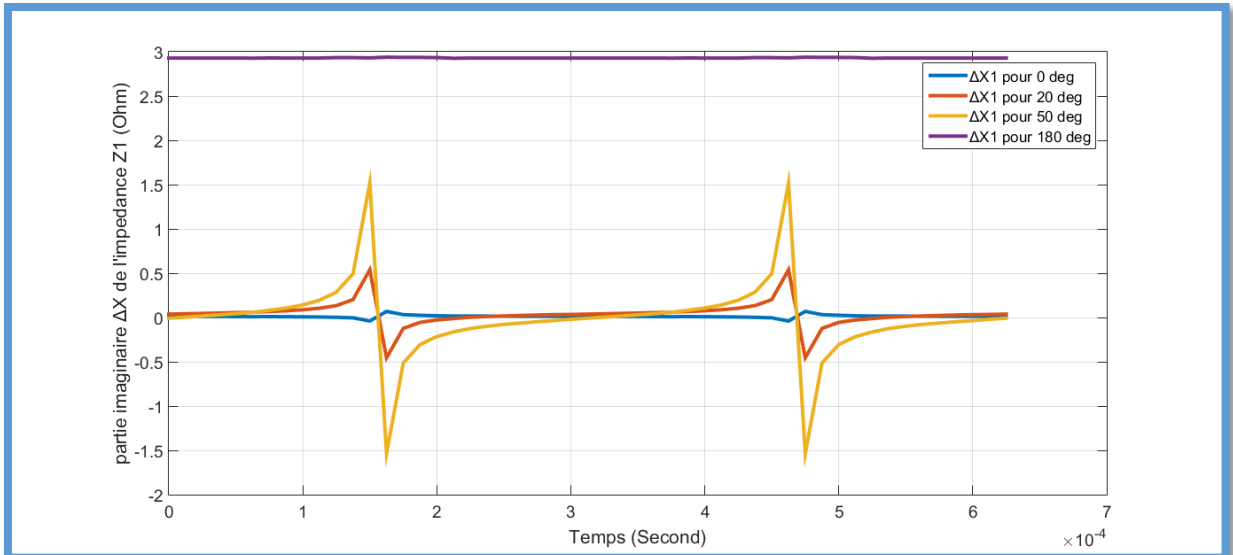


Figure III. 16 Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 1.

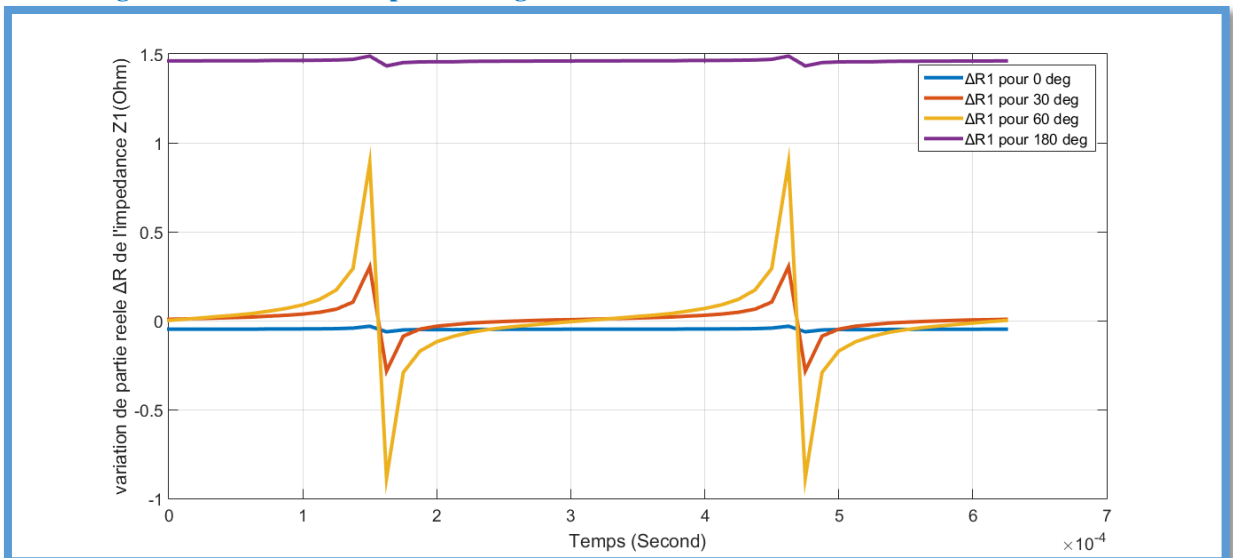


Figure III. 17 Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 2

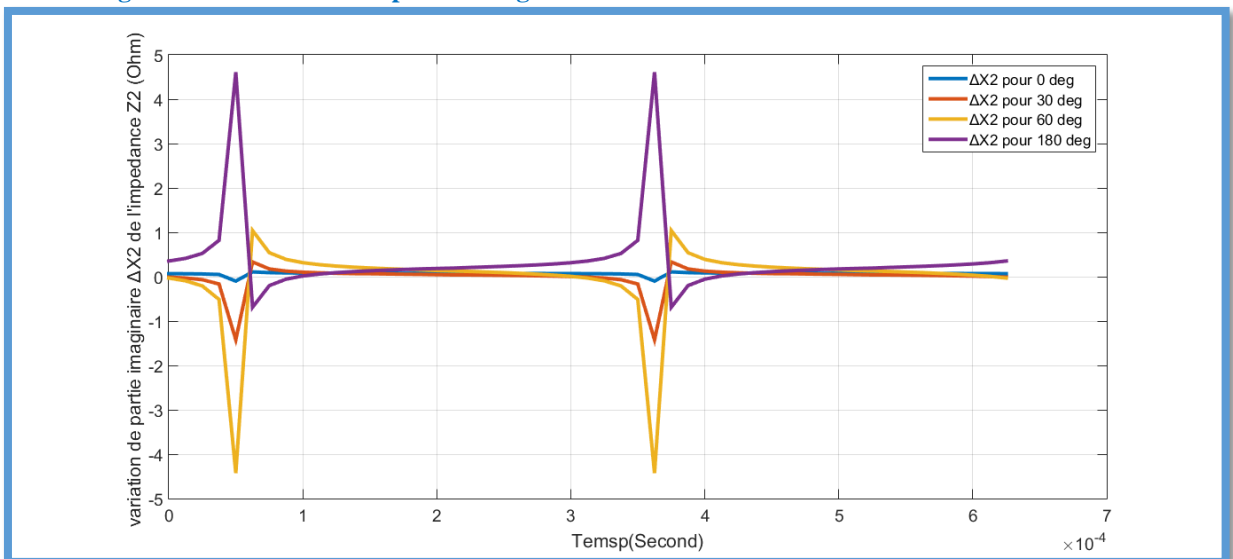


Figure III. 18 Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 2.

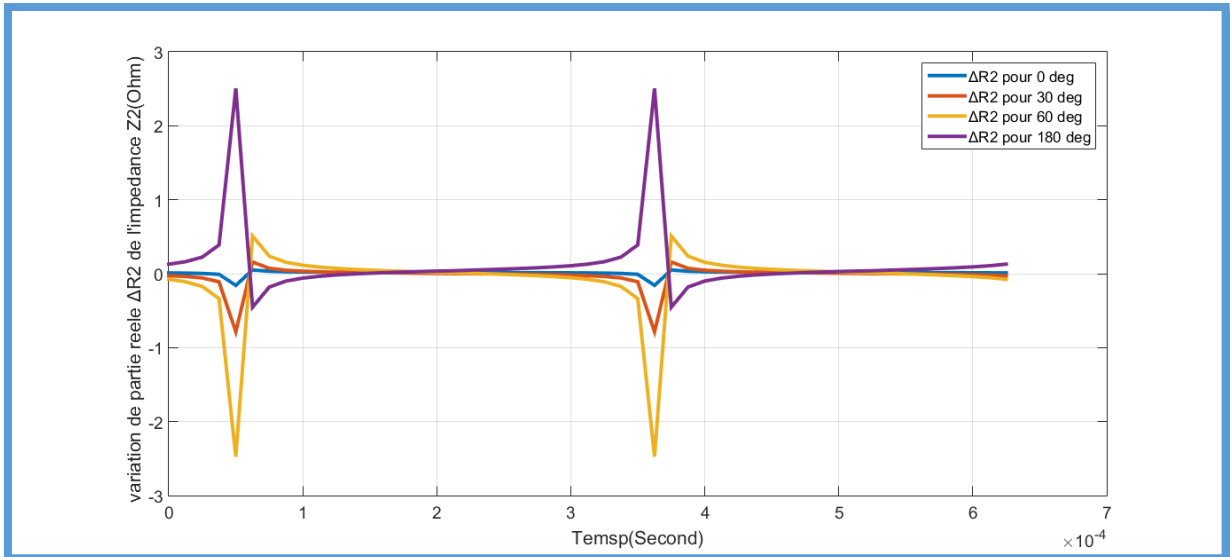


Figure III. 19 Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 2.

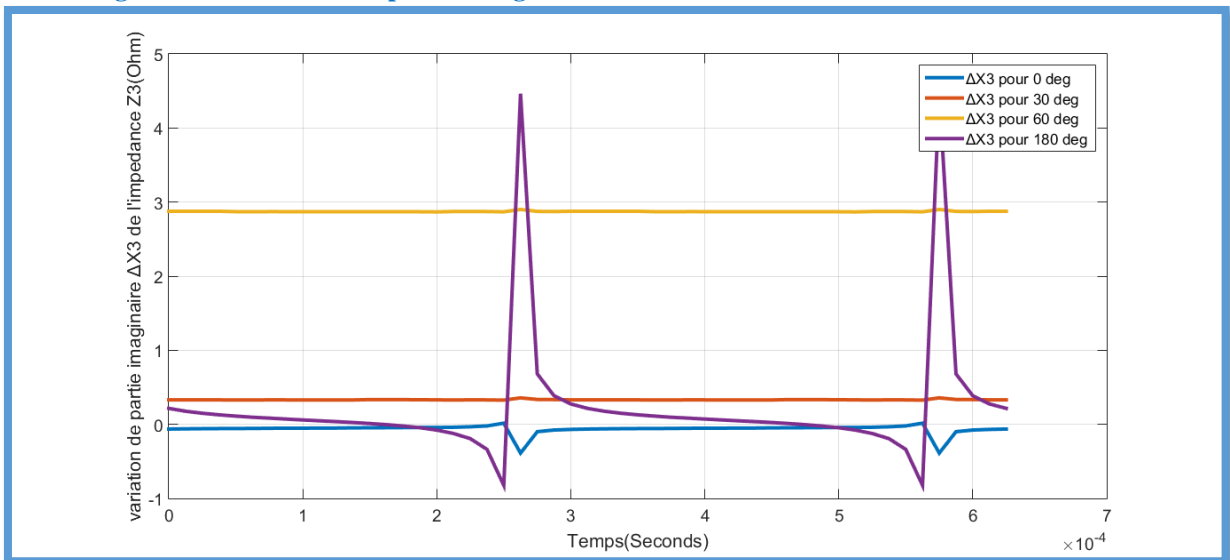


Figure III. 20 Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 3.

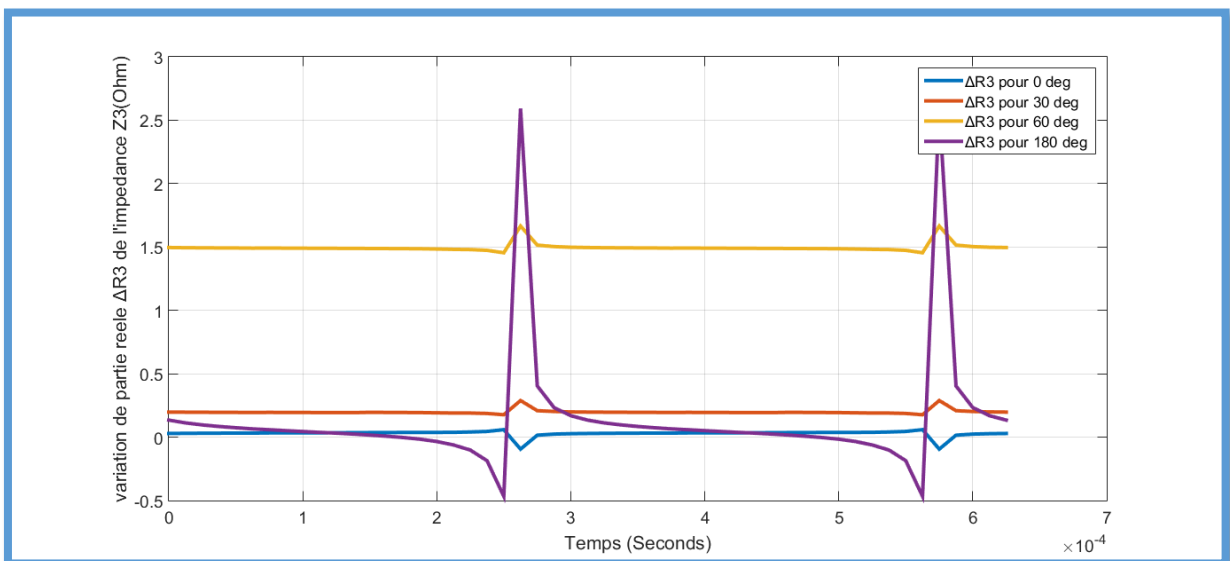


Figure III. 21 Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 3.

D'après les Figures (III. 16-21), il apparait nettement que la sensibilité de détection de la bobine 1 est inversement proportionnel à la distance qui sépare l'axe de la bobine 1 entre 0° et 120° , mais une fois dépassée cette distance cette sensibilité diminue et devient pratiquement nulle au voisinage de la position diamétralement opposé pour la variation de réactance (Figure III.16) et reste décelable pour la variation de la résistance (Figure III.15).

Mais ce résultat n'influe pas sur la possibilité globale de détection, le défaut qui été à 180° de l'axe de la bobine 1, est plus prêt de la bobine 2 ou 3 , car il se trouve à 60° seulement de ces dernières, d'où détection du défaut avec signature de signal très claire, Figures (III.22-23) . .

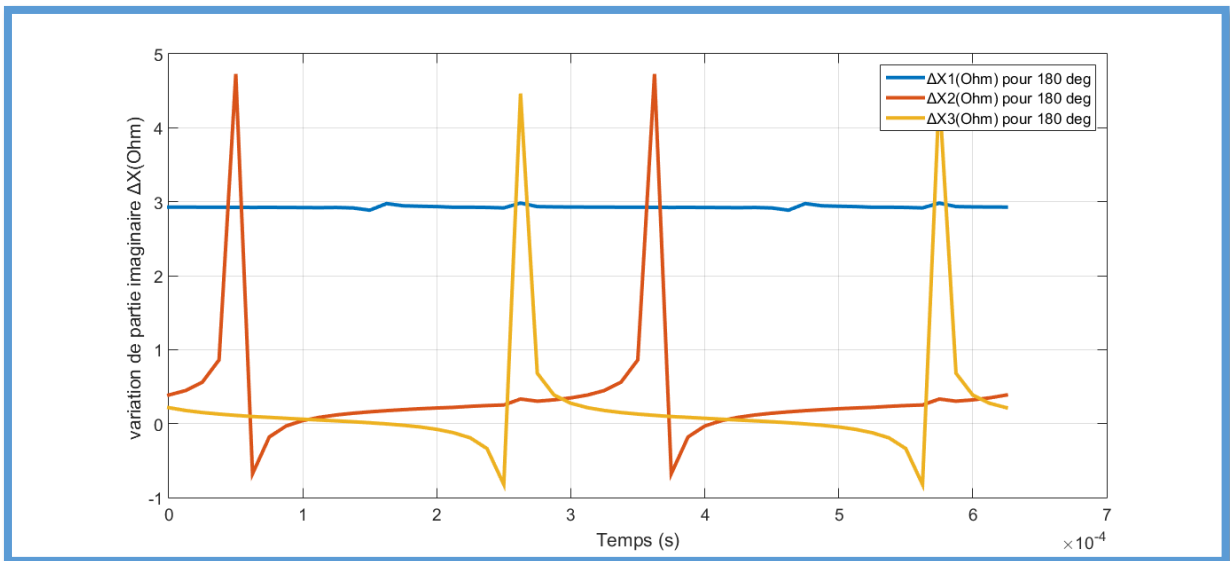


Figure III. 22 Variation de la réactance des trois bobines pour même défaut à 180° par rapport à bobine 1.

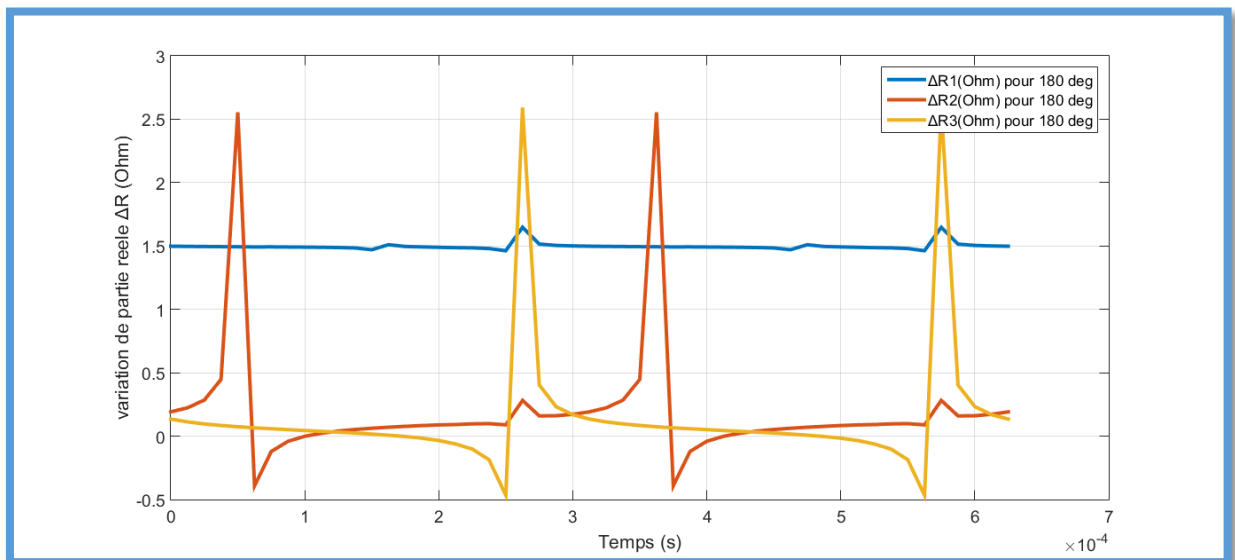


Figure III. 23 Variation de la résistance des trois bobines pour même défaut à 180° par rapport à bobine 1

III.4.3. Simulation du comportement du système tube conducteur

III.4.3.a. Modélisation géométrique et description du système proposé

Ce modèle est constitué d'un Tube en aluminium, autour de ce dernier, un système de trois bobines (1, 2 et 3) en cuivre formant la source du champ tournant et le tout entouré par un domaine d'air en forme parallélépipède.

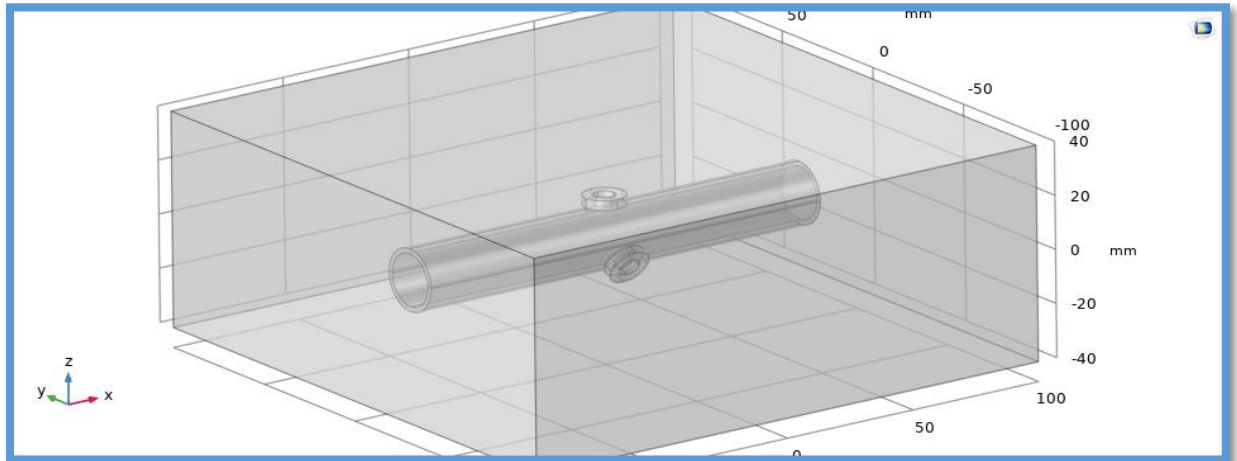


Figure III. 244 Vue de domaine d'étude

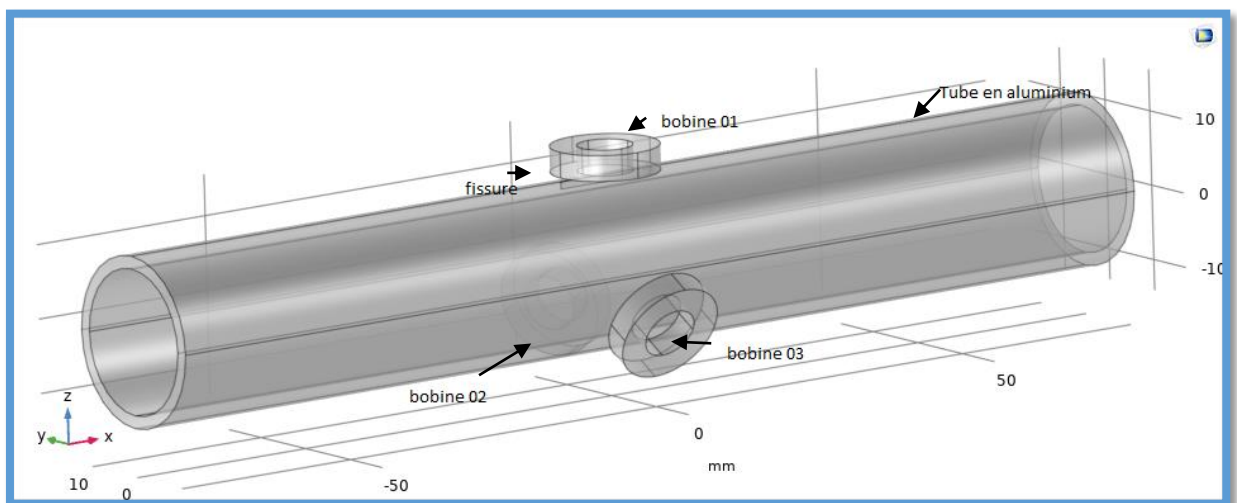


Figure III. 255 Vue de tube en aluminium, les bobines, le défaut

Le défaut est une faille qui s'étire le long du tube, nous l'avons choisi pour être étroit en largeur et pour avoir lieu en dessous de la bobine et nous avons choisi sa longueur comme étant le diamètre de la bobine afin de mieux visualiser les courants induits dans et autour de lui.

Le bloc d'air peut être caché de la vue globale de dispositif, l'air dans la nature a une conductivité nulle ($\sigma = 0$), mais dans les études comme la nôtre on doit choisir une valeur

numérique non-nulle (dans notre cas on définit $\sigma_{air} = 17[S/m]$) pour assurer une solution convergente des équations qui régissent notre dispositif.

III.4.3.b. Caractéristiques géométrique du modèle

Tableau III-2 Caractéristique de dispositif

	Le capteur	Le tube	Le défaut
Caractéristique physique	Courant d'excitation : 0.8 A Fréquence d'alimentation : 2000[Hz] Nombre de spire : 962 spires Perméabilité relative : 1	Type de matériau : Aluminium de : Perméabilité relative : 1 Conductivité électrique : $3.774 \times 10^7 \frac{S}{m}$	
Caractéristique Géométrique	Rayon interne : 3.74 [mm] Rayon externe : 7.325[mm] Hauteur : 3.46 [mm] Lift-off : 0.5[mm]	Langueur : 0.155 m Rayon interne : 0.00988 m Rayon externe : 0.01161 m	Langueur : 0.01465 m Largeur : 0.16 mm Hauteur : 1 mm

Les trois bobines sont excitées par un courant alternatif sinusoïdal triphasé déphasé ou :

$$I_1 = I_{eff} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (III.10)$$

$$I_2 = I_{eff} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + 2\pi/3) \quad (III.11)$$

$$I_3 = I_{eff} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + 4\pi/3) \quad (III.12)$$

Où, I_1, I_2 et I_3 sont les courants d'alimentation imposés des trois bobines et $I_{eff} = 0.8$ A.

III.4.3.c. Maillage du domaine d'étude

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, Le choix de la taille des éléments conditionne fortement la précision de la solution numérique obtenue.

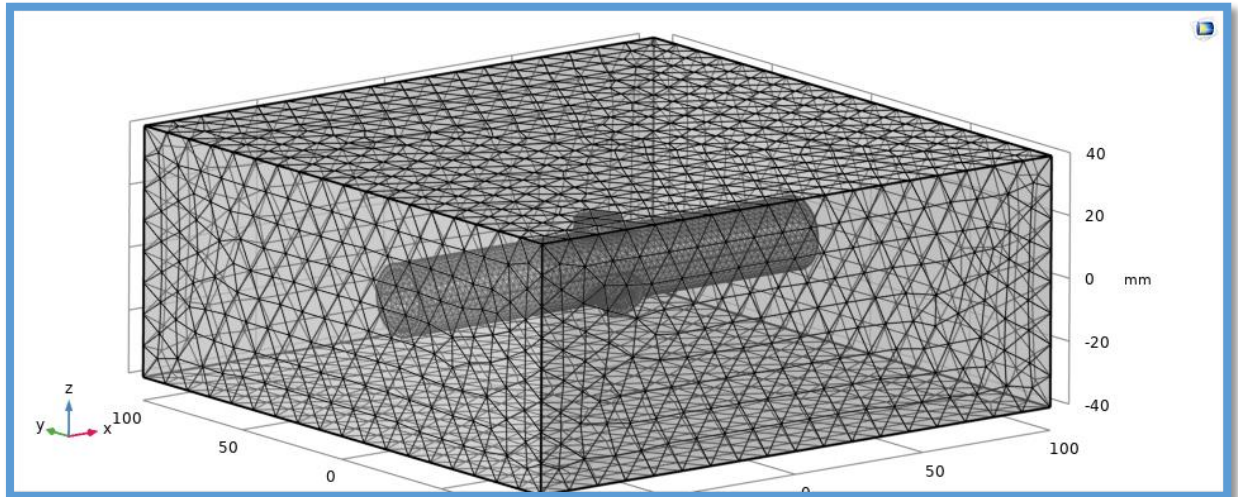


Figure III. 266 maillage de domaine d'étude

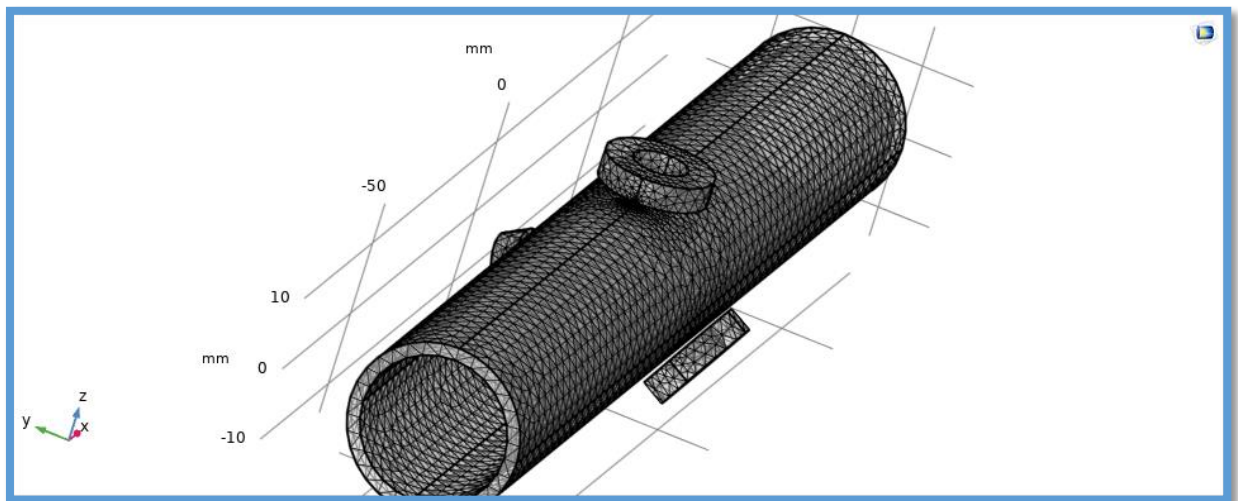


Figure III. 277 maillage des domaines de tube, bobines , défaut

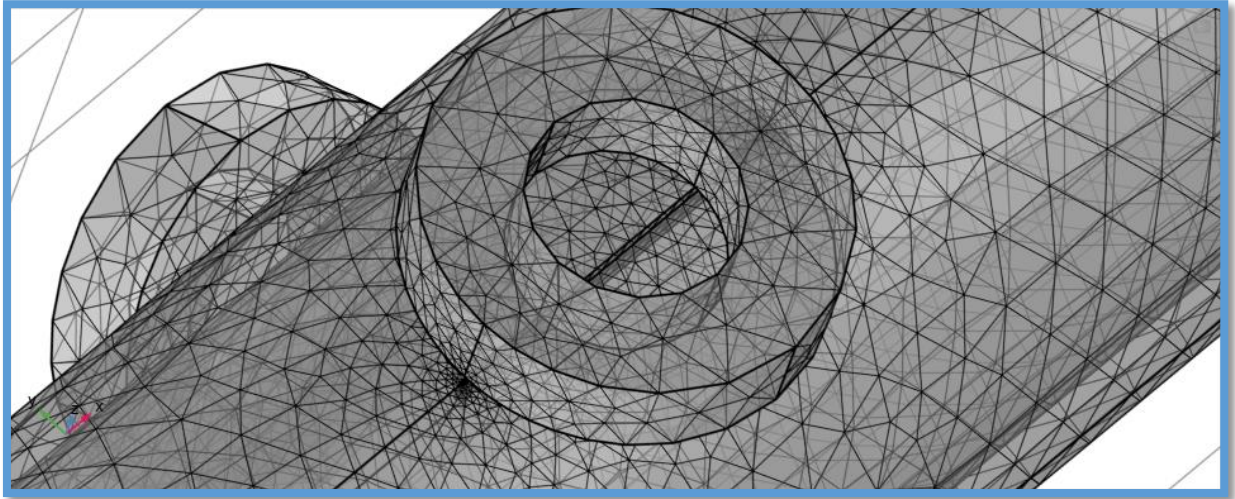


Figure III. 288 maillage de domaine de défaut

Le modèle complet est constitué de 5 domaines, le maillage complet consiste en 141276 éléments de domaine, 15760 éléments de frontière et 1307 éléments d'arête et une qualité minimale des éléments de 0.1441.

III.4.3.d. Tests de validation

Avant d'entamer la simulation du comportement du système de CND-CF par champs tournant créée par les trois bobines décalées dans l'espace et déphasées de 120° l'une de l'autre, il faut vérifier que les tensions et les courants des trois bobines sont bien décalés de 120° .

- **Vérification des courants I1, I2 et I3 sans défaut autour de tube.**

- La figure III.29 illustre bien que le système triphasé d'alimentation des trois bobines est équilibré en courants, ces derniers sont imposés car on a utilisé une source de courant comme moyen d'alimentation, à $t=0$ on a :

- $$I_1 = 0.8 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0) = 0.8(A) \quad (\text{III.13})$$

- $$I_2 = 0.8 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0 + \frac{2\pi}{3}\right) = 0.4(A) \quad (\text{III.14})$$

- $$I_3 = 0.8 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0 + 4\pi/3) = 0.4(A) \quad (\text{III.15})$$

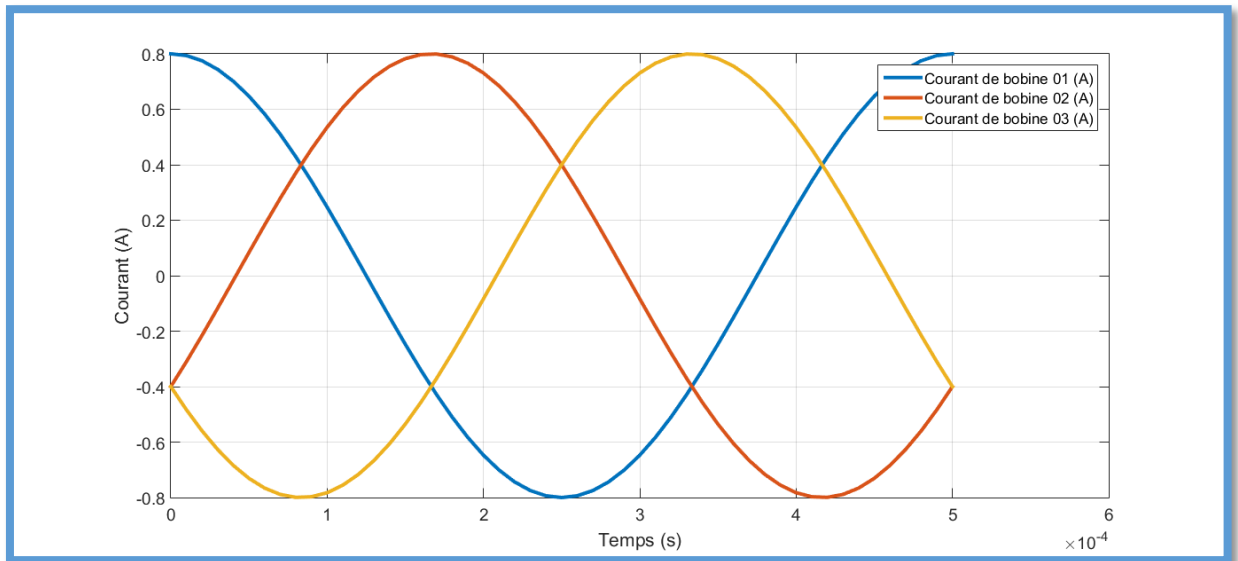


Figure III. 299 Système triphasé équilibré des courants d'alimentation I1, I2 et I3.

▪ Vérification des tensions de mesure V1, V2 et V3 sans défaut autour de tube

Pour un système sans défaut à l'intérieur de l'alésage, on doit avoir des tensions de mesure au niveau des trois bobines déphasées dans le temps et égales en amplitude, car l'impédance de la bobine n'est rien d'autre que le rapport de la valeur efficace de la tension à la valeur efficace du courant, vérifier que les valeurs de la tension des bobines sont déphasées de 120 degrés et égales en amplitude sans défaut donne un signe que notre système donne des valeurs significatives qui peuvent être interprétées car il n'y a pas de défaut dans la plaque ,cela est confirmé par la figure III.30.

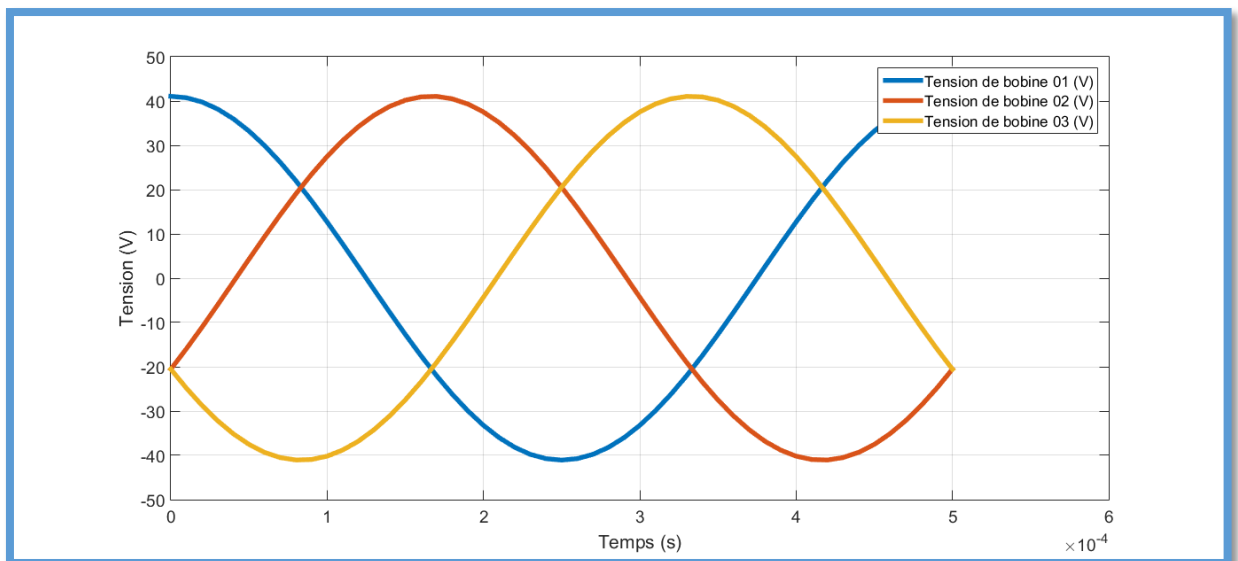


Figure III. 30 Système triphasé équilibré des tensions mesurées V1, V2 et V3.

▪ **Vérification de la détection de défaut par variation de tension.**

Etant donné que les courants sont imposés, la présence de défaut doit avoir des répercussions sur la valeur de la tension de mesure des bobines, et principalement sur celle qui proche du défaut.

Pour un défaut en face la bobine 1 Figure III.31, on peut constater que la tension au borne de cette dernière est passé, à t_0 s, de 5 V (sans défaut) à la valeur de 6 V, d'où on peut conclure que notre système a pu détecter la présence de défaut.

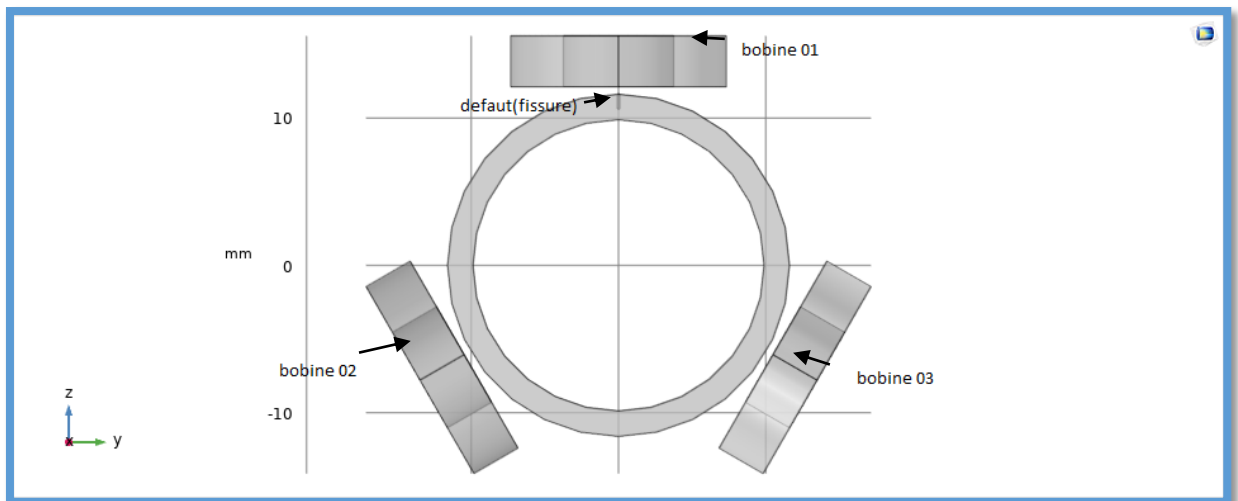


Figure III. 31 Vue de position de défaut en face de bobine 01

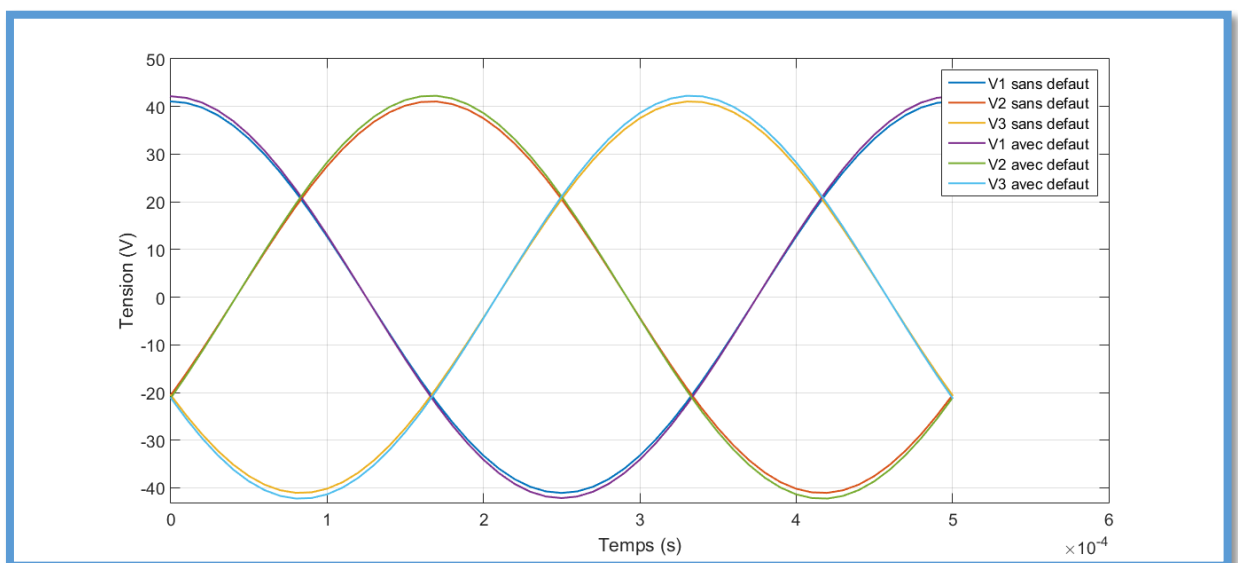


Figure III. 32 Comparaison de la tension V1, V2, V3 (défaut en face de bobine 1).

III.4.3.a. Répartition de la densité des courants induits.

On comparant le maximum de la densité des courants induits sur le volume ou sur le contour, on peut constater qu'il est passé respectivement de $0.08 \cdot 10^7$ A/m² et $3.8 \cdot 10^7$ A/m² pour le cas sans défaut (Figure III.33) à $0.16 \cdot 10^7$ A/m² et $6.34 \cdot 10^7$ A/m² pour le cas avec défaut (Figure III.34). Cela nous amène à déduire que le système de simulation est fiable car il y a variation des courants induits lors d'apparition de défaut.

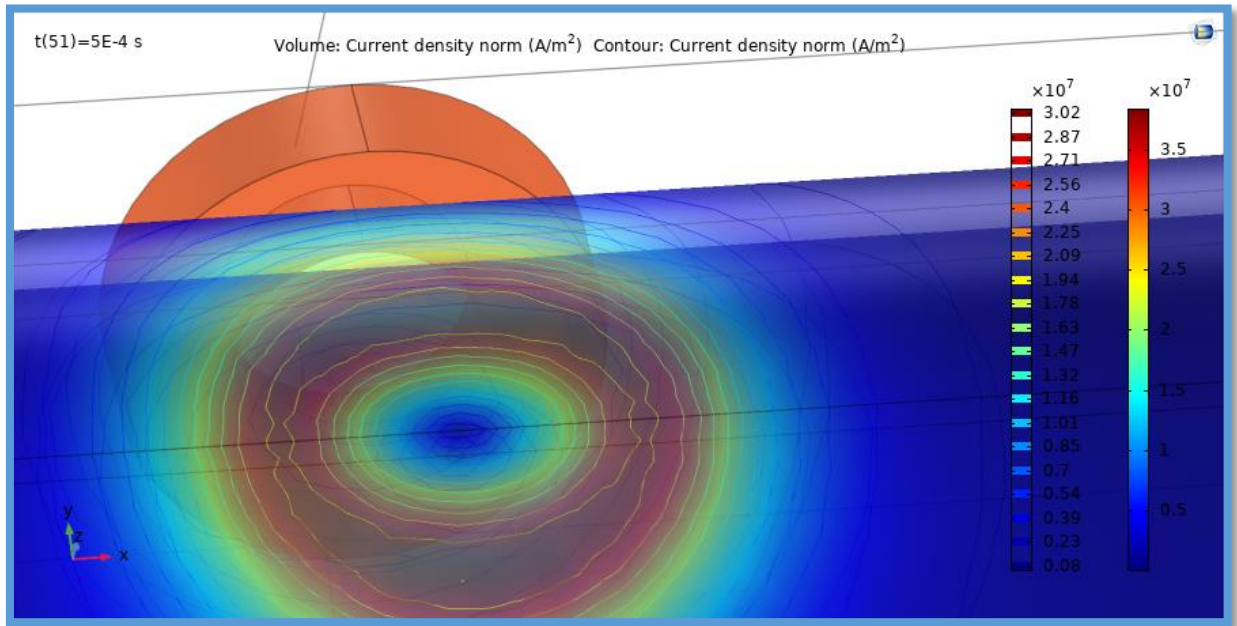


Figure III. 33 Courant induits sur contour et sur volume – cas sans défaut

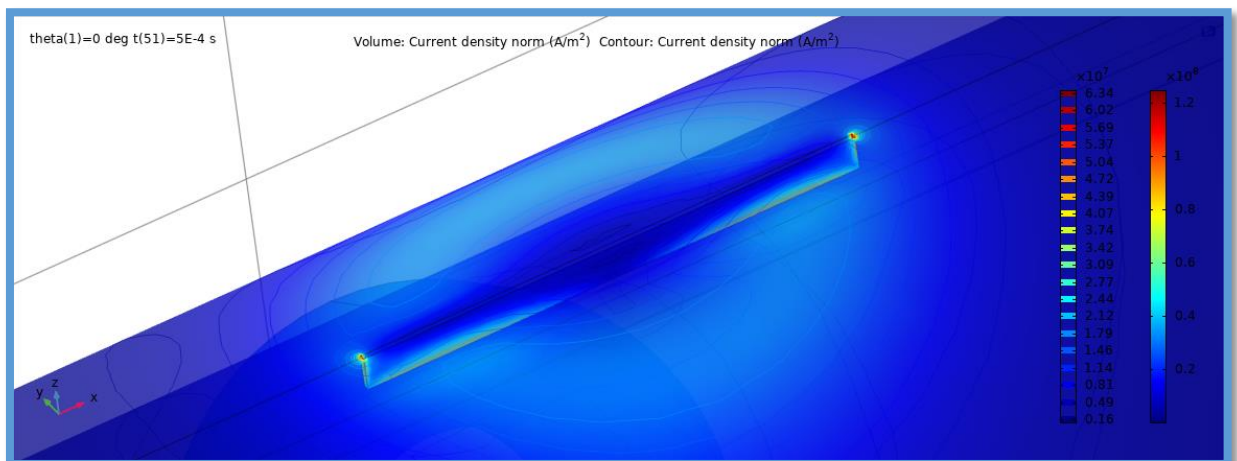


Figure III. 34 Courants induits sur contour et sur volume – cas avec défaut

Nous pouvons observer à travers les figures III.33 et III.34 que la répartition de la densité des courants induits s'affaiblit avec la présence du défaut, car il y a déformation de la trajectoire des courants induits qui vont se répartir à l'intérieur de ce dernier.

III.4.3.b. Variation de l'impédance des capteurs.

- **Variation des impédances en par rapport au positon angulaire de défaut**

Maintenant nous tournons notre attention vers le signal généré par les bobines elles-mêmes, par conséquent nous désirons connaître les effets du défaut sur le signal de l'impédance de chaque bobine lorsque le défaut balaie la circonférence (Figure III.35) d'une certaine surface extérieure du tube dans lequel les bobines sont positionnées.

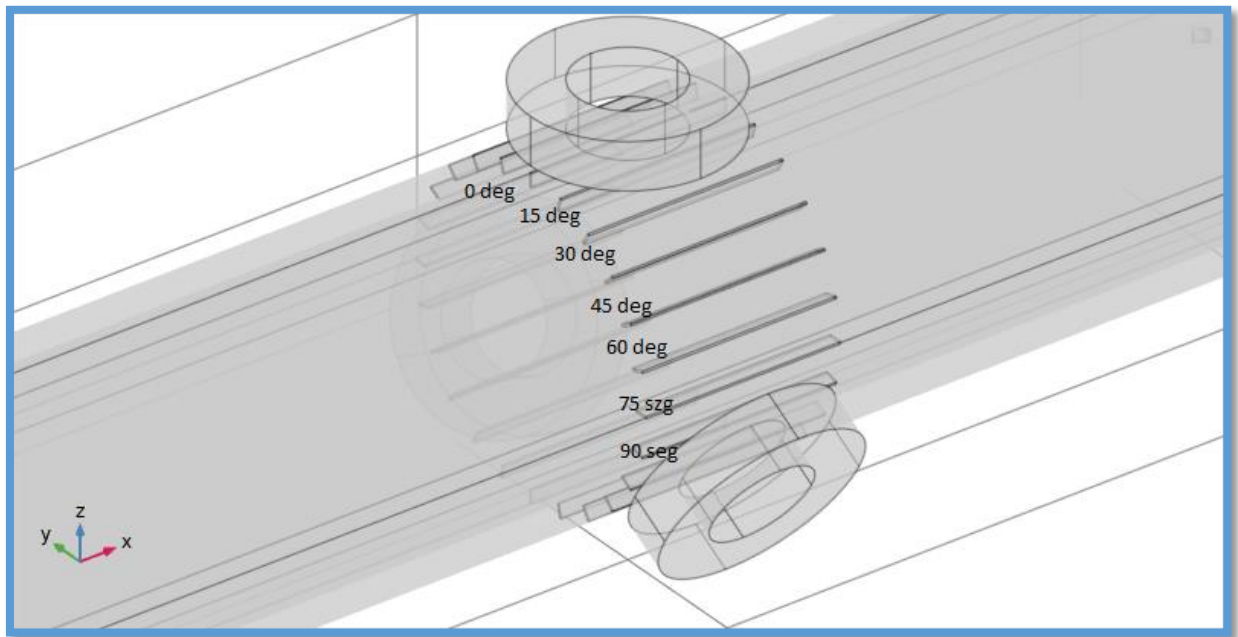


Figure III. 35 les positions angulaires de défaut autour de tube

Les figures qui vont suivre Figure III.36-III.37 représentent la variation des impédances des bobines (1,2et3) par rapport à la position angulaire du défaut autour de la circonférence du tube

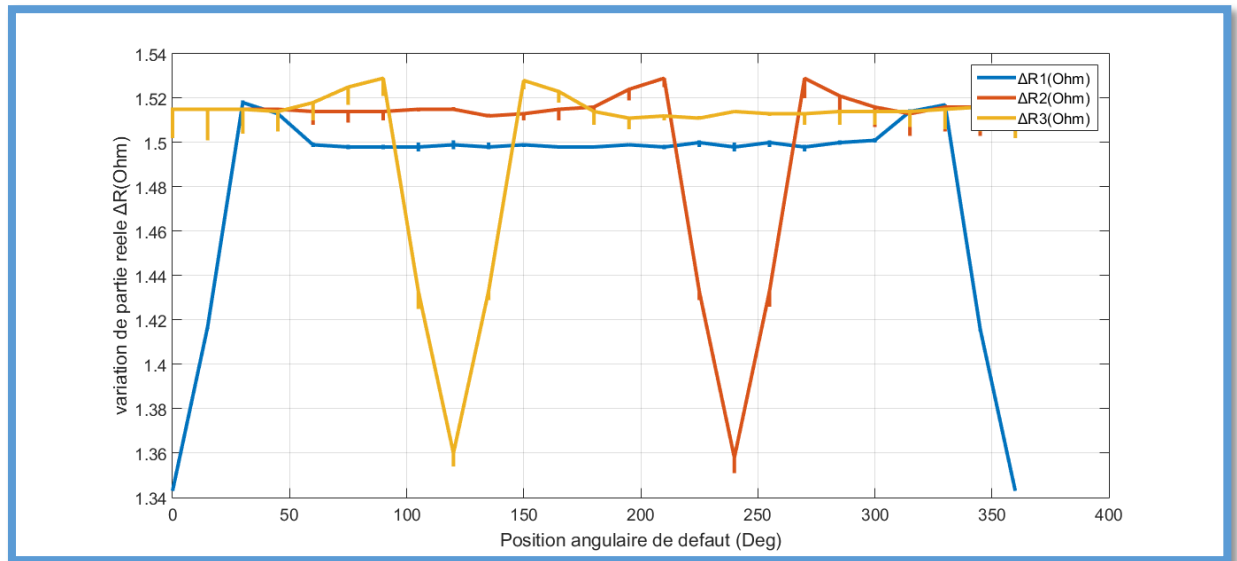


Figure III. 36 variation de la partie réelle ΔR (Ohm) des impédances des bobines 1,2 et3 en fonction de position angulaire de défaut

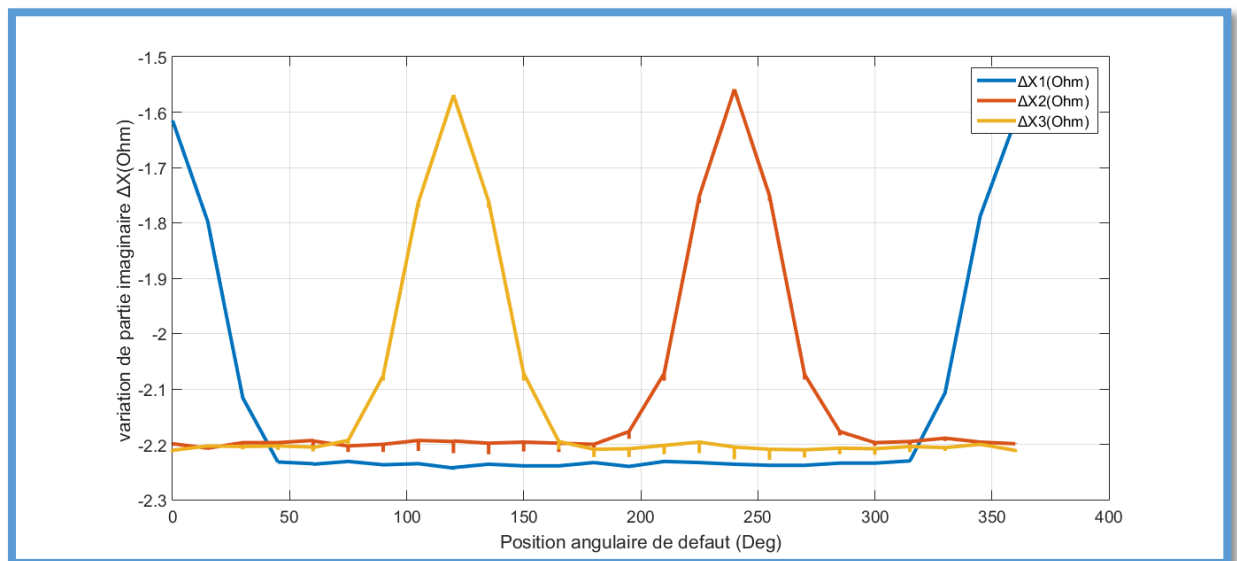


Figure III. 37 variation de la partie imaginaire ΔX (Ohm) des impédances des bobines 1,2 et 3 en fonction de position angulaire de défaut

on remarque que dès que le défaut commence à se rapprocher de la région opposée à une bobine spécifique, la partie réelle ΔR de l'impédance de cette bobine commence à diminuer et la partie imaginaire ΔX commence à augmenter inversement, la partie réelle ΔR atteint son minimum lorsque le défaut est directement au-dessous du centre de la bobine, c'est-à-dire lorsque la partie imaginaire ΔX atteint son maximum, après que le défaut s'est éloigné de la région opposée à la bobine, la partie réelle ΔR recommence à augmenter et la partie imaginaire ΔX commence à diminuer pour revenir à leurs valeurs lorsque face à la région saine du tube.

▪ Effet de la position angulaire sur la variation de l'impédance.

Dans cette partie on visualise les variations d'impédances des bobines par rapport au temps pour des différents positons angulaires de défaut.

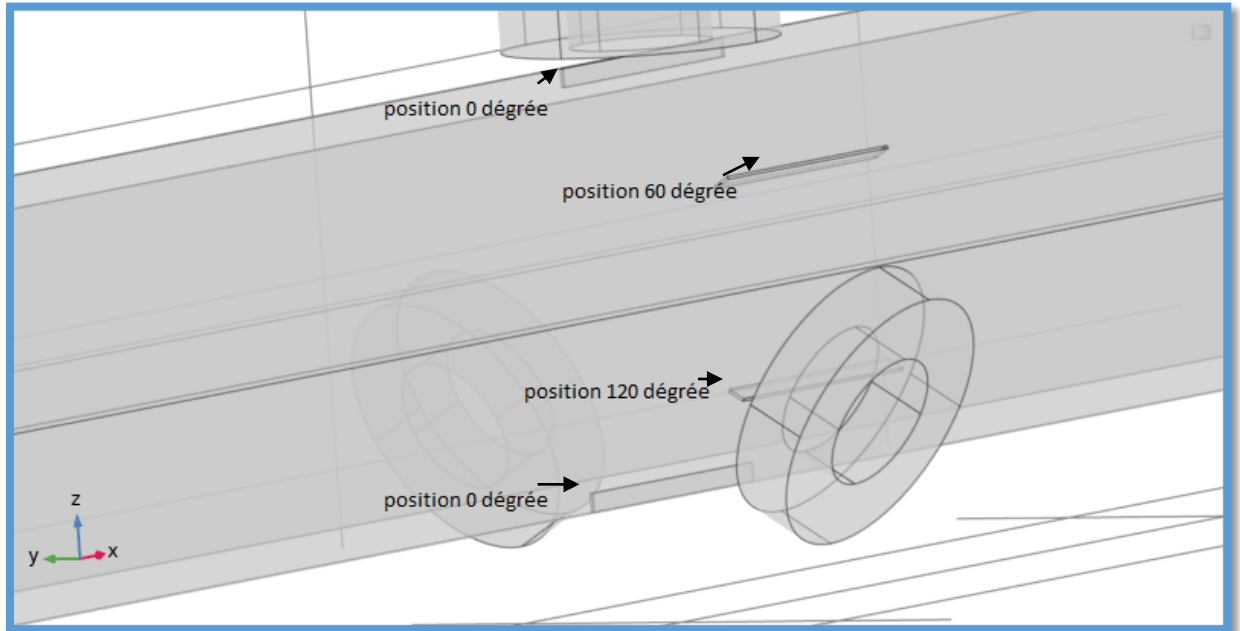


Figure III. 38 les positions angulaires de défaut

Les figures suivantes représentent l'effet de la position angulaire sur le signal d'impédance.

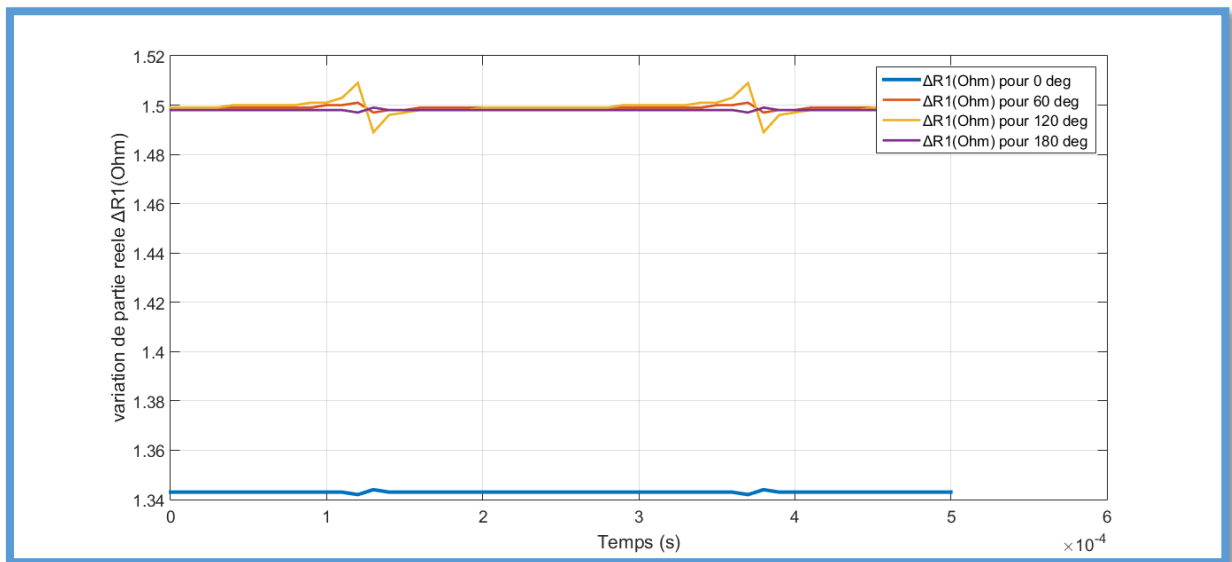


Figure III. 39 Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 1.

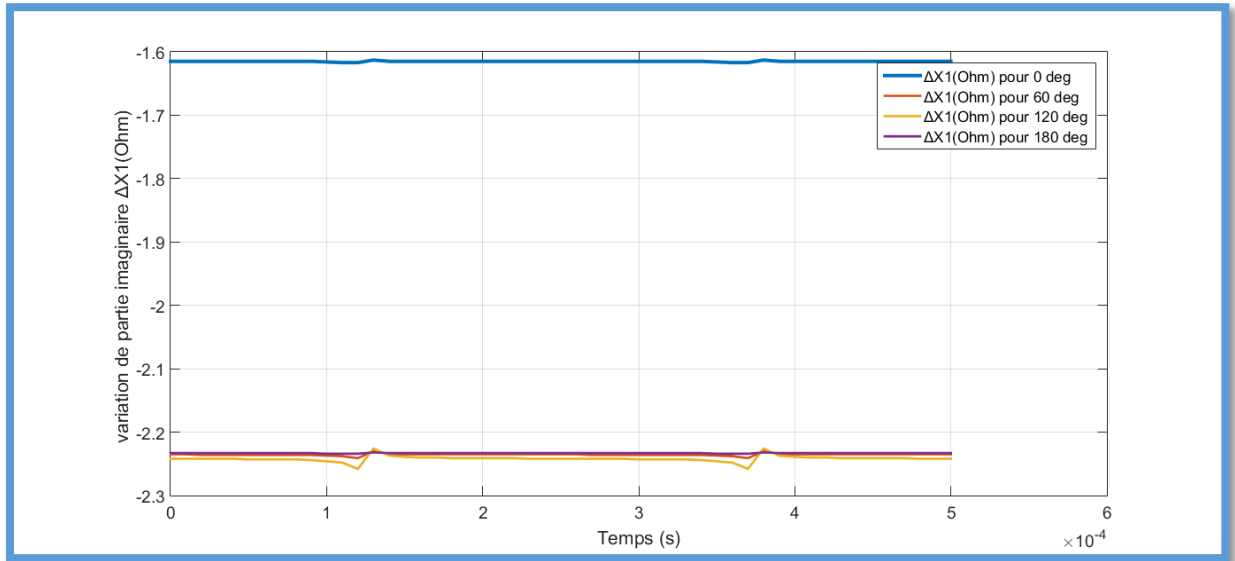


Figure III. 40 Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 1.

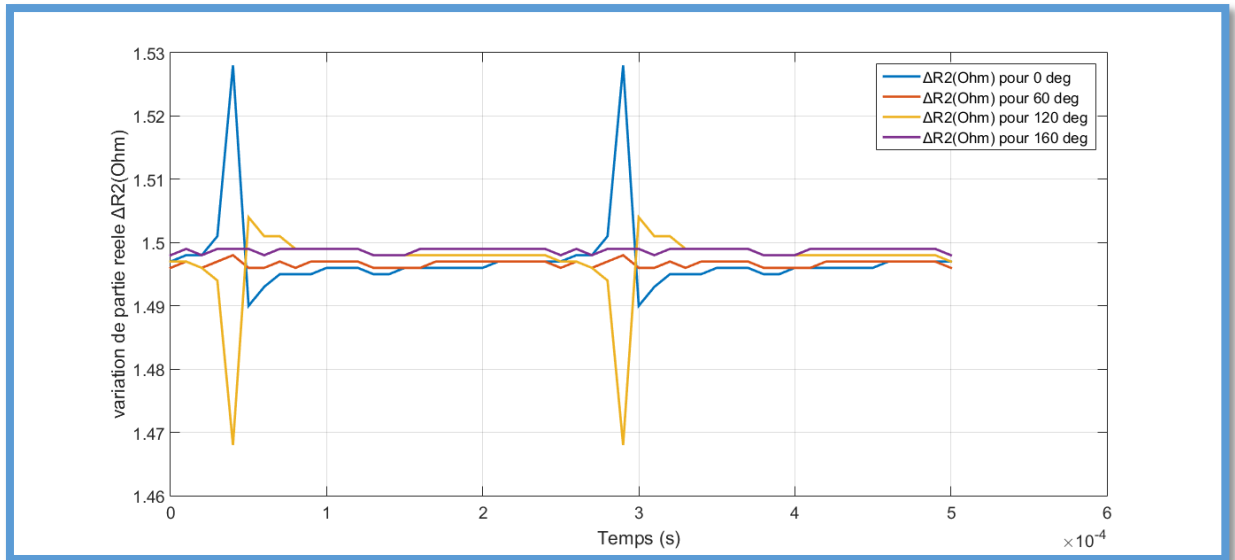


Figure III. 41 Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 2.

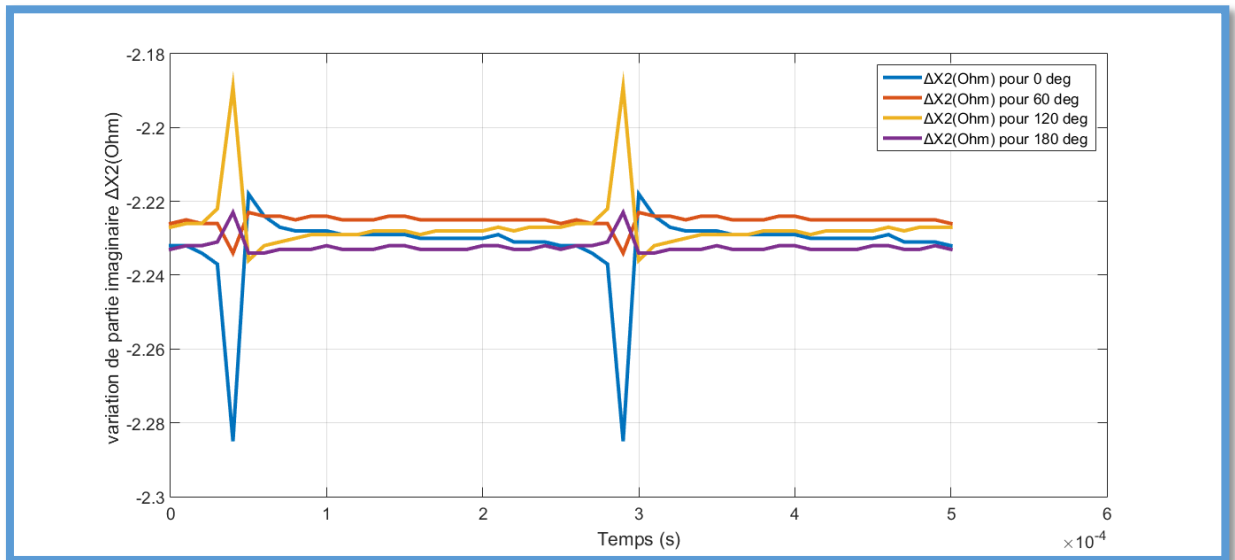


Figure III. 42 Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 2.

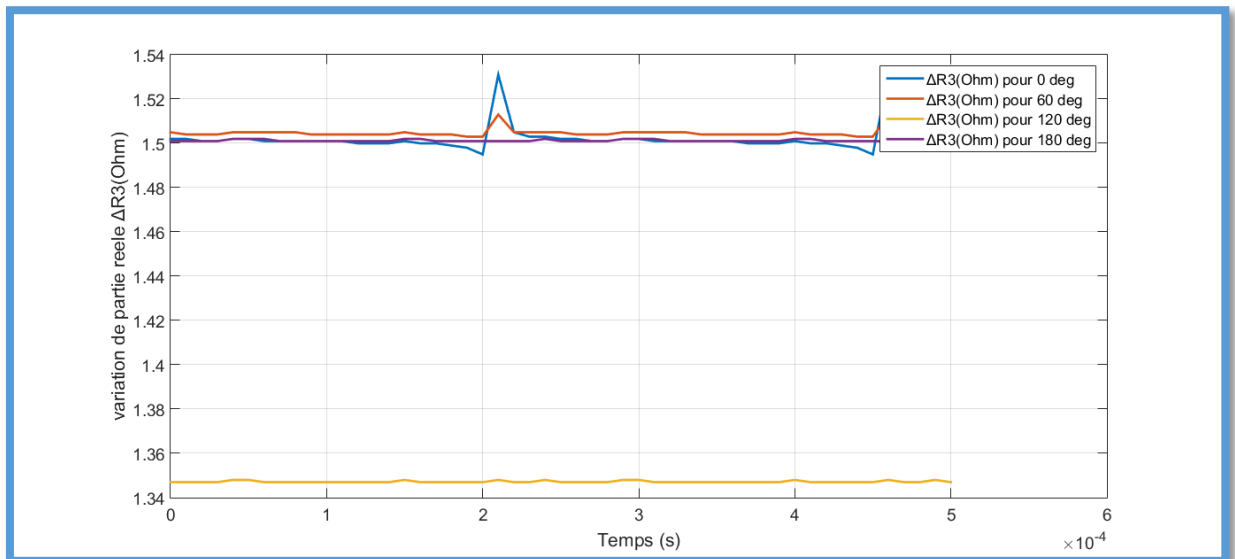


Figure III. 43 Effet de la position angulaire sur la variation de la résistance de la bobine 3.

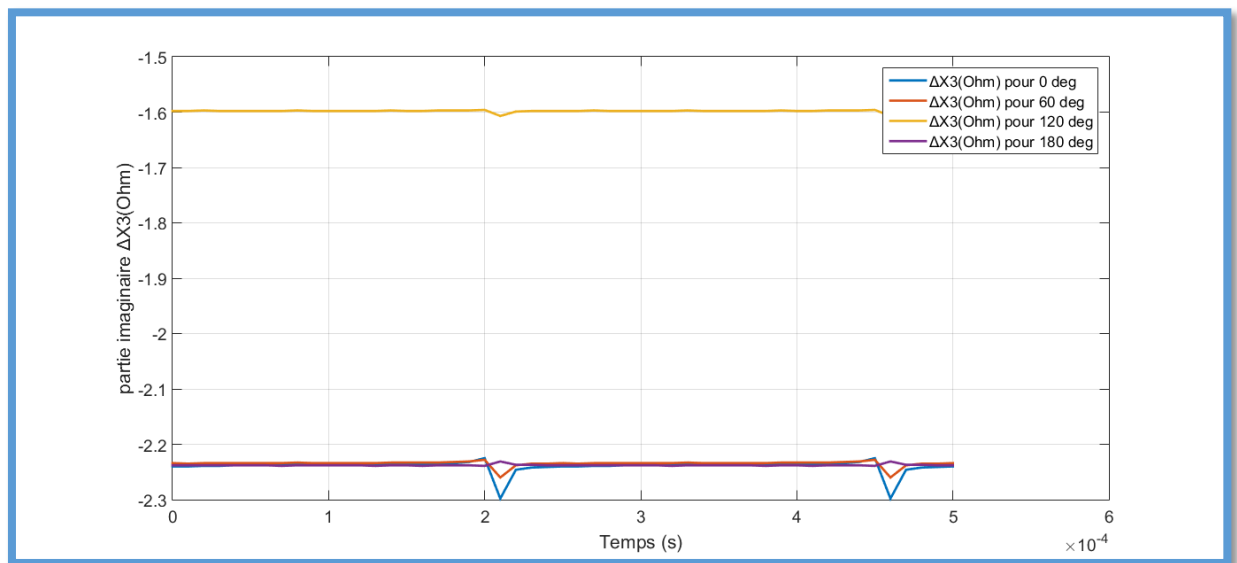


Figure III. 44 Effet de la position angulaire sur la variation de la réactance de la bobine 3.

D'après les Figures il apparaît nettement que la sensibilité de détection de la bobine 1 est inversement proportionnel à la distance qui sépare l'axe de la bobine 1 entre 0° et 120° , mais une fois dépassée cette distance cette sensibilité diminue et devient pratiquement nulle au voisinage de la position diamétralement opposé pour la variation de réactance et reste décelable pour la variation de la résistance

III.5. Conclusion:

La technique des courants de Foucault à champ magnétique rotatif est une technique prometteuse pour l'inspection des tubes ou plaque avec alésage. Elle permet de détecter des défauts circonférentielle sans avoir recours au déplacement mécanique des capteurs. Cette méthode nous permet d'obtenir plus d'informations sur le défaut.

De plus avec cette technique circonférentielle complète l'inspection est possible sans rotation physique de la sonde.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le CND consiste en la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation de paramètres physiques ou géométriques ou la détection des défauts apparaissant dans des structures industrielles diverses, ce qui est un enjeu dont dépend notamment la sécurité. Parmi les différentes méthodes de CND, celle des courants de Foucault est très employée pour le contrôle de milieux conducteurs. Celle dite des courants de Foucault (CF) est très répandue en raison de sa facilité de mise en œuvre, de son faible coût et de son caractère non polluant. Elle est réservée aux pièces électriquement conductrices dans lesquelles elle permet de détecter la présence de fissures, de mesurer une épaisseur... La nécessité de contrôler des pièces de géométries de plus en plus complexes tout en améliorant les performances de contrôle conduit à développer des capteurs souples destinés à s'adapter à la surface de la pièce contrôlée afin de minimiser la distance capteur-pièce (lift-off). [4]

Le CND par CF fait toujours l'objet d'études et de développements visant, par exemple, à l'augmentation de la rapidité d'un contrôle ou bien à l'amélioration de la sensibilité des capteurs CF. Ces développements s'appuient sur les outils informatiques et plus particulièrement sur les outils de simulation des phénomènes électromagnétiques qui permettent d'améliorer la compréhension des signaux mesurés ou encore d'optimiser la conception de capteurs CF. [5]

Dans ce travail, une recherche bibliographique sur les différentes techniques du CND les plus utilisées a été élaborée en premier lieu.

Nous avons présenté par la suite un aperçu sur les différents capteurs utilisés en CND-CF ainsi que leurs méthode de mesure et modes d'excitation, puis nous avons abordé le modèle mathématique et numérique qu'on va utiliser pour modéliser le dispositif, basé sur la méthode des éléments finis. On a commencé par la représentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans le dispositif électrique qui sont les équations de Maxwell.

Dans la troisième partie, une contribution pour l'étude du CND-CF. Par champ tournant a été proposée. Cette nouvelle technique contribuer au contrôle non destructif de défauts dans les pièces conductrices comportant des alésages ou pièce cylindriques tubulaires pour l'inspection des défauts internes soit surfacique sans procéder au déplacement des capteurs.

Après implémentation du système de CND-CF par champ tournant sous COMSOL Multiphysics, cela nous a permis de simuler la détection par champ tournant d'une part, et

d'autre part, nous avons pu mettre en évidence l'effet du déplacement angulaire sur la circonférence interne de l'alésage et sur la circonférence externe du tube en aluminium

En effet:

- *La variation d'impédance du capteur est importante lorsque le défaut est positionné entre 0° et 120° ;*
- *La détection du défaut par une bobine donnée devient moins sensible lorsque le défaut est positionné à 180° , c'est à diamétralement opposé ;*
- *Le dernier constat n'est pas très influent car le manque de sensibilité d'un capteur qui se trouve à 180° d'un défaut est compensé par les deux autres capteurs qui se trouvent à 60° du défaut en question, d'où existence toujours de possibilité de défaut.*

Bibliographie

- [1] A. Abdou, «Contrôle non Destructif (CND) :Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif à Courant de Foucault,» Université de Batna 2 , Batna, 2018.
- [2] IAEA, Eddy Current Testing at Level 2:, 2011.
- [3] B. Oussama, «Contrôle non destructif par courants de Foucault,» Université de Msila, 2012.
- [4] A. O. SAFER, «Etude et modélisation de capteur à courant de Foucault pour le controle non destructif,» Université de M'sila, 2014.
- [5] B. Delabre, «Développement de capteurs flexibles à courants de foucault : applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique,» Université Paris Saclay, 2016.
- [6] A. BENHALIMA et A. SAOUDI, «Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques),» Université de M'sila, 2018.
- [7] N. Bowler, «Eddy-Current Nondestructive Evaluation,» Springer Series in Measurement Science and Technology, 2019.
- [8] Y. Choua, «Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault,» Université Paris Sud Paris XI, 2010.
- [9] H. Meziane, «ETUDE ET CARACTERISATION DES FISSURES FINES EN EVALUATION NON DESTRUCTIVE,» UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.
- [10] K. MOHAMED, «Etude et Modélisation de Capteur à Courant de Foucault pour le Controle Non Destructifs CND,» Université de Constantine, 2007.
- [11] N. M. Nathan Ida, «Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation,» Springer International Publishing, 2019.
- [12] L. Oukhellou, «Paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif. Application à la reconnaissance des défaut de rails par courant de Foucault,» l'Université Paris XI Orsay, 2004.

- [13] B. RAMDANE, «Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de,» UNIVERSITE DE NANTES, 2009.
- [14] H. Zaidi, «Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courant de Foucault : application aux capteurs souples,» UNIVERSITE PARIS-SUD, 2013.
- [15] C. Zorni, «Contrôle non destructif par courants de Foucault de,» L'UNIVERSITÉ PARIS-SUD 11, 2012.
- [16] N. BENHADDA, «Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND),» Université de Batna 2 , Batna, 2015.

