

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N° :/2024

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE: Electrotechnique

SPECIALITE : Electrotechnique Industrielle

Thème

**Influence des paramètres géométriques et physiques dans la
détection des défauts par la méthode du contrôle non destructif**

Présenté par : M^{elle} Messaoudene Bochra
M^{elle} Berkas Kaouter

Encadrée par : M^{me} D. Sedira Ep Amiour

Date de soutenance : 23/06/ 2024

Jury de Soutenance

Président : M ^{me} I. Boutana Ep Hafsaoui	Grade :	MCA	Univ MSB Jijel
Encadreur : M ^{me} D. Sedira Ep Amiour	Grade :	MCA	Univ MSB Jijel
Examineur : M ^{me} N. Ferkha Ep Hacib	Grade:	MCB	Univ MSB Jijel

Promotion : 2023 /2024

Remerciements

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, Nous tenons à remercier **DIEU LE TOUT PUISSANT** de nous avoir guider dans la réalisation de ce travail*

*Nous profitons aussi de cette occasion pour adresser nos sincères remerciements à nôtre encadreur **Dr: D. Sedira-Amiour** qui nous a fait bénéficier de ses conseils et de ses compétences, soulignant ainsi l'intérêt constant qu'elle a porté à notre travail. Nous la remercions pour la confiance qu'elle nous a témoignée, sa pédagogie, sa patience, sa disponibilité et son dévouement.*

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury pour avoir accepté de participer à l'évaluation de notre travail.

*On tient à remercier l'ensemble du cadre administratif du département d'électrotechnique et les enseignants de la spécialité **Electrotechnique Industrielle**.*

Notre pensée va aussi à toutes les personnes que nous avons rencontré durant ces derniers mois, pour leur sympathie et leur aide.

*On tient à remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, ainsi que toute la promotion **Electrotechnique industrielle**.*

Pour finir, merci du fond du cœur à nos familles.

Dédicaces

DÉDICACE

Au nom de Dieu le clément et le miséricordieux

Je dédie ce modeste travail à :

♥ *Mes chers parents, que dieu les gardent.*

♥ *Mon frère expatrié Lokman et mon petit frère
Mohammed.*

♥ *Mes sœurs, Hana et Fatima.*

♥ *Mon fiancé Zakaria Ferkha pour son
soutien.*

♥ *Mes cousines Wafa, Nihed et Khadija.*

♥ *Mes amis, Madjda, Maïssa,
Amina, Nessrine, Chaïma,
Darine et Amina.*

Berhas Kaouter

DÉDICACE

Au nom de Dieu le clément et le miséricordieux

Je dédie ce modeste travail à :

- ♥ *A ma chère maman **ROUIDI YASSMINA** aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés et le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.*
- ♥ *A mon cher papa pour son amour et son dévouement.*
- ♥ *Mon cher frère **BILAL** merci énormément pour ton soutien plus que précieux, merci pour ton grand cœur toutes vos qualités qui seraient trop longues à énumérer. Ma vie ne serait pas aussi magique sans ta présence et ton amour. Je t'aime de tout mon cœur.*
- ♥ *Ma grand-mère **FADILA** merci pour votre prière, que dieu vos protège pour nous.*
- ♥ *A l'animal le plus chère que j'ai mon chat.*
- ♥ *A tous les membres de ma famille sans exceptions.*
- ♥ *A mes amies merci pour vos conseils, aides et encouragements.*
- ♥ *Pour finir, a tous que j'aime et qui m'aiment, je dédie ce mémoire.*

Messaoudenc Bohra

Tables des matières

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif (CND)

I.1 Introduction..... 4

I.2 Historique 4

I.3 Définition et intérêt du contrôle non destructif (CND) 4

I.4 Principe général des techniques de CND..... 5

I.5 Différentes techniques du contrôle non destructif 6

 I.5.1 Contrôle visuel..... 6

 I.5.1.1 Principe du contrôle visuel..... 6

 I.5.1.2 Matériel du contrôle visuel 7

 I.5.1.3 Avantages..... 8

 I.5.1.4 Inconvénients 8

 I.5.2 Contrôle par ressuage..... 9

 I.5.2.1 Principe de ressuage..... 9

 I.5.2.2 Domaine d’application..... 11

 I.5.2.3 Avantages et inconvénients..... 12

 I.5.3 Contrôle à flux de fuite magnétique 12

 I.5.3.1 Principe..... 12

 I.5.3.2 Méthode de magnétisation 13

 I.5.3.3 Avantages..... 14

 I.5.3.4 Inconvénients 14

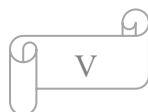
 I.5.4 Contrôle par radiographies..... 14

 I.5.4.1 Principe..... 15

 I.5.4.2 Domaine d’application..... 15

 I.5.4.3 Avantages..... 16

 I.5.4.4 Inconvénients 16



I.5.5 Inspection par Thermographie infrarouge	16
I.5.5.1 Principe.....	16
I.5.5.2 Matériel utilisé	17
I.5.5.3 Domaine d’application.....	17
I.5.5.4 Avantages.....	18
I.5.5.5 Inconvénients	18
I.5.6 Procédés à ultrasons.....	18
I.5.6.1 Principe.....	19
I.5.6.2 Domaine d’application.....	19
I.5.6.3 Avantages.....	19
I.5.6.4 Inconvénients	19
I.5.7 Contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF).....	20
I.5.7.1 Historique.....	20
I.5.7.2 Principe.....	20
I.5.7.3 Objectifs du CND-CF	22
I.5.7.4 Domaines d’application	22
I.5.7.5 Avantages.....	22
I.5.7.6 Inconvénients	23
I.5.7.7 Propriétés affectant la distribution des courants de Foucault	23
I.5.7.8 Classification des capteurs	24
I.5.7.9 Types de défauts.....	29
I.5.7.10 Fréquence et effet de peau	30
I.6 Conclusion	31

Chapitre II : Modélisation d’un capteur à courants de Foucault

II.1 Introduction	32
II.2 Lois générales de l’électromagnétisme	33
II.2.1 Théorème d’Ampère.....	33
II.2.2 Théorème de Gauss	33

II.2.3 Loi de Faraday	34
II.2.4 Loi de Lenz.....	34
II.2.5 Conservation du flux magnétique.....	34
II.2.6 Equations de Maxwell	35
II.3 Relation de passage du champ électromagnétique	37
II.3.1 Champ électrique.....	38
II.3.1.1 Composante normale	38
II.3.1.2 Composante tangentielle.....	39
II.3.2 Champ magnétique	39
II.3.2.1 Composante normale	39
II.3.2.2 Composante tangentielle.....	40
II.4 Modélisation d'un capteur à courant de Foucault	40
II.4.1 Description	40
II.4.2 Equation de Maxwell dans le régime quasi-stationnaire	41
II.4.3 Modélisation en potentiel vecteur A.....	41
II.4.4 Modélisation bidimensionnelle	43
II.4.5 Condition aux limites	43
II.5 Méthodes de résolution	44
II.5.1 Méthodes analytiques	44
II.5.1.1 Modèle mathématique	44
II.5.1.2 Formulation.....	44
II.5.1.3 Types de résolution analytiques.....	45
II.5.2 Méthodes numériques.....	45
II.5.2.1 Méthode des différences finies	45
II.5.2.2 Méthodes d'approximation intégrales et variationnelles	46
II.5.2.3 Méthode des éléments finis	46
II.6 Conclusion.....	47

Chapitre III : Résultats de simulation d'un capteur à courants de Foucault

III.1 Introduction	48
III.2 Comsol multiphysics.....	48
III.2.1 Définition	48
III.2.2 Historique	48
III.2.3 Domaine d'application	49
III.3 Description du dispositif de CND-CF.....	49
III.3.1 Présentation	49
III.3.2 Dimensions et propriétés physiques.....	50
III.4 Modélisation du capteur.....	51
III.5 Maillage et géométrie du dispositif.....	51
III.5.1 Cas d'une plaque sans défaut	51
III.5.2 Cas d'une plaque avec défaut.....	52
III.6 Résultats de simulation	54
III.6.1 Expression de la différence d'impédance	54
III.6.2 Variation des propriétés physiques	55
III.6.2.1 Variation de la fréquence	56
III.6.2.2 Variation de la conductivité	58
III.6.3 Variation des propriétés géométriques.....	65
III.6.3.1 Variation du Lift-off.....	65
III.6.3.2 Variation de la position du défaut	67
III.7 Conclusion	73
Conclusion générale	74

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

Figure I.1: Exemple du contrôle non destructif	5
Figure I.2: Principe général des techniques de CND.....	6
Figure I.3: Trois phases essentielles.....	7
Figure I.4: Exemples du contrôle visuel.....	7
Figure I.5: Lampe torche UV.....	7
Figure I.6: Boroscope.....	8
Figure I.7: Endoscope.....	8
Figure I.8: Révélation de fissures par ressuage.....	9
Figure I.9: Nettoyage par pulvérisation d'un solvant.....	9
Figure I.10: Application du pénétrant à la surface à examiner.....	10
Figure I.11: Enlèvement de l'excès du pénétrant de la surface.....	10
Figure I.12: Application du révélateur.....	11
Figure I.13: Exposition de la surface à examiner à la lumière blanche.....	11
Figure I.14: Principe du contrôle par magnétoscopie.....	13
Figure I.15: Schéma de la magnétisation par courant d'injection.....	13
Figure I.16: Electro-aimant portable.....	14
Figure I.17: Schéma de principe du contrôle radiographique.....	15
Figure I.18 : Principe de la thermographie.....	17
Figure I.19: Pièce contrôlée par la thermographie.....	18
Figure I.20: CND par Ultrason.....	19
Figure I.21: Principe de la méthode des courants de Foucault.....	21
Figure I.22: Objectif du CND par CF.....	22
Figure I.23: Critères de classification des capteurs.....	24
Figure I.24: Sonde interne.....	25
Figure I.25: Sonde encerclante.....	25
Figure I.26: Bobine ponctuelle (Palpeur).....	25
Figure I.27: Bobine plate.....	26
Figure I.28: Sonde interne tournante.....	26
Figure I.29: Capteur à double fonction.....	27
Figure I.30: Capteur à fonctions séparée.....	27
Figure I.31: Capteur absolu.....	27

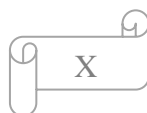


Figure I .32: Capteur absolu en mode compensé.....	28
Figure I .33: Capteur en mode différentiel.....	28
Figure I .34: Perturbation du signal d'alimentation.....	29
Figure I .35: Profondeur de pénétration.....	31
Chapitre II : Modélisation d'un capteur à courants de Foucault	
Figure II.1: Surface ouverte S.....	33
Figure II.2: Surface fermée S contenant une charge totale.....	33
Figure II.3: Surface S1 et S2 s'appuyant sur le même contour Γ	35
Figure II.4: Deux demi-espaces 1 et 2 séparés par la surface S.....	38
Figure II.5: Discontinuité de E_N à la traversée d'une surface chargée.....	39
Figure II.6: Élément de surface autour du point $M \in S$	39
Figure II.7: Élément de volume autour du point $M \in S$	40
Figure II.8: Schéma descriptif d'un problème de type CND par CF.....	40
Figure II.9: Exemple de discrétisation par éléments finis.....	46
Chapitre III : Résultats de simulation d'un capteur à courants de Foucault	
Figure III.1: Structure du système « capteur-cible »	50
Figure III.2: Géométrie du système « capteur-cible »	51
Figure III.3: Maillage du système « capteur-cible »	52
Figure III.4: Géométrie du système « capteur-cible » avec défaut.....	53
Figure III.5: Maillage du système « capteur-cible » avec défaut.....	54
Figure III.6: Variation de la différence de résistance en fonction de la position du capteur.....	56
Figure III.7: Variation de la différence de la réactance en fonction de la position du capteur.....	57
Figure III.8: Variation de la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur.....	57
Figure III.9: Densité de courant induit J [A/m^2].....	58
Figure III.10: Potentiel vecteur magnétique A [Wb/m].....	59
Figure III.11: Densité de courant induit J [A/m^2] pour $x=0$ m.....	60
Figure III.12: Potentiel vecteur magnétique A [Wb/m] pour $x=0$ m.....	61
Figure III.13: Densité de courant induit J [A/m^2] pour $x=0.003$ m.....	62
Figure III.14: Potentiel vecteur magnétique A [Wb/m] pour $x=0.003$ m.....	63
Figure III.15: Variation de la différence de résistance en fonction de la position du capteur.....	64
Figure III.16: Variation de la différence de la réactance en fonction de la position du capteur.....	64
Figure III.17: Variation de la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur.....	65
Figure III.18: Variation de la différence de résistance en fonction de la position du capteur.....	66

Figure III.19: Variation de la différence de la réactance en fonction de la position du capteur.....66

Figure III.20: Variation de la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur.....67

Figure III.21: Géométrie du système « capteur-cible » avec défaut.....68

Figure III.22: Maillage du système « capteur-cible » avec défaut.....69

Figure III.23: Représentation des grandeurs magnétiques $x=0$ m.....70

Figure III.24: Représentation des grandeurs magnétiques $x=0.003$ m.....70

Figure III.25: Variation de la différence de résistance en fonction de la position du capteur.....71

Figure III.26: Variation de la différence de la réactance en fonction de la position du capteur.....71

Figure III.27: Variation de la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur.....72

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre III : Résultats de simulation d'un capteur à courants de Foucault

Tableau III.1: Dimensions géométriques du modèle.....50
Tableau III.2: Caractéristiques physiques du modèle.....50

Introduction générale

Introduction générale

Au cours de la production dans les usines de fabrication, ou lors de la mise en service d'un appareil, des défauts inattendus et de nature différente apparaissent, la détection de ces défauts dans les produits est essentielle pour assurer des performances fiables et un pourcentage élevé de qualification.

Les anciennes méthodes de mesure et de détection des défauts sont basées sur la mise d'un échantillon sous des essais destructifs. Bien que les essais destructifs soient connus pour leur fiabilité et leur précision, ils ont aussi leurs inconvénients. L'utilisation de ces méthodes nécessitent la destruction de chaque élément à tester, cela signifie la possibilité de démolir les composants vitaux d'une machine ou toute son infrastructure. Elles entraînent des pertes d'argent très importantes pour les entreprises qui les effectuent. C'est une technique qui prend beaucoup de temps par rapport à d'autres méthodes de test parce qu'elle implique des processus manuels [1].

En 1895, l'extraction des informations dans une structure sans porter atteinte à son intégrité est devenue possible grâce à la découverte des rayons X, plusieurs recherches sont effectuées plus tard afin de donner naissances à d'autres techniques utilisant le même principe. Elles seront appelées « **Méthodes de contrôle non destructif (CND)** » [2].

Les méthodes de CND sont pour la plupart fondées sur l'observation et l'exploitation d'un phénomène physique dépendant des propriétés constitutives ou géométriques du matériau et éventuellement perturbé par la présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité (défaut), tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Les techniques utilisées sont diverses et dépendent de la nature même du contrôle envisagé, les plus répandues sont : l'examen visuel, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, la radiographie et les méthodes électromagnétiques (courants de Foucault, flux de fuite magnétique). Le choix de la méthode utilisée dépend directement de la spécificité de l'application envisagée et doit prendre en compte les problèmes d'encombrement, le problème des perturbations environnantes, la durée de vie, etc....

Les enjeux du CND pour la protection des installations industrielles sont devenus impératifs et incontournables, englobant la protection des outils et les moyens de production, les personnes et le respect de l'environnement. Il a pour objectif la mise en évidence de toutes les déficiences susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné, c'est pourquoi le recours au CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits et de la gestion des risques, assurant ainsi la sécurité des personnes et des biens [3].

Parmi les méthodes de CND citées plus haut nous nous sommes intéressées dans ce mémoire au contrôle par courants de Foucaults (CF), c'est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre (il est très facile de créer des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde) ce qui la rend moins coûteuse par rapport aux autres techniques et très intéressantes pour des applications industrielles et en même temps elle est complexe. En effet, pour un contrôle donné, la question qu'on peut se poser est : Comment créer une "bonne" répartition des CF permettant d'avoir un "signal de défaut" aussi important que possible ? C'est pour répondre à cette question que nous avons décidé de mener une étude sur les paramètres géométriques et physiques qui affectent la réponse d'un capteur à CF suite à l'existence d'un défaut dans une pièce conductrice. Il faut noter que cette étude est une continuité des travaux de mémoire réalisés l'année dernière avec l'étudiante Boussetla Leyla [4].

Pour pouvoir mener à bien une telle étude, nous présentons dans le premier chapitre une recherche bibliographique sur les techniques de CND les plus utilisées à savoir : L'examen visuel, le ressuage, les ultrasons, la radiographie, la thermographie, le flux de fuite magnétique et enfin les procédés de contrôle par courants de Foucault. Nous allons aborder le principe, les avantages, les inconvénients et le domaine d'application de chacune d'elle. Puisque c'est la méthode des courants de Foucaults qui suscite notre intérêt, nous présentons les propriétés qui affectent leur distribution dans un milieu conducteur, les différents types des capteurs utilisés dans cette technique et les types de défauts qui peuvent être rencontrés lors de l'opération de détection.

Le deuxième chapitre rapporte les lois de base de l'électrotechnique qui vont permettre d'aboutir aux principales formules mathématiques qui régissent les équations de Maxwell. Ces dernières seront combinées dans le but d'obtenir la formulation aux dérivées partielles quasi-statique, qui va nous permettre de modéliser les phénomènes électromagnétiques dans un procédé de contrôle non destructif par courant de Foucault. Dans ce chapitre seront traitées aussi d'une manière très brève, les différentes méthodes qui peuvent être utilisées pour la résolution de ce type de problème, à savoir : Les méthodes analytiques et les méthodes numériques.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du logiciel COMSOL multi-physiques qui est un outil de simulation basé sur la méthode des éléments finis. Il sera exploité pour la résolution de l'équation différentielle obtenue au chapitre II. La modélisation sera effectuée dans le cas d'une pièce saine et dans le cas d'une pièce présentant un défaut. Les résultats qui donnent les grandeurs électromagnétiques et la variation de la différence d'impédance du signal seront analysées, dans le cas de l'étude de l'effet de variation des paramètres géométriques et physiques du dispositif étudié.

A la fin nous clôturons notre mémoire par une conclusion contenant une synthèse des résultats obtenus et les perspectives planifiées pour de prochains travaux.

Chapitre I

Généralités sur le contrôle non destructif (CND)

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif (CND)

I.1 Introduction

De nos jours, la qualité et la gestion des risques sont deux paramètres que ne peuvent négliger les industriels fabriquant, mettant en œuvre ou utilisant les matériaux, les produits ou les structures de toutes natures. Les contrôles non destructifs sont donc devenus essentiels en quelques dizaines, d'années ce qui explique que leur périmètre d'application ne cesse de s'accroître au-delà du domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique.

Dans cet esprit, la définition suivante des contrôles non destructifs apparaît plus proche de la réalité industrielle : il s'agit de « qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapport à des normes de recette » [1].

Ce premier chapitre abordera l'ensemble des principales techniques de contrôle non destructif utilisées dans divers secteurs industriels (nucléaire, aéronautique, chemin de fer, ...), on rappellera leurs principales caractéristiques, on se focalisera surtout sur le contrôle non destructif par courants de Foucault.

I.2 Historique

Les débuts du contrôle non destructif commencent à la fin du XIX siècle, avec la physique moderne, mais c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de CND ont pris leurs essors dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie. Vers les années soixante et soixante-dix, le développement des centrales nucléaires et de l'aéronautique a engendré une forte accélération du progrès du CND, et différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature des défauts recherchés, des pièces contrôlées (rivetées, soudées, laminées, de forme complexe, ...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué [2].

Le CND a atteint aujourd'hui un stade de développement notable, grâce aux américains qui au début des années quatre-vingt-dix ont investi plusieurs millions de dollars et créé 13 centres de recherches spécialisés dans ce domaine.

I.3 Définition et intérêt du contrôle non destructif

Le Contrôle Non Destructif est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux sans les dégrader : soit au cours de la production : soit en cours d'utilisation et même dans le cadre de maintenances (CND). Nous parlons aussi d'essais non destructifs ou d'examen non destructifs (END), ce qu'évoquent plutôt les examens en laboratoire que

la qualité industrielle. En ce sens, le CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité et de la santé des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objectif est la détection et la mise en évidence des hétérogénéités, anomalies et défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et plus généralement la conformité d'un produit à l'usage qu'il est destiné, plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce [3].

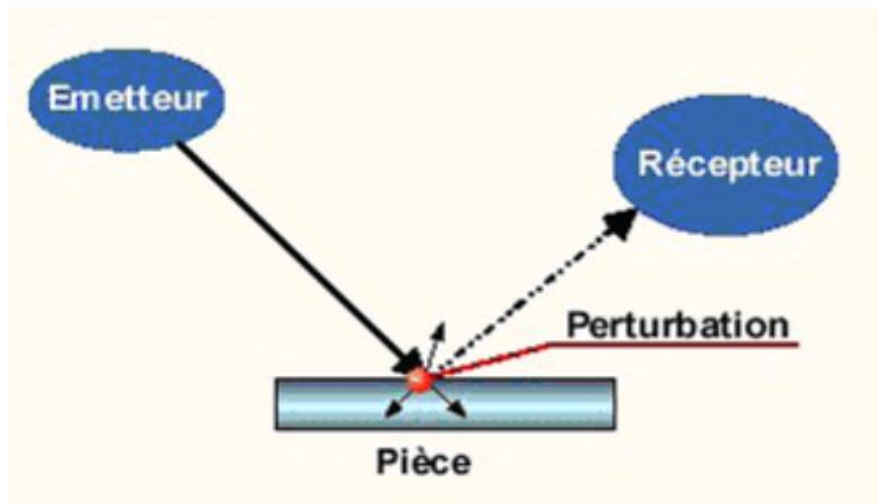


Figure I.1: Exemple du contrôle non destructif [5]

I.4 Principe général des techniques de CND

La figure ci-dessous illustre le principe général des techniques de CND. Cela consiste à induire une perturbation dans le matériau investigué, et à enregistrer sa réponse à cette excitation. Le défi du contrôleur consiste alors à traiter cette réponse de manière à en extraire l'information sur le matériau. La technique de CND la plus populaire est sans nul doute celle consistant à taper sur le matériau sous investigation avec un marteau, et à écouter le bruit émis par ce matériau suite à l'impact. Si le bruit est sourd, cela veut dire que le matériau est sain. Par contre, un bruit creux est révélateur d'un vide dans ce matériau. Les technologies modernes de CND utilisent toutefois différents types d'excitations (mécanique, électrique...), et une panoplie d'outils plus ou moins complexes d'acquisition et de traitement des données [6].

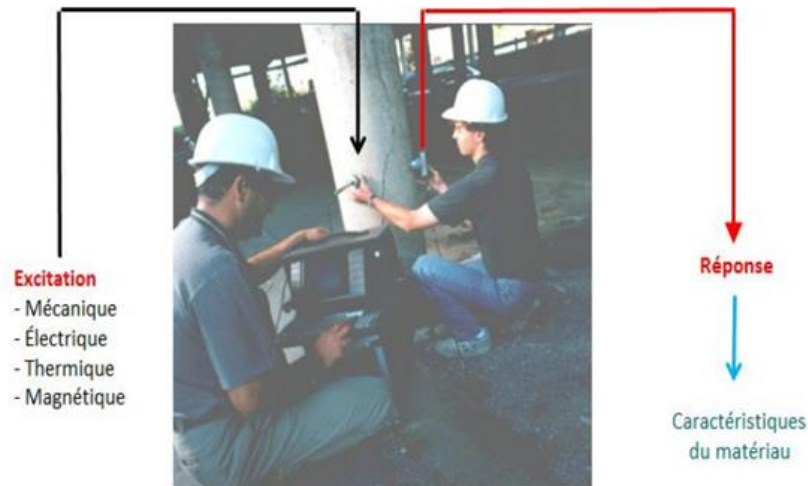


Figure I.2: Principe général des techniques de CND [6]

I.5 Différentes techniques du contrôle non destructif :

Les techniques de CND utilisées sont diverses. Le choix d'une méthode dépend de [1] :

- La pièce à contrôler (nature du matériau, forme...).
- Le type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur...).
- Les conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué.

I.5.1 Contrôle visuel

Le contrôle visuel est une technique essentielle qui donne un aperçu de l'état extérieur d'une pièce. Il est destiné à déceler les défauts tels que les fissures, les inclusions, et le manque de pénétration dans le cas d'une soudure. Il implique l'utilisation de gabarits et de calibres. On utilise des loupes, des caméras vidéo, des calibres et des règles graduées [3].

I.5.1.1 Principe du contrôle visuel

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peuvent être une indication de défaut plus grave à l'intérieur.

Le processus mis en jeu se décompose en 3 phases :

- La phase d'excitation qui consiste à produire le faisceau lumineux.
- La phase qui consiste à placer la pièce dans le champ optique du faisceau et son orientation la plus favorable pour la mise en évidence défauts de surface.

- La phase de révélation qui consiste à placer l'œil dans le champ du faisceau réfléchi par la surface de la pièce.

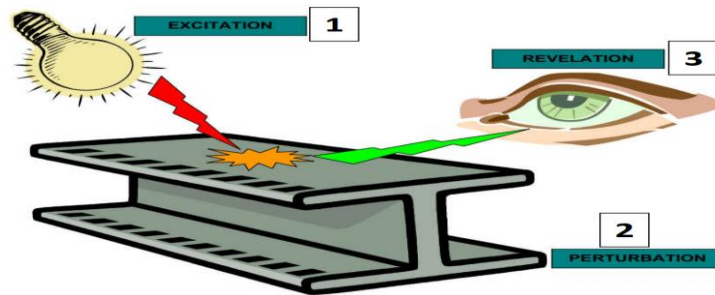


Figure I.3: Trois phases essentielles [1]



a) Principe de examen Visual



b) Inspection du réacteur d'un avion

Figure I.4: Exemples du contrôle visuel [7]

I.5.1.2 Matériel du contrôle visuel

a. Lampe stylo

La lampe stylo permet d'éclairer l'intérieur des tubes et d'assurer la vision du cordon de pénétration. En lumière rasante, la lampe stylo révèle les défauts de forme comme les morsures et les caniveaux en bord du cordon [8].



Figure I.5: Lampe torche UV[8]

b. Boroscope

Le boroscope ou fibroscope est un appareil permettant de voir dans des endroits extrêmement petits et difficiles d'accès. Il est constitué de fibres optiques situées dans un câble et permettant de visualiser une image située à l'extrémité de celui-ci.



Figure I.6: Boroscope [9]

c. Endoscopie

C'est une méthode d'exploration et d'imagerie industrielle (ou médicale) qui permet de visualiser l'intérieur de conduits ou de cavités inaccessible à l'œil. L'endoscope est composé d'un tube optique muni d'un système d'éclairage. Couplé à une caméra vidéo on peut ainsi retransmettre l'image sur un écran.



Figure I.7: Endoscope [9]

I.5.1.3 Avantages

- Facilité de mise en œuvre
- Applicable à tous types de matériaux
- Peut être conservée par photographie.
- Permet une vision d'ensemble des parties accessibles.

I.5.1.4 Inconvénients

La précision de l'examen dépend de 3 éléments [10] :

- Des conditions de préparation et d'examen (nettoyage, éclairage).
- De l'acuité visuelle de l'inspecteur.
- De l'optique des accessoires utilisés.

I.5.2 Contrôle par ressuage

La technique est très ancienne et réside dans la simplicité de sa mise en œuvre. Par opposition aux autres méthodes de contrôle non destructif, le ressuage peut être considéré comme une méthode « globale » pour tous les défauts débouchant en surface, quelle que soit la nature du matériau. Cette technique se classe parmi les méthodes visuelles, appelée aussi optico-chimique. Malgré son ancienneté, la méthode de ressuage reste très utile même de nos jours surtout pour la recherche des défauts surfaciques [2].



Figure I.8: Révélation de fissures par ressuage [2]

I.5.2.1 Principe de ressuage

Son principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes :

a. Nettoyage de la surface à contrôler

La méthode consiste à appliquer un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce :

- Par meulage
- Par broyage
- Par dégraissage (chimique ou en phase vapeur)

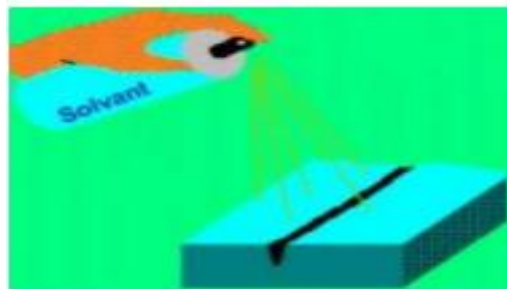


Figure I.9: Nettoyage par pulvérisation d'un solvant [9]

b. Application du pénétrant sur la surface à contrôler

Après nettoyage on applique un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce. On laisse au pénétrant un certain temps de sorte qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissant à la surface.

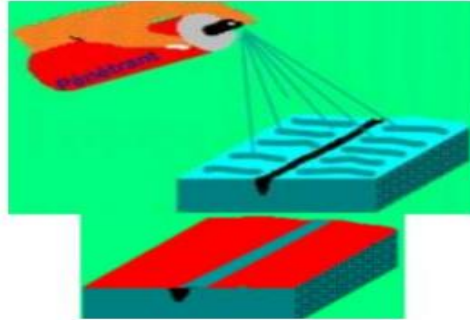


Figure I.10: Application du pénétrant à la surface à examiner [9]

c. Elimination de l'excès du pénétrant

On élimine ensuite le pénétrant sur la surface mais cette opération laisse cependant en place la partie qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités.

On utilise dans cette opération :

- Un chiffon sec et propre et non pelucheux.
- L'eau suivi ou non d'un séchage.
- Un solvant



Figure I.11: Enlèvement de l'excès du pénétrant de la surface [9]

d. Application du révélateur

Un révélateur, produit opaque et absorbant est appliqué sur la surface. Le pouvoir absorbant du révélateur fait que le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités est alors aspiré vers la surface et y laisse une trace. Cette trace à cause de la diffusion du pénétrant dans le révélateur, est toujours plus importante que la discontinuité.

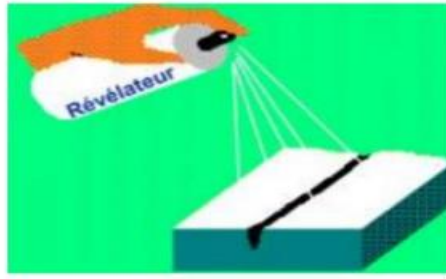


Figure I.12: Application du révélateur [9]

e. Interprétation des résultats

L'efficacité de cette méthode de contrôle repose sur la possibilité de détecter les indications de discontinuité.

Afin d'améliorer cette détectabilité, le pénétrant contient en général, soit :

- Un produit coloré visible à la lumière blanche (lumière du jour).
- Un produit fluorescent visible à la lumière noire (ultraviolet). Une estimation grossière de la fissure peut être faite grâce à la largeur de l'étalement du pénétrant sur le révélateur.



Figure I.13: Exposition de la surface à examiner à la lumière blanche [9]

f. Nettoyage final

Un nettoyage final est préconisé pour certains matériaux (alliages d'aluminium, alliage de magnésium) pour lesquels la présence des produits utilisés peut entraîner des corrosions.

I.5.2.2 Domaine d'application

Le domaine d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement avec le pénétrant [10].

- Contrôle à la température inférieure à 10°C.

- Vérification en maintenance des réservoirs d'oxygène dans les fusées (produis à base aqueuse).
- Contrôle sur béton.

I.5.2.3 Avantages et inconvénients

Cette technique a les avantages suivants :

- Facile de mise en application.
- Rapide et sensible.
- Coût d'application faible.
- Ne nécessite pas une grande expérience.

Mais elle connaît aussi certains inconvénients :

- Impossible de détecter les défauts non débouchant (défauts volumétrique).
- Nécessite des surfaces propres et bien dégraissées : ne pas travailler sur des produits bruts de laminage par exemple.
- Cette méthode ne permet de détecter que des défauts présentant un certain volume. Ainsi les fissures refermées par des contraintes de compression peuvent échapper au contrôle par cette méthode.
- Les produits utilisés peuvent être toxiques ou polluants (produits inflammables et souvent volatils) ; donc il faut prendre des mesures de sécurité.

I.5.3 Contrôle à flux de fuite magnétique

Le flux de fuite magnétique est un type de contrôle électromagnétique non destructif (NDT) qui est largement utilisé pour tester l'intégrité des plaques et des tuyaux en acier ferreux. Un système de fuite de flux magnétique générique (MFL) se compose de pôles d'aimant permanent (PM) opposés ou de bobine d'excitation DC pour magnétiser à la saturation l'objet sous inspection. Un défaut dans l'objet d'essai provoque une déviation du flux magnétique et ce flux est détecté par un ensemble de capteurs correctement placés [11].

Cette méthode permet en plus, par rapport au ressuage, de mettre en évidence des défauts non débouchant mais proche de la surface. Pour cela, on applique un fort champ ou un fort courant sur la pièce et on visualise à l'aide d'une poudre métallique les lignes de champ au droit des défauts. L'examen des pièces se fait le plus souvent sous éclairage UV [1].

I.5.3.1 Principe

Le contrôle par flux de fuite est basé sur la circulation d'un champ magnétique à travers l'épaisseur du tube. Étant donné que le tube est ferromagnétique, le champ magnétique est canalisé

par le tube. En cas de défaut, les lignes de force du champ magnétique subissent une distorsion qui génère un “champ de fuite”, appelé également “fuite de flux magnétique”. Le champ magnétique en surface du tube est modifié. Ce changement de champ magnétique peut-être mesuré à l’aide de bobines ou de capteurs à effet Hall [10].

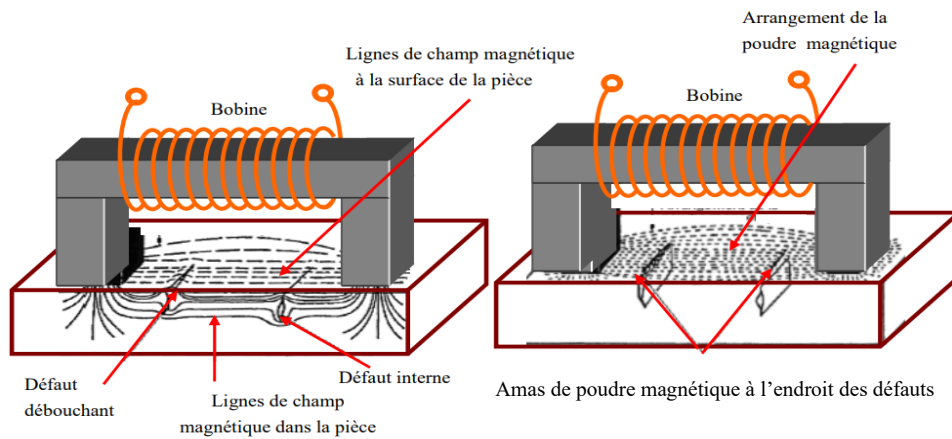


Figure I.14: Principe du contrôle par magnétoscopie [7]

Remarque : Il est très important de noter que les défauts ne peuvent être détectés que s’ils sont orientés pour tout ou en partie normalement aux lignes de champ. La démarche de mise en œuvre de ces procédés consiste à définir clairement le type et l’orientation des défauts recherchés, puis en fonction de ces paramètres, à choisir le type de magnétisation qui fournira un champ d’orientation convenable [7].

I.5.3.2 Méthode de magnétisation

Dans la pratique, on procède à l’aimantation des pièces suivant deux techniques principales [8] :

a. Magnétisation par courant d’injection

La pièce est aimantée par l’intermédiaire d’un courant la traversant totalement ou localement.

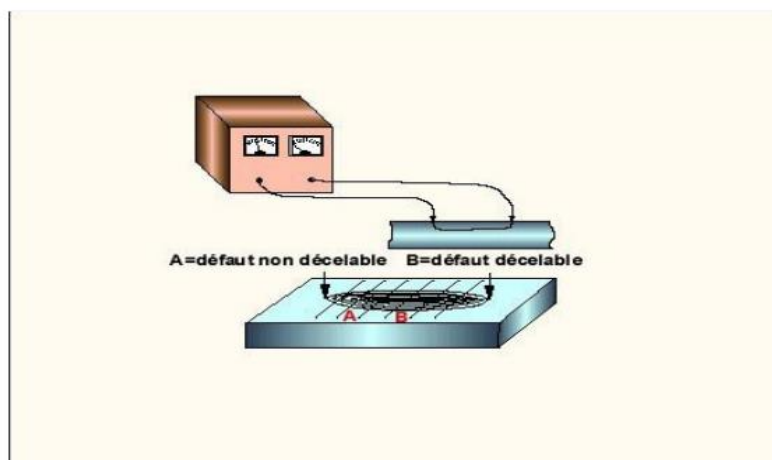


Figure I.15: Schéma de la magnétisation par courant d’injection [8]

b. Magnétisation par un électro-aimant mobile

La pièce est aimantée totalement ou localement par l'intermédiaire d'un électro-aimant. On peut utiliser une magnétisation longitudinale, transversale ou oscillante de façon à s'adapter à l'orientation des défauts.



Figure I.16: Electro-aimant portable[11]

I.5.3.3 Avantages

- Permet une analyse rapide de la perte d'épaisseur de la paroi contrôlée.
- Rapport de contrôle numérisé et stocké.
- Permet de détecter des pertes d'épaisseurs internes et externes.
- Peut être utilisé en présence d'un revêtement anti corrosion interne au réservoir.

I.5.3.4 Inconvénients

- Impossibilité de distinguer la face de la paroi affectée par la perte d'épaisseur.
- Les zones suspectes peuvent nécessiter une confirmation par une mesure d'épaisseur par Ultrasons.
- Encombrement de l'outillage nécessaire au contrôle qui interdit d'accès certaines zones (robe du réservoir, puisard, serpentin interne, pied de charpente).
- La surface doit être exempte de particules aux propriétés électromagnétiques, sèche, balayée et non grasse.

I.5.4 Contrôle par radiographies

La radiographie industrielle est une technique de contrôle non destructif (CND) très utilisée dans le domaine industriel notamment pour le contrôle des soudures, pour le repérage des défauts des matériaux et pour évaluer la corrosion. Elle est aussi utilisée pour détecter des défauts sous la surface d'un matériau. Deux types de rayons électromagnétiques sont utilisés [13] :

- Le rayon X : il est généré dans un tube radiogène, un appareil électrique qui émet des rayons X lorsqu'il est mis sous tension.
- Le rayon gamma γ : il est généré par des éléments radioactifs (isotopes). Les isotopes les plus fréquemment utilisés sont le cobalt-60, le césium-137 et l'iridium-192.

I.5.4.1 Principe

La radioscopie est une des plus vieilles méthodes d'évaluation non destructive. Son principe consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'ondes, les rayons X ou γ (qui sont de même nature, mais leur origine diffère: les premiers sont généralement produits par l'impact d'un faisceau d'électrons hautement énergétiques sur une cible adéquate; les seconds sont issus du réarrangement de noyaux instables d'isotopes radioactifs au cours de leur désintégration) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau incident sous forme d'une image sur un récepteur surfacique du type film photographique argenté ou capteur électronique du type amplificateur de brillance ou autre. La radiographie permet en fait de visualiser les défauts internes d'une pièce. L'intensité du rayonnement incident issu d'un générateur de rayons X ou d'un radioélément artificiel est modifiée lors de son passage à travers un matériau par les discontinuités qu'il renferme [13] [7].

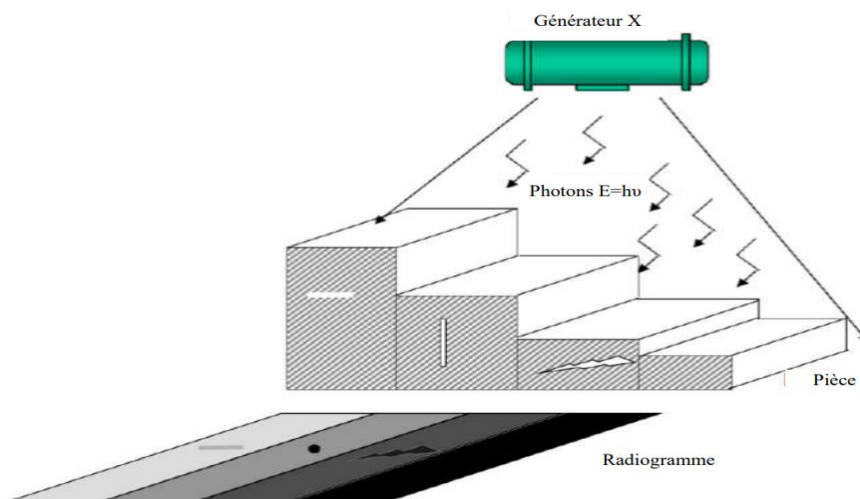


Figure I.17: Schéma de principe du contrôle radiographique

I.5.4.2 Domaine d'application

Le contrôle radiographique par rayon X ou gamma s'applique à toute sorte de matériaux de nature différente (papier, matière plastique, matériaux métalliques).

Les paramètres qui influent sur la probabilité de détection des discontinuités dans la matière sont principalement :

- L'épaisseur et la forme du matériau radiographié.
- La nature de ce matériau.
- La forme et la nature des discontinuités affectant le matériau - la position de ces défauts dans l'épaisseur contrôlée.
- La nature de la source de rayonnement et le type du film utilisé.

Lorsqu'un défaut est mis en évidence par radiographie, il est possible d'en déterminer la nature ainsi que la dimension apparente sur le film. En revanche, l'appréciation de la profondeur du défaut constitue une opération longue et délicate.

I.5.4.3 Avantages

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

I.5.4.4 Inconvénients

- Coût de mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel.
- Réglementation souvent très contraignante (transport et stockage des sources radioactives,) [14].

I.5.5 Inspection par thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge occupe une place de plus en plus importante dans les opérations de contrôle non destructif où la plupart des pièces à inspecter n'émettent pas de chaleur [2]. Elle permet d'explorer la surface d'un corps émettant un rayonnement infrarouge. La présence de défauts dans un corps entraîne des modifications de la carte thermique de ce dernier. Ces modifications permettent la détection des défauts [13] [11].

I.5.5.1 Principe

En CND, on utilise l'inhomogénéité de propagation ou de diffusion d'une impulsion thermique liée aux discontinuités de la structure de la pièce à examiner. Une part très importante du succès de la méthode est liée à la manière dont le flux de chaleur est transmis à la pièce.

L'importance de la discontinuité de la propagation de la chaleur est fonction de :

- La nature de la pièce.
- La dimension, la nature et la position du défaut.

L'analyse se fait en régime transitoire, car à l'équilibre les différences de rayonnement induites par les éventuels défauts sont souvent imperceptibles.

Pour de grandes pièces, il peut être difficile d'avoir un chauffage uniforme. Dans ce cas, on utilise une source à apport thermique local dont le déplacement sera lié à celui du système de détection.

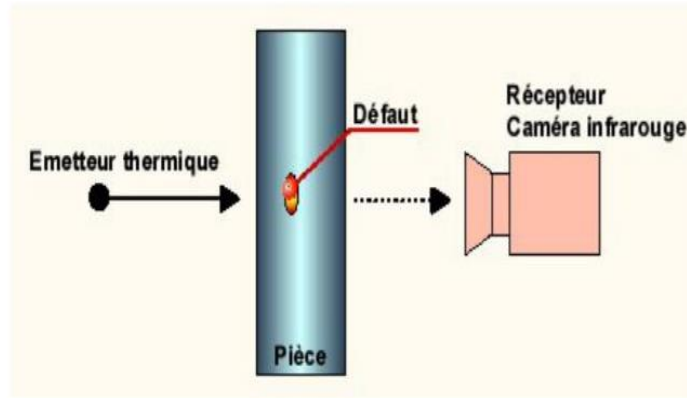


Figure I.18: Principe de la thermographie [9]

I.5.5.2 Matériel utilisé

Pour l'analyse thermique, on utilise [13] :

- Une caméra infrarouge.
- Une unité de traitement d'images.
- Un magnétoscope pour enregistrement sur site, et/ou un stockage numérique des données sur disquette, carte PCMCIA, ...
- Un ordinateur associé pour analyser les résultats en direct.
- Un ensemble portatif de mesures (température ambiante, vitesse du vent, ...).
- Un logiciel d'analyse laboratoire : (Thermogramme, Thermonitor, TIC8000).

Cet équipement est mobile, portable ou sur chariot et ne nécessite pas d'alimentation électrique externe.

L'ensemble du matériel infrarouge est obligatoirement étalonné annuellement dans le respect des normes.

I.5.5.3 Domaine d'application

L'industrie de la métallurgie en est à ses essais de thermographie dans le domaine de la recherche. L'état métallurgique d'un métal et la qualité du produit final dépendent fortement des procédés de fabrication et des cycles de température auxquels sont soumis les matériaux (laminage à chaud ou à froid, trempe, hypertrempe, recuit, traitements thermiques classiques, ...) [9].

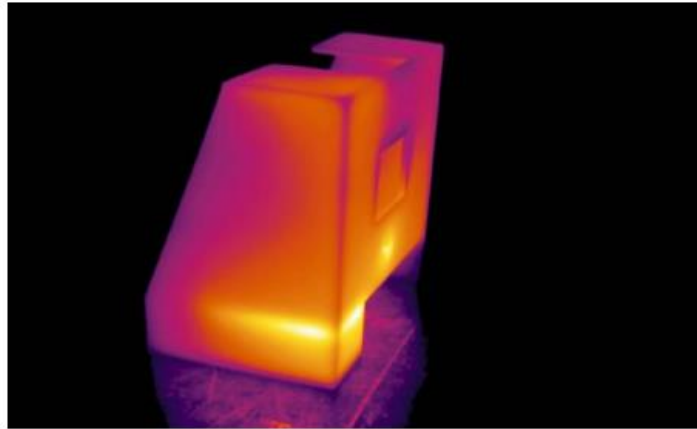


Figure I.19: Pièce contrôlée par la thermographie [13]

I.5.5.4 Avantages

On cite quelques avantages de la thermographie [15] :

- Obtention de faibles températures des surfaces contrôlées pour les matériaux de forte émissivité (proche de 1).
- Facilité de mise en œuvre.
- Conservation des clichés (fichiers informatiques).
- Rapidité de mise en évidence des défauts (pendant le contrôle).

I.5.5.5 Inconvénients

Parmi les inconvénients, on a :

- Méthode coûteuse en investissement.
- Contrôle possible uniquement sur des équipements déjà « alimentés » en chaleur (impossible à mettre en œuvre sur une pièce non raccordée ou pendant un arrêt de production).
- Fiabilité des contrôles dépendant fortement des conditions météorologiques (contrôle pendant la nuit ou par temps couvert et en l'absence de fortes chaleurs).

I.5.6 Procédés à ultrasons

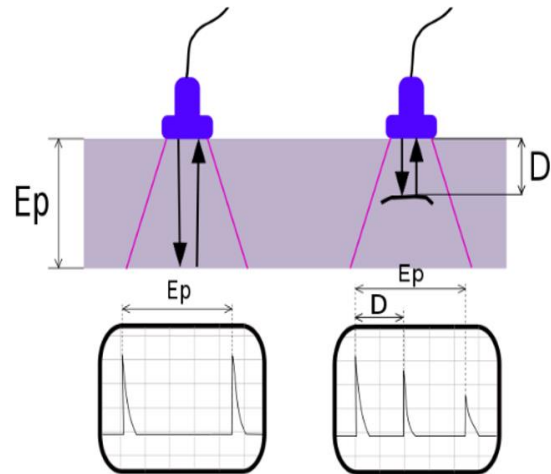
Cette technique est parmi les méthodes les plus répandues. Elle consiste à détecter les défauts en balayant la pièce à contrôler et en observant les échos réfléchis sur les discontinuités de la matière [16].

I.5.6.1 Principe

Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure [17].



a) Contrôle ultrasonore d'une aile d'avion



Ep : épaisseur de plaque, D : distance de localisation de défaut

b) Principe

Figure I.20: CND par Ultrasons [17]

I.5.6.2 Domaine d'application

- Contrôle manuel ou automatique de la majorité des matériaux [18].
- Tous les matériaux élastiques (métaux, composites, bétons, ...) [19].

I.5.6.3 Avantages

- Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge).
- Équipements portatifs.
- Appareil très sensible aux fissures.
- Résultats immédiats.
- Absence totale d'inconvénients liés à l'hygiène et à la sécurité.

I.5.6.4 Inconvénients

- Pour les contrôles "manuels" une grande expérience des opérateurs est nécessaire.
- Méthode impliquant un très haut niveau de technicité.
- Sensible à la géométrie (forme, rugosité).
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.

I.5.7 Contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF)

I.5.7.1 Historique

Le phénomène des courants de Foucault a été découvert par le physicien Français Léon Foucault en 1851. Ce savant a construit un dispositif utilisant un disque de cuivre se déplaçant dans un champ magnétique pour montrer que les courants de Foucault sont générés lorsqu'un matériau se déplace dans un champ magnétique appliqué.

L'utilisation des courants de Foucault s'est développée grâce à la découverte du phénomène de l'induction magnétique par Michael Faraday. Ce dernier a découvert que lorsqu'un champ magnétique traverse un conducteur ou lorsqu'un conducteur passe à travers un champ magnétique, un courant électrique s'écoulera à travers le conducteur s'il trouve un chemin fermé grâce auxquelles le courant peut circuler. En 1889, une autre percée a été faite lorsqu'un autre scientifique anglais, David Hughes, a démontré le changement des propriétés d'une bobine à proximité des pièces conductrices ayant des perméabilités et des conductivités électriques différentes.

Dans les débuts des années 30 du siècle dernier, précisément en 1933 en Allemagne, alors qu'il travaillait pour l'institut Kaiser-Wilhelm, le professeur Friedrich Förster adapte la technologie actuelle des courants de Foucault à l'usage de l'industrie. En 1948, Förster fonde sa propre compagnie, une entreprise basée sur les courants de Foucault qui continue à ce jour. Nombreuses avancées ont été faites dans les années 1950 et 1960 notamment dans les avions et les industries nucléaires. Il y a eu beaucoup de développements récents dans les courants de Foucault, conduisant à l'amélioration des performances et de développement de nouvelles applications. Les courants de Foucault sont maintenant une technique d'inspection largement utilisés pour le contrôle des câbles, mesure de l'épaisseur des matériaux, mesure de conductivité, ...etc.

Parlons chiffre, le contrôle non destructif a connu entre 2007 et 2012 une forte croissance avec une augmentation de 16%, que depuis n'a cessé de freinée ou d'abaissée.

Aujourd'hui, le contrôle non destructif par courants de Foucault est en forte demande. D'après des études, dans l'année 2020, le marché des équipements électromagnétiques du contrôle non destructif devrait atteindre 220 millions de dollars [2].

I.5.7.2 Principe

Le contrôle non destructif par courants de Foucault est basé sur les phénomènes d'induction électromagnétique. Selon la loi d'Ampère, un champ électromagnétique est généré lorsqu'une bobine d'excitation reçoit un courant variable dans le temps. Sur la base de la loi de Faraday, des courants de Foucault seront produits dans tout matériau conducteur proche de ce champ. Le champ électromagnétique qui résulte de ces courants s'oppose au champ magnétique initial de la bobine. En raison de l'interaction entre les deux champs, la bobine subit un changement d'impédance.

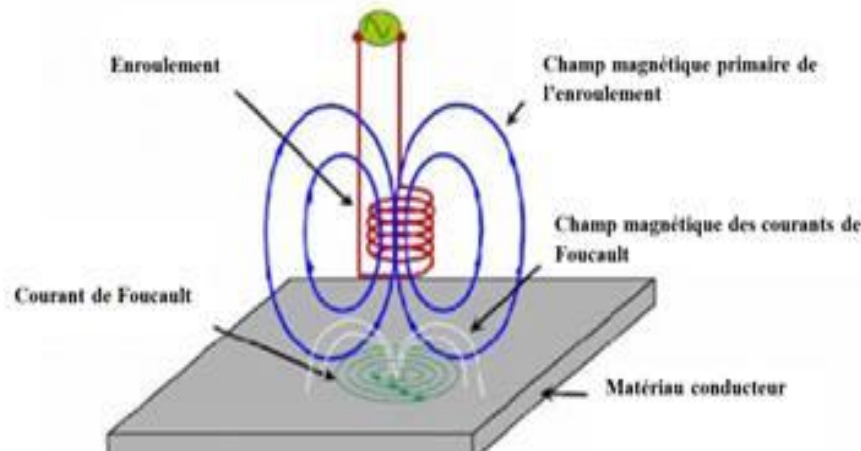


Figure I.21: Principe de la méthode des courants de Foucault

Lorsqu'il n'y a pas de pièce près du capteur, l'impédance Z_0 de la bobine est une valeur complexe, donnée par l'équation [19] :

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (\text{I.1})$$

Où R_0 et jX_0 sont la partie réelle et imaginaire de Z_0 . La composante $X_0 = 2\pi f L_0$ est proportionnelle à la fréquence f et au coefficient d'induction L_0 .

Lorsque la pièce à tester s'approche de la bobine, des courants induits apparaissent dans cette dernière et créent un champ secondaire qui interagit avec le champ primaire. En conséquence, la nouvelle impédance de la bobine Z_c s'écrit :

$$Z_c = R_c + jX_c \quad (\text{I.2})$$

Où R_c et jX_c représente la parties réelle et imaginaire de la nouvelle impédance, $X_c = 2\pi f L_c$ est proportionnelle à la fréquence et le coefficient d'induction L_c .

L'impédance de la bobine est une variable bidimensionnelle, et les parties réelles et imaginaires peuvent être représentées sur un plan d'impédance. Pour cela elles sont normalisées et définis comme suit :

$$R_{cn} = \frac{R_c - R_0}{X_0} \quad (\text{I.3})$$

$$X_{cn} = \frac{X_c}{X_0} \quad (\text{I.4})$$

I.5.7.3 Objectifs du CND-CF

Un capteur à courants de Foucault peut accomplir diverses tâches, du fait que l'impédance du système Capteur/Pièce est fonction des différentes caractéristiques électromagnétiques et géométriques. Parfois utilisé pour la caractérisation géométrique et électromagnétique, d'autre fois pour le contrôle de l'état de santé en cherchant et caractérisant les défauts. La figure (I.22) illustre les différentes fonctions d'un capteur à courant de Foucault [21].

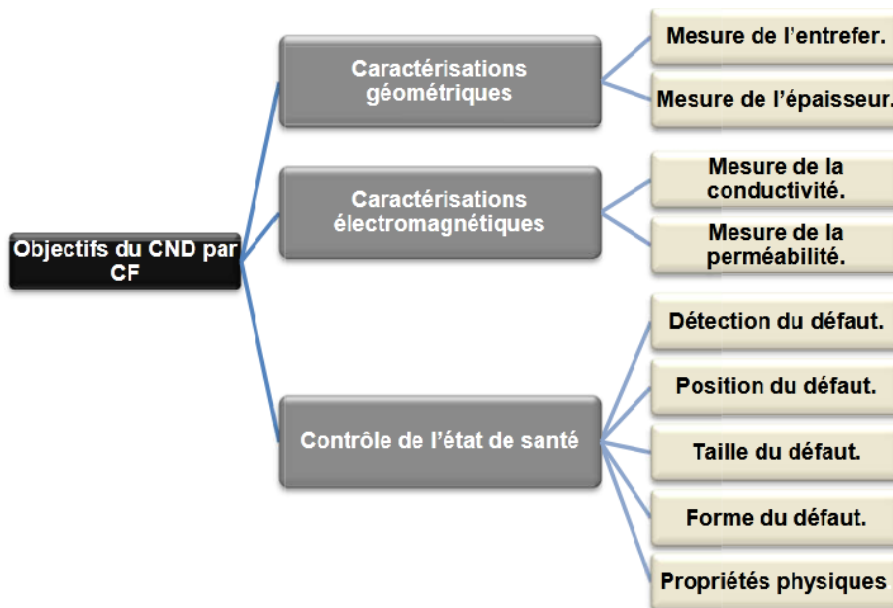


Figure I.22: Objectif du CND par CF [21]

I.5.7.4 Domaines d'application

Le CND-CF (contrôle non destructif par courant de Foucault) peut être appliqué aux matériaux conducteurs magnétiques ou amagnétiques dans [18] :

- Le contrôle de filtrages (détection de métaux dans un environnement donné).
- Le contrôle des tôles minces.
- Le contrôle d'épaisseur de revêtement.
- Les matériaux composites comportant des fibres conductrices.

I.5.7.5 Avantages

- Les appareils sont alimentés par batterie ou chargés, de sorte qu'ils peuvent être portés. Il peut également être utilisé dans des systèmes complexes.
- Le test ne cause pas de dommages au matériau, il peut être testé à nouveau.
- Le contact des sondes sur la pièce d'essai n'est pas nécessaire.

- Il est sensible aux dommages mineurs.
- L'expérience peut être effectuée sur le système de travail.
- Il donne des résultats rapides.

I.5.7.6 Inconvénients

- L'échantillon d'essai doit être nettoyé car il est extrêmement sensible aux imperfections de surface
- Il ne peut être appliqué qu'aux matériaux conducteurs.
- La profondeur de mesure est limitée.
- Un environnement spécial est requis pour tester les métaux ferromagnétiques.

I.5.7.7 Propriétés affectant la distribution des courants de Foucault

a. Conductivité électrique

Les matériaux qui conduisent l'énergie électrique et la chaleur sont appelés conducteurs. Plus le nombre d'électrons se déplaçant dans le matériau est élevé, plus la conductivité électrique est élevée. Plus la conductivité du matériau est élevée, plus les courants induits seront élevés. Chaque matériau a sa propre propriété de conductivité [22].

b. Perméabilité magnétique

La perméabilité magnétique est la propriété d'un matériau magnétique. Il est obtenu par le rapport de l'induction magnétique à l'intensité magnétiques.

c. Épaisseur du matériau

Les courants induits ne peuvent pas atteindre des profondeurs dans des matériaux très épais. Par conséquent, ils ont une profondeur de pénétration limitée. La densité de courant est plus élevée à la surface et près de la surface. La profondeur de pénétration standard est exprimée comme la valeur de profondeurs à laquelle la densité de courant induit à la surface du matériau diminue à 37% de la valeur initiale

d. Lift-off

C'est la distance entre la bobine d'excitation et la pièce à tester.

Plus une sonde (bobine) est proche de la surface, plus l'effet sur cette bobine sera grand. Cela a deux effets principaux :

- Le signal de "décollage" lorsque la sonde est déplacée sur et hors de la surface.
- Une réduction de la sensibilité lorsque l'espacement bobine / produit augmente.

e. Effet de bord et extrémité

L'effet de bord est un phénomène qui se produit quand une bobine de détection se situe à l'extrémité de la pièce conductrice. Dans ces cas, les courants induits sont déformés car ils ne peuvent pas circuler convenablement. Ainsi, afin d'éviter la confusion avec les défauts, l'inspection est limitée aux bords. La distance où l'effet de bord est présent est d'environ un à trois fois le diamètre de la bobine d'inspection dans le cas des sondes circulaires [22].

f. Discontinuités

Les discontinuités sont des matériaux étrangers sur le matériau (couche formée à la suite de la soudure), porosité visible ou invisible et fissures qui se produisent en raison de la fatigue du matériel. C'est un facteur qui affecte la circulation des courants induits, indiquant qu'il y a un défaut sur la pièce à tester [22].

I.5.7.8 Classification des capteurs

Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs. La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle. La Figure (I.23) résume les trois critères déjà cités [23] :

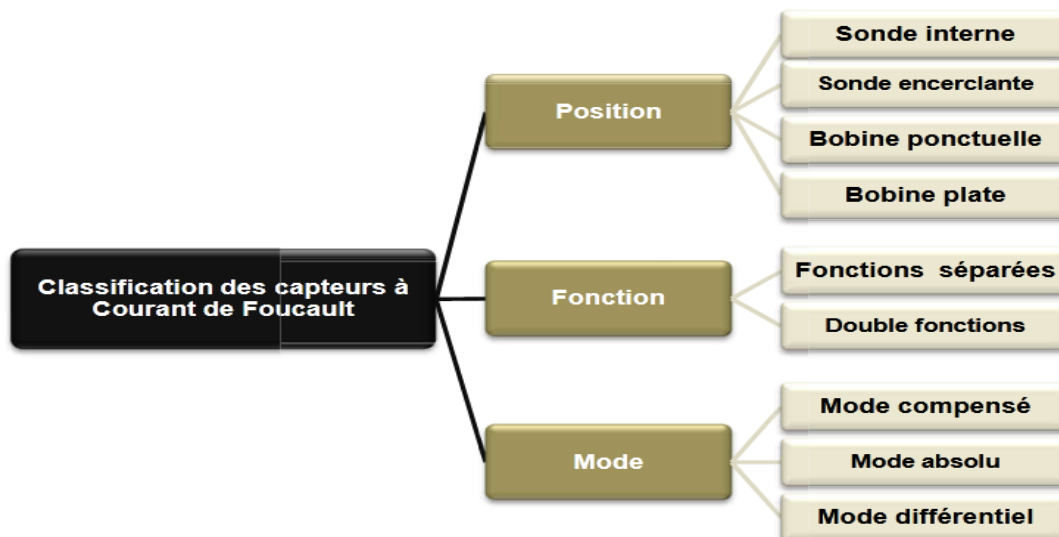


Figure I.23: Critères de classification des capteurs. [21]

a. Selon la position

- **Sonde interne**

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau [23].

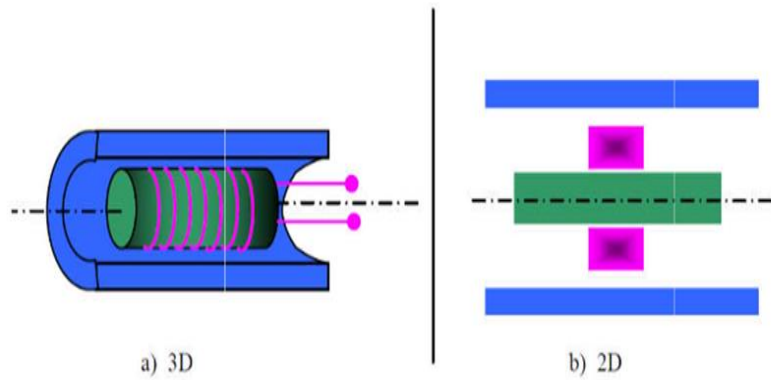


Figure I.24: Sonde interne [23]

- **Sonde encerclante**

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner (Figure I.25). Dans la majorité des cas, il s'agit de bobines à section circulaire. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes et les barres [24].

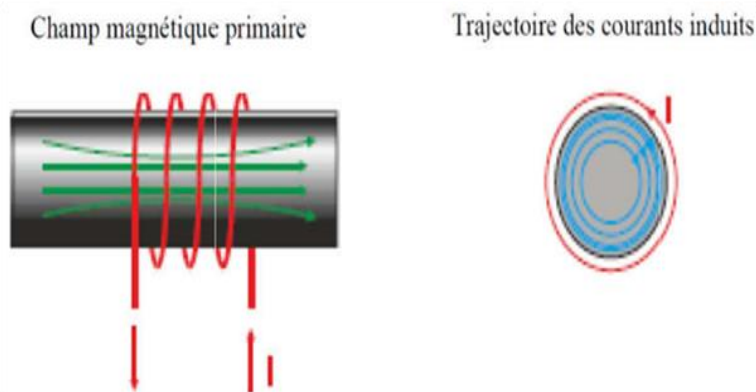


Figure I.25: Sonde encerclant [24]

- **Bobine ponctuelle (Palpeur)**

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube [25].

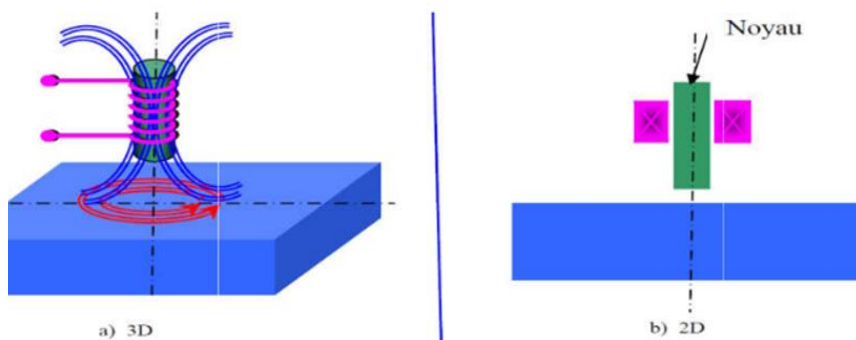


Figure I.26: Bobine ponctuelle (Palpeur) [25]

- **Bobine plate**

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large [18].

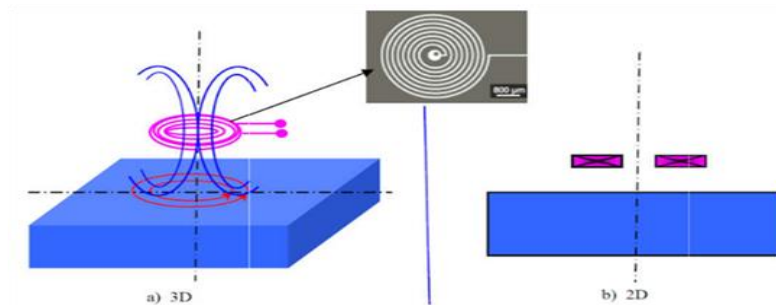


Figure I.27: Bobine plate [18]

- **Sonde interne tournante**

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube [26].

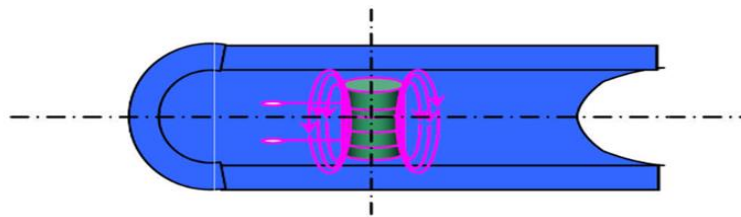


Figure I.28: Sonde interne tournante [26]

b. Selon la fonction du capteur

Par définition, l'émetteur alimenté par un courant alternatif crée un champ magnétique, répondant ainsi à la fonction d'émission, et le récepteur fait une mesure de champ magnétique, c'est la fonction de réception. Les capteurs CF se décomposent en deux configurations : les capteurs à double fonction et les capteurs à fonction séparées [27].

- **Capteur à double fonction**

Le capteur à double fonction est un capteur dont le ou les éléments constitutifs jouent simultanément le rôle d'émetteur et de récepteur. Le capteur à double fonction le plus simple est constitué d'une seule bobine [27].

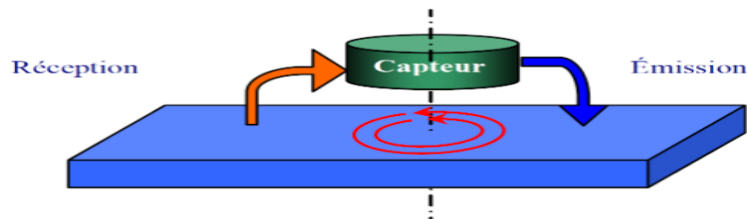


Figure I.29: Capteur à double fonction [27]

• Capteurs à fonctions séparées

Dans ce cas, le capteur contient au moins deux éléments, une bobine pour l'émission d'un champ alternatif et une autre bobine ou un capteur de champ magnétique pour la réception de la réponse de la pièce examinée. Dans le cas où le récepteur est une bobine la grandeur mesurée est la force électromotrice (f.e.m) induite aux bornes de celle-ci [17].

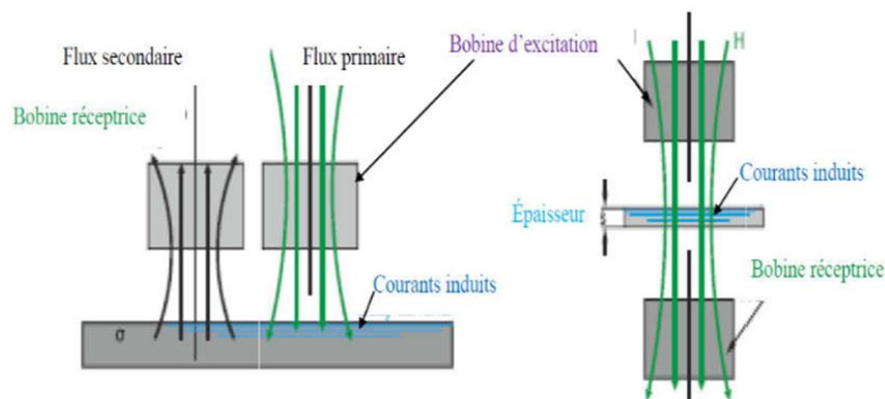


Figure I.30: Capteur à fonctions séparées [17]

c. Selon le mode de fonctionnement

• Mode absolu

Le mode absolu utilise un capteur à double fonction, qui est destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit à examiner par la comparaison du signal reçu à une référence artificielle [17].

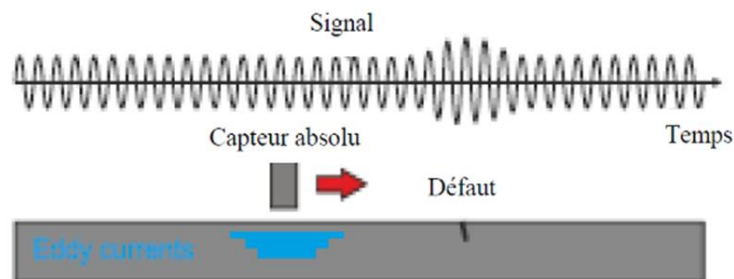


Figure I.31: Capteur absolu [17]

Ce mode de mesure permet d'accéder simultanément aux grandeurs utiles et perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau à tester) [28].

Pour réduire l'effet de la variation de la température sur la performance du contrôle, le mode absolu compensé est le mieux adapté [17].

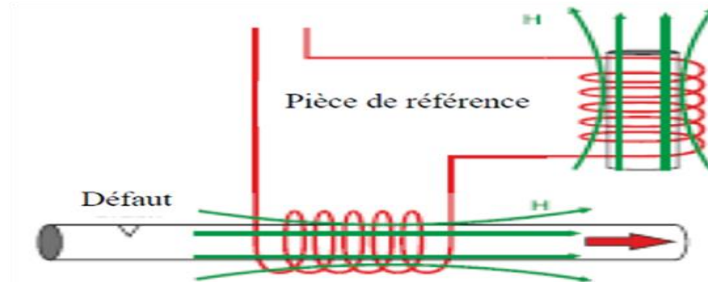


Figure I.32: Capteur absolu en mode compensé [17]

- **Mode différentiel**

La mesure différentielle est une comparaison de deux mesures effectuées simultanément d'impédances de deux capteurs absolus dont les flux sont opposés [28].

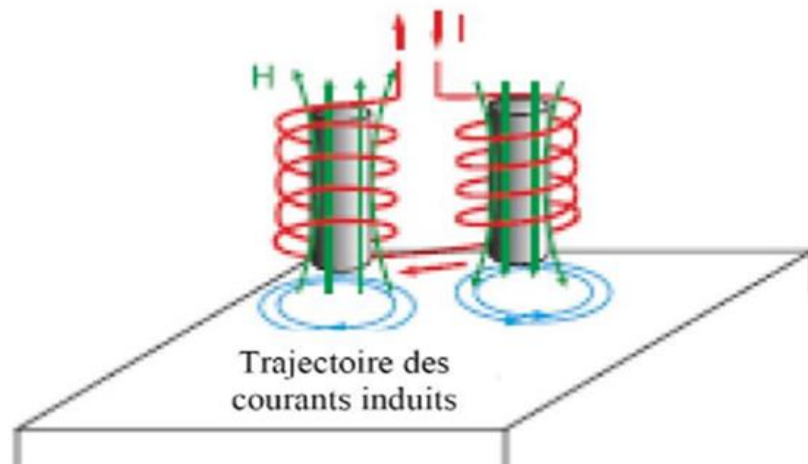


Figure I.33: Capteur en mode différentiel [17]

En effet, dans le cas d'une pièce saine, l'impédance différentielle est nulle.

Par contre, si la pièce présente une anomalie l'amplitude de la grandeur d'alimentation est modifiée [23].

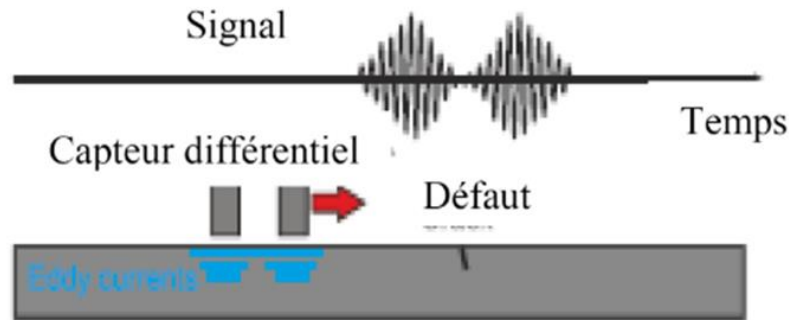


Figure I.34: Perturbation du signal d'alimentation [23]

I.5.7.9 Types de défauts

La plupart des pièces au cours de leur service sont soumises à des efforts importants. Dans les pièces mécaniques, les défauts sont à l'origine [13] :

- Des fissures de fatigue et de ruptures brusques car le matériau n'a plus les qualités mécaniques requises pour le bon fonctionnement de la pièce.
- De la détérioration d'un assemblage. Ou la diminution de la résistance à corrosion dans le cas d'un manque d'adhérence très localisé dans un collage ou revêtement.

a. Défauts internes

Il s'agit de tous les défauts localisés dans le volume du corps à contrôler il s'agit des pièces moulées, forgées, laminées ou soudées. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle, dans l'industrie des métaux il peut s'agir de porosité, d'amas inclusions aires endogènes ou exogènes, ou de fissures comme des flocons. Pour ce type de défauts le contrôle visuel est exclu d'office et on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND [29].

b. Défauts de surface

Accessible à l'observateur direct mais pas toujours visible à l'œil nu, ils peuvent se classer en deux catégories distinctes :

- Défauts ponctuels : correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Les méthodes de contrôle non destructif les plus sensibles sont les mieux adaptées pour ce type de défauts (ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault).
- Défauts d'aspect, dans lesquels une variation de paramètre géométriques ou physiques attire le regard et rend le produit inutilisable (rugosité, surépaisseur, taches diverses). Pour ce type de défauts le contrôle visuel est possible mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques [29].

c. Autres défauts

- **Corrosion**

Elle provoque des piqûres, cratère, fissures et d'importantes réductions de section souvent dissimulées sous des couches d'oxyde feuilletées ou revêtement.

- **Erosion**

Il s'agit d'un arrachement de matière. Elle se remarque particulièrement dans les tubulures transportant des abrasifs. Elle apparaît, aussi, aux chargements de section et aux couches.

- **Effet de choc**

Des chocs intensifs et répétés entraînent un écrouissage important qui conduit à la formation de fissures.

- **La surchauffe**

La surchauffe provoque fréquemment la décarburation, l'augmentation de la grandeur du grain, et l'abaissement des caractéristiques mécaniques, ce qui engendre des fissures.

I.5.7.10. Fréquence et effet de peau

La fréquence est une grandeur qui joue un très grand rôle dans la détection des défauts. Dans une pièce conductrice à surface plane, excitée par une nappe de courant extérieure de fréquence f , les lignes de courants induits sont situées dans des plans parallèles à la surface de la pièce. La densité de ces courants varie en fonction de la profondeur z suivant l'expression [8] :

$$J(z) = J_s \exp(-z\sqrt{\pi f \sigma \mu}) = J_s \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \quad (\text{I.5})$$

Avec :

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

La profondeur de pénétration dépend de la conductivité électrique, de la perméabilité magnétique du matériau d'essai et de la fréquence de courant induit. La profondeur de pénétration est plus faible à mesure que la conductivité, la perméabilité ou la fréquence d'inspection augmentent. Elle peut être calculée par la relation :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (\text{I.6})$$

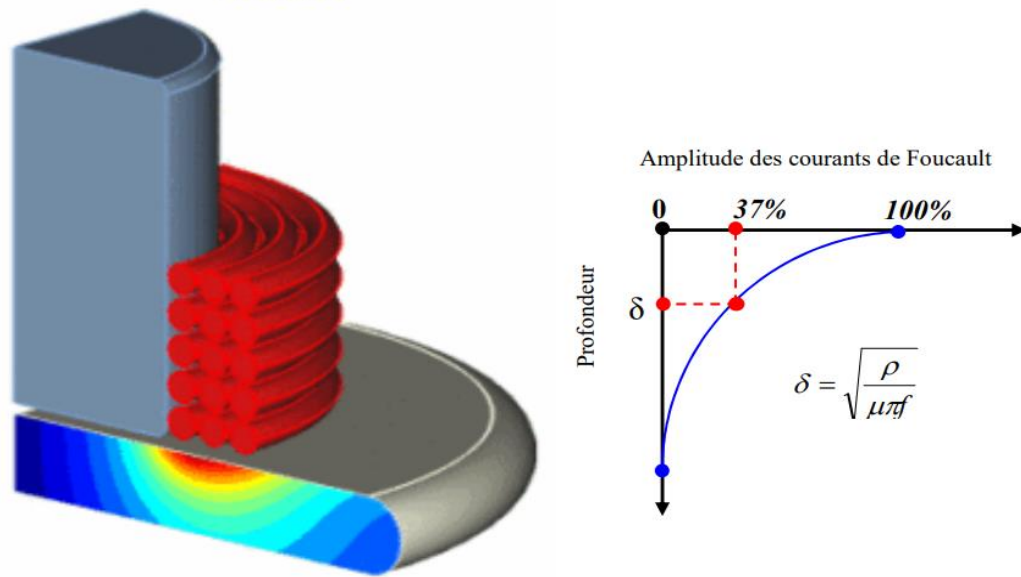


Figure I.35: Profondeur de pénétration [7]

Les tests à basse fréquence augmentent la profondeur de pénétration et sont plus appropriés pour l'inspection des défauts profonds.

Les fréquences d'inspection typiques dans les essais de courant électrique se situent dans la plage de 100 Hz-10 MHz.

Les essais à faible fréquence sont couramment utilisés dans l'inspection des matériaux ferromagnétiques pour compenser leur haute perméabilité et pénétrer dans la pièce d'essai.

I.6 Conclusion

Le CND est une opération de très grande importance qui gagne de plus en plus de terrain dans l'industrie avec tous ses différents secteurs. Son évolution technologique (instrumentation, automatisation ...) se manifeste surtout dans les secteurs produisant des pièces à coût de production élevé en quantité faible ou des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique. En effet, les méthodes de CND ont été développées pour répondre aux différentes problématiques rencontrées. Le choix d'une technique dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux inspectés, des phénomènes utilisés (thermique, électromagnétique...) et de la nature de la réponse recherchée. Le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND - CF), par sa simplicité, sa facilité de mise en œuvre, son efficacité, son faible coût et son caractère non polluant, sa possibilité d'automatisation et de contrôle à des vitesses de défilement élevées, est la technique la plus utilisée pour la caractérisation des défauts de surfaces dans les matériaux conducteurs d'électricité. Il sera choisi dans notre travail pour la détection d'un défaut dans une pièce conductrice.

Chapitre II

Modélisation d'un capteur à courants de Foucault

Chapitre II : Modélisation d'un capteur à courants de Foucault

II.1 Introduction

L'électromagnétisme est la branche de la physique qui étudie les effets de l'électricité, en englobant les effets dépendants ou indépendants du temps. Elle est apparue à la fin du XIXe siècle, de la découverte des effets magnétiques de l'électricité et de la mise en évidence d'un lien entre des phénomènes électriques et magnétiques. Avant la découverte de l'électromagnétisme, les effets de l'électricité étaient traités de manières différentes selon qu'ils étaient générés respectivement par des forces électriques ou par des forces magnétiques. Depuis les travaux de Maxwell (1864), il est devenu clair que les effets électriques et magnétiques ne sont indépendants l'un de l'autre qu'en régime stationnaire (c'est-à-dire, lorsque ces effets sont indépendants du temps), et ne le sont pas en régime variable. Plusieurs travaux de recherches importants ont permis la mise en place des lois fondamentales de l'électromagnétisme.

Le principe de fonctionnement du contrôle non destructif par les courants de Foucault est basé sur les phénomènes d'électromagnétisme. La compréhension de ces phénomènes est très importante pour la modélisation mathématique et la simulation numérique.

Les équations de Maxwell et les lois de comportement des matériaux régissent les interactions entre un capteur électromagnétique et une pièce conductrice. Différentes formules mathématiques concernant les champs électromagnétiques permettent de déterminer ces champs et/ou les potentiels électromagnétiques requis pour évaluer la variation de l'impédance de la bobine.

Dans ce chapitre nous allons présenter modélisation le problème de CND par CF. Les équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électriques et magnétiques seront rappelées. Elles seront développées afin d'obtenir la formulation en potentiel vecteur \mathbf{A} permettant de résoudre les problèmes quasi-statique. Enfin, on donnera les méthodes numériques susceptibles de résoudre l'équation différentielle aux dérivées partielle en l'occurrence la méthode des éléments finis.

II.2 Lois générales de l'électromagnétisme

II.2.1 Théorème d'Ampère

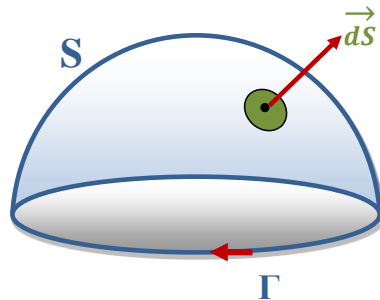


Figure II.1 : Surface ouverte S.

Le flux du champ magnétique \mathbf{B} à travers un contour fermé Γ est égale à la somme des intensités traversant Γ (Figure II.1) :

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = I + I_D \quad (\text{II.1})$$

Où I est l'intensité du courant de conduction et I_D celle du courant de déplacement à travers le courant fermé Γ .

Ce théorème montre que les source du champ magnétique \mathbf{B} sont les courants électriques « vrai » et ceux de déplacement, ces derniers résultant des variations temporelles du champ électrique [30].

II.2.2 Théorème de Gauss

Pour toute surface fermée quelconque S délimitant un volume τ contenant une charge électrique, le champ électrique \mathbf{E} vérifie dans le vide :

$$\oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q_{int}}{\epsilon_0} \quad (\text{II.2})$$

Avec q_{int} la charge contenue dans le volume τ et ϵ_0 la permittivité du vide.

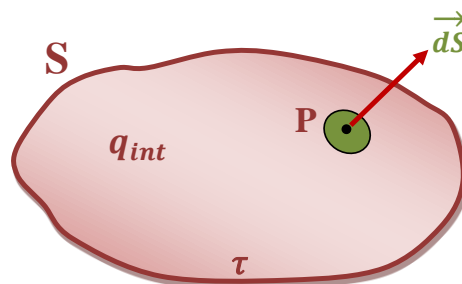


Figure II.2 : Surface fermée S contenant une charge totale q_{int} .

II.2.3 Loi de Faraday

Michael Faraday (1791-1867) physicien et chimiste anglais, a mené des travaux importants en chimie (lois de l'électrolyse) et en électrostatique. Il a étudié les actions réciproques d'un aimant et d'un circuit électrique. En 1831, il découvre le phénomène d'induction qui est donnée par la loi suivante [31] :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{II.3})$$

e est appelé la force électromotrice (f.e.m) d'induction et correspond à la différence de potentiel qui apparaît dans le contour fermé Γ . Φ est le flux magnétique à travers la surface S qui s'appuie sur ce même circuit.

Cette loi et le pilier de l'induction électromagnétique, qui stipule que les variations temporelles du flux magnétique à travers un circuit induisent l'apparition d'une force électromotrice qui engendre dans un circuit fermé des courants induits [30].

II.2.4 Loi de Lenz

En 1843, le physicien allemand Heinrich Lenz énonce la règle suivante dictant l'orientation du courant induit par la variation temporelle du champ magnétique :

Le courant induit dans un cadre est tel que le champ magnétique induit généré par ce courant dans la région à l'intérieur du cadre s'oppose à la variation du flux magnétique (champ magnétique qui traverse une surface) externe qui traverse le cadre [32].

Les effets magnétiques, et mécaniques de l'induction sont orientés de façon à s'opposer à ses causes.

Cette loi est, en pratique, utile, car elle permet de détecter de manière simple les erreurs d'orientation qui se traduisent par des erreurs de signes [31].

II.2.5 Conservation du flux magnétique

Soient deux surfaces S_1 et S_2 s'appuyant sur un même contour Γ orienté et S la surface fermée réunion des deux surfaces S_1 et S_2 , délimitant ainsi un volume τ (Figure II.3).

Les flux Φ_1 et Φ_2 du champ magnétique \mathbf{B} à travers la surface S_1 et S_2 valent :

$$\begin{cases} \Phi_1 = \iint_{S_1} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n}_1 dS \\ \Phi_2 = \iint_{S_2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n}_2 dS \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Si on effectue la différence entre les deux flux on aura :

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \iint_{S_1} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n}_1 \, dS - \iint_{S_2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n}_2 \, dS \quad (\text{II.5})$$

Puisque $n_1 = n$ sur S_1 et $n_2 = -n$ sur S_2 . On obtient donc :

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \iint_{S_1} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n}_1 \, dS + \iint_{S_2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n}_2 \, dS = \oiint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dS \quad (\text{II.6})$$

L'application de la formule d'Ostrogradsky et sachant que le champ magnétique a une divergence nulle donne :

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \oiint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dS = \iiint_\tau \text{div} \mathbf{B} \, d\tau = 0 \quad (\text{II.7})$$

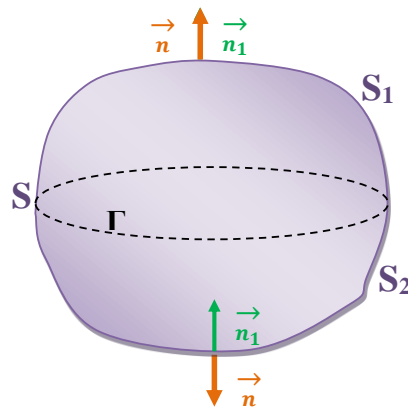


Figure II.3 : Surface S_1 et S_2 s'appuyant sur le même contour Γ .

Le flux magnétique à travers une surface fermée S est nul (Figure II.3) :

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dS = 0 \quad (\text{II.8})$$

On dit que le **champ magnétique \mathbf{B} est à flux conservatif**. La surface qu'on utilise pour calculer le flux à travers le contour Γ n'a pas d'influence.

II.2.6 Equations de Maxwell

Les lois physiques de l'électromagnétisme ont été découvertes sans liaison les unes avec autres et de manière incomplète (champ électrostatique, champ magnétostatique). De cet ensemble de lois, Maxwell en a tiré des équations plus générales. Ces équations locales sont des équations vectorielles valables en tout point de l'espace, dans tout milieu, et à tout instant.

Les équations de Maxwell relient les deux composantes du champ électrique E et du champ magnétique B à leurs sources, les densités de charges et les courants électriques [30]. Elles se présentent comme suit :

- **Maxwell-Gauss (électrique) :** Elle lie l'amplitude du champ électrique avec ses sources, elle est valable pour tous les régimes.

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

E : Champ électrique [V/m].

ρ : Densité volumique des charges électriques [C/m^3].

- **Maxwell-Gauss (magnétique) :**

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (\text{II.10})$$

- **Maxwell-Faraday :** L'équation de Maxwell- Faraday représente la loi d'induction qui établit le lien entre le champ électrique et l'induction magnétique. C'est la formulation mathématique du phénomène inductif dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur en mouvement mais soumis à un champ magnétique constant.

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

t : Temps [s].

- **Maxwell-Ampère :** Elle nous permet de trouver une relation directe entre le champ électrique, le champ magnétique et les courants électriques.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

J : Densité de courant [A/m^2].

Le terme $\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ représente la densité de courant de déplacement en [A/m^2].

Les équations de Maxwell doivent être complétées par les trois relations du milieu considéré.

- Relation magnétique en absence d'un aimant permanent

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mu = \mu_0 \cdot \mu_r \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

μ : Perméabilité magnétique absolue [H/m].

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide elle est égale à $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu.

- Relation électrique

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

ε : Permittivité électrique absolue [F/m].

ε_0 : Permittivité électrique du vide elle vaut $8.85 \cdot 10^{-12}$ [F/m].

ε_r : Permittivité électrique relative.

- Dans un milieu conducteur, nous avons la **loi d'Ohm**

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{ex} + \sigma \mathbf{E} + \sigma(\mathbf{V} \wedge \mathbf{B}) \quad (\text{II.15})$$

\mathbf{J}_{ex} : Densité des courants de sources [A/m^2] ,

σ : Conductivité électrique du matériau [S/m],

\mathbf{V} : Vitesse de déplacement de la pièce en mouvement [m/s],

$\sigma(\mathbf{V} \wedge \mathbf{B})$: Densité de courants induits par le déplacement des charges [A/m^2].

II.3 Relation de passage du champ électromagnétique

Les relations de passage expriment la discontinuité du champ électromagnétique à la traversée d'une surface chargée avec une densité superficielle σ ou parcourue par un courant de densité \mathbf{J}_s .

Soit une surface S séparant deux demi-espaces 1 et 2 qui peut être chargée ou parcourue par un courant (Figure II.4). On s'intéresse à un point M de cette surface, et aux deux points M_1 et M_2 de part et d'autre de la surface, proches de M. On appelle $\mathbf{n}_{1 \rightarrow 2}$ le vecteur unitaire porté par la droite $z'z$ et de même sens. L'objectif est de faire tendre M_1 et M_2 vers M pour l'assimiler au point M : on met alors en évidence la discontinuité du champ lors de la traversée de la surface au point M [30].

Les indices N et T désigneront respectivement la composante normale et la composante tangentielle quelconque d'un vecteur à la surface [30].

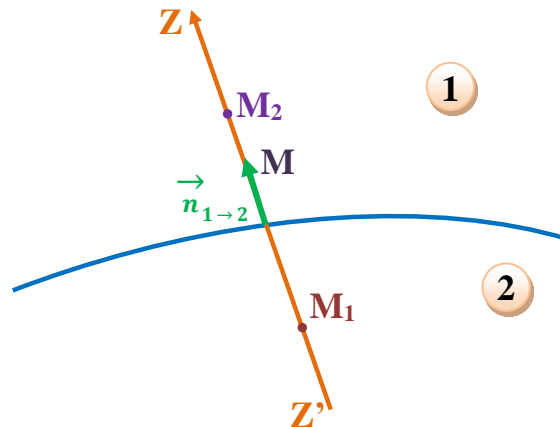


Figure II.4 : Les deux demi-espaces 1 et 2 séparés par la surface S.

II.3.1 Champ électrique

II.3.1.1 Composante normale

La condition de passage pour la composante normale du champ électrique lors de la traversée d'une surface chargée est donnée par la relation :

$$[\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1] \cdot \mathbf{n}_{1 \rightarrow 2} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (\text{II.16})$$

Ou bien

$$\mathbf{E}_{2N} - \mathbf{E}_{1N} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \mathbf{n}_{1 \rightarrow 2} \quad (\text{II.17})$$

La composante normale du champ électrique subit alors une discontinuité (Figure II.5).

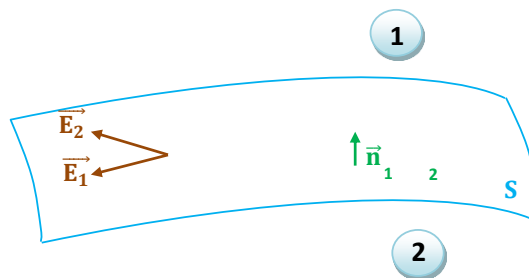


Figure II.5: Discontinuité de E_N a la traversée d'une surface chargée.

II.3.1.2 Composante tangentielle

La figure II.6 représente un contour Γ élémentaire rectangulaire autour d'un point M, dont les côtés sont soit parallèles à la normale $n_{1 \rightarrow 2}$ à la surface S, soit perpendiculaires à cette normale, et on pour dimensions respectives dl' et dl .

$$[\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1] \wedge \mathbf{n}_{1 \rightarrow 2} = 0 \tag{II.18}$$

Ou bien

$$\mathbf{E}_{T1} = \mathbf{E}_{T2} \tag{II.19}$$

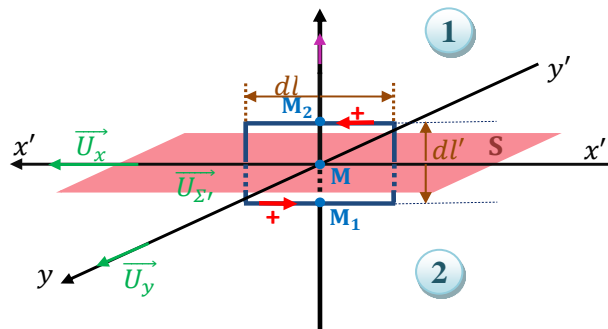


Figure II.6: Élément de surface autour du point $M \in S$.

Il y a conservation de la composante tangentielle du champ électrique a la traversée de toute surface, chargée ou non.

II.3.2 Champ magnétique

II.3.2.1 Composante normale

On prend un élément de surface dS de la surface S, et on construit une surface fermée cylindrique de base dS centrée sur M. M_1 et M_2 sont les centres des bases du cylindre (Figure II.7).

$$[\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1] \cdot \mathbf{n}_{1 \rightarrow 2} = 0 \tag{II.20}$$

Ou bien

$$B_{2N} = B_{1N} \tag{II.21}$$

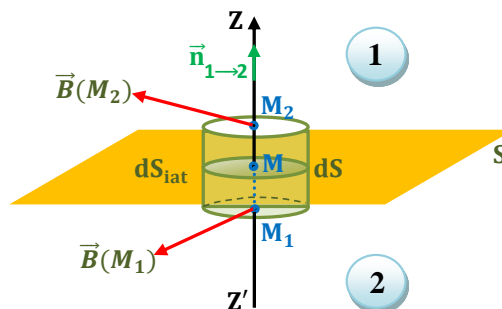


Figure II.7: Élément de volume autour du point $M \in S$.

La composante normale du champ magnétique reste conservée lors de la traversée de toute surface.

II.3.2.2 Composante tangentielle

En considérant la figure II.6 représentée plus haut. On écrit :

$$(\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \wedge \mathbf{n}_{1 \rightarrow 2} = \mu_0 \mathbf{J}_s \quad (\text{II.22})$$

C'est la condition de passage pour la composante tangentielle du champ magnétique lors de traversée d'une surface parcourue par des courants de surface. La composante tangentielle du champ magnétique subit alors une discontinuité.

II.4 Modélisation d'un capteur à courant de Foucault

II.4.1 Description

Généralement un dispositif de CND-CF est constitué de quatre régions (Figure II.9).

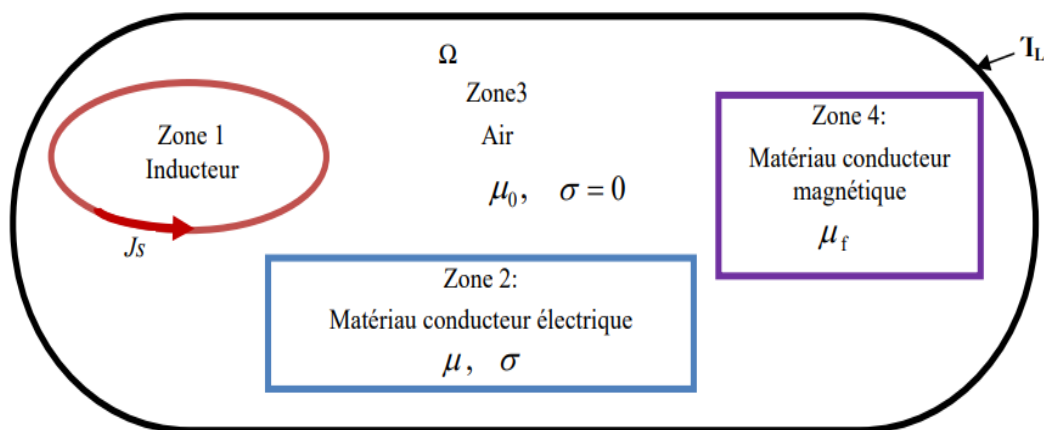


Figure II.8 : Schéma descriptif d'un problème de type CND par CF [7].

- Zone 1 : zone inductrice (bobine, fil...) dans lesquelles circulent des courants sources J_s .
- Zone 2 : zone conductrice, caractérisée par une perméabilité μ et une conductivité δ , qui est le siège des courants induits.
- Zone 3 : zone d'espace environnant où il n'y a ni courants induits ni courants sources, c'est de l'air. La totalité de cette géométrie forme le domaine d'étude Ω de frontière Γ_L
- Zone 4 : zone conductrice magnétique (noyau en ferrite...) pour canaliser le flux magnétique.

L'étude électromagnétique du CND par CF nécessite d'élaborer un modèle mathématique qui pourra donner la réaction d'une cible conductrice lorsqu'elle est soumise à une excitation de courant externe. Pour cela, il est impératif de passer par les équations de Maxwell.

II.4.2 Equation de Maxwell dans le régime quasi-stationnaire

On appelle **approximation des états quasi-stationnaire** l'étude de l'électromagnétisme dans la limite où les temps de propagation peuvent être négligés. Cela signifie que l'on peut négliger les courants de déplacement. Les équations de Maxwell s'écrivent :

- Maxwell-Gauss (électrique)

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (\text{II.23})$$

- Maxwell-Gauss (magnétique)

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (\text{II.24})$$

- Maxwell-Faraday

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{II.25})$$

- Maxwell-Ampère

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (\text{II.26})$$

II.4.3 Modélisation en potentiel vecteur \mathbf{A}

L'équation de Maxwell-Gauss magnétique s'écrit $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$, il existe un champ vecteur \mathbf{A} tel que :

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A} \quad (\text{II.27})$$

Le potentiel vecteur n'est pas unique. Considérons le vecteur $\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \operatorname{grad} U$, \mathbf{A} étant le potentiel vecteur du champ \mathbf{B} et U un champ de scalaires quelconque. Le rotationnel de ce vecteur est :

$$\operatorname{rot} \mathbf{A}' = \operatorname{rot} \mathbf{A} + \operatorname{rot}(\operatorname{grad} U) = \operatorname{rot} \mathbf{A} \quad (\text{II.28})$$

Puisque

$$\operatorname{rot}(\operatorname{grad} U) = 0 \quad (\text{II.29})$$

Donc

$$\operatorname{rot} \mathbf{A}' = \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (\text{II.30})$$

\mathbf{A}' est aussi un potentiel vecteur du champ \mathbf{B} [34].

Pour fixer son unicité on doit fixer sa divergence en utilisant la jauge de Coulomb ci-dessous :

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0 \quad (\text{II.31})$$

En remplaçant l'équation (II.27) dans l'équation (II.25) on aura :

$$\operatorname{rot} \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.32})$$

On peut définir ainsi le potentiel scalaire V tel que :

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\operatorname{grad}(V) \quad (\text{II.33})$$

La combinaison de l'équation (II.15) et (II.33) dans une pièce sans mouvement donne :

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{ex} - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \operatorname{grad}(V) \right) \quad (\text{II.34})$$

En négligeant les courants de déplacement, la substitution de l'équation (II.34) dans l'équation (II.26), permet d'écrire :

$$\operatorname{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J}_{ex} - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \operatorname{grad}(V) \right) \quad (\text{II.35})$$

En substituant l'équation du comportement des milieux (II.13), ensuite l'équation (II.27) dans l'équation (II.35) on a :

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\mathbf{A}) \right) + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \operatorname{grad}(V) \right) = \mathbf{J}_{ex} \quad (\text{II.36})$$

Cette équation admet dans ce cas une infinité de solution. Pour que \mathbf{A} soit totalement défini, on doit fixer sa divergence en utilisant la jauge de Coulomb :

$$\operatorname{div}(\mathbf{A}) = 0 \quad (\text{II.37})$$

Dans le cas d'une excitation par une densité de courant l'équation précédente s'écrit :

$$\mathbf{rot}\left(\left(\frac{1}{\mu}\right)\mathbf{rot}(\mathbf{A})\right) + \sigma \frac{\partial(\mathbf{A})}{\partial t} = \mathbf{J}_{ext} \quad (\text{II.38})$$

Le terme $\left(-\sigma \frac{\partial(\mathbf{A})}{\partial t}\right)$ représente la densité des courants de Foucault.

II.4.4 Modélisation bidimensionnelle

Le problème bidimensionnel que nous allons étudier concerne les systèmes à symétrie transrionnelle, ou aucune variation n'est enregistrée sur l'une des trois directions d'un plan cartésien. On choisit généralement l'axe (oz).

Le potentiel vecteur dans ce cas n'a qu'une seule composante parallèle à (oz). Il vient que le potentiel vecteur \mathbf{A} et le vecteur densité de courant se dirigent vers la même direction : $\mathbf{A} (0, 0, A_z)$ et $\mathbf{J} (0, 0, J_z)$. L'équation (II.38) s'écrit de la manière suivante dans chaque région du domaine étudié :

- Dans l'air

$$\mathbf{rot}\left(\left(\frac{1}{\mu}\right)\mathbf{rot}(A_z)\right) = 0 \quad (\text{II.39})$$

- Dans l'inducteur

$$\mathbf{rot}\left(\left(\frac{1}{\mu}\right)\mathbf{rot}(A_z)\right) = \mathbf{J}_{ext} \quad (\text{II.40})$$

- Dans la charge (La cible)

$$\mathbf{rot}\left(\left(\frac{1}{\mu}\right)\mathbf{rot}(A_z)\right) + \sigma \frac{\partial(A_z)}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.41})$$

Si μ est une constante, la notation complexe permet d'utiliser l'équation ci-dessous qui est de résolution aisée et peu coûteuse [34].

$$\frac{1}{\mu} \mathbf{rot}(\mathbf{rot} \mathbf{A}_z) + j \omega \sigma \mathbf{A}_z = \mathbf{J}_{ex} \quad (\text{II.42})$$

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

II.4.5 Condition aux limites

- 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 [35] :

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ A = A_0 & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

- Condition de Neumann (ou condition du deuxième problème aux limites) : on cherche la solution de l'équation différentielle dont on connaît la valeur du gradient sur le bord du domaine de résolution, notant que n la normal unitaire dirigée vers l'extérieur de Ω , on cherche donc à résoudre le problème [35] :

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ \frac{\partial A}{\partial n} = A_n & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

- Condition de mixte (ou condition de Dirichlet Neumann) : on cherche une solution qui vérifie la troisième condition de bord qui est [34] :

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ a \cdot A + b \cdot \frac{\partial A}{\partial n} = c & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

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

On note que :

Δ : L'opérateur Laplacien

f : Terme source.

Ω : le domaine d'étude.

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

II.5 Méthodes de résolution

On peut classer les méthodes de résolution des équations différentielles aux dérivées partielles, en deux grandes catégories : Les méthodes analytiques et les méthodes numériques.

II.5.1 Méthode analytique

II.5.1.1 Modèle mathématique

Un modèle mathématique est la mise en équation d'un phénomène dans le but de représenter fidèlement son comportement réel. Des relations reliant les variables d'entrées aux variables de sorties sont établies. Le modèle est construit selon le but à atteindre. Le succès du modèle dépend de sa facilité d'utilisation et de la précision des résultats prédis par le modèle. Le modèle mathématique n'est pas spécifique aux sciences de l'engineering, mais se retrouve dans d'autres domaines comme les sciences naturelles, les sciences sociales, les sciences économiques, etc... [36]

II.5.1.2 Formulation

Le modèle mathématique est formulé par des équations aux dérivées partielles et des conditions aux limites qui garantissent l'unicité de la solution, donc le fonctionnement du système physique. Nous nous intéressons particulièrement aux différents types d'équations du second ordre, à deux variables indépendantes x et y de la physique mathématique écrites sous la forme générale :

$$A \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + D \frac{\partial \phi}{\partial x} + E \frac{\partial \phi}{\partial y} + F \phi = G(x, y) \quad (\text{II.46})$$

Où $\phi = \phi(x, y)$ est la fonction recherchée, dépendantes de x et y . C'est la fonction qui donne le comportement du modèle. A, B, \dots et F sont les coefficients de l'équation aux dérivées partielles. Ils sont fonction de x et y et peuvent être des constantes. On ne traitera pas les équations non linéaires c'est-à-dire des équations dont les coefficients dépendent de ϕ [36]

L'équation (II.46) peut être réécrite sous la forme :

$$A \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = f\left(x, y, \phi, \frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) \quad (\text{II.47})$$

Selon le signe du déterminant $B^2 - 4AC$ on adopte le classement :

Si $B^2 - 4AC < 0$ L'équation est dite elliptique.

Si $B^2 - 4AC > 0$ L'équation est dite hyperbolique.

Si $B^2 - 4AC = 0$ L'équation est dite parabolique.

II.5.1.3 Types de résolutions analytiques

Les équations aux dérivées partielles peuvent être résolues par de nombreuses méthodes. **La méthode de la solution générale** et **la méthode de séparation des variables** sont les plus couramment utilisées.

La première méthode consiste d'abord à déterminer la solution générale de l'équation aux dérivées partielles puis de la particulariser afin d'obtenir la solution du problème en utilisant les conditions aux limites. La seconde méthode consiste, par contre, à rechercher d'abord des solutions particulières, puis de les utiliser pour la recherche de la solution du problème. Cette deuxième méthode trouve un champ d'application bien plus vaste que la première.

II.5.2 Méthodes numériques

Il existe plusieurs méthodes numériques de résolution de problèmes que rencontre l'ingénieur. Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode des différences finies, les méthodes d'approximation intégrales et variationnelles qui ont donné naissance à la méthode des éléments finis [36].

II.5.2.1 Méthode des différence finies

La méthode des différences finies est basée sur l'approximation locale des dérivées apparaissant dans les équations différentielles. En se basant sur le développement limité de Taylor, les fonctions sont approchées par plusieurs types de schémas aux différences finies : différences finies en avant, en arrière et centrées. La précision du résultat varie d'un schéma à un autre selon la troncature utilisée. La méthode utilise un maillage, ou grille du domaine d'intégration.

L'équation discrétisée, selon les schémas cités plus haut, est projetée aux points du maillage. On obtient alors un système d'équations dont la résolution permet de trouver la solution approchée du problème.

II.5.2.2 Méthodes d'approximation intégrales et variationnelles

Les méthodes d'approximation peuvent se classer en deux catégories principales : Les méthodes de résidus pondérés, ou méthodes intégrales et les méthodes variationnelles ou méthodes à extremum.

Le principe général de l'approximation consiste à chercher la meilleure approximation d'une fonction sur le domaine d'intégration de manière à satisfaire au mieux les lois physiques auxquelles elle obéit.

La solution est écrite sous forme d'une série polynomiale ou trigonométrique à termes finis. Des paramètres généralisés sont introduits et des fonctions de base sont alors construites. Le principe de la méthode consiste à rechercher les paramètres qui donnent la meilleure approximation construite à l'aide de fonctions de base [36].

II.5.2.3 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est la méthode la plus utilisée actuellement, son champ d'application ne cesse de s'élargir. Le succès de la méthode réside principalement dans sa formulation : elle réunit les principes les plus forts de la méthode des différences finies et ceux de la méthode des équations intégrales : respectivement la discrétisation du domaine d'intégration et le principe de construction de l'approximation et sa formulation [36].

La méthode des éléments finis améliore ces deux principes comme suit :

- Le domaine d'intégration n'est plus discrétisé par des points comme pour le cas de la méthode des différences finies, mais par des sous domaines continus ou des dont le nombre est fini, et qu'on appelle élément finis (Figure II.10). En utilisant ce découpage, (modélisation géométrique), la méthode fournit un modèle qui représente aussi fidèlement que possible le phénomène physique dans sa réalité.

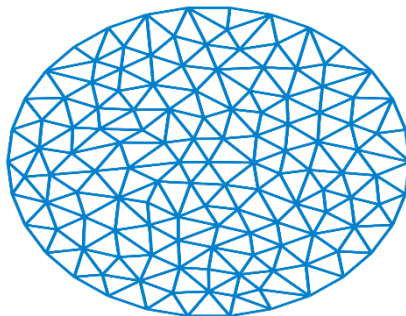


Figure II.9 : Exemple de discrétisation par éléments finis [37]

- La formulation intégrale, de type Galerkin, est appliquée non pas sur le domaine d'intégration global, mais sur des éléments finis standard, ayant des fonctions de formes normées, au lieu des fonctions de base de la méthode de Galerkin. La formulation devient unifiée pour les différents types de problèmes. Une bibliographie d'éléments est alors mise à jour. La méthode devient alors programmable par excellence. Possédant tous ces atouts, la méthode ne cesse de se développer et de s'étendre de plus en plus à des domaines qui étaient jusque-là du seul ressort des méthodes expérimentales.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation des problèmes électromagnétiques liés aux équations de Maxwell dans le domaine CND-CF a été présentée, les différentes formulations en champs électrique et magnétique ont été illustrées, ainsi que les méthodes de résolution des problèmes directs ont été abordées. La méthode des éléments finis est la méthode la plus couramment utilisée pour résoudre les problèmes CND-CF.

Comme le logiciel COMSOL Multiphysics est un logiciel de calcul numérique par éléments finis permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel, nous avons jugé utile d'utiliser ce logiciel comme outil de simulation pour les différents cas possibles du contrôle non destructif par capteurs à courants de Foucault qui feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Résultats de simulation d'un capteur à courants de Foucault

Chapitre III : Résultats de simulation d'un capteur à courants de Foucault

III.1 Introduction

Le contrôle des structures par CF a pour but de détecter les défauts. Cette opération dépend de plusieurs facteurs liés généralement aux propriétés géométriques, électriques et magnétiques de la pièce à analyser et de la sonde. Une modélisation préalable de ce type de capteur permet d'évaluer d'une manière très précise sa capacité de détection. Ce chapitre est consacré à la modélisation élément finis d'un système basique constitué d'une pièce conductrice et d'une bobine d'excitation. L'étude est effectuée dans le but de relever les variations des différences d'impédances, de résistances et de réactance dans le cas de variations physiques (conductivité et fréquence) et de variations géométriques (lift-off et position du défaut). Cette simulation nécessite l'étude de la pièce sans défaut et avec défaut.

Suite à la complexité de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis, nous avons adopté pour notre étude le logiciel COMSOL Multiphysics. C'est un ensemble d'outils et une bibliothèque de modèles prédéfinis permettant la simulation de tout processus physique pouvant être décrit par des équations aux dérivées partielles (EDP), y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF [17].

III.2 Comsol Multiphysics

III.2.1 Définition

COMSOL Multiphysics est un environnement de simulation et de modélisation de presque toutes les physiques. Son point fort : le couplage entre différents phénomènes. Des modules optionnels offrent des interfaces spécialisées en acoustique, génie chimique, géophysique, électromagnétisme, transfert de chaleur, MEMS, plasma, batteries & piles à combustible, etc.

COMSOL Multiphysics propose des outils de maillage automatique et semi-automatique. L'utilisateur peut également définir une séquence de maillage pour contrôler la séquence de création du maillage. Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis. Il contient des interfaces de modélisation prédéfinis pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multiphysiques [38].

III.2.2 Historique

Le logiciel COMSOL et la société correspondante ont été créés en 1986 à Stockholm, en Suède par des étudiants de Germund Dahlquist (Svante Littmarck et Farhad Saeidi). Depuis, l'entreprise s'est

développée en un groupe comprenant plusieurs filiales réparties dans le monde entier. Aujourd'hui, Svante Littmarck est le PDG du groupe COMSOL et le président-directeur général de COMSOL, Inc. Farhad Saeidi est le président de COMSOLAB. La première version de COMSOL Multiphysics est sortie en 1998. La version initiale (avant 2005) de COMSOL Multiphysics s'appelait FEMLAB [38].

- 1986 : Création de la société.
- 1998 : Sortie de FEMLAB.
- 2005 : Changement de nom au profit de COMSOL Multiphysics.
- 2014 : COMSOL Multiphysics 5.0 avec le constructeur d'applications et COMSOL Server.
- 2018 : COMSOL Compiler.

III.2.3 Domaine d'application

La bibliothèque d'applications présente des modèles construits avec COMSOL Multiphysics pour la simulation d'une grande variété d'applications, dans les domaines de l'électromagnétisme, de la mécanique des solides, de la mécanique des fluides et de la chimie. Des modèles résolus avec leur documentation détaillés, comprenant les instructions de construction pas-à-pas peuvent être téléchargés, et utilisés comme point de départ dans un travail de simulation [39].

III.3.1 Description de dispositif de CND-CF

III.3.1.1 Présentation

Le capteur est constitué de deux bobines longues, qui se déplacent le long d'une plaque conductrice. Cette dernière contient un défaut aligné parallèlement aux deux bobines, sa configuration générale est représentée sur la figure (III.1).

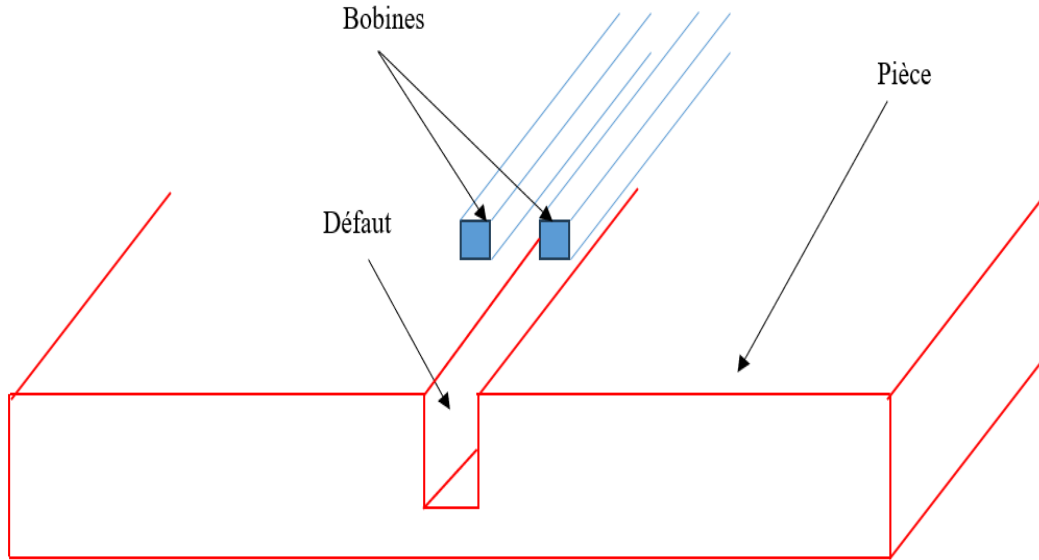


Figure III.1 : Structure du système « capteur-cible »

III.3.1.2 Dimensions et propriétés physiques

Les dimensions géométriques et les propriétés physiques du dispositif sont données respectivement dans les tableaux (III.1) et (III.2), la densité de courant d'excitation $J_{ex}=14*10^6$ A/m².

Plaques métallique	Longueur de la plaque	0.16 m
	Largeur de la plaque	0.005 m
	Largeur du défaut	0.004 m
	Longueur du défaut	0.0004 m
Conducteurs	Longueur de coté de la bobine	0.002 m
	Distance entre les deux conducteurs	0.006 m

Tableau III.1 : Dimensions géométriques du modèle

Milieu	Caractéristiques Physiques	Conductivité Electric[S/m]	Perméabilité Magnétique[H/m]
Air environnant		00	$\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, \mu_r = 1$
Plaque		$35.4 * 10^6$	$\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, \mu_r = 1$

Tableau III.2 : Caractéristiques physiques du modèle

III.4 Modélisation du capteur

Puisque la bobine et le défaut sont très long, l'étude peut être effectuée en 2D dans le plan (XOY). Deux cas vont être étudiés, la plaque sans défaut et la plaque avec défaut.

III.5 Maillage et géométrie du dispositif

III.5.1 Cas d'une plaque sans défaut

Le dispositif limité par le domaine de résolution, se compose d'un inducteur alimenté par un courant sinusoïdale qui représente le capteur, d'une pièce conductrice aimantée et de l'air. La figure III.3.a donne le maillage initial généré par Comsol qui est un maillage triangulaire. Il faut noter que le raffinement du maillage joue un très grand rôle dans la précision des résultats. La figure III.3.b présente la discrétisation en éléments finis adoptée.

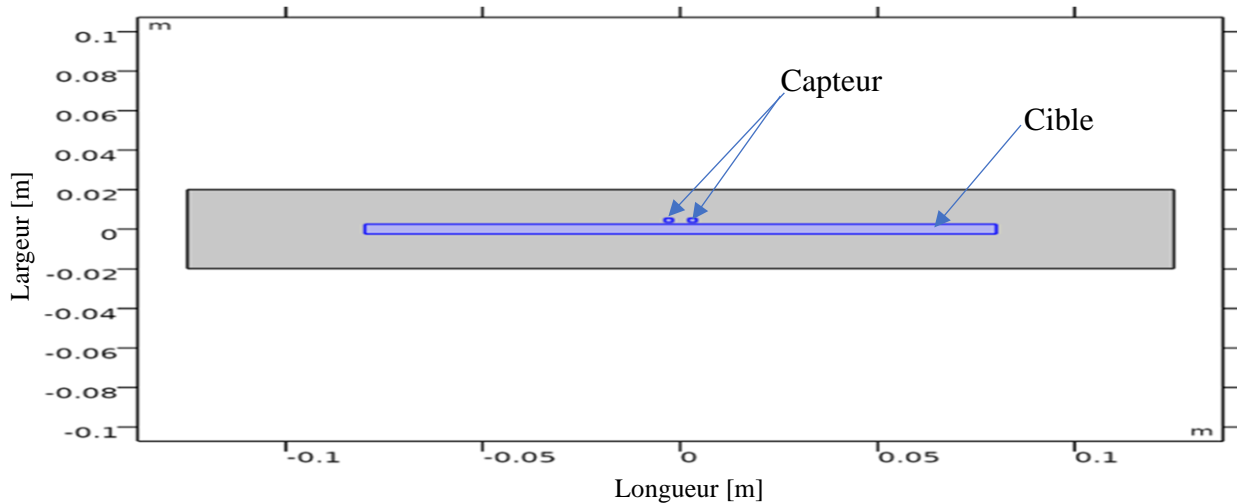


Figure III.2: Géométrie du système « capteur-cible »

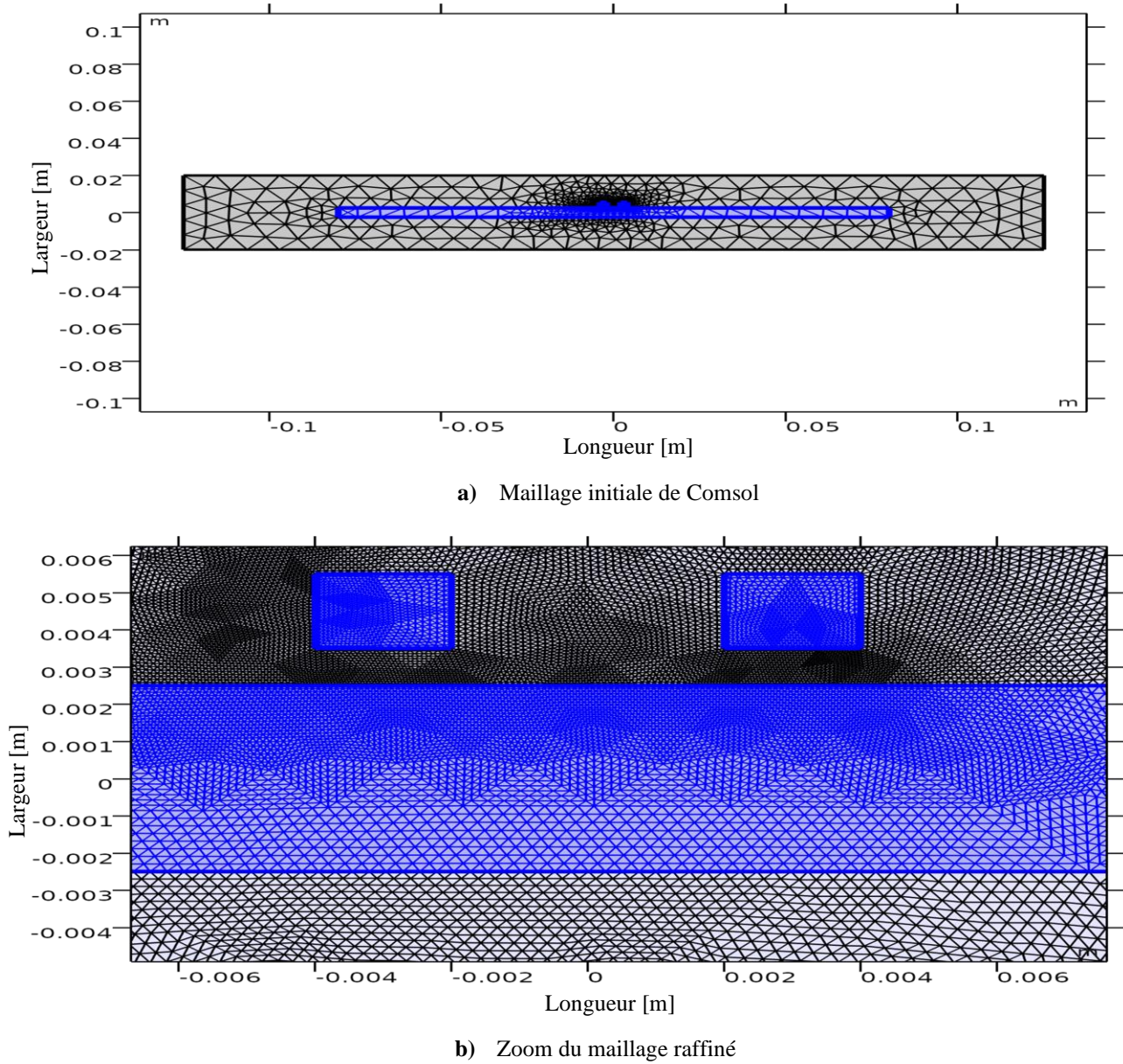


Figure III.3 : Maillage du système « capteur-cible »

III.5.2 Cas d'une plaque avec défaut

La géométrie, le maillage initial et le maillage raffiné du capteur après introduction d'un défaut sont représentés dans les figures (III.4), (III.5.a), (III.5.b) respectivement.

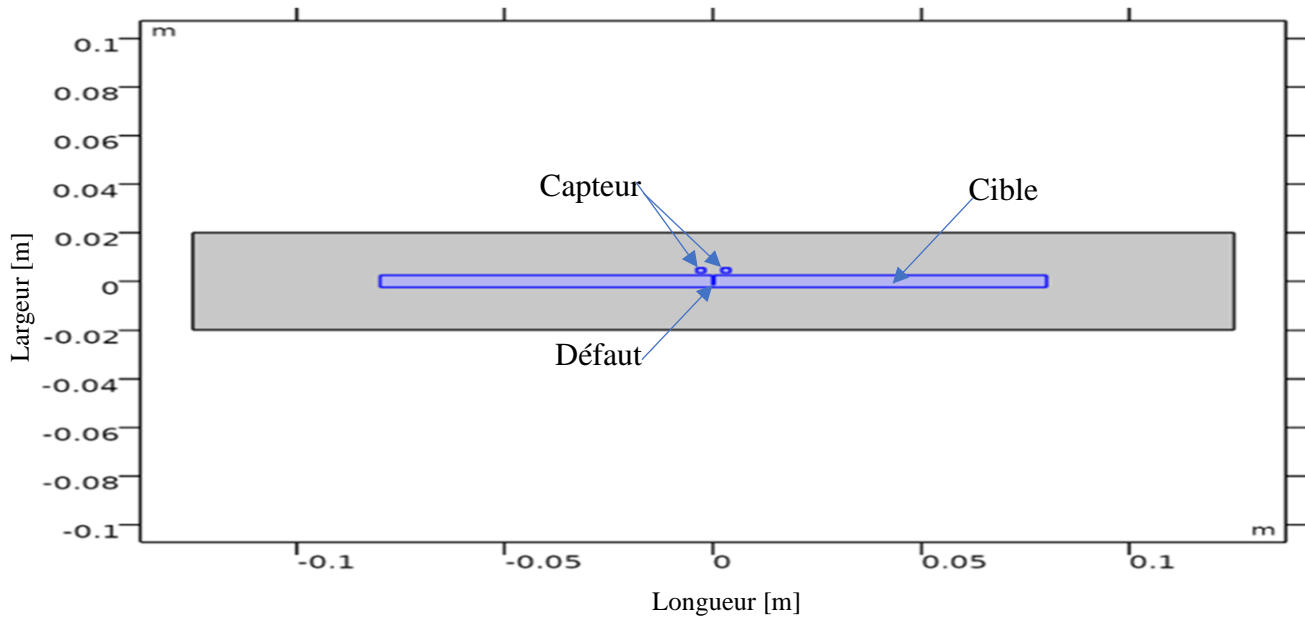
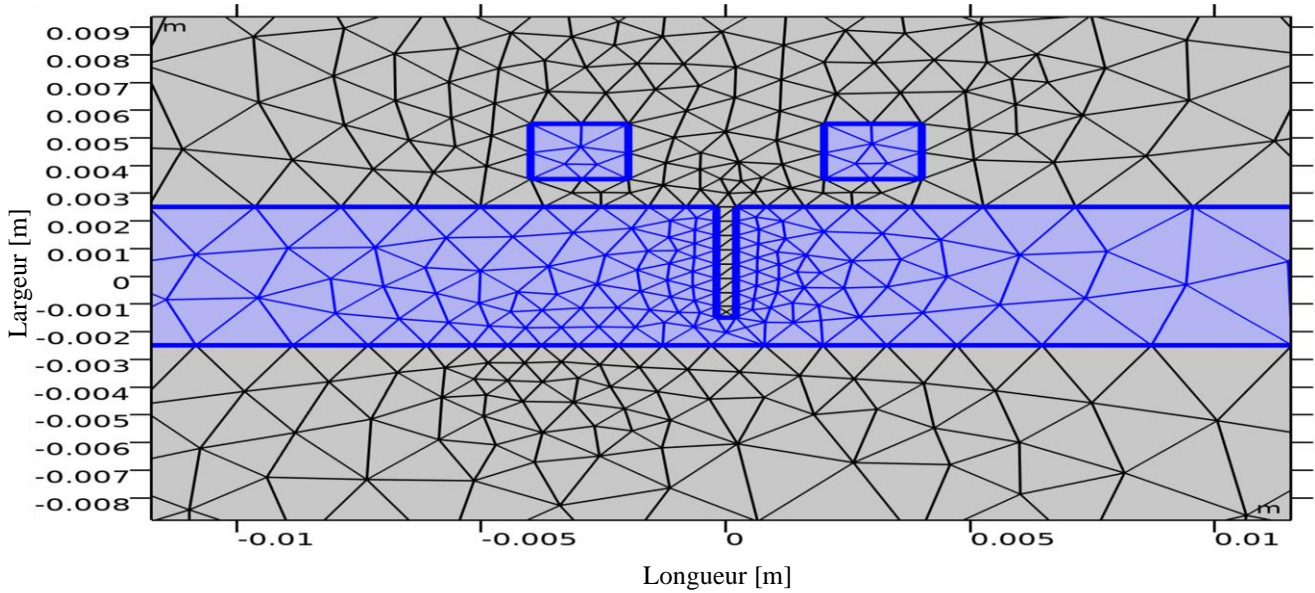
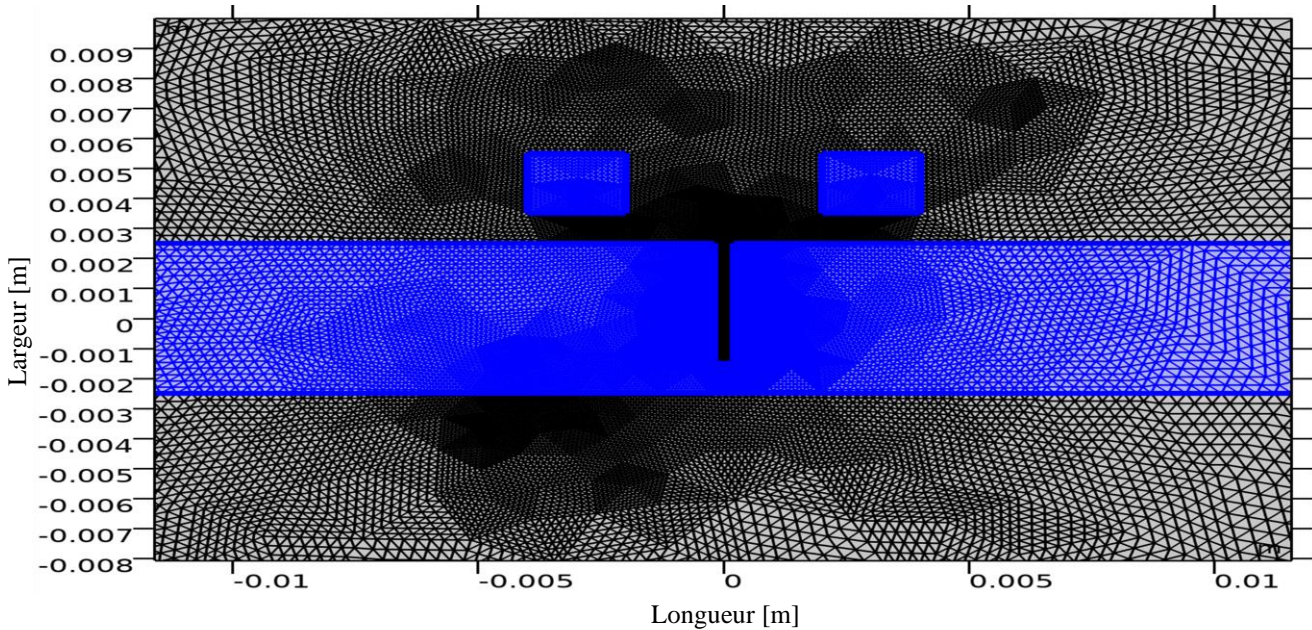


Figure III.4: Géométrie du système « capteur-cible » avec défaut



a) Zoom du maillage initial



b) Zoom du maillage raffiné

Figure III.5: Maillage du système « capteur-cible » avec défaut

III.6 Résultats de simulation

III.6.1 Expression de la différence d'impédance

C'est le signal de variation de la différence d'impédance qui donne les informations nécessaires sur l'existence du défaut, les valeurs de cette dernière sont calculées à partir des valeurs de l'énergie magnétique (W_m) emmagasinée dans tout l'espace d'étude et l'énergie dissipée dans la pièce conductrice

qui représente les pertes Joules (P_j), ces deux grandeurs sont relevées lors de l'exécution du modèle dans le logiciel Comsol pour chaque déplacement. Elles sont définies par les relations suivantes [40] :

$$W_m = \frac{1}{2} L I_{eff}^2 \quad (III.1)$$

$$P_j = R I_{eff}^2 \quad (III.2)$$

I_{eff} représente la valeur efficace du courant parcourant la bobine déterminée à partir de la densité du courant.

L'impédance de la bobine est définie par :

$$Z = R + j\omega L \quad (III.3)$$

La résistance R et l'inductance L sont obtenues successivement par les équations (III.1) et (III.2).

Les différences d'impédances de réactance et de résistance sont données par les équations suivantes :

$$\Delta Z = \sqrt{\Delta R^2 + \Delta X^2} \quad (III.4)$$

$$\Delta X = X_d - X_0 \quad (III.5)$$

$$\Delta R = R_d - R_0 \quad (III.6)$$

Tel que :

X_d : Réactance du capteur avec défaut [Ω].

X_0 : Réactance du capteur avec pièce sans défaut [Ω].

R_d : Résistance du capteur avec défaut [Ω].

R_0 : Résistance du capteur sans défaut [Ω].

III.6.2 Variation des propriétés physiques

Cette étude est dédiée à l'analyse de l'effet de la variation de la fréquence et de la conductivité sur les phénomènes électromagnétiques obtenus. Nous avons relevé les résultats du potentiel vecteur A, et de la densité des courants induits. Dans toute la simulation la densité de courant d'excitation est constante, sachant que la bobine aller représente la bobine à droite et la bobine retour représente la bobine à gauche.

III.6.2.1 Variation de la fréquence

Puisque l'effet de la variation de la fréquence sur la distribution des grandeurs électromagnétiques a été déjà abordée dans un travail précédent [4], nous avons jugé de ne représenter que la différence de variation de l'impédance, de la réactance et de la résistance du capteur pour des fréquences de 1KHz, 2KHz, 4KHz, 6KHz, 8KHz et 10KHz.

Le centre du capteur se déplace le long de la plaque conductrice, sur une longueur x qui varie de - 0.02 à 0.02.

Les figures (III.6, III.7 et III.8) montrent que plus la fréquence est élevée plus l'impédance ΔZ , donnée par la différence entre les deux impédances constituant le capteur, augmente. En effet, l'augmentation de la fréquence induit des courants très fort dans la pièce conductrice et par conséquent les champs magnétiques qu'ils créent seront eux aussi très forts, ces champs vont s'opposer aux champs magnétiques créés par la bobine ce qui va causer une grande variation de son impédance.

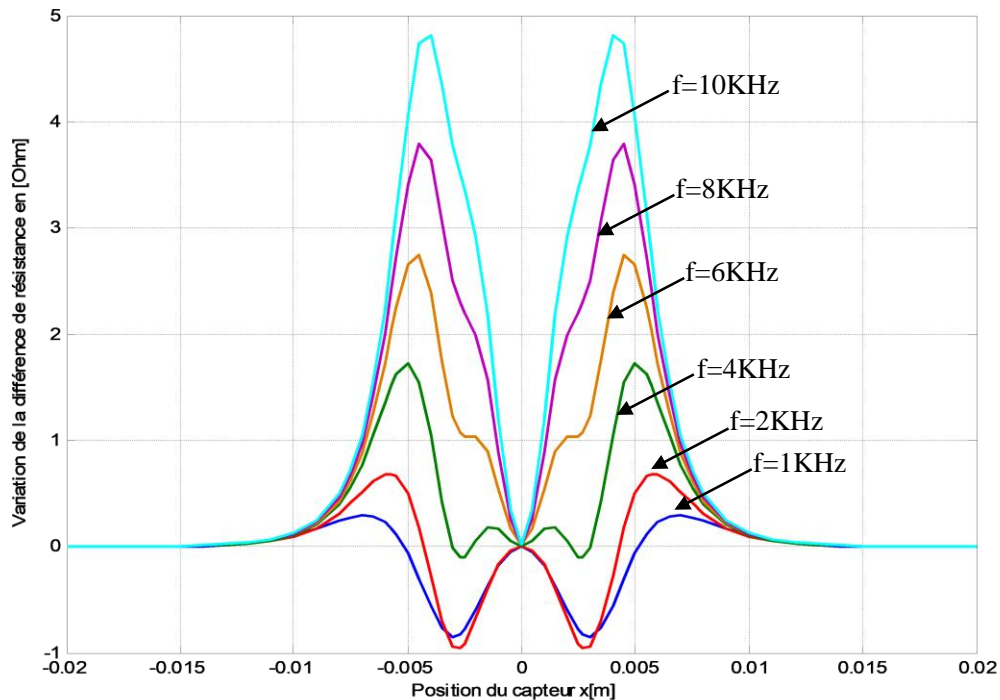


Figure III.6 : Variation de la différence de résistance en fonction de la position du capteur

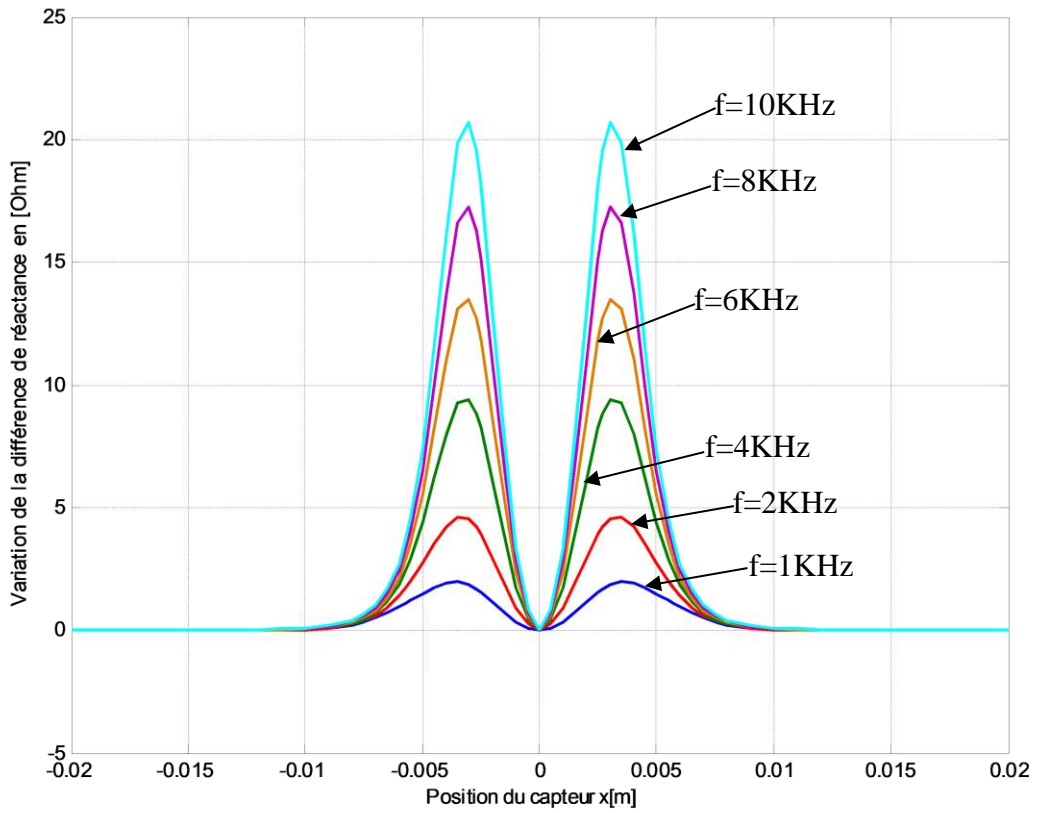


Figure III.7 Variation de la différence de la réactance en fonction de la position du capteur

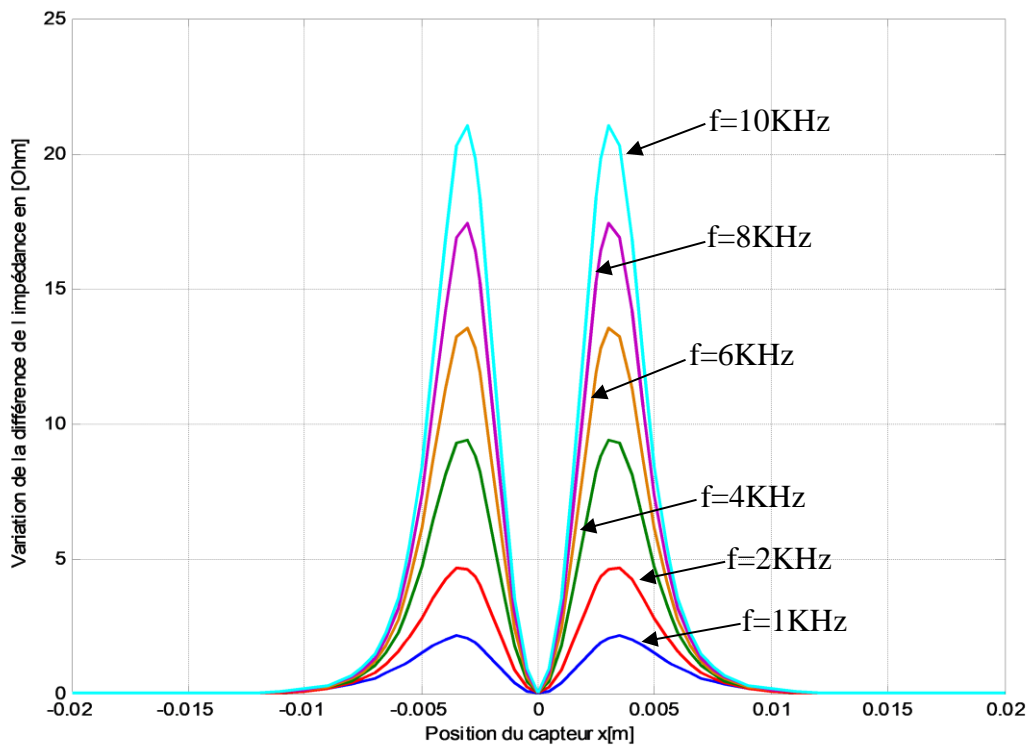


Figure III.8 Variation de la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur

III.6.2.2 Variation de la conductivité

Nous avons choisi trois conductivités $\sigma = 35e^6 S/m$, $\sigma = 59e^6 S/m$ et $\sigma = 85e^6 S/m$ qui représentent respectivement l'Aluminium, le Cuivre et l'Acier la bobine est alimentée avec une fréquence de 1000 Hz, l'étude sera effectuée dans la plaque saine et la plaque avec défaut.

III.6.2.2.a Cas d'une plaque saine (sans défaut)

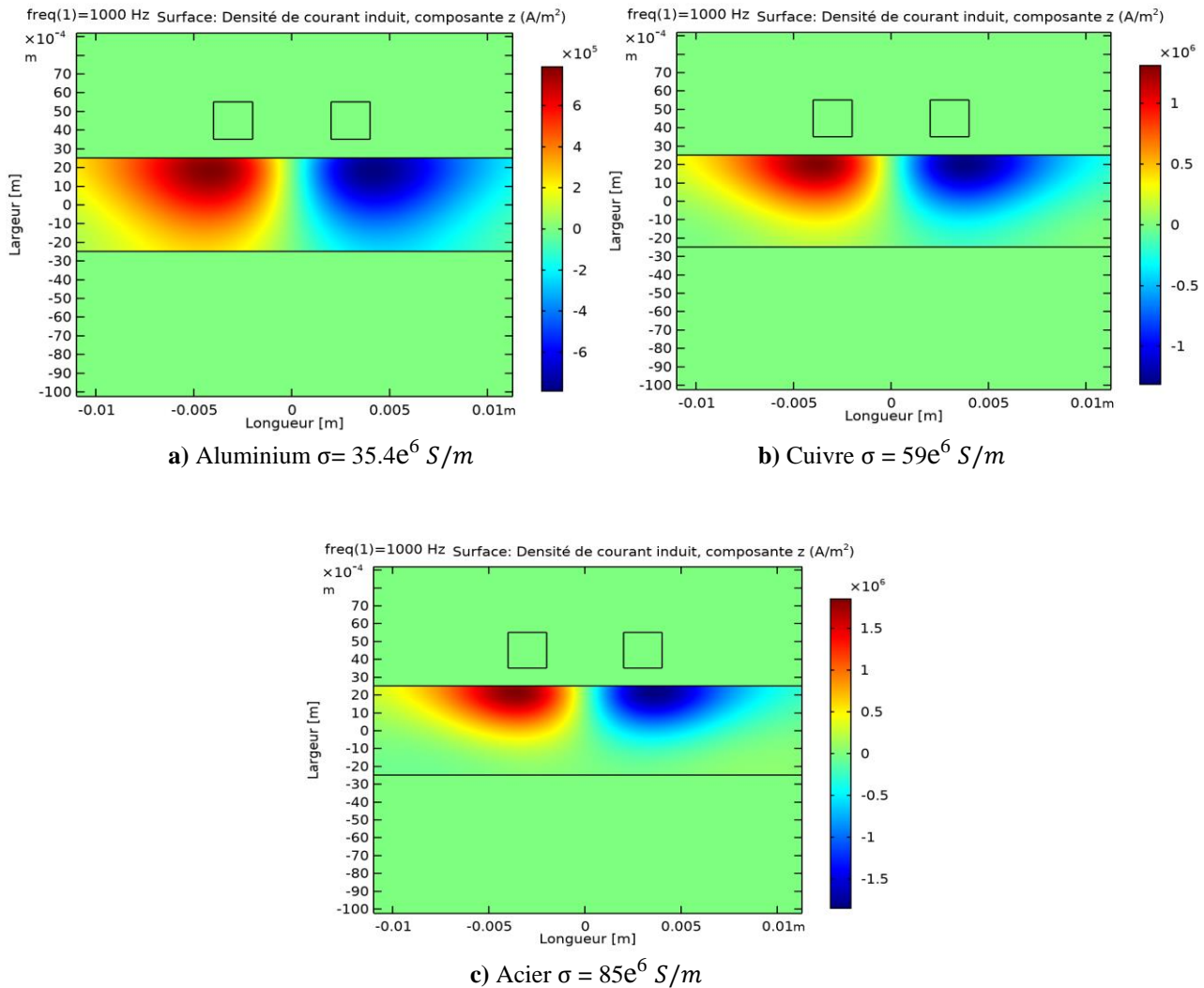
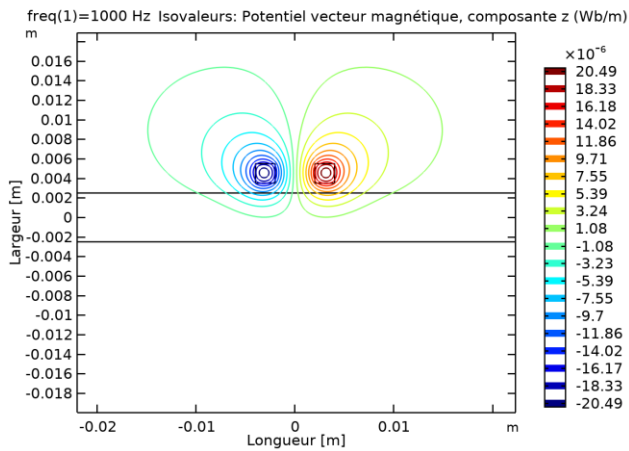
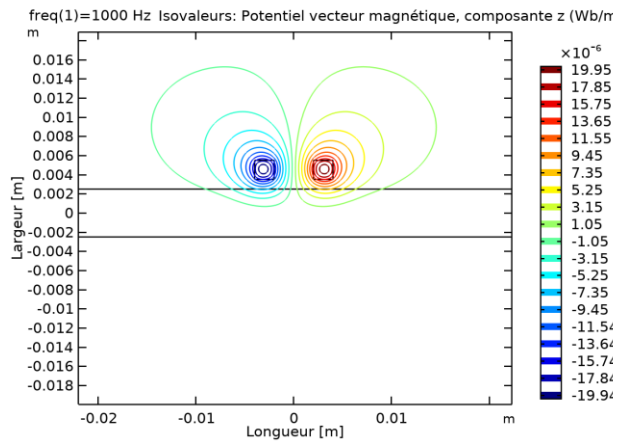


Figure III.9: Densité de courant induit J [A/m²]

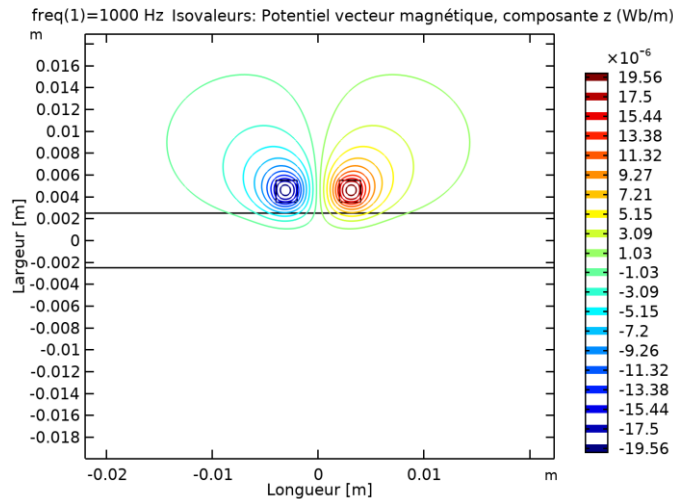
La distribution et l'intensité des courants induits dans les matériaux conducteurs sont fortement affectées par la conductivité électrique. D'après la figure III.9 on remarque que lorsque la conductivité augmente la pénétration des courants induits diminuent avec la profondeur et leurs amplitudes augmentent au niveau de la surface.



a) Aluminium $\sigma = 35.4e^6 S/m$



b) Cuivre $\sigma = 59e^6 S/m$



c) Acier $\sigma = 85e^6 S/m$

Figure III.10: Potentiel vecteur magnétique A [Wb /m]

La figure III.10 montre que lorsque la conductivité augmente, le potentiel vecteur A diminue. En effet, dans un matériau de forte conductivité électrique, de forts courants induits sont générés à la surface, ces derniers produisent à leur tour un fort champ magnétique secondaire qui s'oppose au champ magnétique primaire créé par la bobine. Par conséquent, la diminution de la conductivité électrique engendre une augmentation du champ magnétique dans la bobine.

III.6.2.2.b Cas d'une plaque avec défaut

- **X=0 m (Capteur au-dessus du défaut)**

Dans cette étude, nous avons observé la répartition des courants induits ainsi que le vecteur potentiel A, illustrés dans les figures III.11 et III.12.

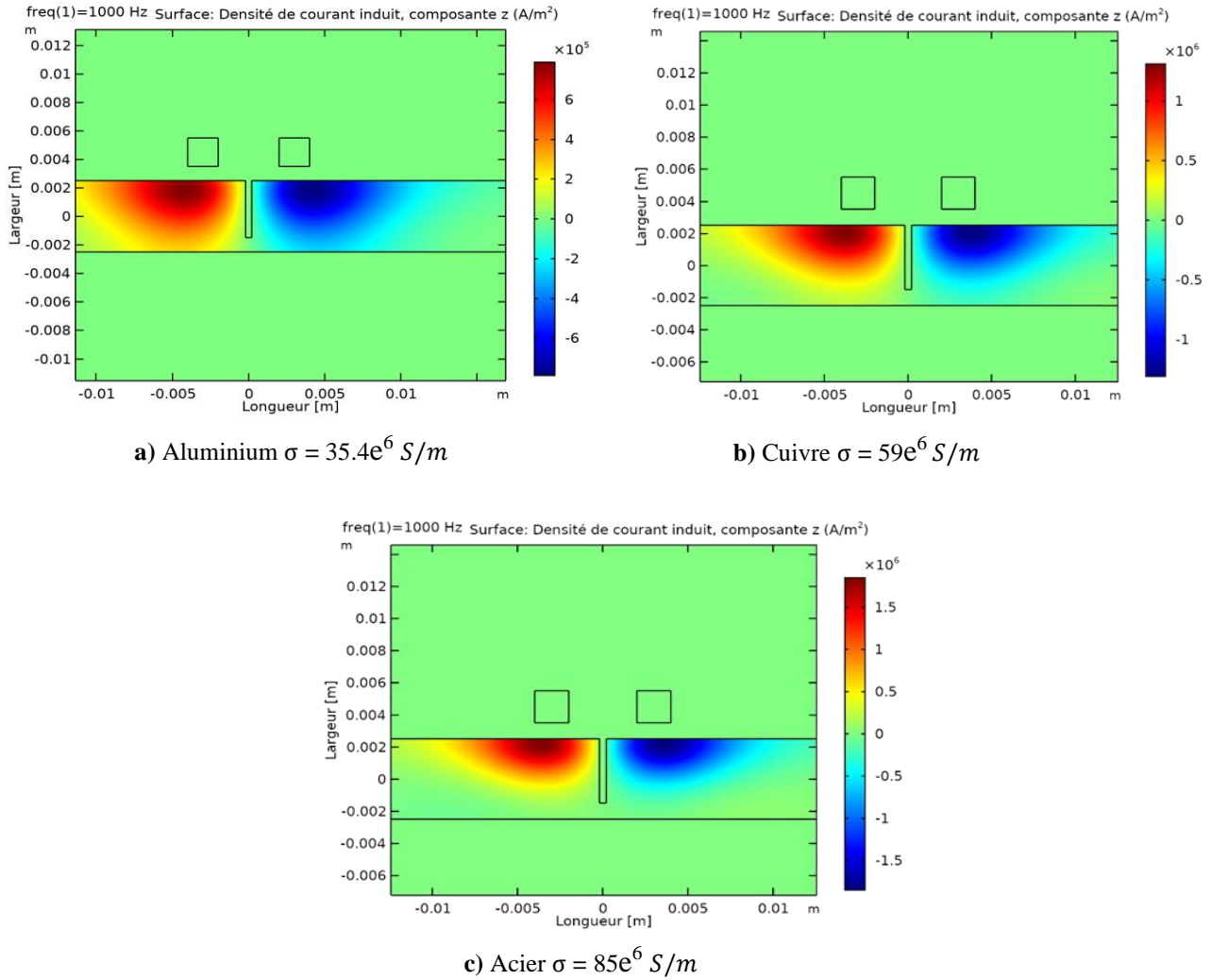
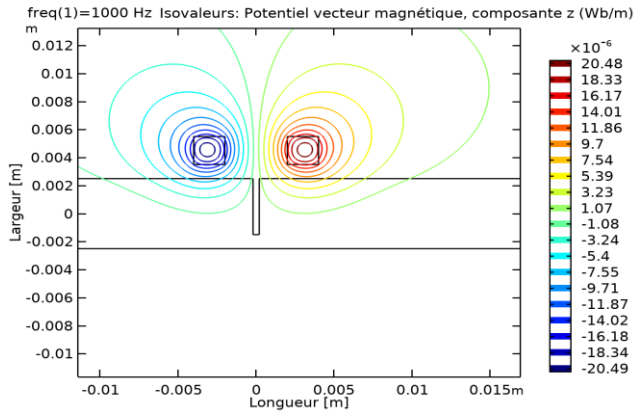
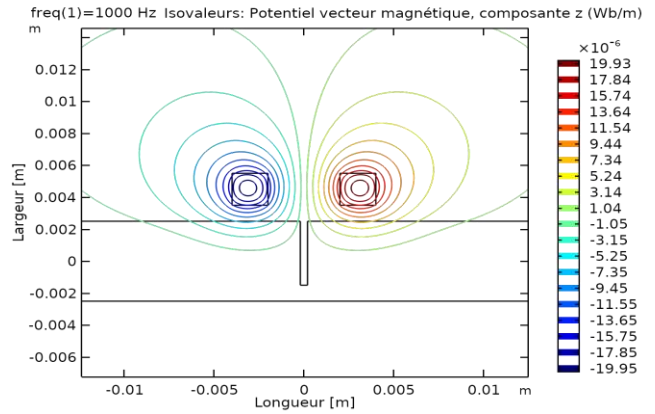


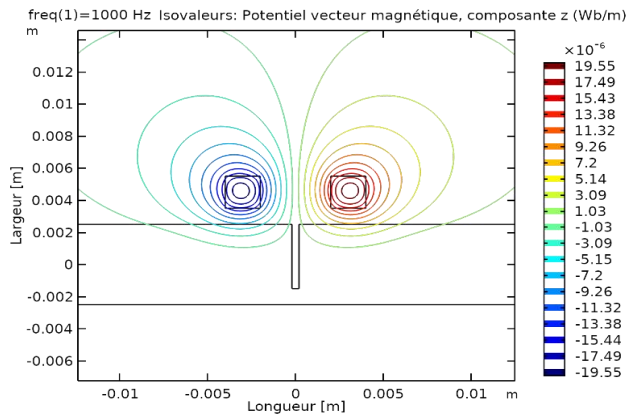
Figure III.11: Densité de courant induit J [A/m²] pour x=0 m



a) Aluminium $\sigma = 35.4e^6 S/m$



b) Cuivre $\sigma = 59e^6 S/m$

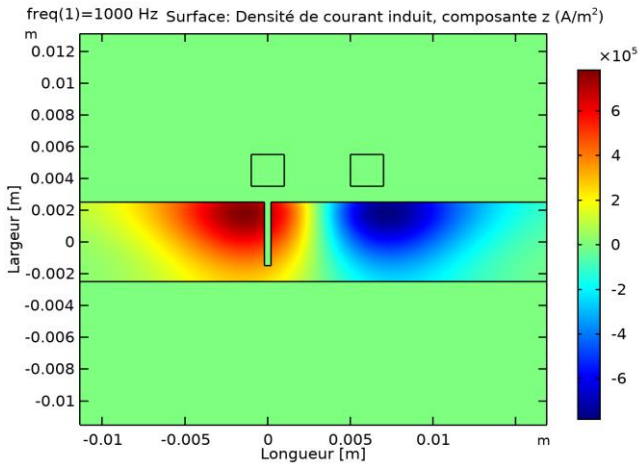


c) Acier $\sigma = 85e^6 S/m$

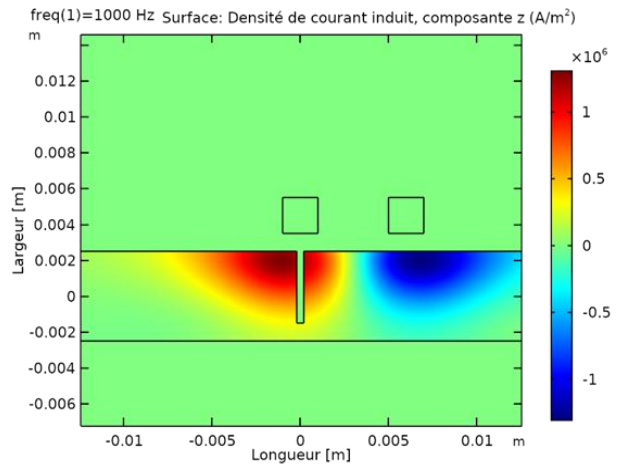
Figure III.12: Potentiel vecteur magnétique A [Wb /m] pour x=0 m

Les figure III.11 et III.12 montre que les résultats obtenus sont similaires à ceux de la modélisation sans défaut, ceci s'explique par le fait que ce dernier est situé au centre de la bobine et a une ouverture très étroite de telle manière qu'il n'a pas d'influence sur la distribution des courants induits.

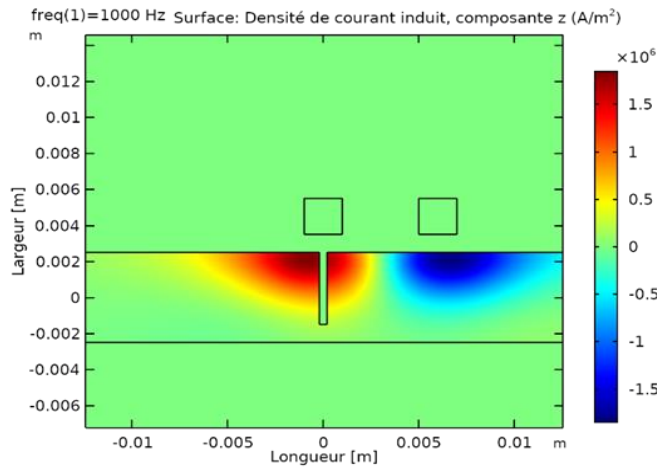
- **X=0.003 m (Bobine retour du capteur au-dessus du défaut)**



a) Aluminium $\sigma = 35.4e^6 S/m$

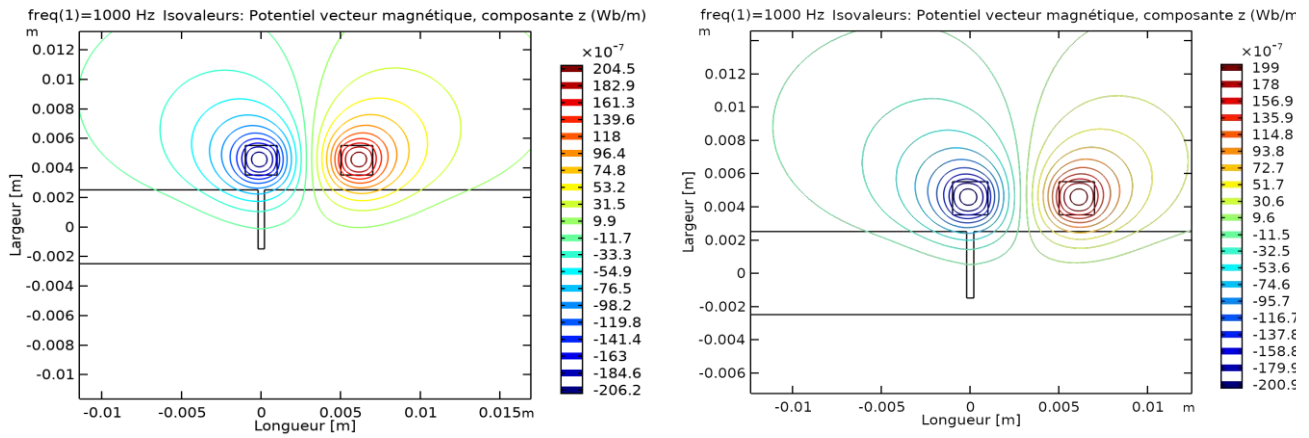


b) Cuivre $\sigma = 59e^6 S/m$



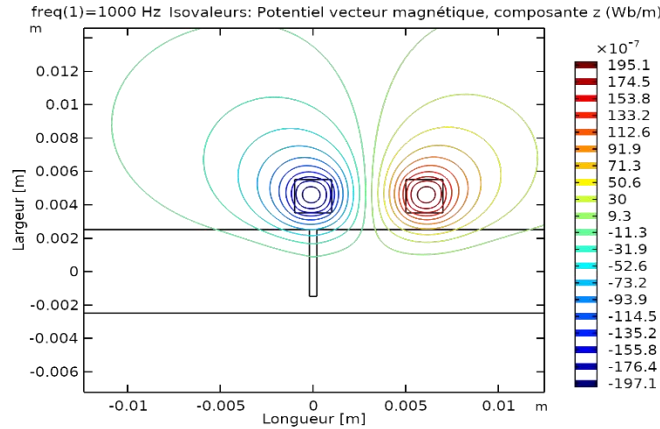
c) Acier $\sigma = 85e^6 S/m$

Figure III.13: Densité de courant induit J [A/m²] pour x=0.003 m



a) Aluminium $\sigma = 35.4e^6 S/m$

b) Cuivre $\sigma = 59e^6 S/m$



c) Acier $\sigma = 85e^6 S/m$

Figure III.14: Potentiel vecteur magnétique A [Wb /m] pour x=0.003

On peut remarquer dans la figure III.13 que l'intensité des courants induits est restée constante par rapport à la simulation sans défaut avec défaut situé à une distance $x=0$, par contre ils n'arrivent pas à franchir la zone du défaut car la conductivité dans cette région est nulle. Les valeurs des équipotentiels du potentiel vecteur A représenté dans la figure III.14 montrent une nette modification au niveau du défaut par rapport aux deux cas étudiés précédemment.

- **Effet de la conductivité**

Les figures (III.15, III.16 et III.17) montrent l'effet de la variation de la conductivité sur la différence de résistance ΔR , la différence de réactance ΔX , et la différence d'impédance ΔZ .

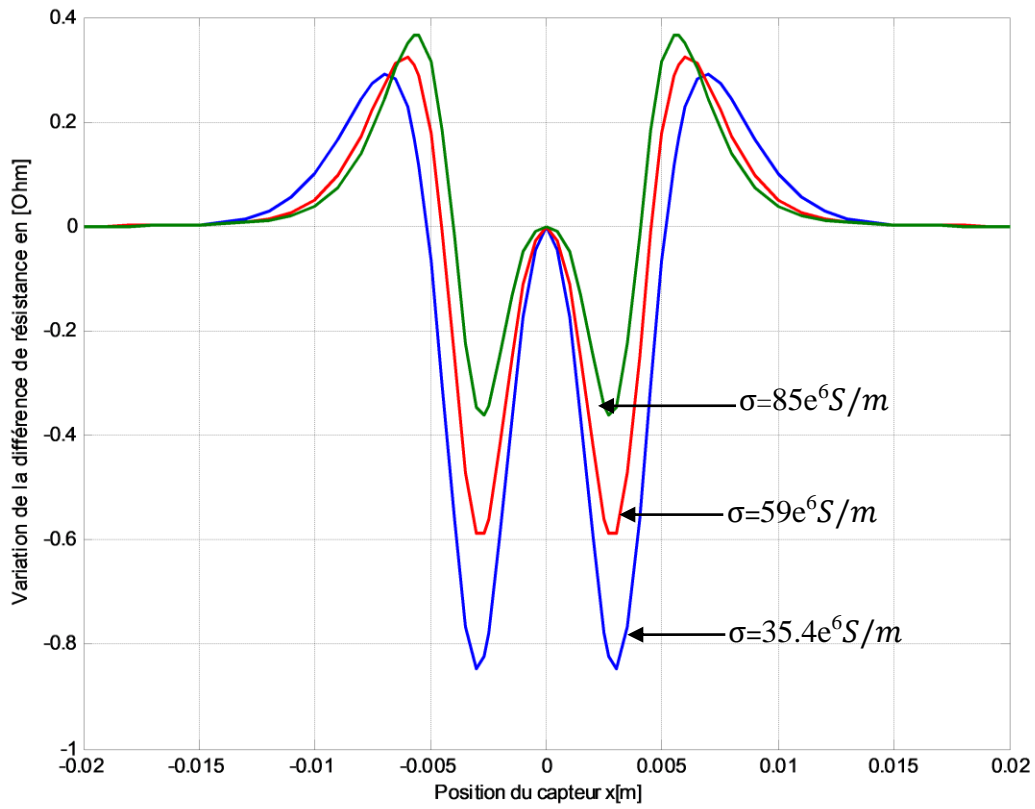


Figure III.15 : Variation de la différence de résistance en fonction de la position du capteur

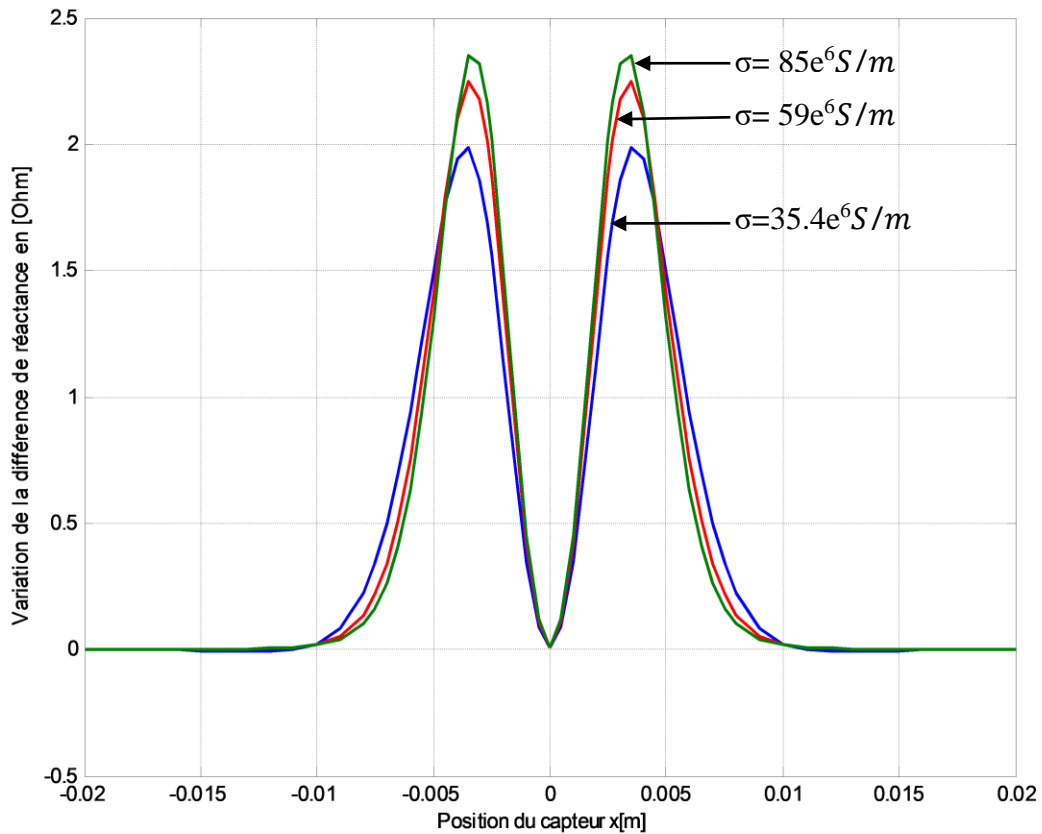


Figure III.16 Variation de la différence de la réactance en fonction de la position du capteur

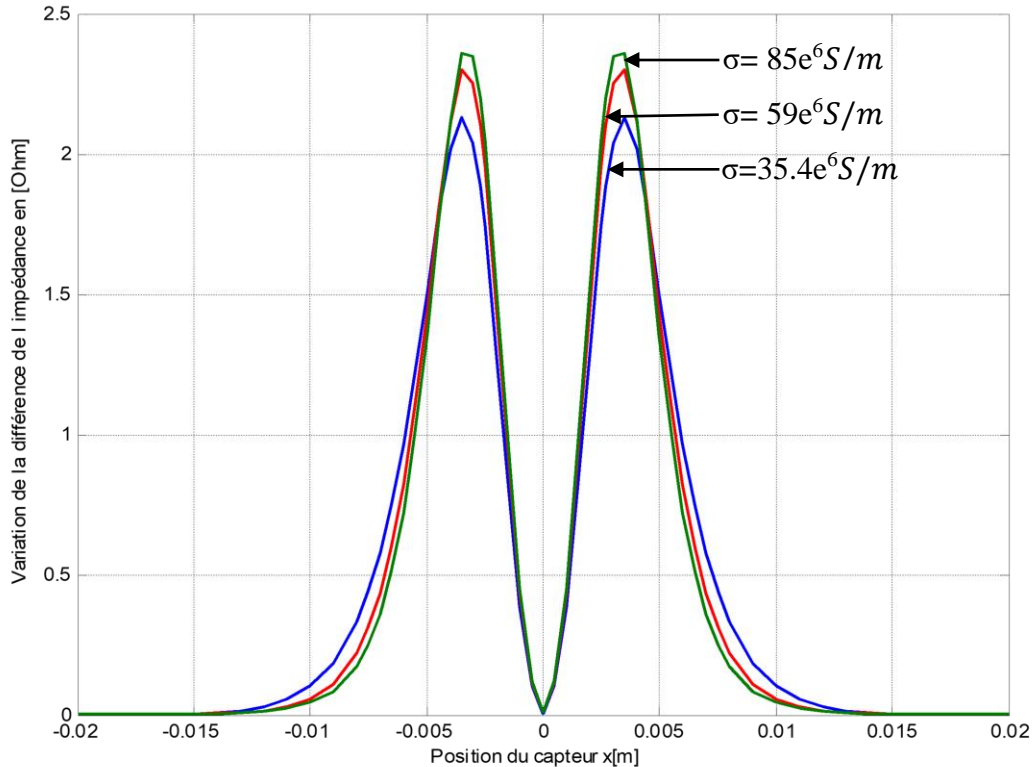


Figure III.17 Variation de la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur

On remarque, d'après les figures (III.15) et (III. 16), que l'augmentation de la conductivité du matériau conducteur se traduit par une augmentation de l'amplitude des signaux des variations de ΔR , ΔX et de ΔZ . Lorsque le capteur est loin du défaut, les composants de variation d'impédance (variation résistance et variation de réactance) sont nuls. À mesure que le capteur approche du défaut, une augmentation de ces composants est observée. En effet, l'amplitude maximale est atteinte lorsque le capteur est précisément au milieu du défaut ($x = 0.003$ mm). D'autre part, on peut remarquer que l'amplitude du signal ΔZ est proportionnelle avec l'augmentation de la conductivité électrique.

III.6.3 Variation des propriétés géométriques

III.6.3.1 Variation du Lift-off

Le but de cette simulation est d'étudier l'influence de la distance entre le capteur et la cible dans la distribution des grandeurs magnétiques dans la plaque. Pour une fréquence de 1000 Hz nous avons choisi des distances de 0.002 m ,0.004 m ,0.006 m et 0.008 m. Pour les mêmes raisons citées plus haut dans le cas de la fréquence nous n'allons représenter que la variation des différences de résistance, de réactance et d'impédance.

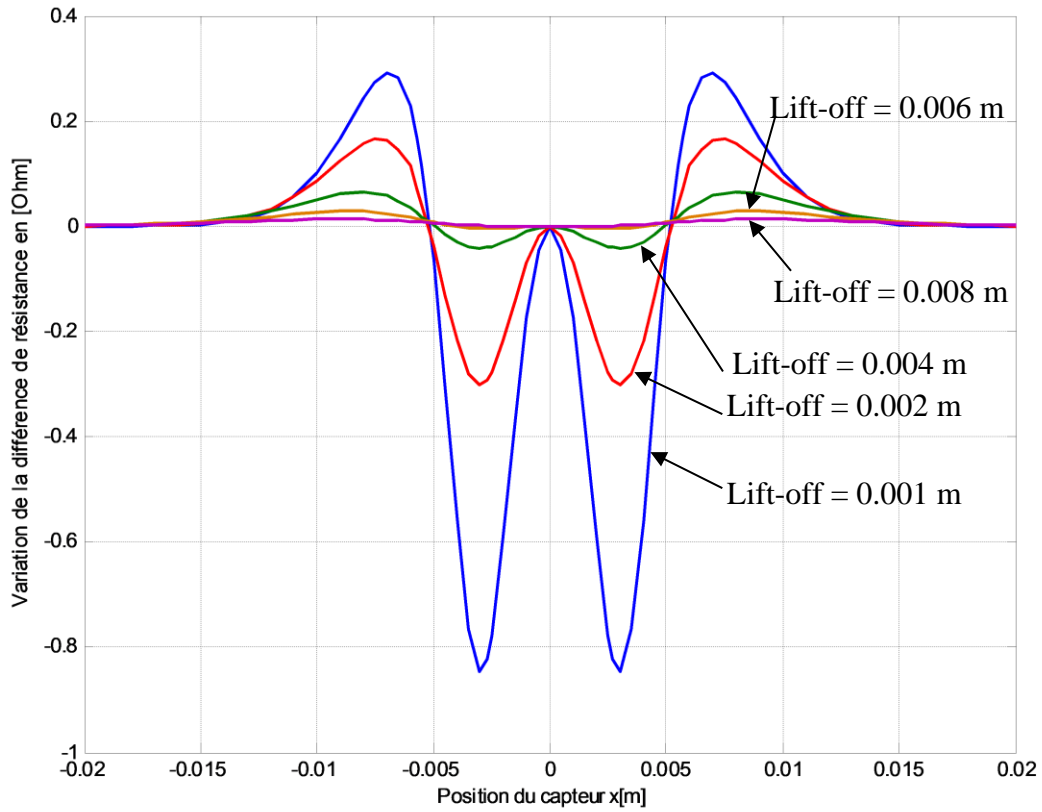


Figure III.18: Variation de la différence de résistance en fonction de la position du capteur

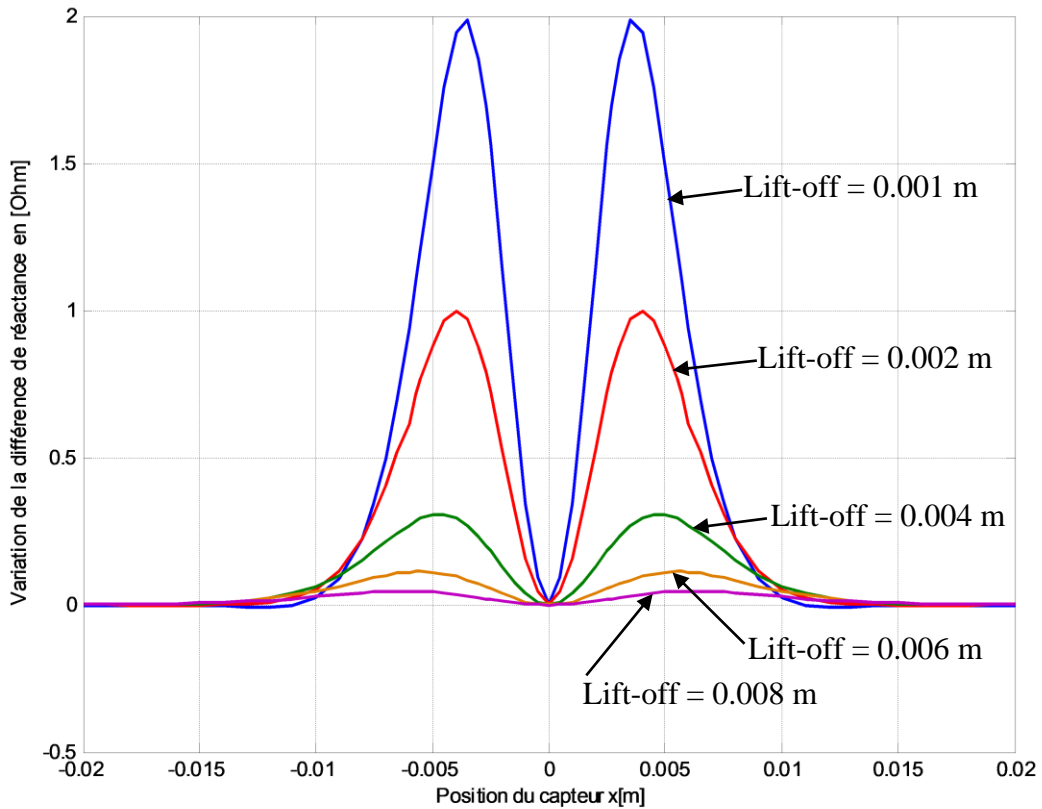


Figure III.19 Variation de la différence de la réactance en fonction de la position du capteur

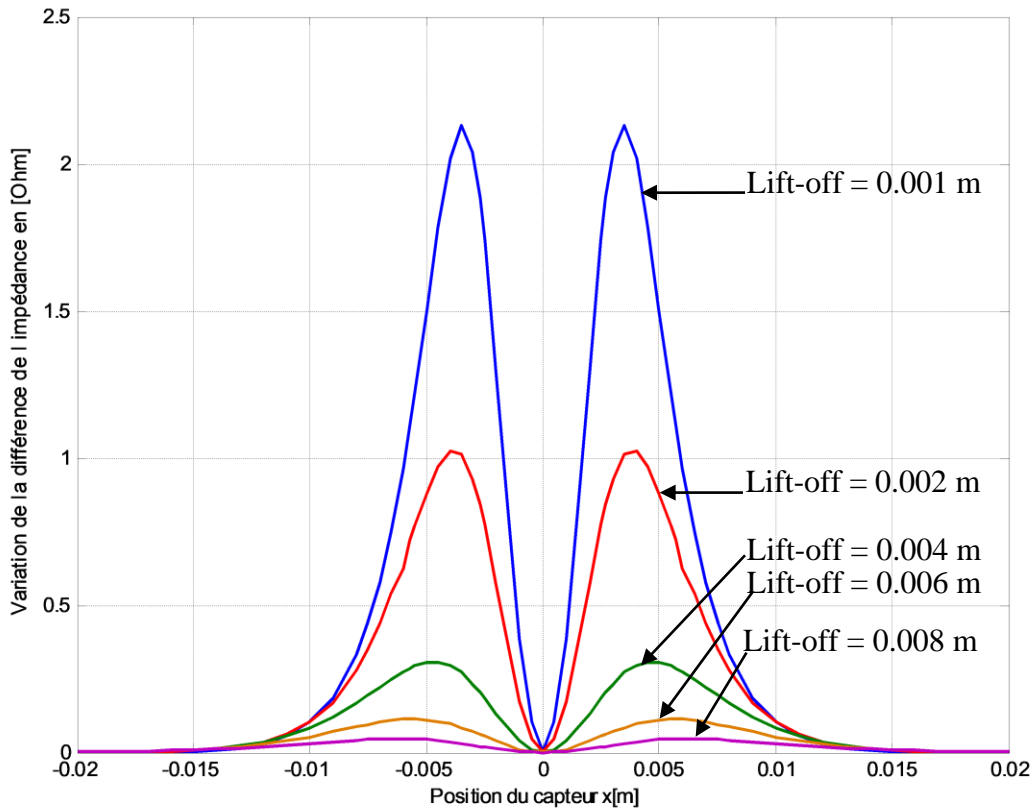


Figure III.20 Variation de la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur

Les figures (III. 18, III.19 et III.20), illustrent les résultats de simulation obtenus. On remarque que la variation d'amplitude du signal ΔR , ΔX et ΔZ , est inversement proportionnellement avec l'augmentation du lift-off. Ceci s'explique par la diminution du couplage électromagnétique entre le capteur et la plaque à inspecter. Tout cela peut être justifié par le fait que l'effet du champ inverse des courants induits diminue avec l'augmentation du lift-off.

III.6.3.2 Variation de la position du défaut

III.6.3.2.a Géométrie et maillage de la nouvelle structure

Cette dernière partie est consacrée au changement du défaut dans la pièce, la nouvelle configuration est représentée sur la figure (III.21). La simulation est effectuée pour une fréquence égale à 1000 Hz.

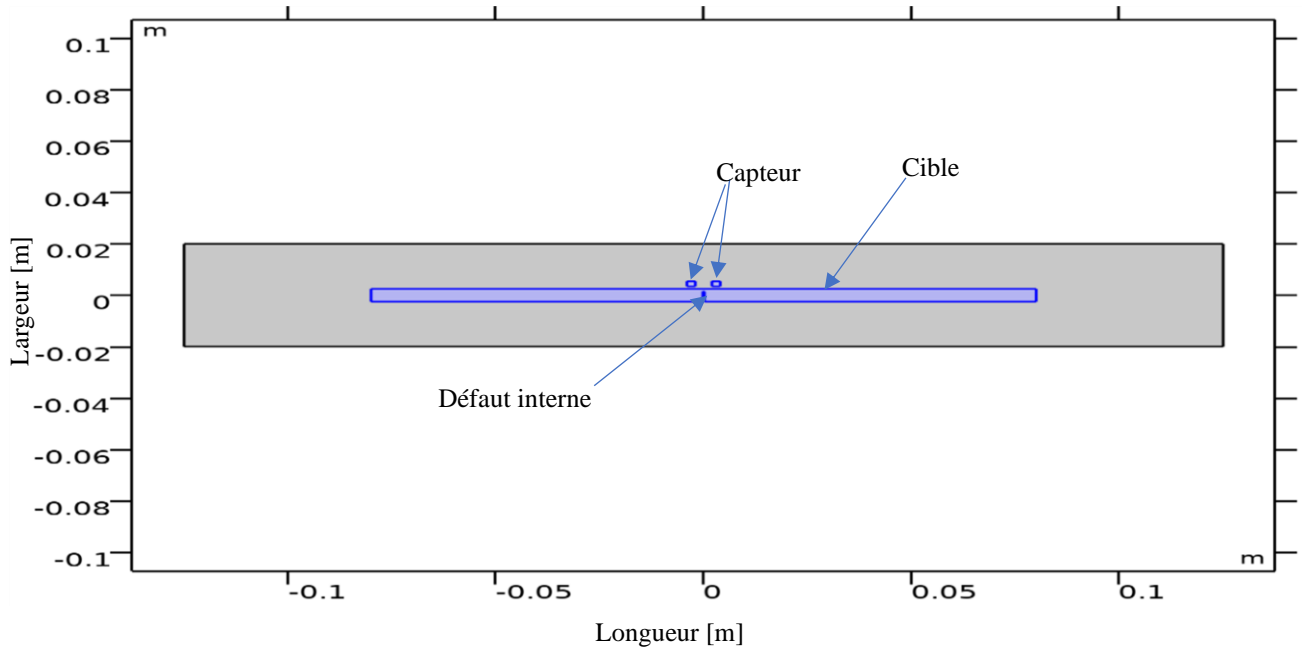
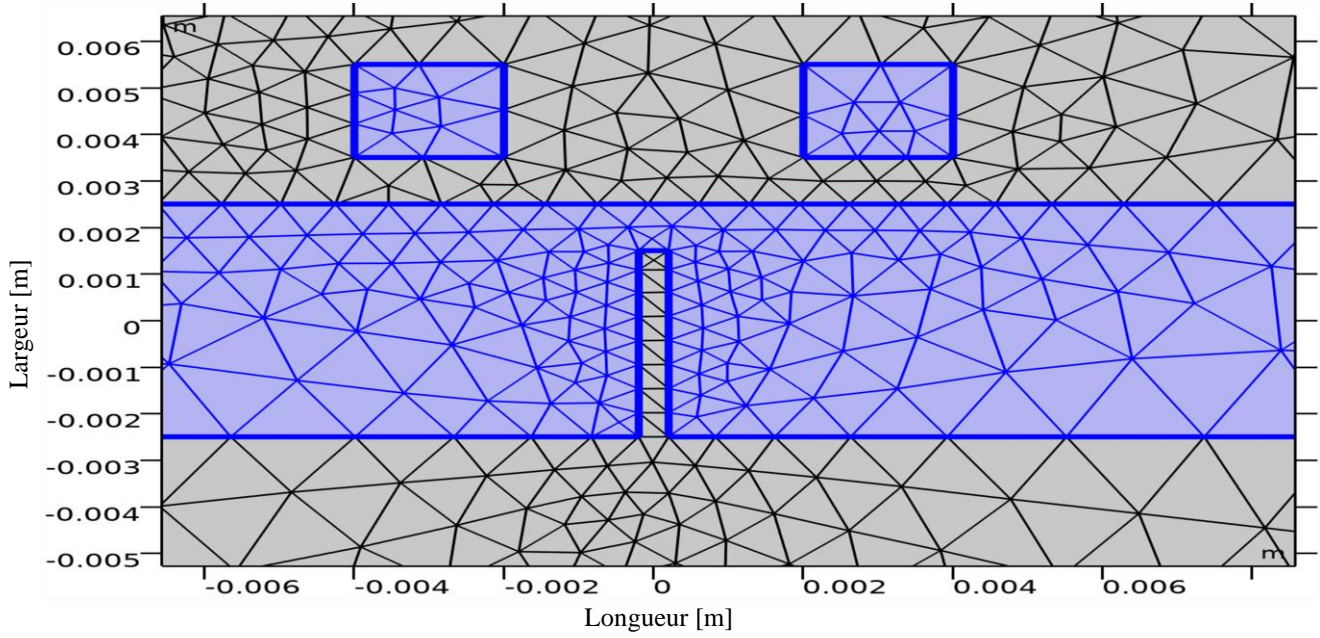
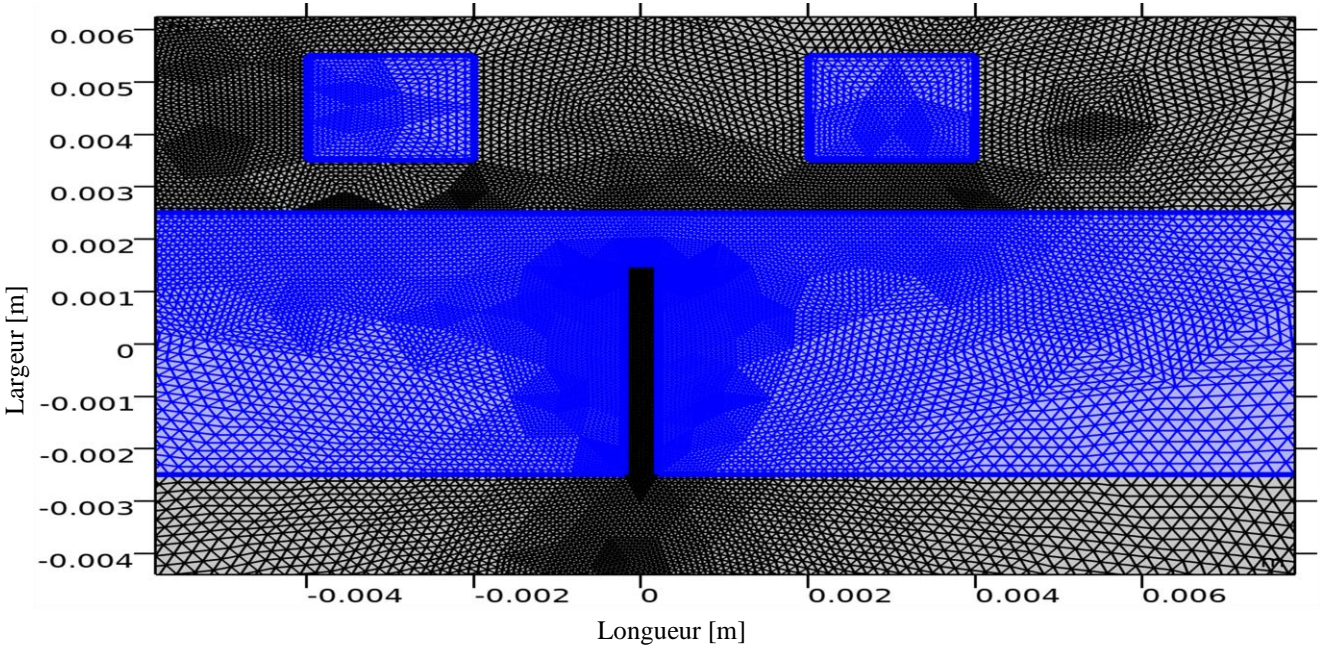


Figure III.21: Géométrie du système « capteur-cible » avec défaut



a) Zoom du maillage initial



b) Zoom du maillage raffiné

Figure III.22: Maillage du système « capteur-cible » avec défaut

III.6.3.2.b Résultats de simulation

- **X=0 m (Capteur au-dessus du défaut)**

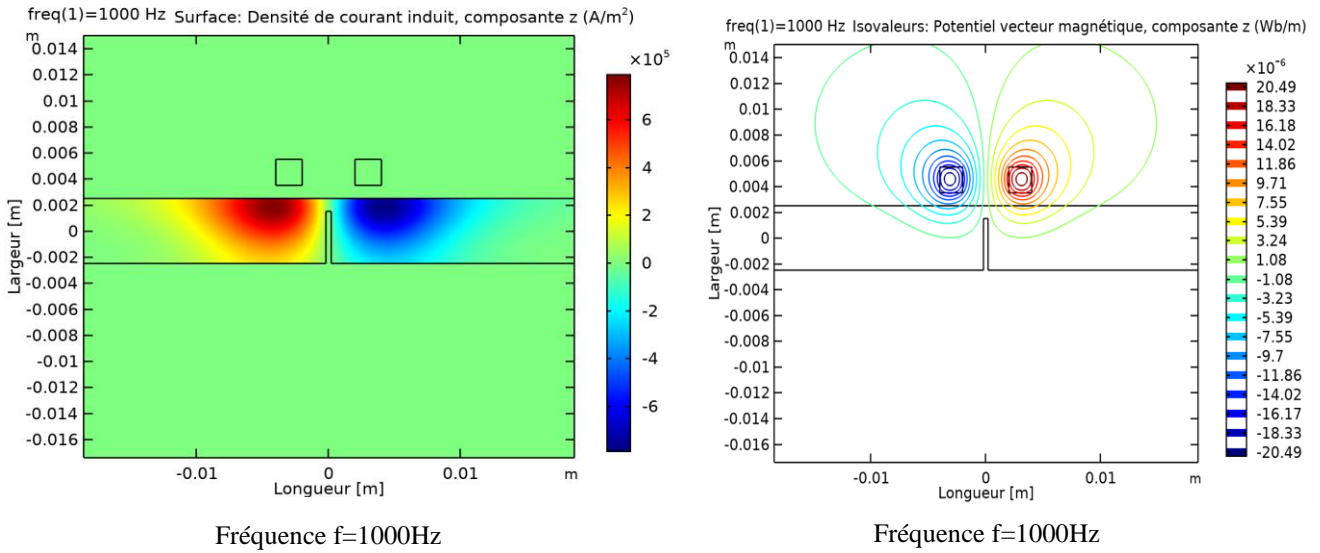


Figure III.23: Représentation des grandeurs magnétiques x=0 m

- **X=0.003 m (Bobine retour du capteur au-dessus du défaut)**

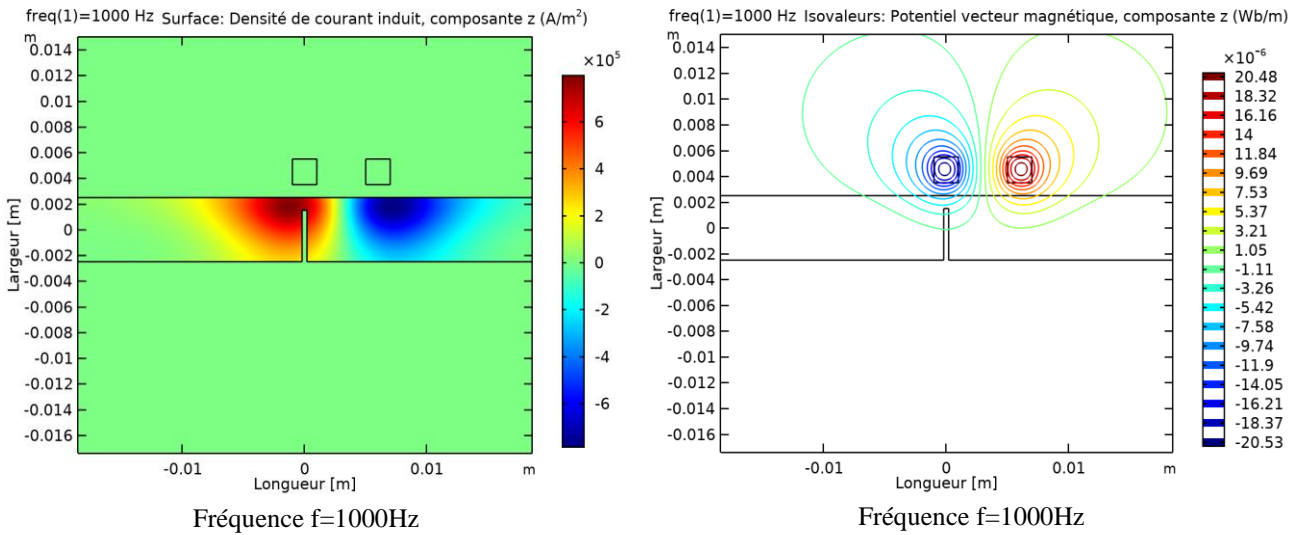


Figure III.24: Représentation des grandeurs magnétiques x=0.003m

• Effet de la position du défaut

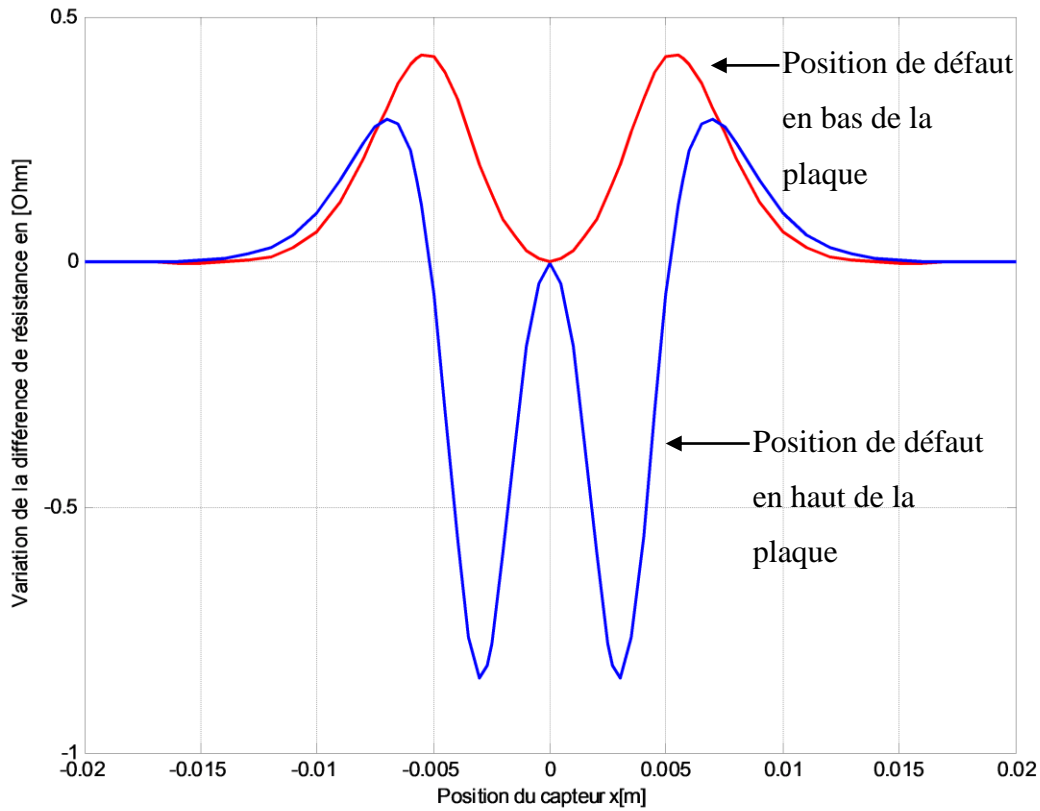


Figure III.25 : Variation de la différence de résistance en fonction de la position du capteur

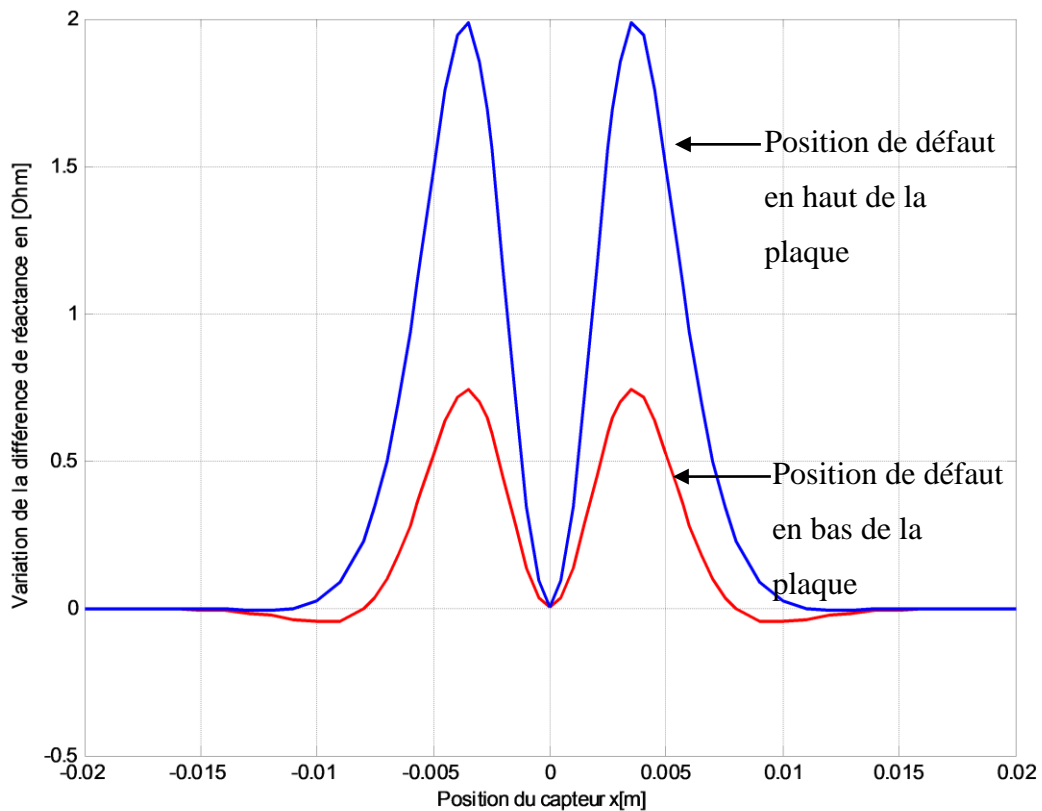


Figure III.26 Variation de la différence de la réactance en fonction de la position du capteur

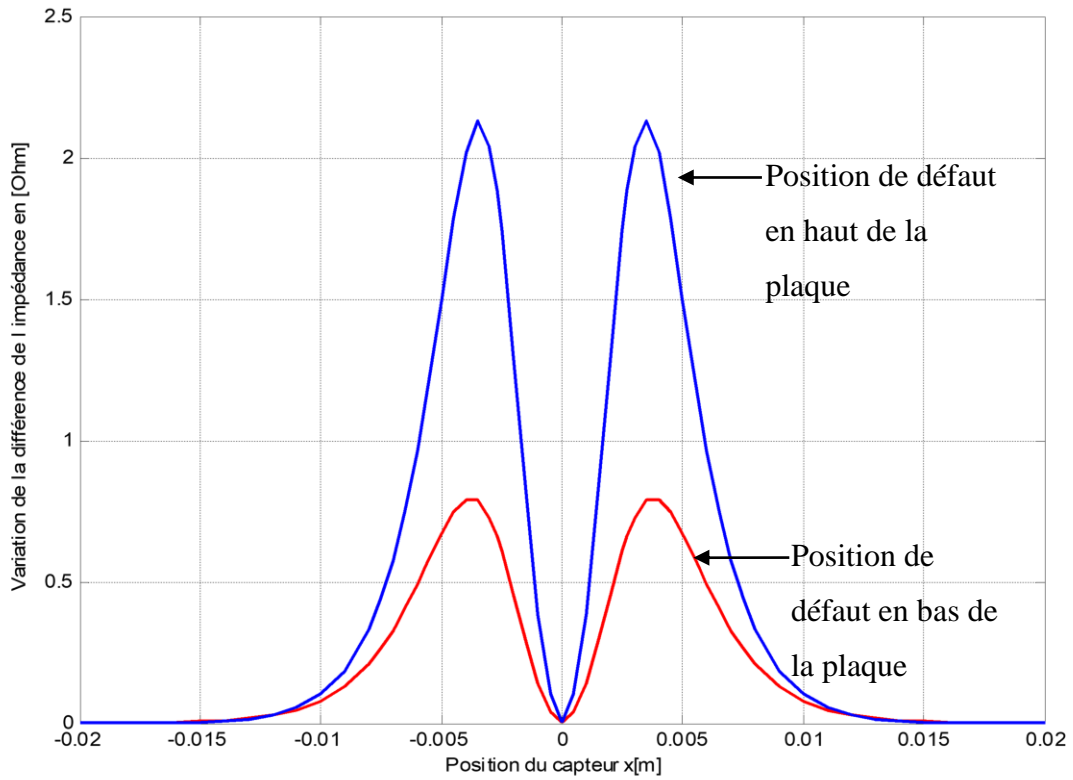


Figure III.27 Variation de la différence de l'impédance en fonction de la position du capteur

Les figures (III.25, III.26, III.27) montrent que le signal de détection du défaut devient plus faible lorsque ce dernier est situé dans la deuxième face de la pièce conductrice, le capteur ne peut pas être très influencé par le changement des distributions des courants induits à cause de la distance entre le défaut et la bobine et à cause de la faiblesse de l'intensité des courant induits dans la zone du défaut.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé un système CND-CF comportant un capteur et une pièce conductrice. En premier lieu, un modèle 2D du CND-CF basé sur la méthode des éléments finis a été implémenté sous le logiciel COMSOL Multiphysics. Une formulation quasi-statique a été utilisée pour modéliser notre système, l'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics a permis d'économiser des ressources informatiques en particulier en ce qui concerne le temps de calcul et la mémoire requise pour les simulations. Plusieurs paramètres peuvent influencer la réponse d'un capteur notamment la fréquence, la conductivité électrique, la distance capteur-cible, et la position du défaut. L'utilisation de la méthode de détection par courants de Foucault dans les milieux conducteurs permet un contrôle non destructif fiable, rapide et peu coûteux. La simplicité de ce contrôle et sa robustesse d'utilisation en font une technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le durcissement de la législation en matière de sécurité des infrastructures industrielles à risque, tels que le nucléaire, l'aéronautique, le secteur pétrolier et métallurgique, ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces qui les constituent et la complexité grandissante des processus industriels exige non seulement des recours plus fréquents au CND, favorisant ainsi la recherche dans ce domaine mais impose également la mise au point de nouvelles méthodes de contrôle plus poussées[42].

Le but de notre travail est l'étude de l'effet des propriétés physiques et géométriques sur la détection des défauts dans un capteur par courants de Foucault, le choix de cette technique a été pleinement justifié suite à la recherche bibliographique effectuée au chapitre I. Elle trouve en effet un large champ d'application, à cause des propriétés des matériaux utilisés. Elle se caractérise le plus souvent par une mise en œuvre plus aisée et moins onéreuse lorsqu'elle est mise en concurrence avec d'autres méthodes. Ces propriétés la rendent donc particulièrement attractives et sa mise en service dans le secteur industriel est devenue capitale, afin de réduire les coûts de maintenance et l'optimisation de la durée de vie des diverses installations.

La modélisation du capteur a été bien détaillée dans le chapitre II, à partir des équations de Maxwell nous avons abouti à l'équation différentielle bidimensionnelle aux dérivées partielles en potentiel vecteur A en quasi-statique, la méthode la plus favorable pour sa résolution parmi les méthodes citées est la méthode des éléments finis. Puis que sa mise en œuvre demande beaucoup de temps, nous avons opté pour l'utilisation du Logiciel Comsol Multiphysique qui a prouvé son efficacité à résoudre plusieurs problèmes liés à l'électromagnétisme. Cet outil de conception et de modélisation présente l'avantage de ne pas être seulement conçu pour un domaine d'application spécifique. Il regroupe un ensemble d'outils et une interface. La bibliothèque de modèles préétablis permet de simuler tous les processus physiques qui peuvent être décrits par des équations différentielles, y compris les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF. De plus, cela permet de travailler en 2D ou 3D, ce qui permet d'économiser des ressources informatiques, notamment en ce qui concerne le temps de calcul et la mémoire nécessaires pour les simulations. Son utilisation a permis de trouver le potentiel vecteur magnétique A ainsi que les différentes grandeurs qui peuvent être dérivées directement de celle-ci à savoir les courants induits dans la pièce conductrice, les pertes joules et l'énergie magnétique emmagasinée dans le système modélisé (capteur, air et cible), qui sont nécessaires pour calculer le changement d'impédance du capteur.

Cette simulation a été effectuée dans le cas de la variation des paramètres physiques et géométriques du dispositif étudié. Nous avons conclu à partir de la variation de la différence d'impédance que l'augmentation de la fréquence et de la conductivité permettent d'avoir une grande sensibilité du capteur, alors que l'augmentation du lift-off et l'augmentation de la pénétration du défaut diminue sa sensibilité.

Comme perspectives nous proposons d'étudier l'effet d'autres paramètres tels que la longueur et la largeur du défaut, l'effet des extrémités de la pièce à tester et l'effet de la perméabilité magnétique. Il serait très intéressant aussi de caractériser le défaut et la pièce à tester à partir du problème inverse et enfin pourquoi pas concevoir un capteur par courants de Foucault.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] BouamamaMerabetet FaresChraa, « Etude Comparative Entre Les Méthodes De CND Pour La Détermination Des Défauts : Application Aux Cordons De Soudure (Contrôle par ultrasons et radiographie à l'entreprise ALFAPIPE) », Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER, Université de Ghardaïa,2018.
- [2] Mohammed Chebout, « Utilisation des techniques électromagnétiques du contrôle non destructif par courants de Foucault pour la détermination de forme des défauts », Thèse de doctorat en sciences, Université de Jijel, 2019.
- [3] Aymene Fettane, Mohamed El Amine Djeghiour, « Application du traitement de signal ultrasonore pour le contrôle Non destructif des matériaux », Mémoire de fin d'étude, Université de Jijel.
- [4] ^{Melle} Boussetla Leyla, « Etude et modélisation du contrôle non destructif par la technique des courants de Foucault », Mémoire De Master, Université de Jijel, 2023.
- [5] Métiers de l'instrumentation, de la mesure et du contrôle qualité,« Contrôle non destructif »,université de bordeaux.
- [6] <https://www.auscultech.com/>
- [7] Abdelhak.Abdou, « Contrôle non Destructif (CND) Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif à Courants de Foucault », Thèse en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université de Batna 2, 2018.
- [8] KadaKarim et GharabiTayab, « Contrôle non destructif », Mémoire En vue de l'obtention du diplôme de master, Université Ahmed doraya – Adrar,2018.
- [9] Hadj Brahim Boujema, Examen visuel et magnétoscopie, Chapitre 2, ISET Siliana,2017/2018.
- [10] <https://mistrasgroup.fr/>
- [11] KHEBAL Merwane, DALI Abderrahmane, « Contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2018 /2019.

- [12] F.I. Al-Naemi, J.P. Hall, A.J. Moses, « FEM modelling techniques of magnetic flux leakage-type NDT for ferromagnetic plate inspections », *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 304, 2006, pp 790-793.
- [13] Adnene Tlili, Sofien Marzouki, Mohamed Najib, Saïdi Faouzi et Mohamed Karoui, « Contrôle Non Destructif », Institut supérieur des études technologiques de Jendouba, 2005/2006.
- [14] HAMEL Meziane, « Etude Et Caractérisation Des Fissures Fines En Evaluation Non Destructive », Thèse De Doctorat, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.
- [15] Boukra Mohamed, « Inspection et contrôle des assemblages soudés par CND », Mémoire de la fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2019/2020.
- [16] Tarek Bouchala, « Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. « Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Elhadj Lakhder Batna, 2008.
- [17] Derradji Imad, Azouz Abdelouhab, « Étude de la détection des défauts dans les structures aéronautiques par capteur à courants de Foucault rotatif », Projet de Fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en Électromécanique, Université A. MIRA-BEJAIA, 2020.
- [18] M^{me}Zerguini Sakina, « Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault », Thèse de doctorat en science en Electrotechnique, Université de Constantine.
- [19] BENHADDA Nabil, « Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND) », Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2015.
- [20] Javier Garcia-Martin, Jaime Gómez-Gil et Ernesto Vázquez-Sánchez, « Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing », *Journal de Sensors*, vol.11, 2011, pp. 2525-2565.

- [21] Yahya 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, 2009.
- [22] Büşra Karanfiloğlu, Neşet Vefa Erden, Elif Eren Gültekin, « Inspection of aircraft parts by eddy current method », International Journal of Aeronautics and Astronautics, vol. 4, ISS. 1, 2023, pp. 36-42.
- [23] Khalil Medjedel, Kamal Bensaiette, « Etude d'un Système de Détection par Courant de Foucault Multiéléments Alimenté en Mode Harmonique Multiplexé Application aux Échangeur de chaleur », Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf -M'SILA,2022.
- [24] Ali Raid, « Contrôle Non Destructif Ressuage, Magnétoscopie, Radiographie, Courants De Foucault Et Ultrasons », Cours ,2017/2018.
- [25] Gilles Corneloup, Cécile Gueudré, « Le Contrôle Non Destructif Et La Contrôlabilité Des Matériaux Et Des Structures », Cours ,2017.
- [26] Amroune Marouane Abd allah, Tabti Abd Elghani, « Etude et simulation 3D d'un Système MFL Multiéléments en vue de la Détection de Défauts dans les Bacs de stockage des Hydrocarbures », Mémoire de la fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER, Université Mohamed Boudiaf-M'SILA,2023.
- [27] Zaidi Houda, « Méthodologie pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault :application aux capteurs souples », Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud,2012.
- [28] Bidi Lyes, « Contrôle Non Destructif (CND) », cours,2018/2019.
- [29] SLIMANE Wissam, « Conception d'un Système Multi-Capteurs à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND) », Mémoire De Magistère En Electrotechnique, Université El Hadj Lakhdar Batna,2008.
- [30] P. KREMPF,Electromagnétisme PC-PSI, Imprimé en France par I.E.M.25110 Baume-Les-Dames, en Aout 2004.
- [31] Jean-Marie BREBEC, Electromagnétisme, Imprimé en Espagne par UNIGRAF,Aout 2010.

- [32] LAYADI Soumia, TARZOUT Nesrine, « Modélisation numérique d'un capteur différentiel dédié au contrôle non destructif par courants de Foucault des structures tubulaires », Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara De Boumerdes, 2022.
- [33] Michel Hulin, Nicole Hulin, Denise Perrin, Equation de Maxwell Ondes électromagnétiques, Imprimé en France, 1991.
- [34] J.C.Sabonnadière, J.L.Coulomb, « Calcul des champs électromagnétiques », IEEE Transaction on Magnetics, vol.49, n°4, pp.1238-1247, 2005.
- [35] SAFER Omar Adib, « Etude et modélisation de capteur à courant de Foucault pour le contrôle non destructif CND », Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master en génie électrique, Université de M'SILA, 2013/2014.
- [36] TAHAR ABBES Miloud, « Méthode Numériques Tome 1 », Achevé d'imprimer sur les presses de l'office des publications universitaires.
- [37] https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal
- [38] Mechri Rachid, « Modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent par le logiciel COMSOL-Multiphysics », mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [39] <https://www.comsol.fr/models>
- [40] T. HACIB, « Contribution à l'étude du problème électromagnétique inverse par une méthode couplée éléments finis réseaux de neurones », Thèse de Doctorat, Université de Jijel, 2008.
- [41] Damien Rodat, « Simulation opérationnelle en Contrôle Non-Destructif », Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, 2018.
- [42] MEHADDENE Hamid, « Étude du Contrôle et de l'Évaluation Non-Destructifs dans les Milieux Magnétiques », Thèse De Doctorat 3ème CYCLE LMD, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2019.

Résumé

Résumé

Le contrôle non destructif (CND) est une méthode d'inspection utilisée pour évaluer l'intégrité des matériaux, des composants ou des structures sans les endommager. L'une des techniques les plus utilisées est celle des courants de Foucault, son principe se base sur la loi de l'induction de Faraday, elle permet aux professionnels de tester la qualité des matériaux dans plusieurs domaines tels que l'aérospatiale, l'industrie nucléaire, la construction, et bien d'autres. Dans le domaine du contrôle non destructif, les paramètres géométriques et physiques jouent un rôle crucial dans la détection des défauts. Dans ce mémoire nous avons modélisé un capteur par courant de Foucault en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics. Nous avons étudié l'effet de la fréquence, de la conductivité, du lift-off et enfin de la position du capteur sur la sensibilité du signal de détection du défaut. Les résultats obtenus ont permis de donner une claire estimation des grandeurs qui influent sur la réponse du capteur.

Mots clés : Contrôle non destructif, courants de Foucault, Comsol Multiphysics, méthode des éléments finis.

Abstract

Non-destructive control (NCD) is an inspection method used to assess the integrity of materials, components or structures without damaging them. One of the most widely used techniques is that of eddy currents, its principle is based on Faraday's law of induction, it allows professionals to test the quality of materials in several fields such as aerospace, nuclear industry, construction, and many others. In the field of non-destructive control, geometric and physical parameters play a crucial role in defect detection. In this memory we modeled an eddy current sensor using the Comsol Multiphysics software. We studied the effect of frequency, conductivity, lift-off and finally the position of the sensor on the sensitivity of the defect detection signal. The results obtained allowed to give a clear estimate of the parameters that influence the response of the sensor.

Keywords: Non-destructive control, Foucault currents, comsol multiphysics, method of finite elements.

المخلص

الاختبار غير المدمر (CND) هو طريقة فحص تستخدم لتقييم سلامة المواد أو المكونات أو الهياكل دون الإضرار بها. إحدى التقنيات الأكثر استخدامًا هي تقنية التيارات الدوامية، ويستند مبدأها على قانون فاراداي للحث، وهو يسمح للمحترفين باختبار جودة المواد في العديد من المجالات مثل الفضاء الجوي والصناعة النووية والبناء وغيرها الكثير. في مجال الاختبارات غير المدمرة، تلعب المعلمات الهندسية والفيزيائية دورًا حاسمًا في اكتشاف العيوب. في هذه الأطروحة قمنا بتصميم حساس التيار الدوامي باستخدام برنامج Comsol Multiphysics. قمنا بدراسة تأثير التردد، الموصلية، الإقلاع وأخيرًا موضع المستشعر على حساسية إشارة اكتشاف الخطأ. أتاحت النتائج التي تم الحصول عليها إعطاء تقدير واضح للكميات التي تؤثر على استجابة المستشعر.

الكلمات المفتاحية: الاختبارات غير المتلفة، التيارات الدوامية، فيزياء Comsol المتعددة، العناصر المحدودة.