

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par :

Mlle. BAITI Afaf

Mlle. KHATTAB Soumia

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

**Modélisation numérique d'un capteur inductif dédié
au contrôle non destructif des structures
axisymétriques**

Soutenu le -- ---- 2019 devant le jury :

Mr. GROUNI	Said	Professeur	UMBB	Président
Mr. HAMEL	Meziane	MCB	UMBB	Encadreur
Mme. MZIOU	Nassima	Professeur	UMBB	Examineur
Mme. ABDESLAME	Djamila	MAA	UMBB	Examineur

Année Universitaire : 2018/2019

ANABIB



Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Département d'Ingénierie des Systèmes Electriques (ISE) de l'université M'Hamed BOUGARA de Boumerdès (UMBB).

Nous remercions Monsieur Said GROUNI, Professeur à l'UMBB, de nous avoir fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.

Nous sommes très reconnaissantes à Monsieur Meziane HAMEL, MCB à l'UMBB de nous avoir encadré. Nous lui présentons nos sincères remerciements pour avoir dirigé ce travail, pour sa patience et ses nombreux conseils.

Nous tenons à remercier toute l'équipe de l'entreprise ANABIB à Réghaia pour son aide, ses précieux conseils ainsi que pour leur disponibilité et les éclaircissements qu'ils nous ont apportés sur le plan technique.

Nous tenons également à remercier Madame Nassima MZIOU, Professeur à l'UMBB et Madame Djamila ABDESLAME, MAA à l'UMBB, qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

Nos chaleureux remerciements vont également à tous les enseignants du Département d'Ingénierie des Systèmes Electriques qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nous remercions du fond du cœur toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

DEDICACES

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, ma maman que j'adore.

A Mes sœurs et Mes frères : Nacira, Hanan, et Soumia, Kamal et Mouhamd, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

*A ma nièce et mes neveux Hibat el Rahman, Hadil, Seif addine, Saddek,
Abd el Moumen*

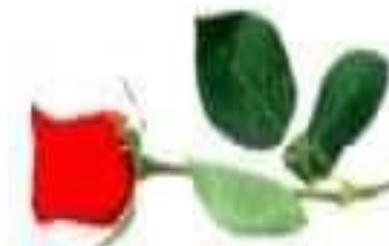
A tous les membres de la famille KHATTAB et la famille KORBAB.

*A mes chères ami(e)s : Fares Belynda, Baiti Imane, Belkif Imane, Sofah Nessrine,
Hammad Thinhinane, Achouri Houda, Chaâbani Hanane, Delici Nour el Islam,
Sadaoui walid et Guenoun Khaled.*

A tous mes camarades de la promotion machines électriques 2018/2019

Dédicace spéciale Pour mon cher Lazib Mouhamed.

Je n'oublie pas ma chère sœur Baiti Afaf.



KHATTAB SOUMIA



DEDICACES

Je remercie d'abord Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté de faire ce modeste travail.

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail à la source qui m'a noyé avec ses sentiments, et le cœur qui m'a réchauffé avec son amour la chère au monde à toi ma mère.

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père.

À mes frères: Adel, Mohamed, Amine, Abd El malek.

À mes sœurs: Imane, Hanane, Nour El Houda, Souad je n'oublie pas de mentionner Zineb et Meriem et ses enfants : Anes, Islam et Louai.

À ma cousine Souad et à tous ses enfants: Abd el Raouf, Imad Eddin, Akram, Ayman, Nada, Sohaib.

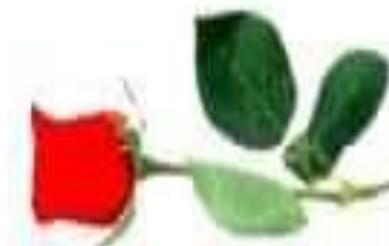
À toutes les familles et proches

À tous mes amis: Belynda, Farida, Thinhinane, Houda, Zineb, Nouria, Bouchra, Imane, Samiha, Hadjer et sa fille : assil.

Islam, Walid et Khaled tous les étudiants du Master 2.

À ma collègue de recherche et à mon amie "Soumia" et sa famille.

BAITI AFAF



Sommaire

Sommaire

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iii
Liste des symboles	iv
Abréviations	v

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur le CND

I.1	Introduction.....	3
I.2	Principe de détection d'un défaut	3
I.3	Les différentes méthodes de contrôle non destructif	4
I.3.1	L'examen visuel	4
I.3.2	Le ressuage.....	5
I.3.3	Magnétoscopie	5
I.3.4	Radiographie	6
I.3.5	Thermographie infrarouge (IR)	7
I.3.6	Ultrasons	8
I.3.7	CND par courants de Foucault	9
I.3.7.1	Nature du contrôle non destructif par courant de Foucault.....	10
I.3.7.2	Schéma synoptique du dispositif	10
I.3.7.3	Modes d'excitation.....	11
I.3.7.3.1	Contrôle mono-fréquence	11
I.3.7.3.2	Contrôle multi-fréquences	11
I.3.7.3.3	Contrôle par courants de Foucault pulsés.....	12
I.3.7.4	Exemples de capteurs à courants de Foucault.....	12
I.3.7.5	Epaisseur de peau	13
I.3.7.6	Type de capteurs	14
I.3.7.7	Avantages et limites de la technique CND-CF	15
I.4	Conclusion	16

Chapitre II : Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

II.1	Introduction	17
II.2	Equations de Maxwell	17
II.2.1	Lois de comportement	18
•	Relations du milieu	18
•	Loi d'Ohm	19
II.3	Electromagnétisme en régime quasi-stationnaire	19
II.3.1	Hypothèses simplificatrices	19
II.4	Modèle magnétodynamique	20
II.4.1	Formulation en termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A}	20
II.5	Méthodes de résolution des équations différentielles	21
II.5.1	Méthodes analytiques	21
II.5.2	Méthodes numériques	21
II.5.2.1	La méthode des différences finies(MDF)	21
•	La discrétisation d'une fonction	22
•	Approximation des dérivées	22
II.5.2.2	La Méthode des éléments finis(MEF).....	23
II.5.3	Etapas de résolution par la MEF	23
•	Méthode des résidus pondérés.....	24
a)	Principe de la méthode	24
b)	Différentes méthodes déduites des résidus pondérés	24
•	La discrétisation.....	25
a)	Eléments finis réels	25
b)	Elément de référence	26
c)	Fonction d'interpolation	27
1)	Principe de l'état complet	27
2)	Principe de comptabilité.....	27
d)	Fonction d'interpolation sur l'élément	28
e)	Fonction d'approximation sur le domaine	28
II.6	Techniques de calcul d'impédance	29
II.6.1	Hypothèses	29
II.6.2	Impédance à travers l'induction ou le flux magnétique	30
II.7	Conclusion	31

Chapitre III : Applications et résultats

III.1	Introduction	32
III.2	Organigramme de calcul	32
III.3	Formulation électromagnétique du problème	33
III.4	Première application : Défaut interne	33
III.4.1	Domaine d'étude et conditions aux limites	34
III.4.2	Résultats en termes de potentiel vecteur magnétique.....	35
III.4.3	Résultats en termes de variation d'impédance	36
III.4.3.1	Effet de la fréquence	36
III.4.3.2	Effet du lift-off	38
III.4.3.3	Effet de la profondeur du défaut.....	39
III.4.3.4	Effet de la longueur du défaut	40
III.4.3.5	Effet de la conductivité du tube	42
III.5	Deuxième application: défaut externe	45
III.5.1	Domaine d'étude et conditions aux limites	46
III.6	Troisième application: Tubes ferromagnétiques	49
III.6.1	Description de problème.....	49
III.7	Conclusion.....	54
	Conclusion générale	55
	Bibliographie	56

Liste de figures

Figure I.1 : Principe de détection d'un défaut	4
Figure I.2 : Principe de contrôle par ressuage.....	5
Figure I.3 : Principe de contrôle par magnétoscopie	5
Figure I.4 : Appareil de contrôle par magnétoscopie	6
Figure I.5 : Principe de contrôle par radiographie	6
Figure I.6 : Principe de contrôle par thermographie	7
Figure I.7 : Principe de contrôle par ultrason	8
Figure I.8 : Appareil de contrôle ultrason	8
Figure I.9 : Principe de la détection par courants de Foucault	9
Figure I.10 : Détection d'un défaut avec une sonde encerclant différentielle	9
Figure I.11 : Schéma synoptique de la chaîne de contrôle	10
Figure I.12 : diagramme d'impédance normalisée	12
Figure I.13 : Trois exemples de capteurs CF	13
Figure I.14 : Répartition des courants Foucault	14
Figure II.1 : Maillage de type différences finies	23
Figure II.2 : Eléments finis de référence à une dimension.....	25
Figure II.3 : Eléments finis de référence à deux dimensions (éléments triangulaires)	25
Figure II.4 : Eléments finis de référence à deux dimensions (éléments carrés).....	26
Figure II.5 : Eléments finis de référence à trois dimensions	26
Figure II.6 : Elément de référence utilisé dans PDETool.....	27
Figure II.7 : Triangle de Pascal	27
Figure II.8 : Bobine à N spires jointives	30
Figure III.1 : Organigramme de calcul	32
Figure III.2 : Description du problème.....	34
Figure III.3 : Géométrie du domaine d'étude	35
Figure III.4 : Maillage du domaine	35
Figure III.5 : Les lignes du potentiel vecteur magnétique A en fonction de la position du capteur	36
Figure III.6 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour les Fréquences : 50, 250,300 et 500kHz	37
Figure III.7 : Zmax de la fréquence en fonction de la position du capteur	37
Figure III.8 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour Différentes valeurs du lift off.....	38

Figure III.9 : Zmax de Lift-off en fonction de la position du capteur.....	39
Figure III.10 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur du défaut.....	39
Figure III.11 : Zmax de la profondeur du défaut en fonction de la position du capteur	40
Figure III.12 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la longueur du défaut	41
Figure III.13 : Zmax de la longueur du défaut en fonction de la position du capteur	41
Figure III.14 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes conductivités électriques (matériaux conducteurs).	42
Figure III.15 : Zmax de différentes conductivités électriques en fonction de la position du capteur	43
Figure III.16 : Tube de cuivre ($\sigma = 59.10^6$ S/m)	43
Figure III.17 : Tube d'Aluminium ($\sigma = 35,4.10^6$ S/m)	44
Figure III.18 : Tube d'Inconel_600 ($\sigma = 1.10^6$ S/m).....	44
Figure III.19 : Représentation de la configuration	46
Figure III.20 : Maillage du domaine d'étude	46
Figure III.21 : Géométrie du domaine d'étude	47
Figure III.22 : Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique A	48
Figure III.23 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur du défaut:2mm, 3mm, 5mm, 8mm	48
Figure III.24 : Défauts des soufflures en radiographie	50
Figure III.25 : Défauts des soufflures en réalité	50
Figure III.26 : Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique A	52
Figure III.27 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur du défaut pour la fréquence 50KHZ.....	53
Figure III.28 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur du défaut pour la fréquence 5KHZ	53

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Caractéristiques géométriques et physiques du système.....	34
Tableau III.2 : Configuration du tube et des défauts	45
Tableau III.3 : Caractéristiques géométriques et physiques du système.....	51

Liste des symboles

- A : Potentiel Vecteur magnétique (T.m)
B : Induction magnétique (T)
D : Induction électrique (C/m²)
E : Champ électrique (V/m)
f : Fréquence (Hz)
H : Champ magnétique (A/m)
J : Densité de courant (A/m²)
R : Résistance électrique (Ω)
R_n : Résistance normalisée
t : temps (s)
V : Potentiel scalaire électrique (V)
 ω : Pulsation électrique (rad/s)
X : Réactance (Ω)
X_n : Réactance normalisée
 \emptyset : Potentiel scalaire magnétique (A)
 ϵ_0 : Permittivité électrique absolue du vide (F/m)
 ϵ_r : Permittivité électrique relative
 σ : Conductivité électrique (S/m)
 ρ : Densité volumique de charges électriques. (C/m²).
 δ : Épaisseur de peau (m).
 μ_0 : Perméabilité magnétique absolue du vide (H/m).
 μ_r : Perméabilité magnétique relative.
 Ω : Milieu.
 Γ : Frontière du milieu.
 ∇X : Gradient d'un scalaire X.
 $\nabla \cdot X$: Divergence d'un vecteur X.
 $\nabla \times X$: Rotationnel d'un vecteur X.
 ΔX : Laplacien d'un vecteur X

Abréviations

CND : Contrôle Non Destructif.

CF : Courants de Foucault.

CND-CF : Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault

MEF: Méthode des Eléments Finis.

EDP : Equation aux dérivées partielles.

2D: Bidimensionnel.

MEF2D-axi : Méthode des Eléments Finis Bidimensionnel axisymétrique.

Introduction générale

Durant l'exploitation d'un produit industriel, son maintien en état de marche dans de bonnes conditions de sécurité nécessite une bonne connaissance de l'évolution des pièces qui le constitue. Cette connaissance implique en particulier de réaliser des contrôles ne portant pas atteinte à l'intégrité des pièces et en entravant le moins possible la disponibilité du produit. Ceci justifie l'importance croissante que prend le contrôle non destructif (CND) [1].

Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité, ...etc.), soit pour détecter la présence de défauts et les caractériser. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault). Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui), les conditions de mise en œuvre,etc. [1].

Les méthodes électromagnétiques sont fréquemment utilisées pour le contrôle des pièces électriquement conductrices et/ou magnétiques. Par exemple, le contrôle de pièces de fonderie (industrie automobile, industrie pétrolière) peut se faire par magnétoscopie. Les tubes (nucléaire, industrie pétrolière) peuvent être testés par les courants de Foucault (CF).

Le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre, il est facile de créer des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde, et complexe. En effet, pour un contrôle donné, comment peut-on créer une bonne répartition des courants de Foucault permettant d'avoir un 'signal de défaut' aussi important que possible? Il est nécessaire avant toute chose d'avoir une connaissance suffisamment complète du phénomène physique. Les courants de Foucault n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent [2].

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

par CF, la modélisation est ainsi devenue, grâce à la performance du matériel informatique, une actrice importante dans la conception de sondes.

La modélisation d'une configuration réelle de CND par CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement et fait appel à des méthodes numériques. Parmi celles-ci, la méthode des éléments finis (MEF) qui permet de prendre en compte des géométries complexes de sondes et de pièces, est l'une des plus utilisées. Elle s'est en effet imposée comme un outil efficace pour résoudre numériquement les problèmes électromagnétiques [3].

L'objectif de ce travail est l'étude par la méthode des éléments finis d'un dispositif de contrôle par courants de Foucault des structures cylindriques.

Ce manuscrit est réparti en trois chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur le CND. Les principales méthodes de CND sont rappelées. Le contrôle basé sur les courants de Foucault est particulièrement détaillé.

Le second chapitre est consacré à la position d'un problème de CND par CF et aux équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électromagnétique dans le système capteur/pièce. La formulation en potentiel permettant de modéliser le système est développé avec sa formulation éléments finis.

Le troisième chapitre est dédié aux applications et aux résultats du modèle proposé. Il concerne la simulation des différentes configurations cylindriques avec des capteurs de types sondes internes et bobine encerclant.

Nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur le CND

I.1. Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) a pour objectif de vérifier l'intégrité d'une pièce ou d'un matériau sans l'endommager en détectant d'éventuels défauts présents dans celui-ci. Dans différents secteurs industriels (aéronautique, nucléaire, automobile, métallurgie...), le CND est primordial afin de garantir la sûreté de fonctionnement des systèmes critiques. Une grande variété de méthodes existent et permettent de détecter des anomalies internes ou de surface, de déterminer la composition ou la structure des matériaux. Le CND peut être utilisé en production, lors de la mise en service ou lors d'opérations de maintenance [2].

Les techniques de CND continueront à élargir leur champ d'application vers de nouveaux secteurs d'activité économique. On constate aussi que l'objectif du contrôle non destructif évolue, il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, il faut aussi le localiser et le caractériser. Il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des hétérogénéités physiques complexes ou irrégularités de propriétés telles que, par exemple, des variations de microstructure dans les composites, des variations de texture ou de rugosité sur une surface...etc. Ces objectifs sont souvent difficiles à atteindre car les lois de la physique sont ce qu'elles sont et aussi, dans ce domaine, les progrès sont lents. Il n'en va pas de même l'automatisation des CND qui bénéficie pleinement des progrès de l'informatique ; il en résulte l'arrivée sur le marché, d'année en année, d'appareillages plus performants, plus fiables et surtout plus faciles à utiliser dans le cadre du respect de procédures de contrôles très strictes. L'évolution des CND doit prendre toutefois en compte l'aspect coût, ce dernier pouvant freiner l'essor de nouvelles techniques très performantes [4].

Dans ce contexte, nous exposerons dans ce chapitre les principales techniques du CND, une description détaillée sera apportée pour le CND par courants de Foucault qui fait l'objet de notre travail.

I.2. Principe de détection d'un défaut

Les méthodes de contrôles non destructifs sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. On exploite donc un phénomène physique pour détecter la présence d'une hétérogénéité dans un matériau. Les principes physiques comme l'atténuation, réflexion ou diffraction des ultrasons, atténuation ou diffraction des rayons X ou γ , perturbation des courants de Foucaultsont à la base des essais non destructifs, ils peuvent servir à caractériser les matériaux (gros grain, anisotropie, dureté, état de contraintes, fissures surfacique ou en profondeur...) [5].

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

- ✓ Mise en œuvre d'un processus physique énergétique (**excitation**).
- ✓ Modulation ou altération de ce processus par les défauts (**perturbation**).
- ✓ Détection de ces modifications par un capteur approprié (**révélation**).
- ✓ Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

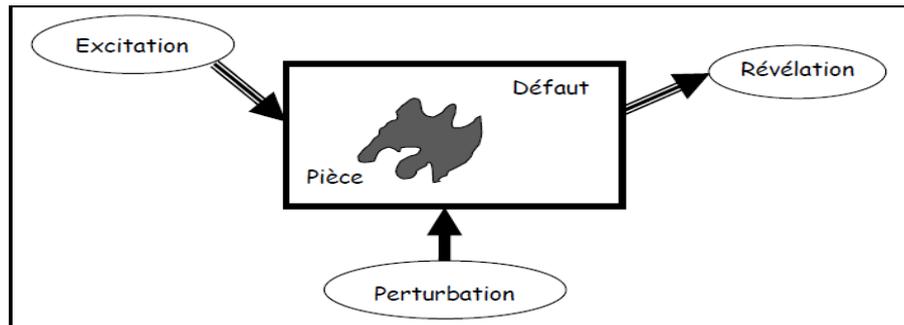


Figure I.1 : Principe de détection d'un défaut

I.3. Les différentes méthodes de contrôle non destructif

La diversité des pièces à inspecter, leurs géométries, leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Il ne s'agit pas ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du CND [6], mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement. Plusieurs méthodes sont utilisées dans l'industrie et leur champ d'utilisation s'étend à plusieurs applications [7]. Chacune a son domaine d'action privilégié, On distingue :

I.3.1. L'examen visuel

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures qui justifient l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique (contrôle optique automatique ou assisté, techniques optiques particulières) [8].

I.3.2. Le ressuage

Le procédé d'inspection par ressuage, bien qu'il soit difficile de retracer ses débuts exacts, semble très ancien. En effet, ce mode d'inspection était déjà utilisé en 1910 chez Rolls Royce [9].

Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchantes, un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...) ; la pièce étant ensuite examinée visuellement, comme la montre la figure I.2.

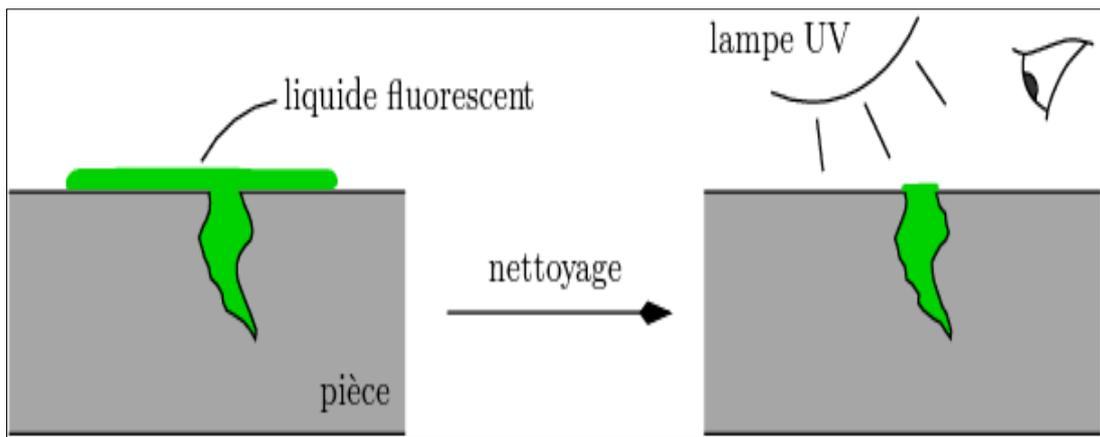


Figure I.2 : Principe de contrôle par ressuage

I.3.3. Magnétoscopie

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 magnétique ou un fort courant sur la pièce et on visualise à l'aide d'une poudre métallique les lignes de champ aux points des défauts. L'examen des pièces se fait le plus souvent sous éclairage UV comme la montre la figure I.3 [3].

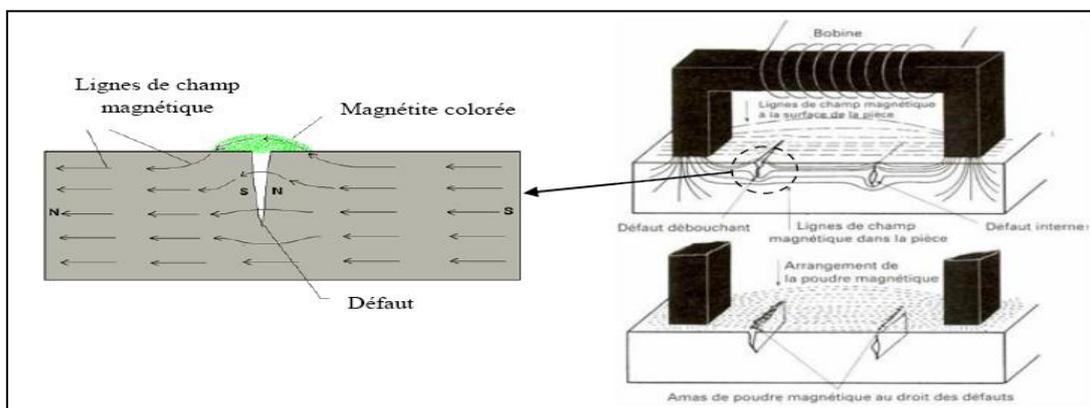


Figure I.3 : Principe de contrôle par magnétoscopie

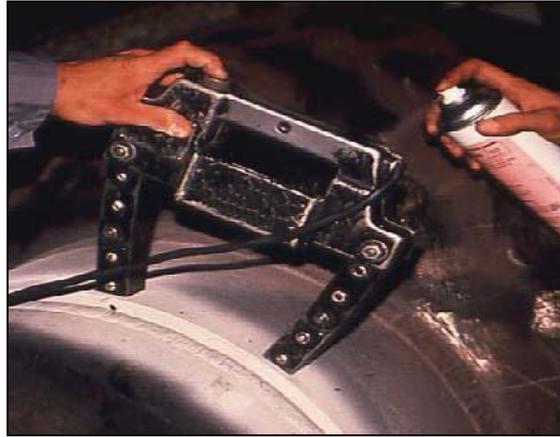


Figure I.4 : Appareil de contrôle par magnétoscopie

I.3.4. Radiographie

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale : elle consiste à faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, comme les rayons X ou les rayons γ , la matière à inspecter. Lors de leur passage à l'intérieur de la pièce, les photons voient leur énergie absorbée totalement ou partiellement par la matière, selon sa densité. Un film placé derrière la pièce est irradié par les photons qui ont encore suffisamment d'énergie. Il récupère ainsi le radiogramme, où les zones avec des défauts sont représentées par une variation de la densité optique [10].

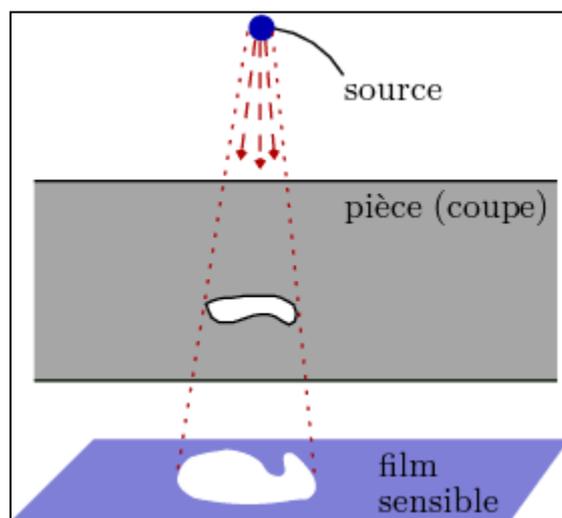


Figure I.5 : Principe de contrôle par radiographie

I.3.5. Thermographie infrarouge (IR)

Cette méthode repose sur la mesure d'un flux thermique ou le rayonnement électromagnétique émis dans l'infrarouge de tous corps chauds. Cela se fait après l'application d'une source de chaleur (faisceau laser, air chaud,...) sur la cible. Le rayonnement émis sera lié à la distribution de la température, elle-même est fonction des propriétés thermiques et géométriques. Tout défaut sera rendu visible par une caméra à infrarouge qui mesure ce rayonnement thermique (Figure I.6). Selon l'excitation thermique deux techniques peuvent se trouver [5] :

– **Thermographie pulsée** : la source utilisée peut être des lampes flashes avec une durée d'impulsion de quelques microsecondes ou bien des lampes halogènes avec des impulsions de l'ordre du dixième de seconde. Les principaux défauts détectés par cette méthode sont les délaminages et les porosités sur des composites de faibles épaisseurs.

– **Thermographie Lock-in** : est basée sur la génération d'une onde thermique grâce à une excitation périodique (modulation sinusoïdale de l'excitation thermique).

Elle permet la mesure de la phase de l'onde thermique qui est fonction de sa propagation. La fréquence de modulation étant inversement proportionnelle à la profondeur d'inspection du matériau [8], il est possible d'évaluer la profondeur d'un défaut.

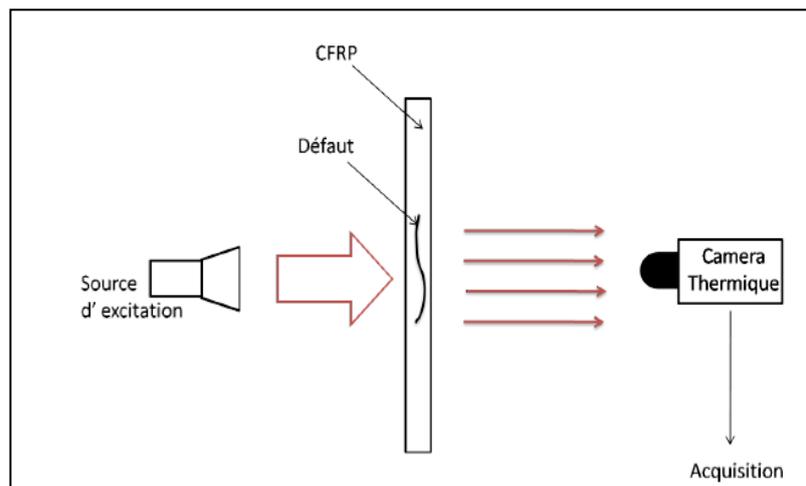


Figure I.6 : Principe de contrôle par thermographie

I.3.6. Ultrasons

Le principe fondamental du contrôle non destructif par ultrasons réside dans l'analyse de l'influence des défauts, de type localisés ou inhomogénéités, sur la propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et diffraction sur les interfaces, atténuation dans la matrice liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion. La vitesse de propagation est variable selon les directions. Une bonne connaissance des phénomènes liés à la propagation des ultrasons est donc une base indispensable à la pratique de ce type de contrôle alors on déduit que l'ultrason est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage dans la pièce à contrôler [11].

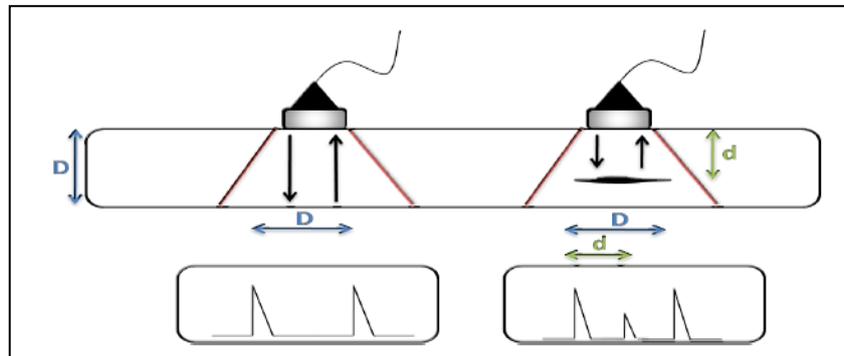


Figure I.7 : Principe de contrôle par ultrason



Figure I.8 : Appareil de contrôle ultrason

I.3.7. CND par courants de Foucault

Le contrôle par courants de Foucault s'effectue en créant un champ magnétique dans une bobine que l'on va déplacer à la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation des lignes des courants induits dans la pièce, par un défaut, va se traduire par une modification du coefficient du self induction, qui sera détectée (figures I.9 et I.10).

En générale on utilise une méthode comparative, dont l'objet est de mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine de la pièce contrôlée et celle d'une pièce de référence (sans défauts).

En jouant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobines, il est possible de contrôler jusqu'à quelques millimètres de la surface [3].

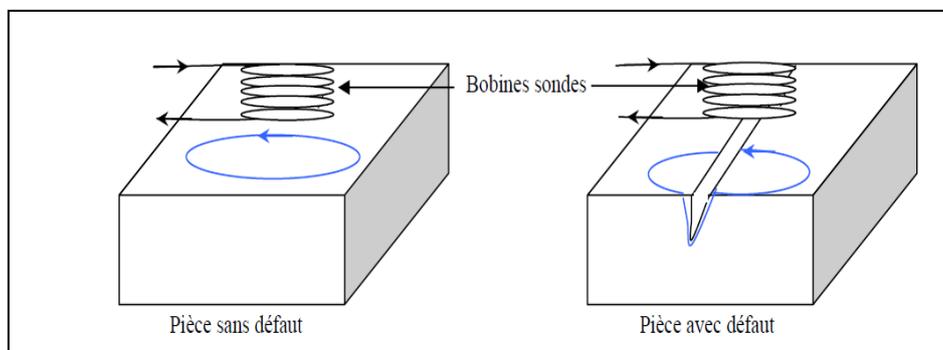


Figure I.9 : Principe de la détection par courants de Foucault

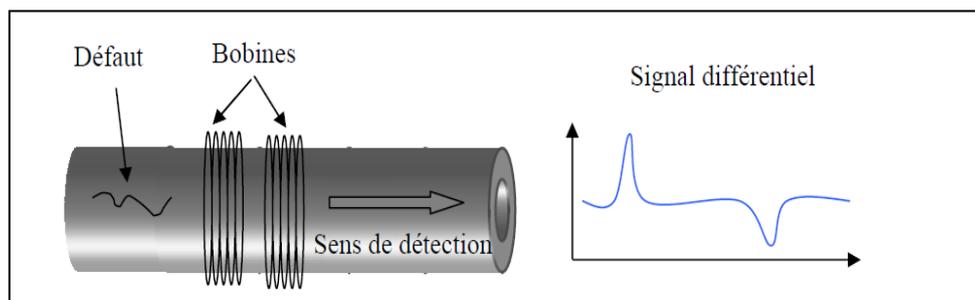


Figure I.10 : Détection d'un défaut avec une sonde encerclant différentielle

L'archivage électronique de signature des défauts et le traitement du signal constituent des voies de développement actuel permettant de simplifier l'exploitation de la technique du CND par courants de Foucault et d'en étendre le champ d'application. Ils sont aussi bien utilisés pour la mesure de corrosion uniforme que localisée. Ainsi, la corrosion sous contrainte, qui entraîne le développement de fissures, est souvent mesurée par courants de Foucault [12].

I.3.7.1. Nature du contrôle non destructif par courant de Foucault

La répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent de la conductivité électrique σ , de la perméabilité magnétique μ , de la fréquence de travail f , de la géométrie du matériau à contrôler, du couplage entre le capteur et le matériau et d'éventuels défauts dont la présence se manifeste à travers une combinaison complexe des paramètres précédents. Le procédé de contrôle par courants de Foucault permet donc d'effectuer des contrôles dimensionnels, des contrôles de l'état de santé et de réaliser des caractérisations métallographiques [4].

Le contrôle dimensionnel s'applique à des mesures d'épaisseur de revêtement (ex : peinture, dépôt électrolytique) et la détermination des caractéristiques géométriques du matériau (ex : l'épaisseur de petits tubes ou de plaque). Le contrôle de santé recherche la présence de défauts (fissures, inclusions,...). Le contrôle métallographique est destiné à discriminer les matériaux, de dureté, de composition chimique ou de structure métallographique différente [4].

I.3.7.2. Schéma synoptique du dispositif

La chaîne de contrôle non destructif par courant de Foucault comprend essentiellement un générateur alimentant le capteur, le capteur lui-même, le produit à contrôler dont éventuellement la présence de défauts et enfin le système d'observation qui visualise une grandeur dérivée des courants de Foucault. Les paragraphes suivants décrivent chaque élément de cette installation [5].

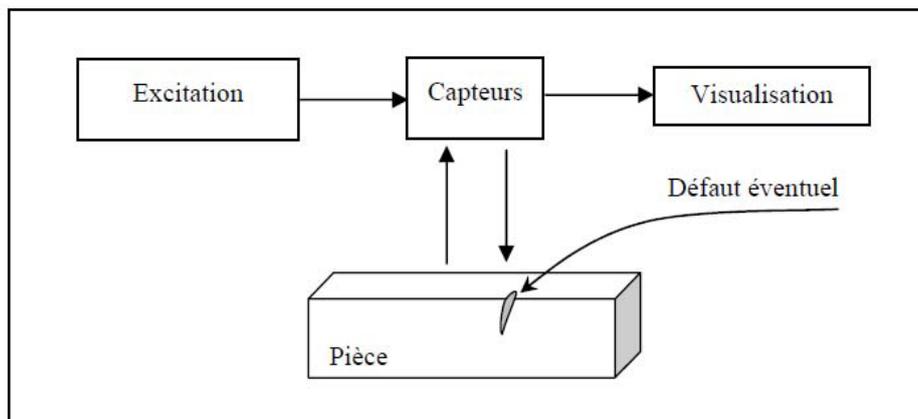


Figure I.11 : Schéma synoptique de la chaîne de contrôle

I.3.7.3. Modes d'excitation

On distingue trois types d'alimentation pour les capteurs à courants de Foucault:

- signal mono-fréquentiel.
- signal multi-fréquentiel.
- signal pulsé: signal à durée "finie".

I.3.7.3.1. Contrôle mono-fréquence

Les courants de Foucault sont obtenus par un courant sinusoïdal de fréquence donnée. Pour des matériaux dont les caractéristiques sont linéaires, tous les signaux sont eux aussi sinusoïdaux. Le contrôle s'effectue par mesure d'impédance de la bobine [13].

L'exploitation se fait à l'aide du plan d'impédance normalisé. On utilise les grandeurs X_0 (réactance de la bobine hors matériau), X (réactance de la bobine en présence du matériau), R (résistance de la bobine en présence du matériau), R_0 (résistance de la bobine seule). R et X permettent de représenter les puissances actives et réactives mises en jeu dans tout le dispositif, en particulier dans la pièce où se développent les courants de Foucault. On définit:

- la résistance normalisée: $R_n=(R-R_0)/X_0$.
- la réactance normalisée: $X_n=X/X_0$.

On trace alors l'évolution de l'impédance normalisée dans le plan $X_n=f(R_n)$. La trajectoire de l'extrémité de vecteur impédance lors d'un déplacement relatif bobine matériau sera représentative de l'évolution d'une des propriétés du matériau (figure I.12) et constitue la signature. D'un point de vue industriel, des appareils permettent de visualiser directement le plan d'impédance.

I.3.7.3.2. Contrôle multi-fréquences

En mono-fréquence, on dispose de deux informations qui ne permettent pas toujours de caractériser un défaut, ou d'éliminer l'influence de grandeurs perturbatrices (comme les entretoises dans les tubes de générateurs de vapeur). L'utilisation de n fréquences permet d'avoir $2n$ informations. Dans ce cas, l'appareillage permet:

- d'alimenter la bobine avec plusieurs fréquences, soit simultanément, soit en séquence.
- d'appliquer une méthode d'analyse.

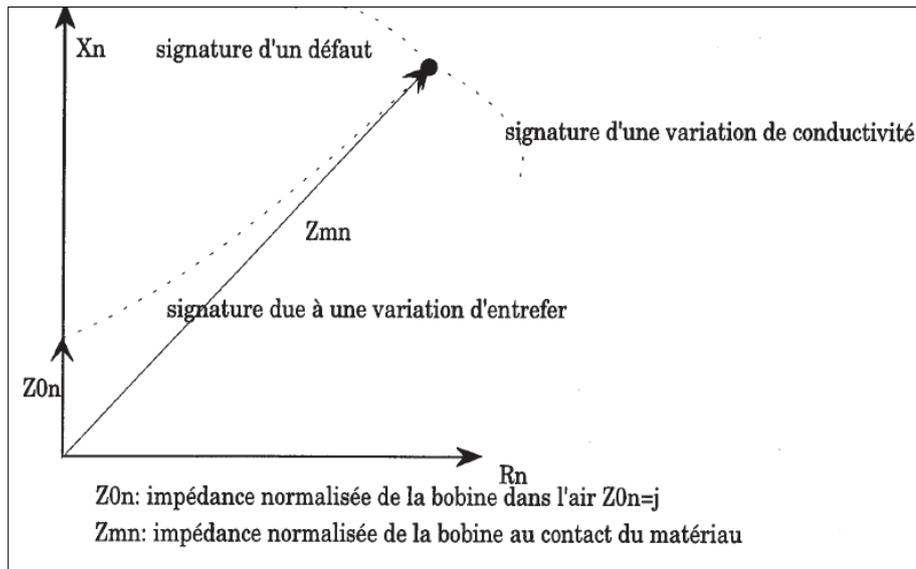


Figure I.12: diagramme d'impédance normalisée

Les applications de cette méthode sont limitées aux secteurs d'activité où le surcoût de ce matériel est justifié par des impératifs de sécurité (nucléaire).

I.3.7.3.3. Contrôle par courants de Foucault pulsés

C'est une extension de la méthode multi-fréquences. L'utilisation d'une "impulsion" (signal à durée finie) permet d'avoir une excitation à large bande spectrale. L'analyse se fait alors soit de manière temporelle, soit de manière fréquentielle. La variation du contenu spectral de l'impulsion est obtenue en agissant sur la forme et la durée de l'impulsion. On utilise essentiellement des signaux rectangulaires, en forme de trapèze, de demi-sinusoïde, des impulsions de courtes durées.

On constate que l'exploitation de la réponse se réduit la plupart du temps à l'exploitation d'une ou deux informations (comme en sinusoïdal). La forme du signal d'excitation est souvent liée à l'existence d'un générateur à possibilités limitées, mais simple à réaliser [14].

I.3.7.4. Exemples de capteurs courants de Foucault

Les capteurs CF peuvent avoir une grande variété de formes. Le choix du type de capteur, par conséquent sa structure, dépend de l'application. On rencontre essentiellement trois types de capteurs que l'on peut décrire de la façon suivante :

- Les capteurs surfaciques ou palpeurs permettent d'inspecter des surfaces planes ou bien de formes complexes. Ce sont les capteurs les plus présents sur le marché. Il existe différents types de capteurs surfaciques tels que les capteurs plans (figure I.13 (a)) ou bien sous forme de stylo [12].

- Les capteurs encerclant entourent complètement l'échantillon à inspecter. Ces capteurs sont destinés au contrôle de matériaux de formes cylindriques telles que les tubes, barres ou encore les fils. L'utilisation d'un guide est nécessaire pour que le matériau sous test soit parfaitement centré par rapport au capteur. Le diamètre interne du capteur est légèrement supérieur au diamètre externe du matériau à inspecter (figure I.13 (b)).
- Les capteurs internes dits sondes permettent le contrôle interne de tubes. Pour cela, on distingue notamment les sondes tournantes, nécessitant un mouvement hélicoïdal afin de balayer toute la surface interne du tube à l'aide d'un élément (ou d'un nombre réduit d'éléments) de la sonde autour de son axe de translation. Ainsi que les sondes multiéléments dont la partie active du capteur est composée de plusieurs éléments disposés radialement et équi-répartis autour de l'axe de la sonde, nécessitant un mouvement de translation (figure I.13 (c)) [15].

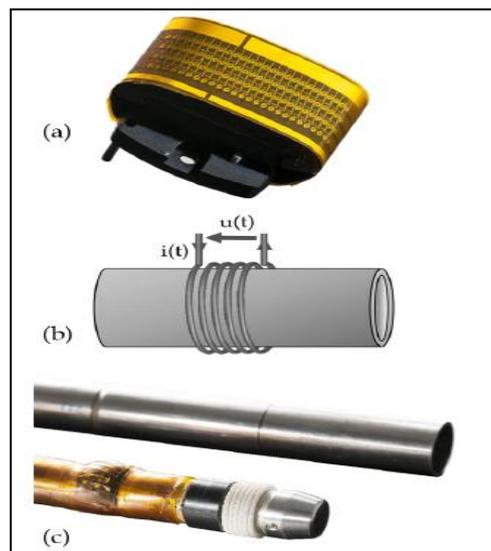


Figure I.13: Trois exemples de capteurs CF : tête d'un capteur multiéléments flexible pour l'inspection de surfaces planes (a), schéma de principe d'un capteur encerclant (b) et sonde multiéléments interne (c)

I.3.7.5. Epaisseur de peau

On a défini une profondeur de pénétration conventionnelle δ pour laquelle le module du courant à la surface est divisée par $e = 2.718$ la base des logarithmes népériens [6].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \sqrt{\frac{1}{\pi\mu\sigma f}} \quad (\text{I.1})$$

Cette profondeur est pure convention. Appelée profondeur de pénétration ou épaisseur de peau, seuls 63% des courants de Foucault circulent dans cette épaisseur, ce sont les couches les plus importantes du point de vue de la sensibilité aux interactions avec les défauts de surface.

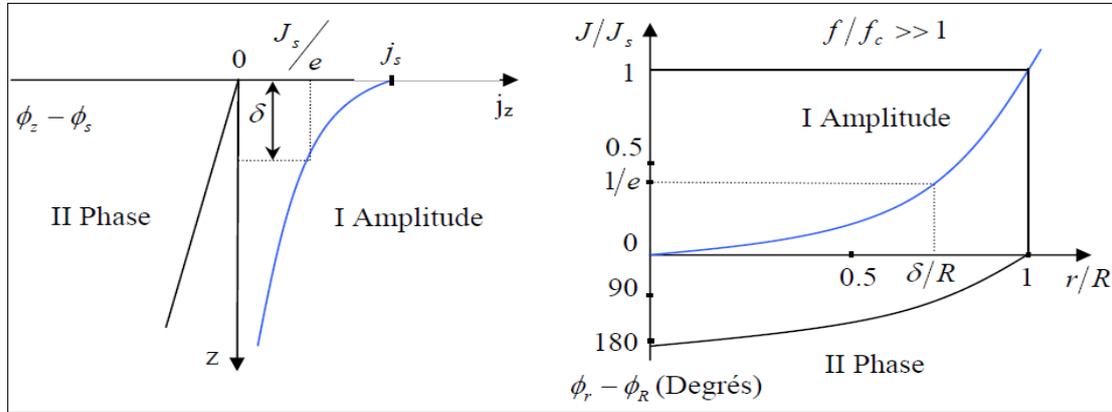


Figure I.14.a : Répartition des courants

Figure I.14.b : Répartition des courants

Foucault sous un cylindre

Foucault sous une surface plane

Les courants de Foucault induit sont parallèles au courant inducteur et de même fréquence. Ils sont progressivement déphasés à partir de la surface ($z=0$) et décroissent exponentiellement en amplitude (Figure I.14.a) et l'effet de peau résultant est caractérisé par une profondeur de pénétration δ définie par l'équation (I.1).

I.3.7.6. Type de capteurs

La topologie des courants de Foucault engendrés au sein d'une pièce est riche d'informations. Cependant, cette topologie n'est pas directement accessible à la mesure. C'est par l'intermédiaire d'un capteur inductif que nous obtenons les informations utiles à l'analyse du système contrôlé. La variation d'impédance ou la différence de potentiel aux bornes d'une bobine représente la quantité de flux magnétique créée et la puissance dépensée due à la présence des courants de Foucault dans la pièce contrôlée. On distingue principalement trois types de capteurs :

- Les capteurs à double fonction.
- Les capteurs à fonctions séparées.
- Les capteurs différentiels.

C'est la même bobine qui assure le rôle d'excitatrice et de réceptrice dans un capteur à double fonctions. La mesure de l'impédance de la bobine excitée renseigne sur les paramètres à variation lente tels que la conductivité. Le lift-off ou l'épaisseur d'un matériau [3].

Deux bobines distinctes peuvent également être employées. L'une pour l'émission du champ magnétique d'excitation et l'autre pour la réception. On parle alors de capteur à double fonctions. La différence de potentiel est alors mesurée aux bornes de cette deuxième bobine, qui peut être de taille réduite par rapport à la bobine d'émission.

Pour détecter des petites discontinuités lors du déplacement de la sonde au-dessus d'un matériau. Tout en s'affranchissant des variations lentes telles que la conductivité on l'entrefer. Les capteurs différentiels sont préconisés. Au moins deux bobines sont utilisées et sont généralement côte à côte dans le même boîtier de sonde. Leurs impédances sont soustraites. Le signal recueilli est donc nul si les deux bobines voient la même chose. Dès qu'une différence de topologie est vue une seule des deux bobines, Un signal apparaît [10].

I.3.7.7. Avantages et limites de la technique CF

La méthode permet de rechercher des défauts situés à des profondeurs variables (de zéro à quelques millimètres) et de connaître la taille de la fissure ou de la piqûre. Toutefois, elle ne présente pas une grande sensibilité. Pour donner un ordre d'idées, les courants de Foucault détectent des fissures d'une longueur minimale de 0,2 mm et d'une largeur de 1 mm

La technique par courants de Foucault offre les possibilités suivantes :

- 1-Inspection rapide, simple et fiable pour la détection de défauts de surface et de faible profondeur sur des matériaux conducteurs.**
- 2-Peut être utilisée pour mesurer la conductivité électrique de matériaux.**
- 3-Mesure de revêtement non conducteur.**
- 4-Inspection de trous avec l'utilisation de scanners tournant à grande vitesse et de sondes de surface.**

Le CND par courants de Foucault ne s'applique que sur les pièces réalisées en matériaux conducteurs en électricité [10].

I.4. Conclusion

Par leurs possibilités de détection, de reconnaissance et de dimensionnement de défauts isolés dans un matériau ainsi que l'estimation de ses caractéristiques microstructurales et propriétés d'emploi, les techniques de contrôle non destructif font partie des outils incontournables de l'évaluation de la qualité des produits.

Au cours de ce chapitre nous avons passé en revue certaines méthodes de contrôle non destructif et nous avons apporté une attention particulière à la méthode des courants de Foucault. Dans ce qui suit nous présentons la modélisation numérique de cette méthode en vue de la modélisation des structures CND-CF des structures cylindriques.

Chapitre II

Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

II.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de résumer les équations mathématiques de base qui décrivent les phénomènes électromagnétiques intervenant dans le contrôle non destructif par courants de Foucault. Nous présentons la simplification de ces équations aux cas de régime quasi-stationnaire ainsi que leurs formulations à des configurations géométriques spécifiques. Nous établissons différentes formulations de l'impédance et cela en fonction de la grandeur d'état, selon laquelle les équations simplifiées de Maxwell sont résolues.

Dans le domaine du CND par CF la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu permet d'élaborer un modèle mathématique qui pourra prédire la réponse de la sonde en fonction des paramètres de la cible, qui doivent être connus. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la complexité de la configuration cette résolution peut être analytique ou numérique [16].

II.2. Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell spécifient que toute variation spatiale ou temporelle d'un champ électromagnétique en un point de l'espace entraîne ou est due à l'existence d'un autre champ au même point. Ces équations sont donc locales et sont valables dans n'importe quel système d'axes. Ainsi, dans tous les problèmes nécessitant le calcul du champ électromagnétique qui règne dans un système matériel, on utilise les quatre équations fondamentales aux dérivées partielles de Maxwell, qui sous leurs formes la plus générale s'écrivent [17] :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II. 1})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II. 2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 3})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II. 4})$$

\vec{E} (V/m) : Champs électrique.

\vec{H} (A/m) : Champ magnétique.

\vec{D} (C/m²) : Induction électrique.

\vec{B} (T) : Induction magnétique.

ρ (C/m³) : Densité volumique de charges électriques.

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement.

Chapitre II Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

\vec{j}_c (A/m²) : Densité de courant de conduction.

L'équation (II.4) est une généralisation du théorème d'Ampère. Elle permet d'établir la relation entre le champ électromagnétique et les courants électriques. Elle traduit la création d'un champ magnétique par les courants électriques de conduction et de déplacement.

L'équation (II.2) correspond à la loi d'induction de Faraday, qui établit le lien entre un champ électrique et un flux magnétique. Cette loi traduit le phénomène inductif qui se produit dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur en mouvement soumis à un champ magnétique constant.

Ces deux équations (II.4) et (II.2) définissent la relation entre les champs et leurs sources.

Les équations (II.1) et (II.3) traduisent respectivement la conservation de la charge électrique et du champ magnétique.

II.2.1. Lois de comportements

Les champs vectoriels cités en section (II.2) et la liaison des uns aux autres dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu (ϵ , μ , σ) ou ils règnent.

Selon les matériaux utilisés, ϵ , μ , σ peuvent être soit des scalaires modélisant alors le comportement des matériaux isotropes, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie.

✓ Relations du milieu

Nous distinguons une relation magnétique qui exprime le lien entre le vecteur champ magnétique (\vec{H}) et le vecteur induction magnétique (\vec{B}) à travers la perméabilité magnétique et, une relation diélectrique exprimant le lien entre le vecteur champ électrique (\vec{E}) et le vecteur déplacement électrique (\vec{D}) à travers la permittivité électrique [18].

➤ Cas linéaire :

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

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{II. 6})$$

➤ Cas non linéaire : les coefficients μ et ϵ peuvent être fonction de \vec{H} , de \vec{E} et de la température.

$$\vec{B} = \mu(H) \cdot \vec{H} \quad (\text{II. 7})$$

Chapitre II Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

$$\vec{D} = \varepsilon(E) \cdot \vec{E} \quad (\text{II. 8})$$

Dans le cas linéaire nous avons:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad \text{avec} \quad \mu_r = C^{te} \quad (\text{II. 9})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad \text{avec} \quad \varepsilon_r = C^{te} \quad (\text{II. 10})$$

μ : Perméabilité magnétique absolue [H/m].

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

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré.

ε : Permittivité électrique [F/m].

$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$: Permittivité électrique du vide [F/m].

ε_r : Permittivité électrique relative du milieu considéré.

✓ Loi d'Ohm

Elle exprime la relation liant la densité du courant \vec{j} au champ électrique \vec{E} à travers la conductivité σ , elle est donnée par :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.11})$$

σ : Conductivité électrique [$(\Omega.m)^{-1}$].

II.3. Electromagnétisme en régime quasi-stationnaire

II.3.1. Hypothèses simplificatrices

Afin de décrire le modèle mathématique par la suite, qui régit les phénomènes électromagnétiques relatifs à un problème type de CND-CF, certaines hypothèses simplificatrices sont à considérer:

- ✓ La densité volumique de charges est considérée nulle, soit $\rho=0$.
- ✓ Le terme $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ est généralement négligeable pour des basses fréquences.
- ✓ Les sources d'alimentation sont supposées produites par un générateur de courant sinusoïdal parfait.
- ✓ L'induction magnétique rémanente est considérée nulle $B_r=0$, pas d'aimants [13].

II.4. Modèle magnétodynamique

II.4.1. Formulation en termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A}

Le problème formulé en termes de champ magnétique ou électrique présente l'inconvénient de la discontinuité possible de ces grandeurs en passant d'un milieu à un autre, par contre le potentiel vecteur magnétique est continu, de plus, il réduit le nombre d'inconnues.

De l'équation (II.3)

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{II. 12})$$

La combinaison des équations (II.2) et (II.12) nous donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = 0 \quad (\text{II. 13})$$

La relation (II.13) permet de déduire qu'il existe un potentiel scalaire électrique V tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \quad (\text{II. 14})$$

D'où

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} V \quad (\text{II. 15})$$

La densité de courant s'exprime alors :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \left(-\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{II. 16})$$

Alors l'équation $\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}$ devient

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \sigma \cdot \left(-\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{II. 17})$$

❖ Dans le cas ou

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (\text{II. 18})$$

La combinaison des équations (II.12), (II.17) et (II.18) nous donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (\text{II. 19})$$

Avec : $\vec{J}_s = -\sigma \cdot \vec{\nabla} V$

II.5. Méthodes de résolution des équations différentielles

II.5.1 Méthodes analytiques

Historiquement, l'étude des circuits magnétiques et des machines électriques a été réalisée de manière analytique et même géométrique, car l'outil de calcul disponible était faible. Par contre, ces méthodes permettent de rendre compte du fonctionnement de ces machines, ainsi que des principaux phénomènes mis en jeu [9].

II.5.2 Méthodes numériques

C'est dernières décades, les progrès de l'informatique ont permis le développement des méthodes numériques donnant des résultats globaux précis. De plus, elles fournissent des résultats locaux, tels que les flux et les potentiels à l'intérieur de la machine, qui permet d'agir sur la conception, de façon à améliorer les performances. Ces nouveaux outils sont bien adaptés aux validations de dimensionnement des machines. Diverses méthodes existent mettant en œuvre des niveaux de complexités différents. Nous pouvons citer une méthode complète et complexe nécessitant des moyens informatiques lourds pour des résultats considérés comme étant des résultats de référence, c'est la méthode des éléments finis. A un niveau de complexité moindre, nous pouvons aborder la méthode de modélisation par différences finis [2].

II.5.2.1. La méthode des différences finies(MDF)

Historiquement, la méthode des différences finies est la première méthode connue pour calculer sur ordinateur la solution d'une équation aux dérivées partielles. Elle Consiste à décomposer le domaine d'étude en une grille rectangulaire uniforme dont chaque nœud est à équidistance de son voisin suivant les axes x et y et en chaque nœud, le système différentiel est satisfait. La méthode est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences où chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de l'inconnue à déterminer en un certain nombre de points du domaine de résolution. De cette manière l'EDP est transformée en équation algébrique en chacun des nœuds (points). Une distribution du potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans le domaine d'étude est alors la solution du système algébrique.

La méthode des différences finis est une méthode simple à mettre en œuvre mais s'adapte difficilement aux géométries complexes, elle n'aboutit qu'aux valeurs nodales du vecteur potentiel, ce qui exige une interpolation pour déterminer les valeurs de A en d'autres points du domaine de résolution si c'est nécessaire ; en plus de l'espace mémoire et le temps

Chapitre II Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

de calcul. D'autre part, la prise en compte des conditions de symétrie d'un milieu à un autre nécessite un traitement spécifique [3].

a) La discrétisation d'une fonction

$U(x, y)$ définie en tous points (x, y) du domaine Ω avec les conditions aux limites données sur le contour Γ variables x et y par un ensemble fini de N éléments, remplacer ensuite la fonction $U(x, y)$ par une fonction $U(p)$ définie sur Ω . L'EDP déterminant $U(x, y)$ est donc remplacée par un système fini d'équations simultanées déterminant $U(p)$.

b) Approximation des dérivées

Un réseau carré est généralement utilisé.

✓ Dérivée du premier ordre

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_p = \frac{U(E) - U(W)}{2h} \quad (\text{II. 20})$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)_p = \frac{U(N) - U(S)}{2h} \quad (\text{II. 21})$$

✓ Dérivée du second ordre

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_p = \frac{U(E) + U(W) - 2 \cdot U(P)}{h^2} \quad (\text{II. 22})$$

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)_p = \frac{U(N) + U(S) - 2 \cdot U(P)}{h^2} \quad (\text{II. 23})$$

D'où

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_p + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)_p &= \frac{U(E) + U(W) + U(N) + U(S) - 4U(P)}{h^2} \\ &= \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right]_p = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_p + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)_p \\ &= (\Delta U)_p \end{aligned} \quad (\text{II. 24})$$

Finalement l'expression du Laplacien discrétisé par la méthode des différences finis est comme suit :

$$(\Delta U)_p = \frac{U(E) + U(W) + U(N) + U(S) - 4U(P)}{h^2} \quad (\text{II. 25})$$

Chapitre II Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

D'une manière générale :

$$(\Delta U)_{ij} = \frac{U_{i+1,j} + U_{i-1,j} + U_{i,j-1} + U_{i,j+1} - 4U_{ij}}{h^2} \quad (\text{II. 26})$$

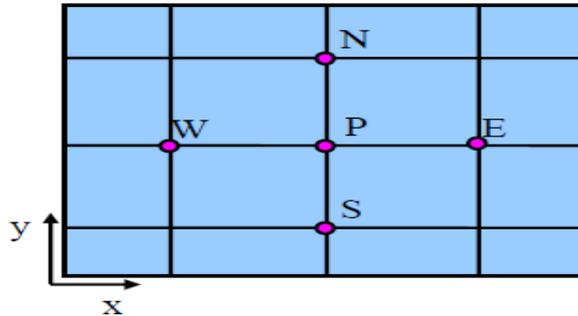


Figure II.1:Maillage de type différences finies

La méthode des différences finies est très simple à mettre en œuvre. C'est une méthode qui est difficilement applicable aux domaines à géométrie compliquée, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières singulières tels que les carrés et les rectangles.

II.5.2.2. La Méthode des éléments finis(MEF)

La méthode des éléments finis est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques.

C'est cette méthode que nous avons retenue. Elle est présentée plus en détail dans la suite de ce chapitre [2] [3].

II.5.3. Etapes de résolution par la MEF

D'une façon générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes :

- Obtention de la formulation variationnelle du problème et définition des espaces fonctionnels de solutions admissibles.
- Réalisation d'un maillage, correspondant à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangles, tétraèdres, hexaèdres . . .) sur lesquels les champs sont écrits en termes d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base à support local
- Calcul des matrices élémentaires qui, après assemblage, génèrent un système matriciel creux.
- Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème.

❖ Méthode des résidus pondérés

a) Principe de la méthode

La méthode des résidus pondérés est basée sur la détermination du résidu par :

$$R = L(A) - f_V \quad (\text{II.27})$$

Avec :

R : représente le résidu de l'approximation.

$L(A)$: Opérateur différentiel.

f_V : Fonction définie sur le domaine d'étude Ω

A : L'inconnue du problème.

A l'aide de fonctions de pondération bien choisies, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en n points du domaine Ω :

$$\int_{\Omega} R_i \cdot \phi_i \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{II.28})$$

ϕ_i : Fonction de projection

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

b) Différentes méthodes déduites des résidus pondérés

Le choix des fonctions de pondération appelées aussi fonctions de projection, conduit à plusieurs méthodes. Parmi celles-ci nous citerons :

- La méthode de collocation par point.
- La méthode des moindres carrés.
- La méthode de Galerkin.

La méthode de collocation par point utilise les fonctions de Dirac comme fonction de pondération, la méthode des moindres carrés est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites. La méthode de Galerkin consiste à choisir des fonctions de projection identiques aux fonctions d'approximation.

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

Dans le cas de l'utilisation de la méthode de Galerkin, on obtient un système algébrique symétrique facile à résoudre.

Chapitre II Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

On se limitera dans ce qui suit, à la méthode projective de Galerkin qui est utilisée dans le cadre de ce travail.

❖ La discrétisation

Le domaine de résolution est discrétisé en petits domaines appelés éléments finis. L'approximation dans un élément est effectuée en fonction des valeurs de l'inconnue aux nœuds de cet élément. On parle alors d'interpolation nodale.

a) Éléments finis réels

Pour des domaines d'étude à une, deux ou trois dimensions, des éléments classiques peuvent être définis selon les degrés de la courbe d'interpolation qui lui est associés. On rencontre généralement, des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.

Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

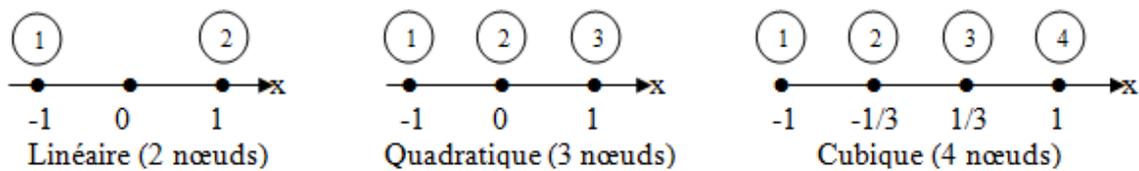


Figure II.2 : Éléments finis de référence à une dimension

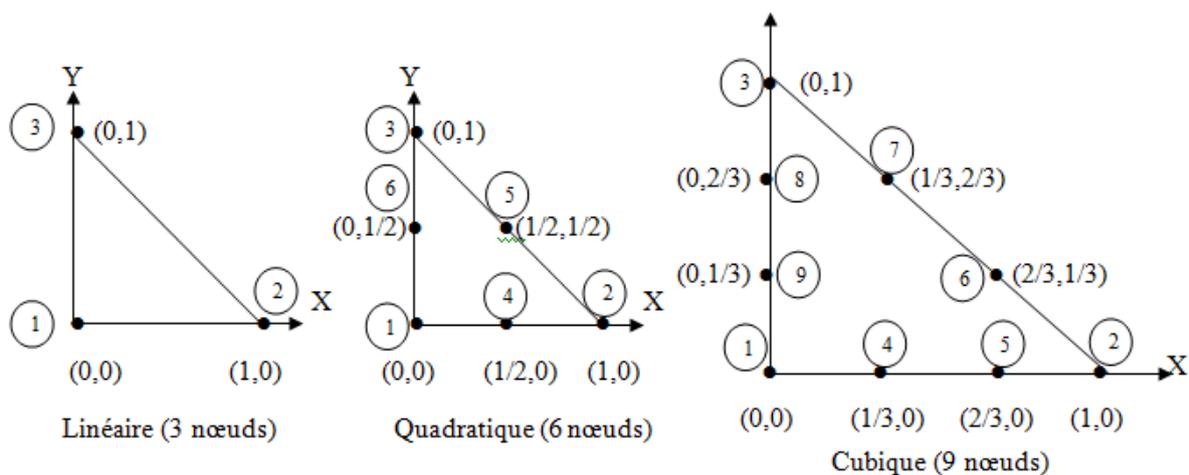


Figure II.3 : Éléments finis de référence à deux dimensions (éléments triangulaires)

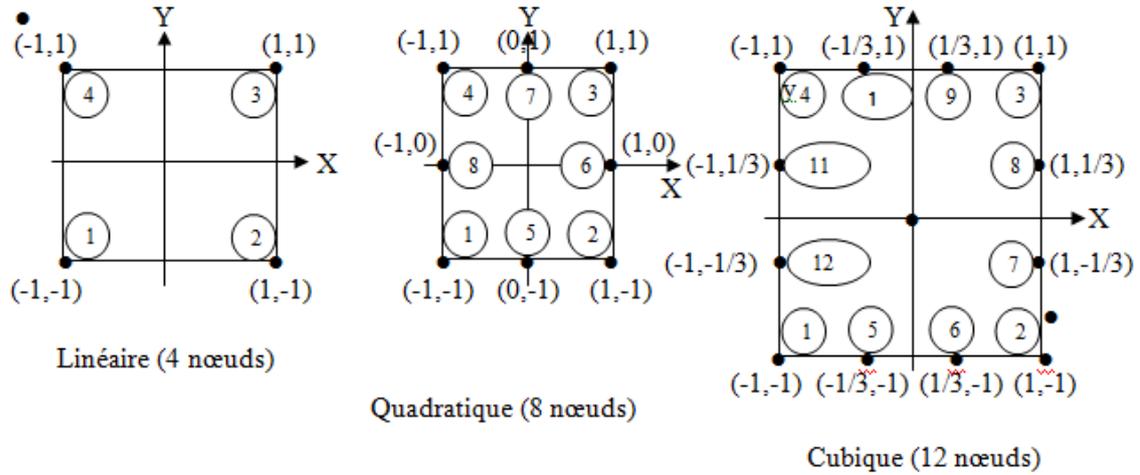


Figure II.4: Eléments finis de référence à deux dimensions (éléments carrés)

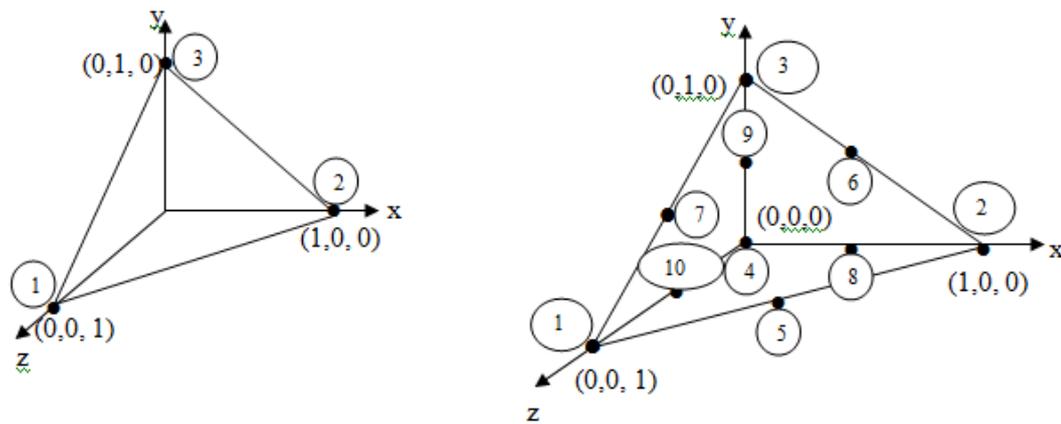


Figure II.5: Eléments finis de référence à trois dimensions

Etant donné que le logiciel de simulation utilisé (MATLAB) fait appel à l'élément triangulaire linéaire, on ne s'intéressera dans la suite qu'à celui-ci

b) Élément de référence

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

Dans le cas qui nous concerne, c'est-à-dire, l'élément triangulaire linéaire, l'élément de référence est tel que donné dans la figure suivante :

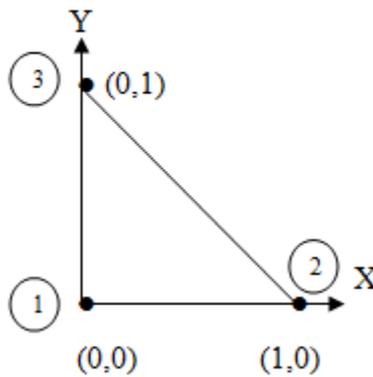


Figure II.6: Élément de référence utilisé dans PDETool

c) Fonction d'interpolation

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de Pascal, donné ci-dessous :

1	—	ordre 0
U V	—	ordre 1
U^2 UV V^2	—	ordre 2
U^3 U^2V UV^2 V^3	—	ordre 3

Figure II.7: Triangle de Pascal

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

1) Principe de l'état complet

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

2) Principe de comptabilité

Celui-ci est explicité par la continuité de la fonction.

Dans le cas d'un élément triangulaire linéaire, la fonction d'interpolation est donnée par :

$$u(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c \tag{II.29}$$

d) Fonction d'interpolation sur l'élément

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

$$u(x, y) = [N_1(x, y) \ N_2(x, y) \ N_3(x, y)] \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

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

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

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

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

$$N_1(x_1, y_1) = 1$$

$$N_2(x_2, y_2) = 0$$

$$N_3(x_3, y_3) = 0$$

e) Fonction d'approximation sur le domaine

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

$$A = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_j \quad (\text{II.31})$$

N : Nombre de nœuds

A_j : Valeur de l'inconnue au nœud j

α_j : Fonction d'interpolation au nœud j

▪ cas axisymétrique

En considérant comme précédemment le régime harmonique ; la formulation intégrale dans ce cas est donnée par l'expression suivante :

$$- \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \cdot \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \cdot \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right) \cdot dr dz + j\omega \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \sigma \cdot A_z \cdot \frac{dr dz}{r} = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot J_{\phi} \cdot dr dz \quad (\text{II.32})$$

Chapitre II Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

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

$$\iint_{\Omega} \frac{v}{r} \cdot \left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial r} \cdot \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial A}{\partial z} \right) \cdot dr dz + - \int_{\Gamma} \frac{v}{r} \cdot \alpha_i \cdot \frac{\partial A}{\partial n} \cdot d\Gamma + j\omega \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \sigma \cdot A \cdot \frac{drdz}{r} = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot J_{\phi} \cdot dr dz \quad (\text{II.33})$$

Dans le cas de conditions aux limites type Dirichlet ou Neumann homogène le terme sur la frontière s'annule, ce qui revient à écrire :

$$\sum_{j=1}^N \left[\iint_{\Omega} \frac{v}{r} \cdot \vec{\nabla} \alpha_i \cdot \vec{\nabla} \alpha_j \cdot dr dz \right] \cdot A_j + j\omega \sum_{j=1}^N \left[\iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \sigma \cdot A \cdot \frac{drdz}{r} \right] \cdot A_j = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot J_{\phi} \cdot dr dz \quad (\text{II.34})$$

L'écriture de (II.34) pour tous les nœuds du domaine nous permet d'aboutir au système matriciel suivant :

$$[M] \cdot [A] + j\omega \cdot [L] \cdot [A] = [K] \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$M_{ij} = \iint_{\Omega} \frac{v}{r} \cdot \vec{\nabla} \alpha_i \cdot \vec{\nabla} \alpha_j \cdot dr dz$$

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

$$K_i = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot J_z \cdot dr dz$$

II.6. Techniques de calcul d'impédance

II.6.1. Hypothèses

Considérant une bobine de section Ω et formée de N spires jointives disposées en séries. La densité de courant est de répartition uniforme. La spire élémentaire à la bobine est soumise à une tension du et parcourue par une l'intensité du courant I [19].

$$I = \iint_{\Omega} \vec{j} \cdot d\vec{\Omega} \quad (\text{II.36})$$

$$I = \frac{J\Omega}{N} \quad (\text{II.37})$$

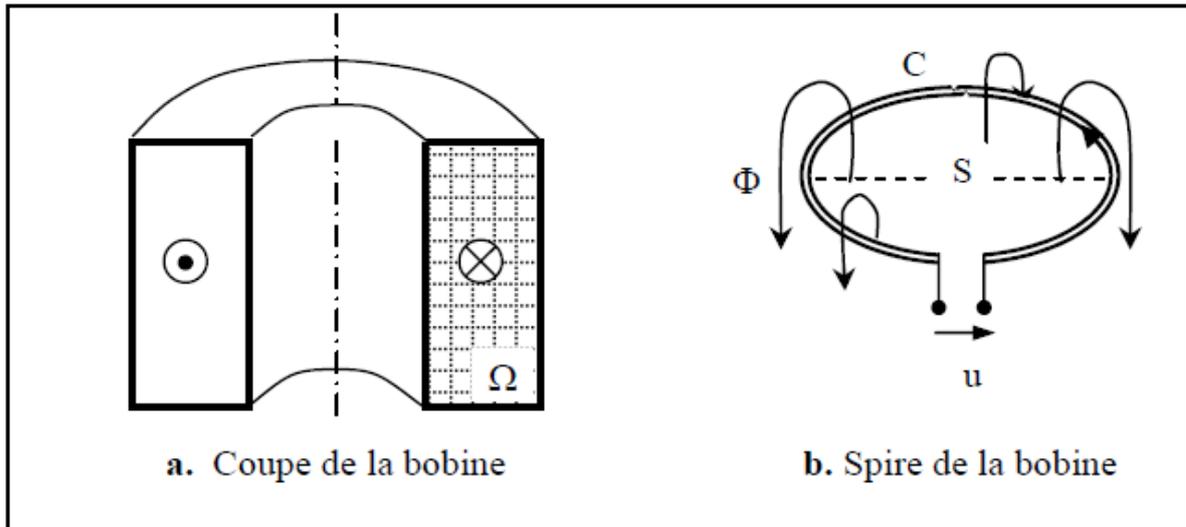


Figure II.8: Bobine à N spires jointives

La tension totale est la somme des tensions élémentaires de chaque spire car les spires sont disposées en séries, soit :

$$U = \frac{1}{\Omega} \iint_{\Omega} u d\Omega \quad (\text{II.38})$$

Différents types de formulation de l'impédance sont possibles. Ces formulations se différencient dans la variable d'état utilisée. Le choix de la variable d'état est relatif aux configurations du problème et à la solution issue de la résolution des équations de Maxwell.

II.6.2. Impédance à travers l'induction ou le flux magnétique

En configuration double fonction ou fonctions séparées, L'impédance du bobinage peut-être calculée à l'aide d'une méthode générale reposant sur le calcul du flux de l'induction magnétique [4].

Partant de l'équation de Maxwell – Faraday (II.2), après intégration sur la surface S enveloppée par le contour C de la bobine (Figure II.8) et application du théorème de Stokes, nous arrivons à:

$$\int_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -j\omega \iint_S \vec{B} d\vec{S} \quad (\text{II.39})$$

Pour obtenir la tension aux bornes de la bobine, nous faisons la somme de toutes les tensions élémentaires des spires d'où l'équation appliquée à l'ensemble des spires :

$$\iint_{\Omega} \left(\int_c \vec{E} \cdot d\vec{l} \right) d\Omega = -j\omega \iint_{\Omega} \left(\iint_S \vec{B} d\vec{S} \right) d\Omega = -j\omega \iint_{\Omega} \Phi d\Omega \quad (\text{II.40})$$

Chapitre II Modélisation électromagnétique des configurations CND-CF

Sachant que l'impédance électrique peut être évaluée à partir de :

$$Z = R + jX = \frac{1}{I} \iint_{\Omega} \left(\int_c \vec{E} \cdot d\vec{l} \right) d\Omega \quad (\text{II.41})$$

Et en introduisant la forme complexe du flux magnétique, on obtient :

$$Z = \frac{\omega}{I} \left(\iint_{\Omega} \text{Im}(\Phi) d\Omega - j \iint_{\Omega} \text{Re}(\Phi) d\Omega \right) \quad (\text{II.42})$$

Les paramètres de l'impédance sont alors :

$$R = \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \text{Im}(\Phi) d\Omega \quad (\text{II.43})$$

$$X = -j \iint_{\Omega} \text{Re}(\Phi) d\Omega \quad (\text{II.44})$$

Ou :

$$R = \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \left(\iint_S \text{Im}(\vec{B} d\vec{S}) \right) d\Omega \quad (\text{II.45})$$

$$X = -j \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \left(\iint_S \text{Re}(\vec{B} d\vec{S}) \right) d\Omega \quad (\text{II.46})$$

L'expression de l'impédance ainsi établie peut s'appliquer indifféremment aux capteurs à double fonction ou à fonctions séparées. Cependant, la majorité des méthodes de résolution utilisent une variable d'état autre que l'induction ou le flux magnétique. Par conséquent, il est préférable de formuler l'impédance en fonction du potentiel vecteur magnétique.

En introduisant le potentiel vecteur magnétique, les équations (II.45) et (II.46) deviennent comme suit:

$$\text{Re}(Z) = \frac{N^2}{J.S^2} \omega \cdot \iint_S 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \text{Im}(A) \cdot dS \quad (\text{II.47})$$

$$\text{Im}(Z) = \frac{N^2}{J.S^2} \omega \cdot \iint_S 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \text{Re}(A) \cdot dS \quad (\text{II.48})$$

Avec :

r : Rayon de la bobine.

II.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à modélisation du capteur à courants de Foucault. Parmi les différentes techniques de modélisation, la méthode des éléments finis présente l'avantage de pouvoir traiter les géométries complexes.

La formulation $\vec{A} - V$ a été développée, une formulation qui permet de simuler avec efficacité l'interaction capteur-cible avec défauts. Dans le chapitre suivant ce modèle sera appliqué à des bobines à air et à des pièces cylindriques pour validation.

Chapitre III

Applications et résultats

III.1. Introduction

Les défauts de types fissures sont fréquemment rencontrés en CND, leur géométrie est caractérisée par le fait qu'une dimension est très importante par rapport aux deux autres. C'est ce type de défauts que nous allons considérer dans cette étude.

L'objectif des applications traitées est d'évaluer le modèle éléments finis développé pour le calcul de l'impédance d'un capteur double fonction en hypothèse 2D.

III.2. Organigramme de calcul

La figure III.1 représente l'organigramme de l'algorithme de calcul développé sous l'environnement Matlab.

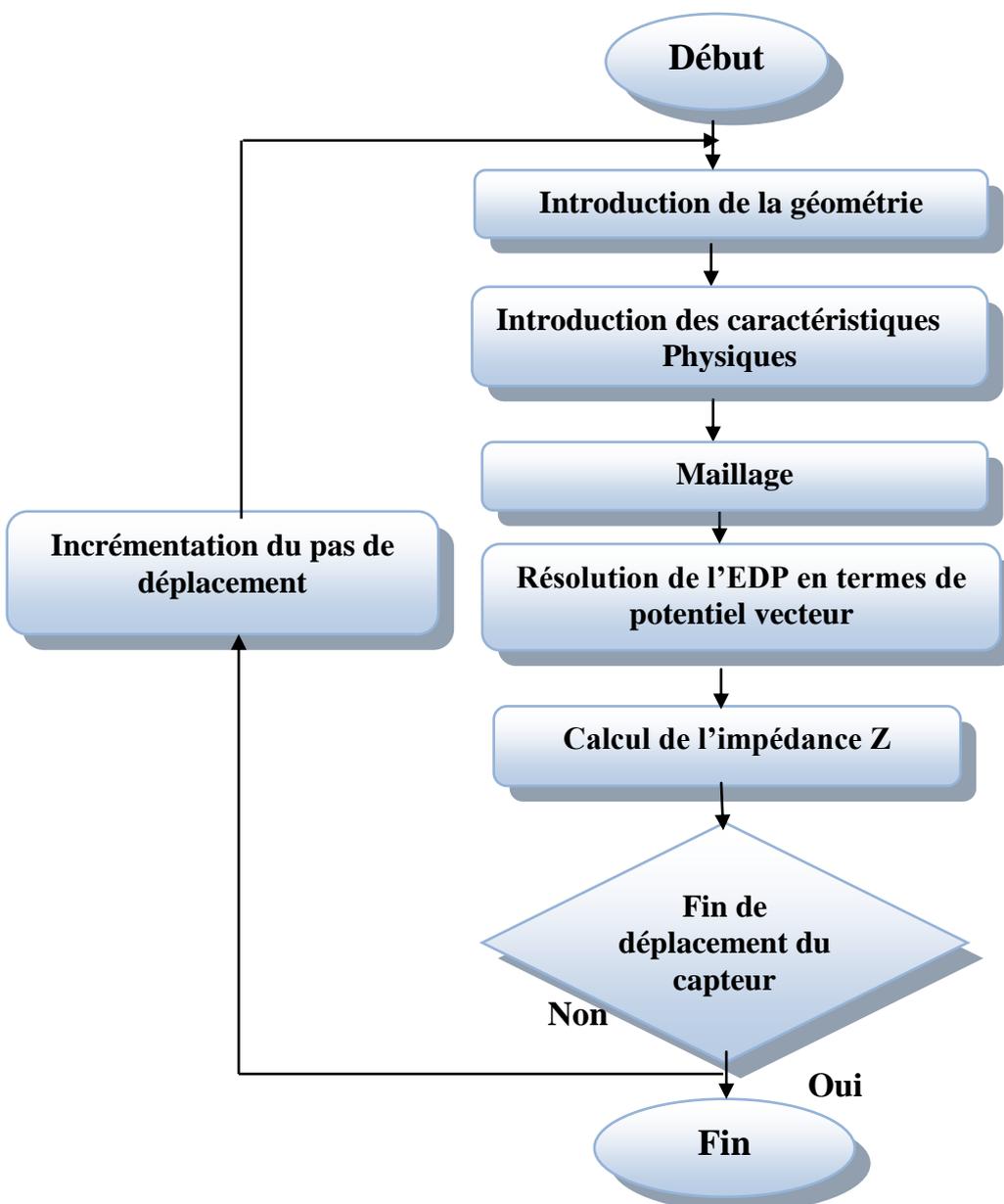


Figure III.1 : Organigramme de calcul

III.3. Formulation électromagnétique du problème

Nous avons considéré un problème magnétodynamique en régime harmonique et dont l'équation en termes de potentiel vecteur magnétique est donnée comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\nu}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\nu}{r} \frac{\partial A}{\partial Z} \right) - \frac{\sigma}{r} j\omega A = -J_{s\varphi} \tag{III.1}$$

L'adaptation de l'équation(III.1) aux différentes régions est donnée comme suit :

L'équation relative à la charge est :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\nu}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\nu}{r} \frac{\partial A}{\partial Z} \right) - \frac{\sigma}{r} j\omega A = 0 \tag{III.2}$$

L'équation associée au capteur est :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\nu}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\nu}{r} \frac{\partial A}{\partial Z} \right) = -J_{s\varphi} \tag{III.3}$$

Dans l'air, l'équation résolue est :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\nu}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\nu}{r} \frac{\partial A}{\partial Z} \right) = 0 \tag{III.4}$$

Avec : $\nu = \frac{1}{\mu}$

III.4. Première application: Défaut interne

Le problème traité dans cette première application est celui d'un tube métallique creux siège d'un défaut interne (Figure III.2). Nous faisons glisser la sonde à l'intérieur du tube et nous récupérons l'impédance de la bobine pour chaque pas de déplacement de cette dernière.

Les caractéristiques géométriques et physiques de chaque élément du dispositif sont listées dans le tableau III.1 :

Paramètres	Valeurs
Bobine	
Diamètre intérieur	28.92 mm
Diamètre extérieur	31.92 mm
Hauteur	1.5 mm
Lift-off	0.51 mm
Nombre de spires	120
Fréquence	50 kHz
Cylindre	
Diamètre intérieur	32.94 mm

Diamètre extérieur	38.1 mm
Epaisseur	2.58 mm
Conductivité	59 MS/m
défaut	
Longueur	10 mm
Profondeur	100%d, 80%d, 50% d, 30% d et 10% d

Tableau III.1: Caractéristiques géométriques et physiques du système

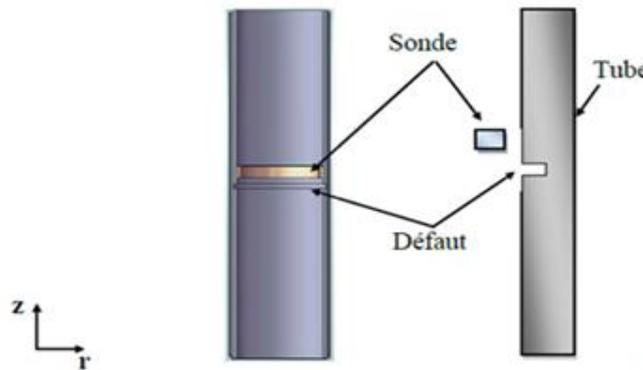


Figure III.2 : Description du problème.

III.4.1. Domaine d'étude et conditions aux limites

La Figure III.3 représente la géométrie du système obtenue avec notre code de calcul éléments finis 2D.

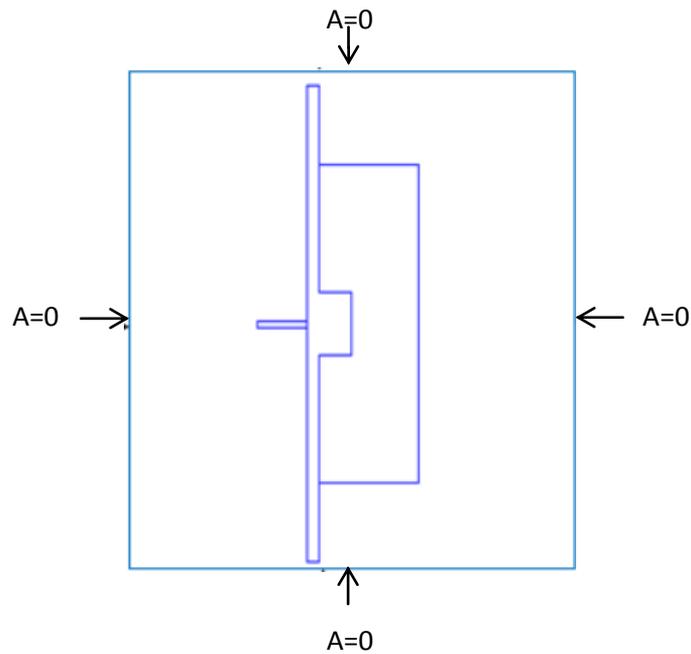


Figure III.3: Géométrie du domaine d'étude

Maillage du domaine

Le maillage de la géométrie de la cible avec défaut dans le cas d'un capteur seul, est représenté sur la figure III.4.

Notons que le maillage doit être suffisamment fin au niveau des régions actives pour obtenir une précision suffisante.

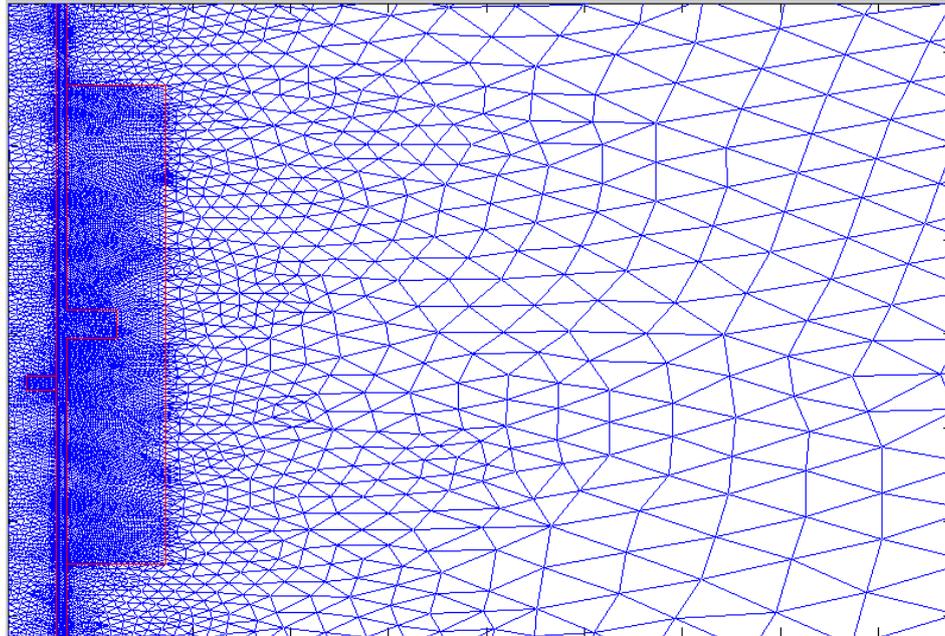
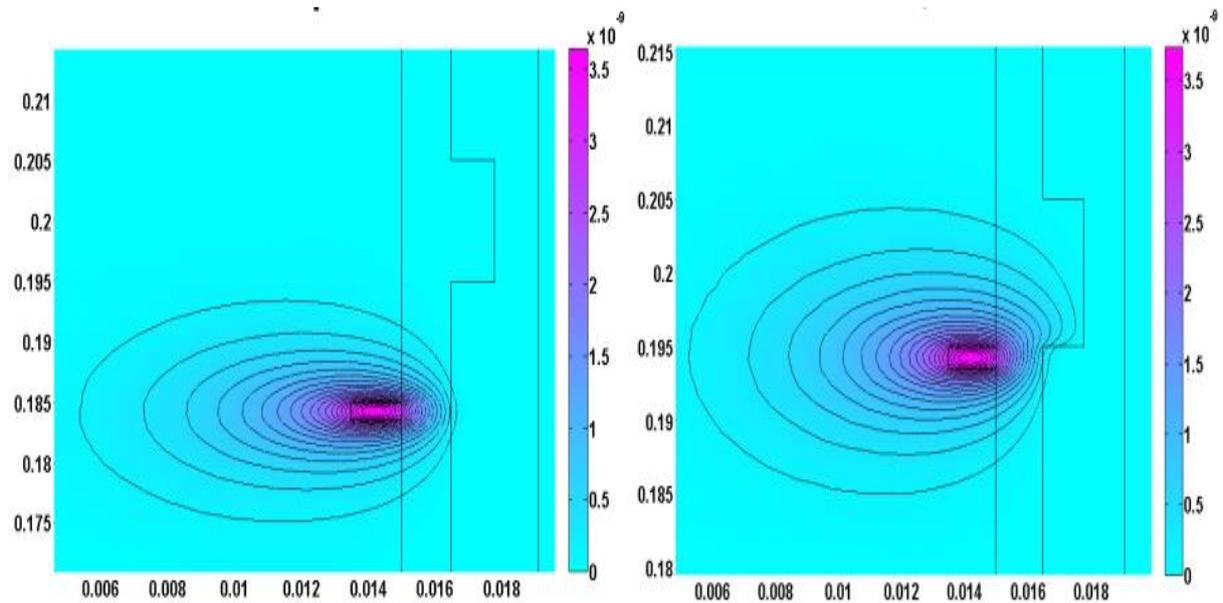


Figure III.4 : Maillage du domaine

III.4.2. Résultats en termes de potentiel vecteur magnétique

Les cartographies du champ magnétique pour différentes positions de la sonde sont représentées par la figure III.5.



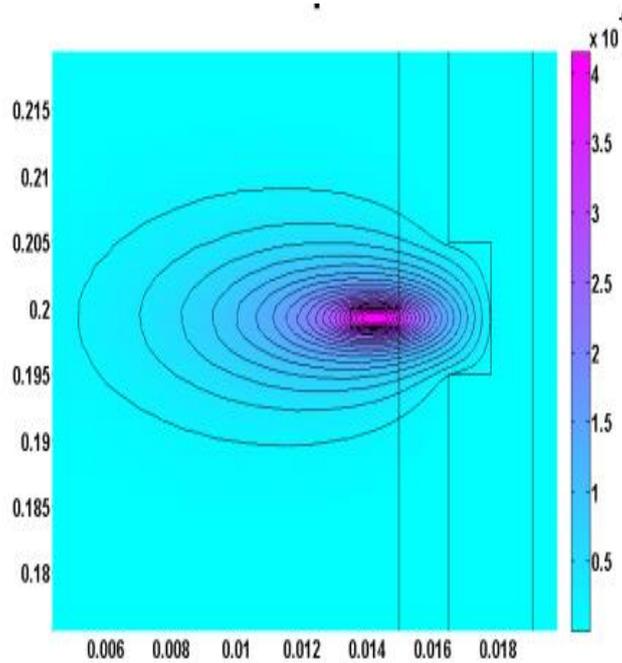


Figure III.5 : Les lignes du potentiel vecteur magnétique A en fonction de la position du capteur

Nous observons une distorsion des lignes du champ magnétique ce qui va impacter l'impédance globale du système vu par la bobine.

III.4.3. Résultats en termes de variation d'impédance

Les signaux de la variation de l'impédance sont obtenus par la relation suivante :

$$\Delta Z_i = Z_i - Z_{\min} \quad (\text{III.5})$$

Z_i : Impédance de la bobine à la position i en présence défaut.

Z_{\min} : Impédance minimale de la bobine en absence de défaut.

Nous avons adopté cette formule pour ne garder que les variations de l'impédance dues à la présence du défaut.

III.4.3.1. Effet de la fréquence

Pour différentes valeurs de fréquence d'excitation 50, 250, 300 et 500 kHz, les figures III.6 et 7 représentent les variations de l'impédance en fonction de la position du capteur.

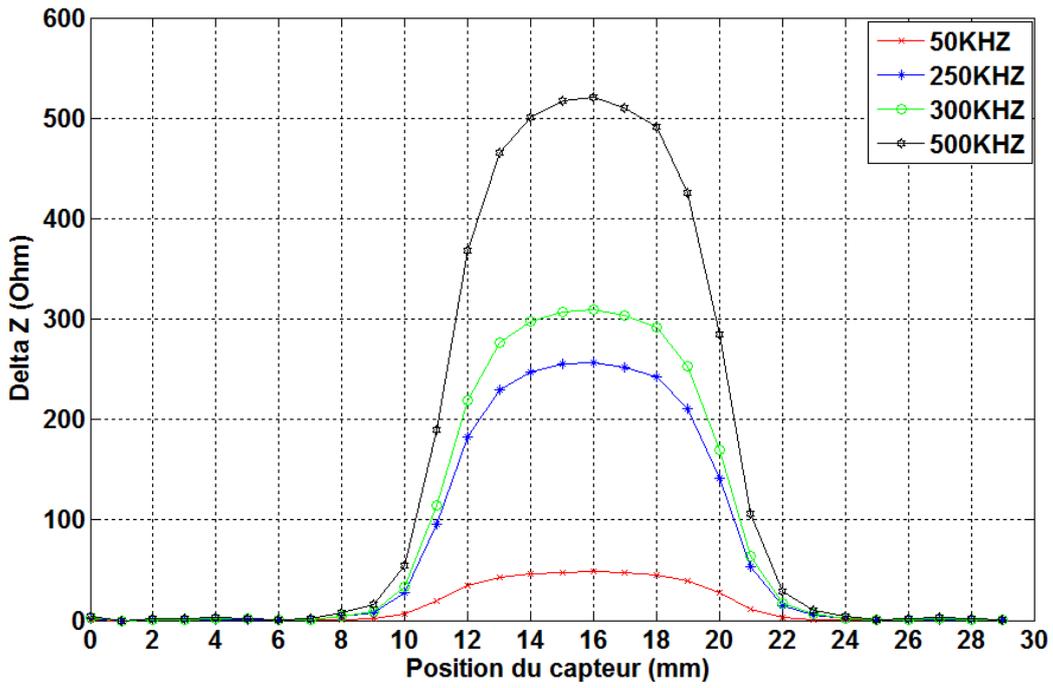


Figure III.6: Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour les Fréquences : 50, 250,300 et 500kHz.

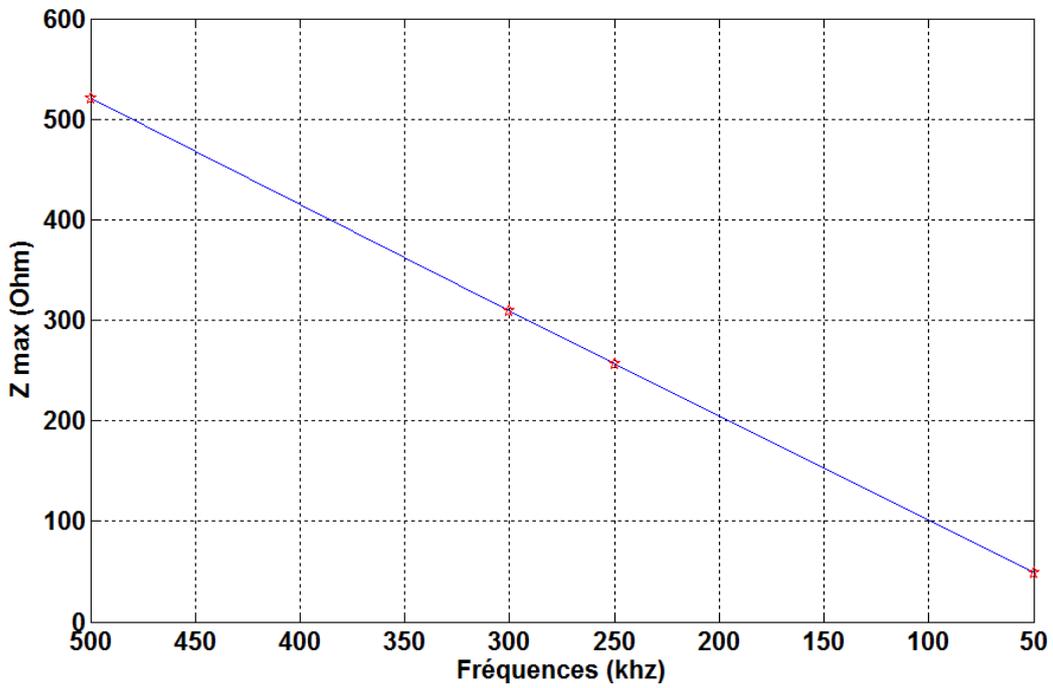


Figure III.7: Zmax de la fréquence en fonction de la position du capteur

D'après les résultats, on remarque que lorsque la fréquence d'excitation augmente, la variation de l'impédance augmente, nous montrons d'une façon plus claire l'importance du choix de la fréquence dans section III.5.

III.4.3.2. Effet du lift-off

La fréquence d'excitation étant fixée à 50 kHz. La figure III.8 et 9 représente la variation de l'impédance du capteur pour différentes valeurs de la distance entre la pièce à contrôler et le capteur (lift-off), soient 0.5mm, 0.75mm, 1mm, 1.5mm et 2mm.

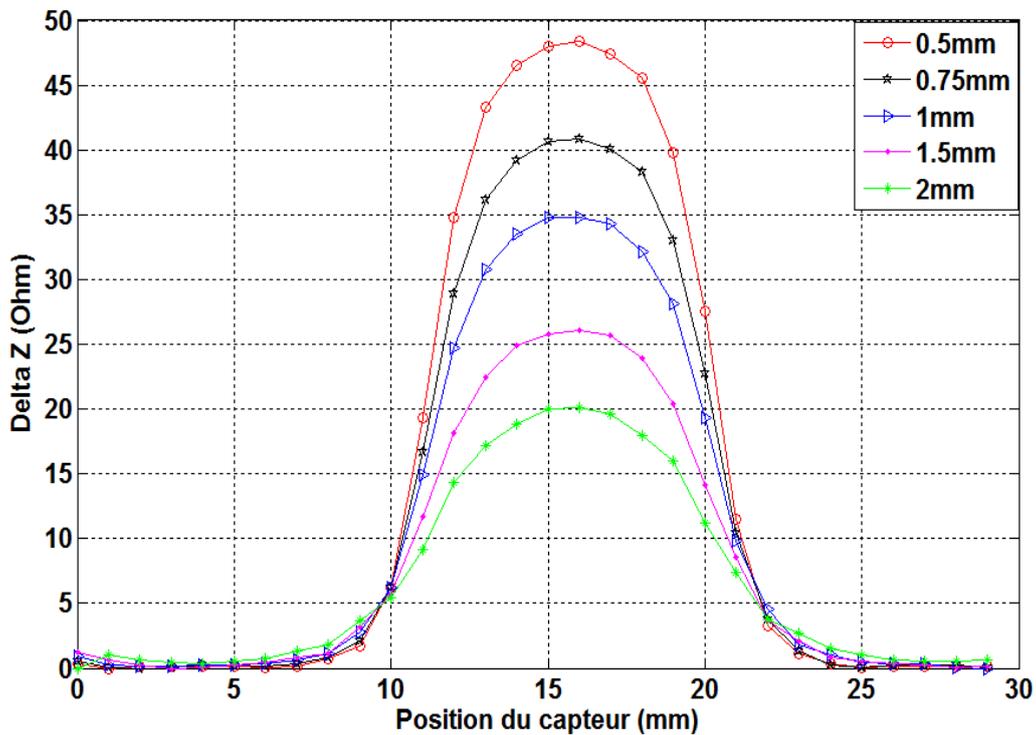


Figure III.8 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs du lift-off

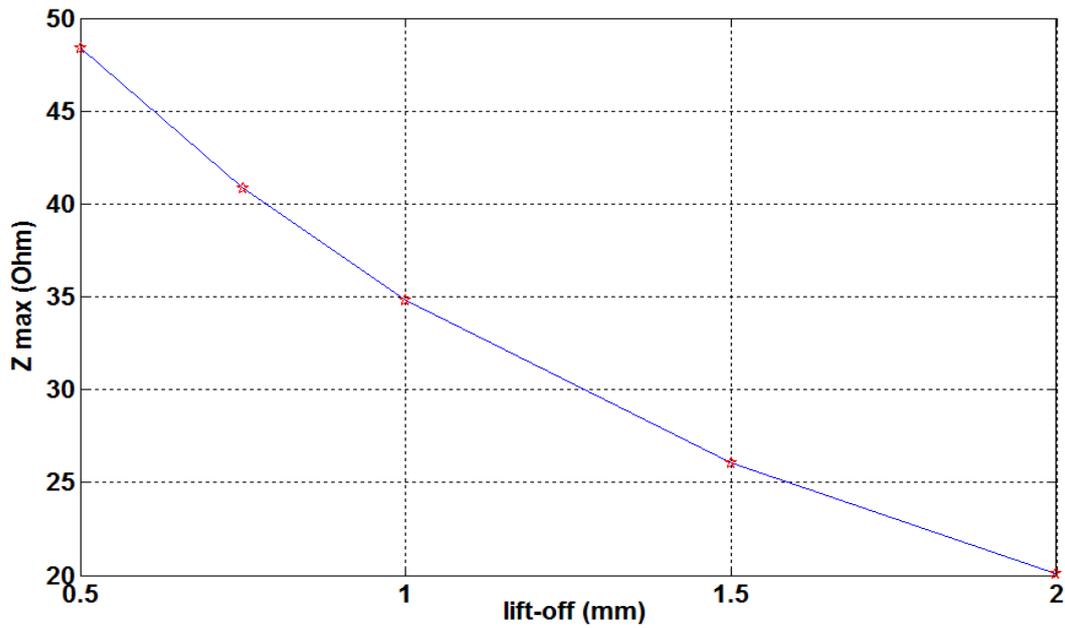


Figure III.9: Zmax de Lift-off en fonction de la position du capteur

Les résultats montrent une diminution de la détection avec l'augmentation du lift-off, cela est justifier par la diminution du couplage magnétique entre la sonde te la pièce.

III.4.3.3 Effet de la profondeur du défaut

Pour une fréquence d'excitation de 50kHz et un lift-off de 0.5mm, on fait varier la valeur de la profondeur du défaut comme suit : 10%, 30%,50%, 80% et 100% de l'épaisseur du tube.

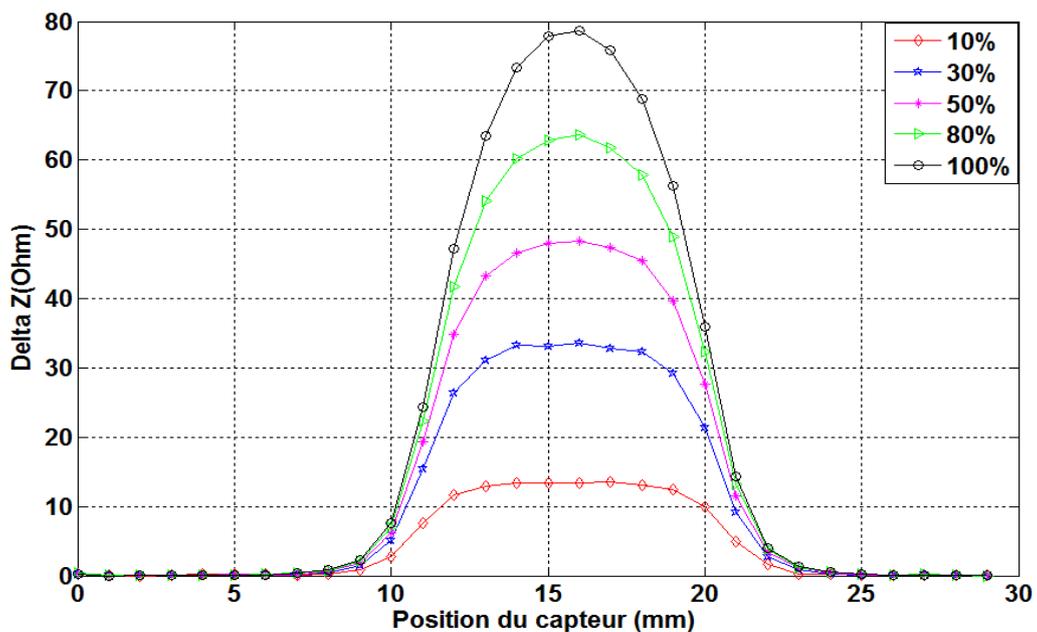


Figure III.10 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur du défaut

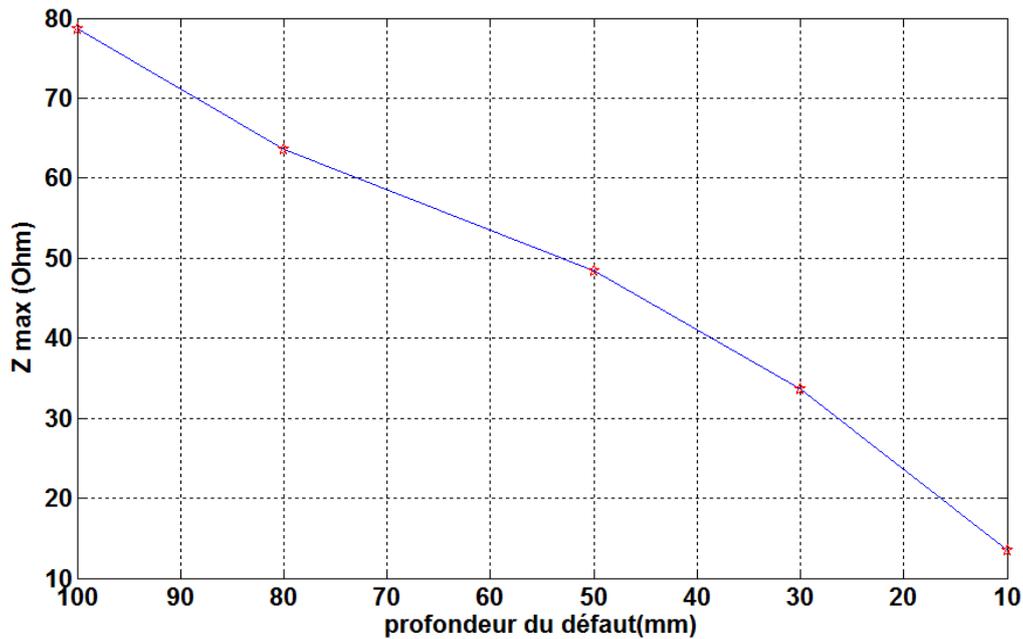


Figure III.11: Z_{\max} de la profondeur du défaut en fonction de la position du capteur

On constate que plus la profondeur du défaut est importante plus la variation de l'impédance l'est aussi. Donc plus la profondeur est importante plus la détection est meilleure.

III.4.3.4 Effet de la longueur du défaut

Pour voir l'effet de la variation de la longueur du défaut sur la détection. Nous avons considéré sept longueurs pour une profondeur égale à 50% de l'épaisseur du tube. Le scan est opéré à une fréquence de 50 kHz et un lift off de 0.5mm. La figure ci-après illustre la variation de l'impédance en fonction de la position du capteur.

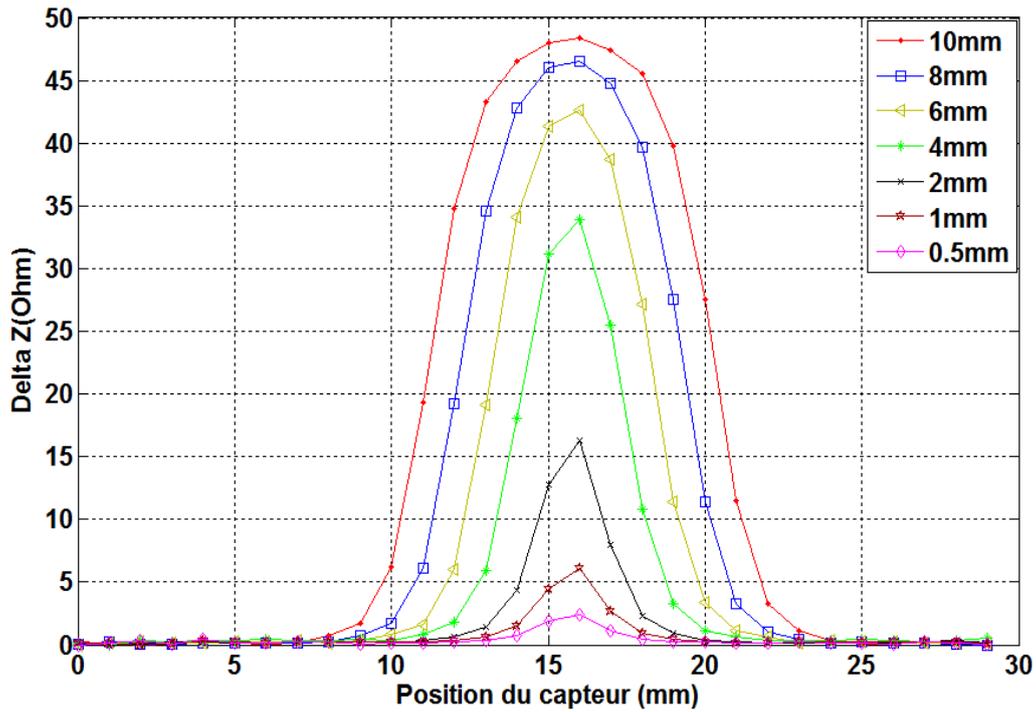


Figure III.12 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la longueur du défaut

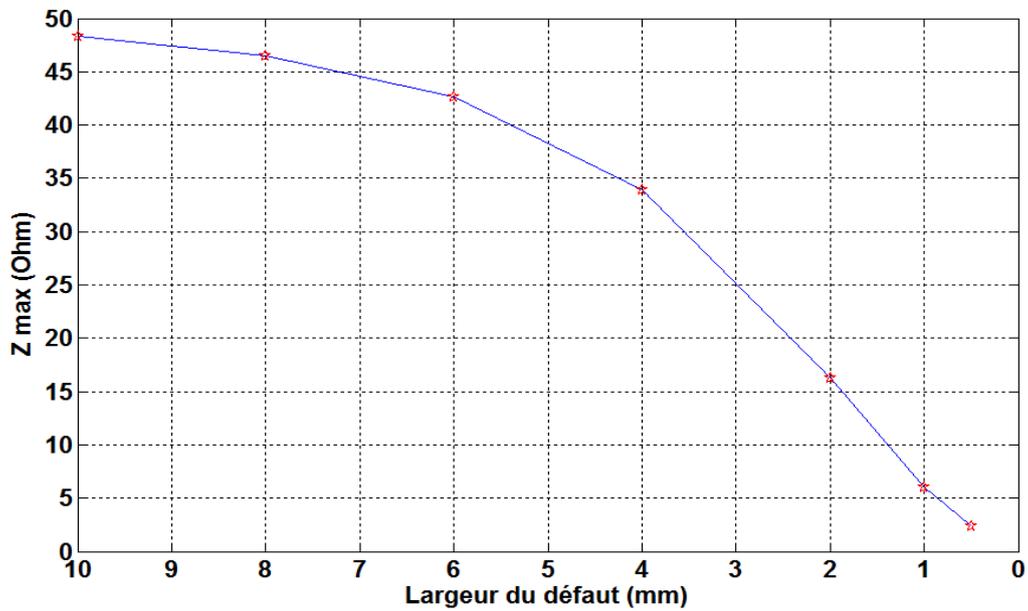


Figure III.13: Zmax de la longueur du défaut en fonction de la position du capteur

D'après les deux figures nous remarquons une augmentation de l'impédance du capteur avec l'augmentation de la longueur du défaut une conséquence directe de la diminution du champ réfléchi par la zone du défaut.

III.4.3.5 Effet de la conductivité du tube

Dans cette simulation nous avons considéré des tubes fabriqués avec différents matériaux : l'inconel-600 ($\sigma = 1e + 6 \text{ S.m}^{-1}$), l'aluminium ($\sigma = 35.4 * 1e + 6 \text{ S.m}^{-1}$), le cuivre ($\sigma = 59 * 1e + 6 \text{ S.m}^{-1}$) et le bronze ($\sigma = 7.4 * 1e + 6 \text{ S.m}^{-1}$). Pour une profondeur du défaut égale à 50% de l'épaisseur du tube et une fréquence de scan de 50kHz nous avons obtenu les courbes suivantes :

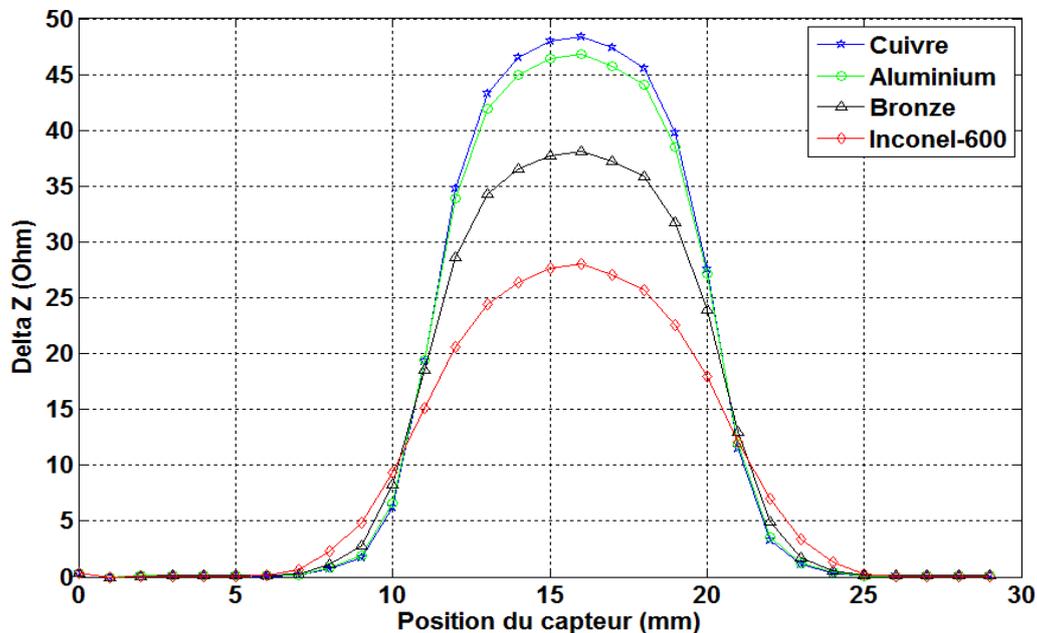


Figure III.14 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes conductivités électriques (matériaux conducteurs)

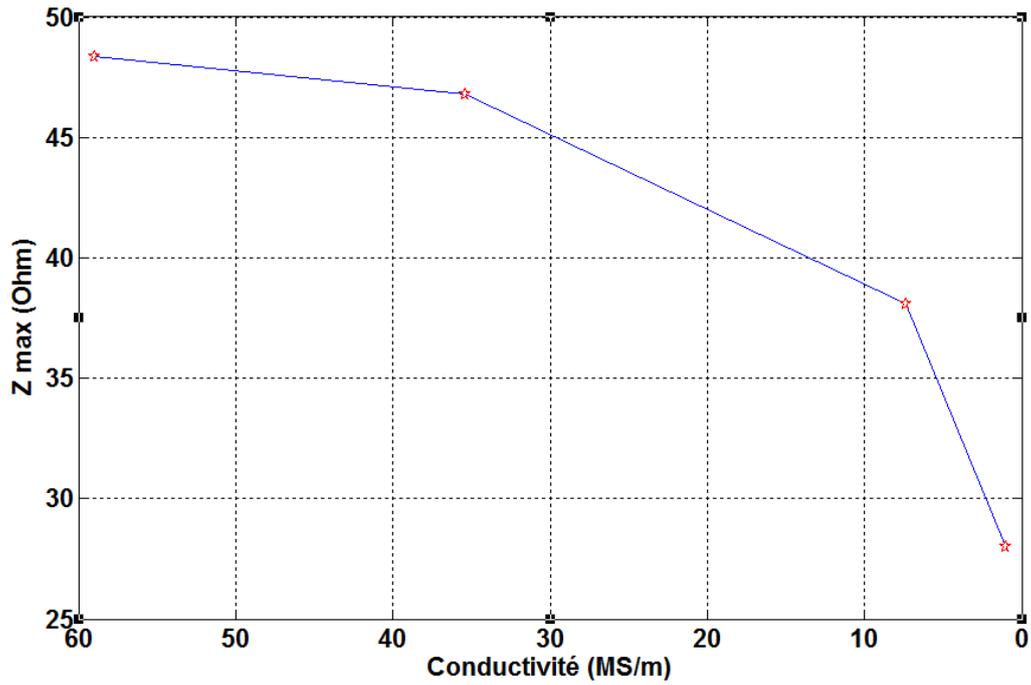


Figure III.15: Zmax de différentes conductivités électriques en fonction de la position du capteur

- Conductivité des matériaux

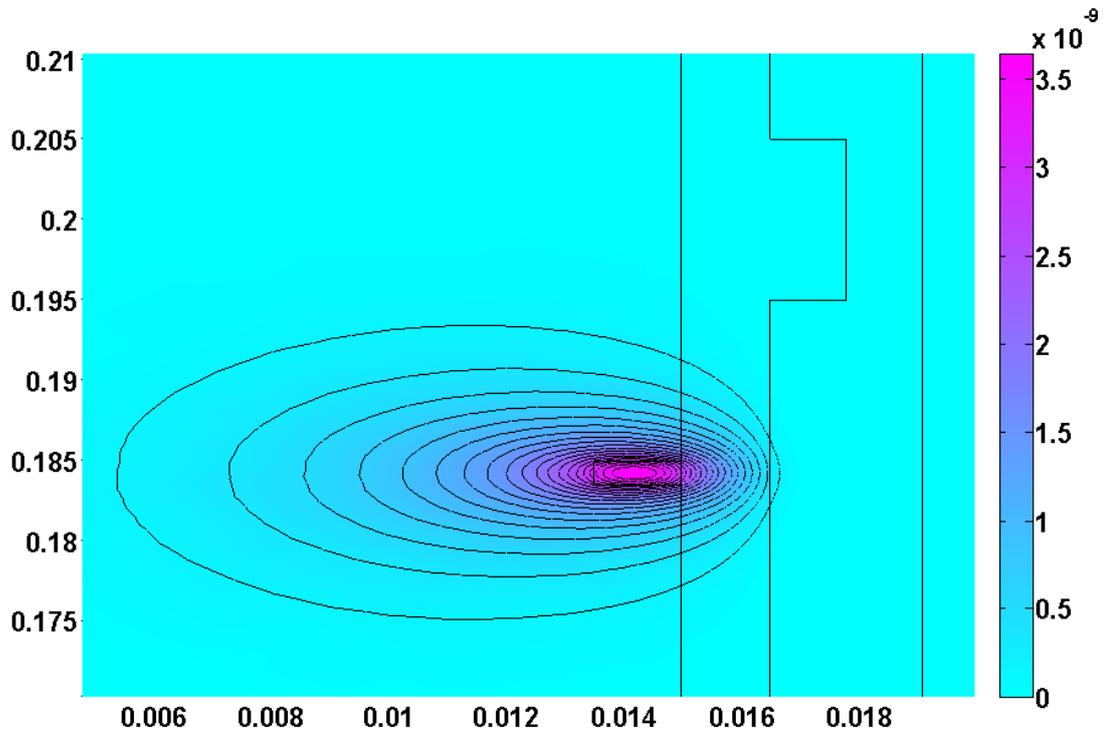


Figure III.16 : Tube de cuivre ($\sigma = 59 \cdot 10^6 \text{ S/m}$)

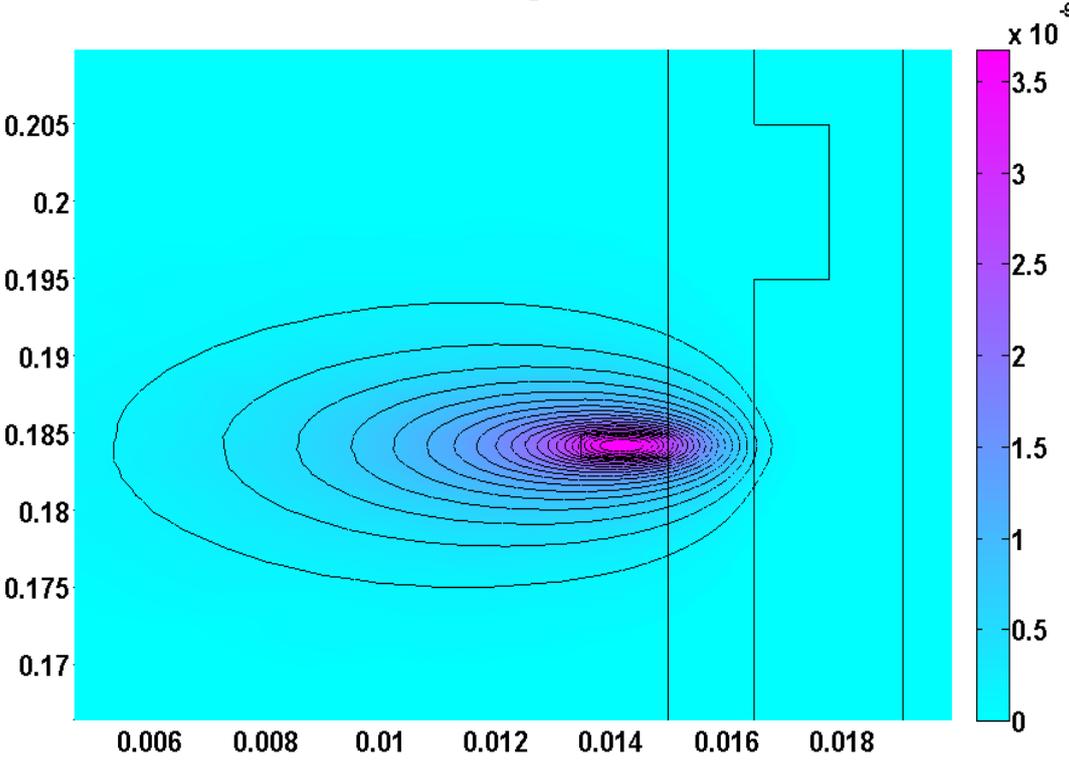


Figure III.17 : Tube d'Aluminium ($\sigma = 35,4 \cdot 10^6 S / m$)

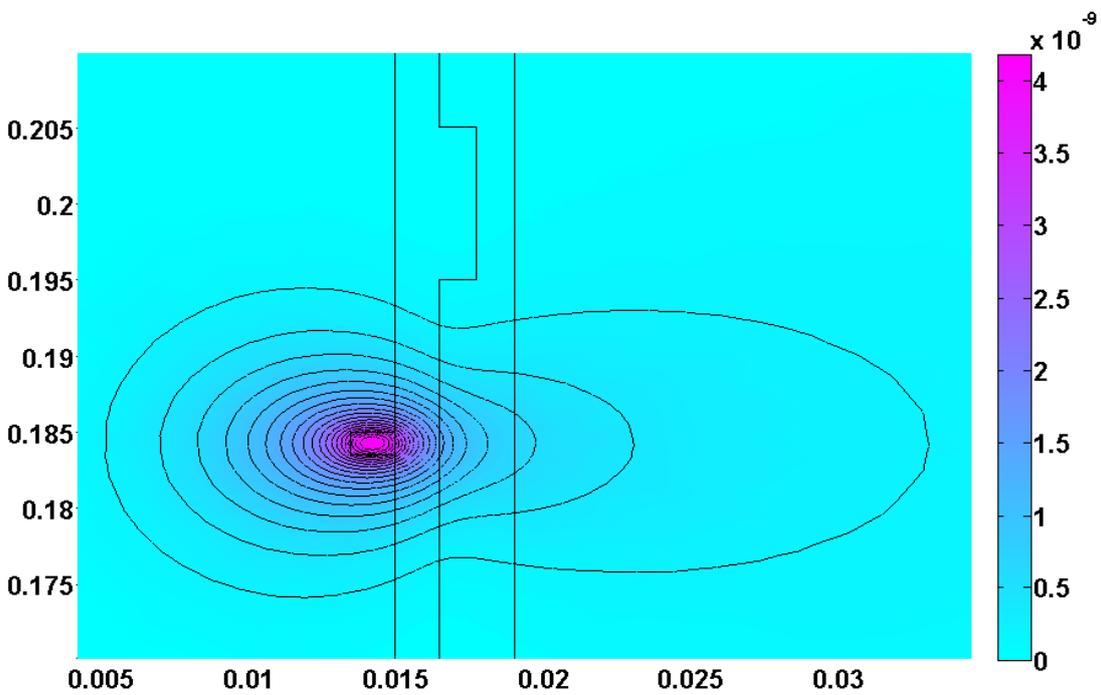


Figure III.18 : Tube d'Inconel_600 ($\sigma = 1 \cdot 10^6 S / m$)

On remarque que la valeur de la variation d'impédance est importante pour un tube en Inconel-600 mais que la détection est meilleure pour le tube en cuivre. Lorsqu'on augmente la conductivité de la plaque les courants de Foucault devient plus importante, ce qui augmente le flux réfléchi et par conséquent on aura une meilleure détection des défauts.

III.5. Deuxième application : Défaut externe

Cette application concerne le contrôle industriel en ligne de tubes en acier sans soudures. Le contrôle s'effectue par une bobine encerclant. Les défauts considérés sont des défauts artificiels de types trous, comme représenté en Figure III.19.

Le tube a un diamètre externe de 32 mm et une épaisseur de 8mm. Son matériau est un acier de dénomination commerciale TP304L, c'est un acier inoxydable contenant essentiellement du fer (~73%), du Chrome (~18%) et du Nickel (~9%). Les caractéristiques électromagnétiques de ce matériau nécessaires pour la modélisation des courants de Foucault, ainsi que les dimensions des différents défauts présents sur le tube. Les caractéristiques du capteur sont listées dans Tableau III.2 [20].

Paramètres	Valeurs
Bobine	
Diamètre intérieur	41mm
Diamètre extérieur	43mm
Hauteur	2mm
Lift-off	4.5 mm
Nombre de spires	200
Fréquence	3 kHz
Cylindre	
Diamètre intérieur	16mm
Diamètre extérieur	32 mm
Epaisseur	8mm
Conductivité	1.43 MS/m
Perméabilité relative	1
Défaut	
Longueur	3.5 mm
Profondeur	8 mm, 5 mm, 3 mm, 2mm

Tableau III.2: Configuration du tube et des défauts

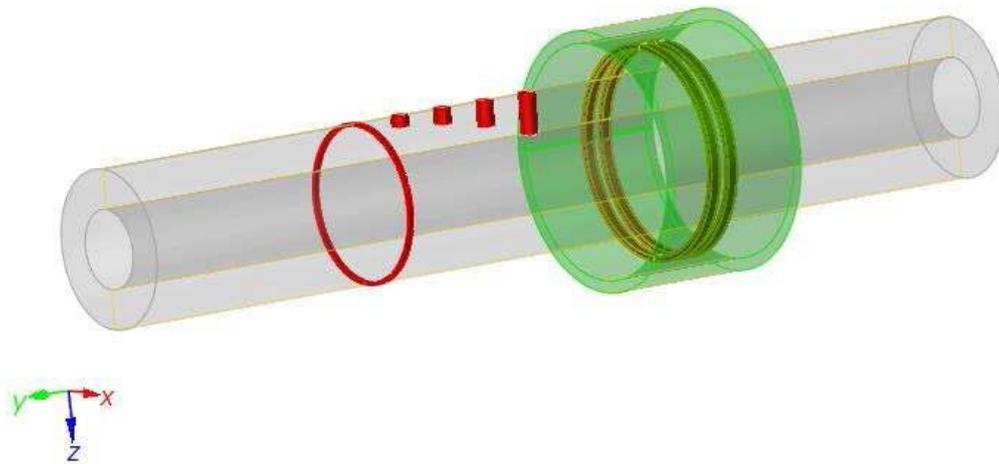


Figure III.19: Représentation de la configuration

Pour le cas proposé, le capteur utilisé pour l'inspection du tube est un capteur encerclant externe. Le contrôle se fait par une avance uniquement linéaire du tube à l'intérieur du capteur. Le capteur encerclant est un capteur différentiel à fonctions séparées, Aucun noyau n'est employé.

III.5.1. Domaine d'étude et conditions aux limites

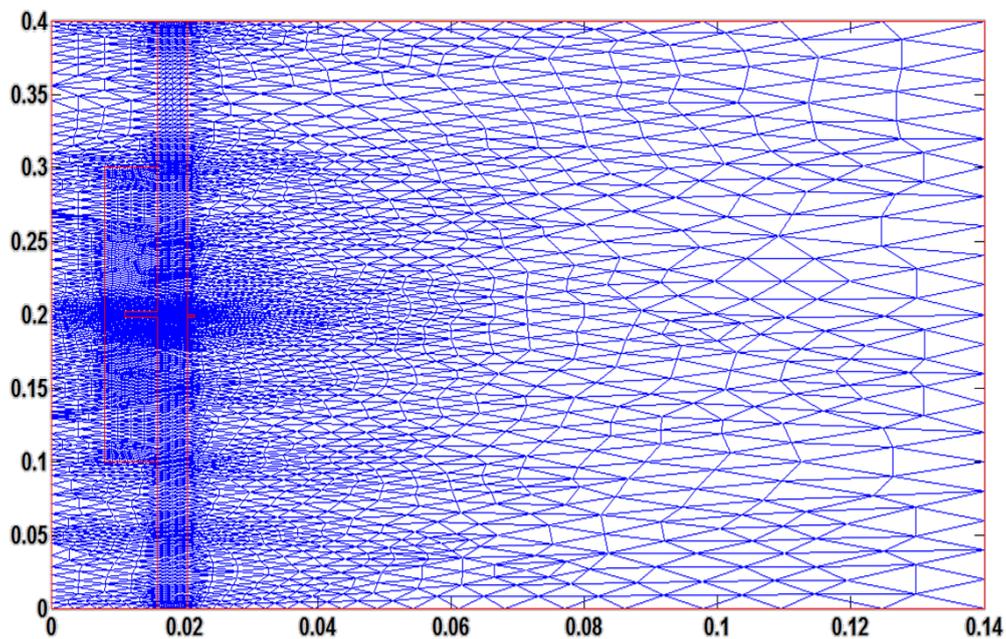


Figure III.20 : Maillage du domaine d'étude

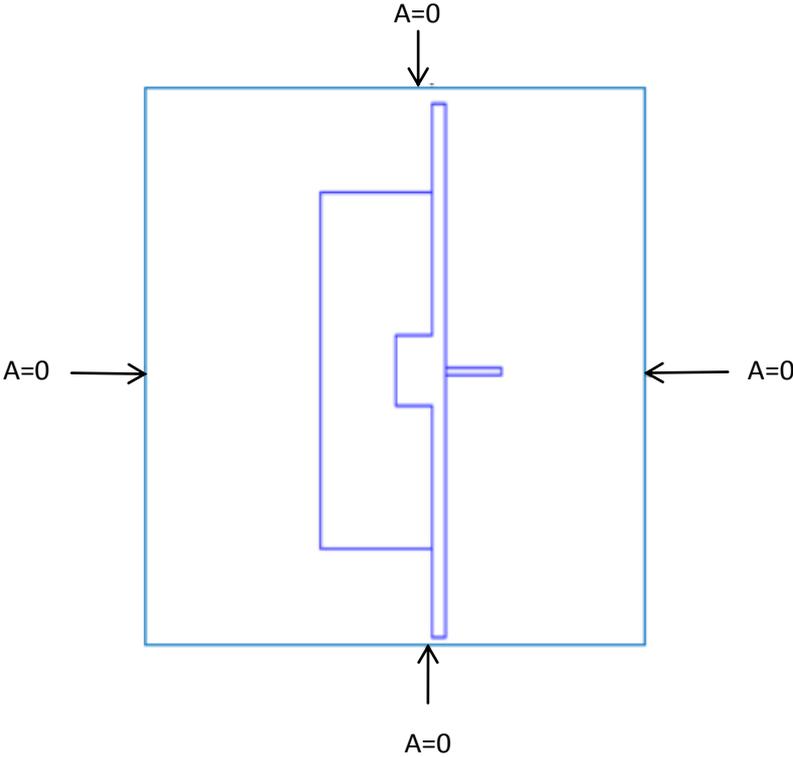
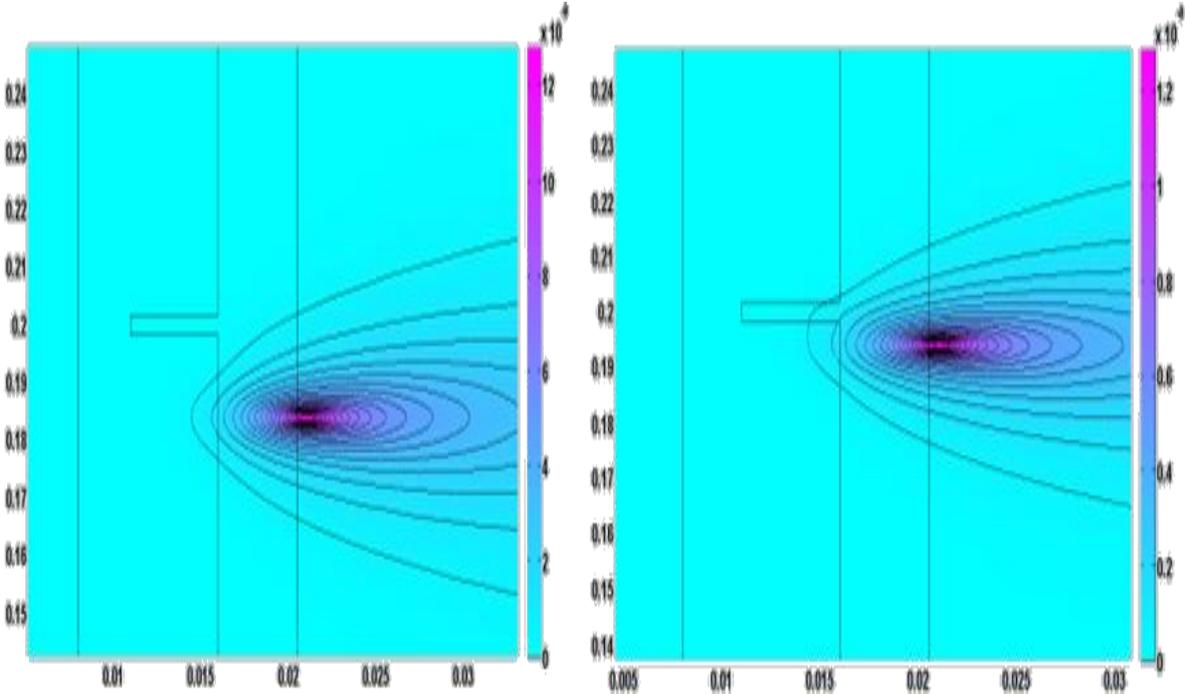


Figure III.21 : Géométrie du domaine d'étude



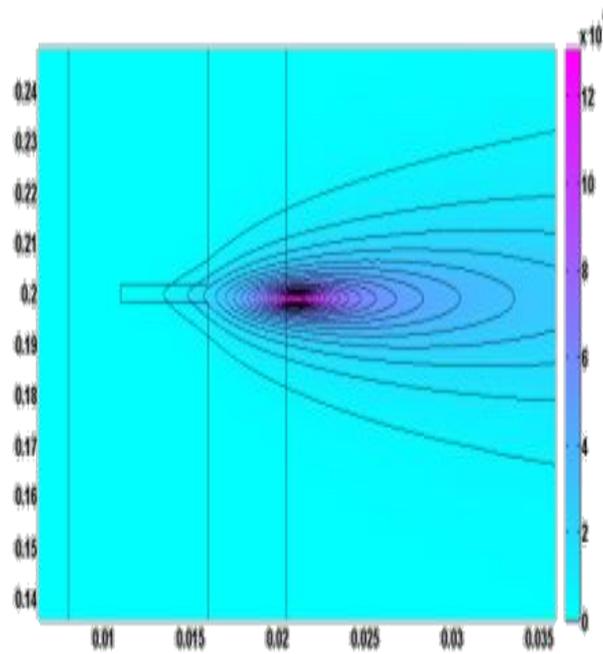


Figure III.22: Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique A

La figure III.23 illustre les variations de l'impédance vues par capteur en fonction de leur position, fréquence de 3kHz, un lift off de 4.5mm, un diamètre 3.5mm.

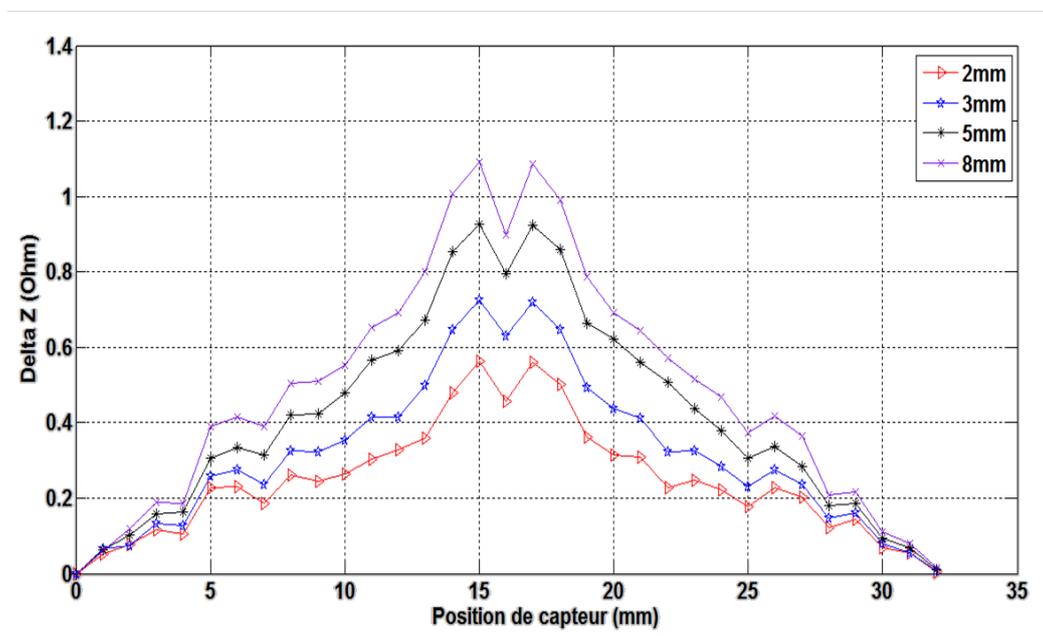


Figure III.23: Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur du défaut: 2mm, 3mm, 5mm, 8mm

Dans le cas d'un défaut surfacique externe, la variation de l'impédance est affectée par l'augmentation de la profondeur du défaut. Le module de cette variation est faible ceci est dû au fort lift-off entre la bobine et la pièce.

III.6. Troisième application : Tubes ferromagnétiques

III.6.1 Description du problème

Ce travail a été effectué dans l'entreprise EPE ANABIB SPA dont le siège social est spécialisé dans la fabrication et la commercialisation des tubes en acier soudés spirale, ainsi que la prestation de revêtement pour les tubes en acier, destinés essentiellement aux secteurs des hydrocarbures et hydraulique.

Le tube est fabriqué à partir de bobines d'acier laminées à chaud. La bobine d'acier après préparation rigoureuse des rives, est cintrée à froid, soudée bord à bord en continu et en automatique, en double cordon de soudure sur le tube, extérieurement et intérieurement.

Les tubes ensuite coupés en longueur de 6 m à 12 m et identifiés à l'unité, puis subissent des opérations de chanfreinage aux extrémités. À chaque étape de leur fabrication, les tubes subissent des mesures de contrôle dans le but d'obtenir une conduite fiable par :

- Contrôle d'aspect et dimensionnel.
- Épreuve hydraulique.
- Contrôle du cordon de soudure et métal de base par le contrôle ultra-son (contrôle off ligne).
- Contrôle par radiographie (rayon x). le contrôle de magnétoscopie.
- Analyse chimique du métal en utilisant la méthode d'émission optique.
- Essai mécaniques (traction, pliage...) sur éprouvettes prélevées sur des tubes.
- Contrôle final.

Au cours de cette formation, nous avons appris à reconnaître les défauts au moyen de radiographie (rayon x), les images étaient comme suit :

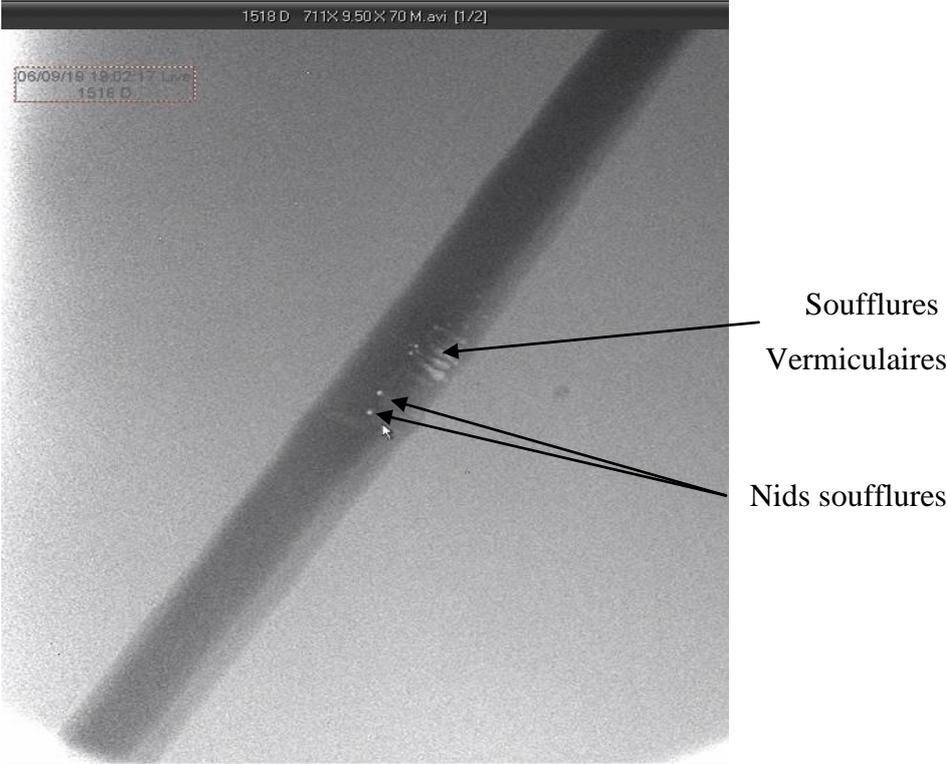


Figure III.24: Défauts des soufflures en radiographie

Après ouverture au niveau de la zone concernée, nous avons rencontré les défauts montrés dans la figure ci-après :



Figure III.25: Défauts des soufflures en réalité

Nous avons proposé l'idée de contrôler les tubes par la méthode des courants de Foucault. Chaque tube métallique est fait en acier de dénomination commerciale X70M composé essentiellement du fer (~99%) et du carbone (~1.5%). Les paramètres de la cible sont listés dans le Tableau III.3

Paramètres	Valeurs
Bobine	
Diamètre intérieur	688.74mm
Diamètre extérieur	691.74 mm
Hauteur	1.5 mm
Lift-off	0.13mm
Nombre de spires	120
Fréquence	5kHz
Cylindre	
Diamètre intérieur	692 mm
Diamètre extérieur	711mm
Epaisseur	9.5 mm
Conductivité	6.99 MS/m
Perméabilité relative	100
défaut	
Longueur	1.83mm
Profondeur	80% d, 60% d, 40% d et 20% d

Tableau III.3: Caractéristiques géométriques et physiques du système

Nous avons fait simuler notre configuration pour une fréquence d'excitation de 50 kHz et un lift off de 0.13mm, on a fait varier la valeur de la profondeur du défaut comme suit : 20%, 40%, 60%,80% de l'épaisseur du tube.

Les résultats de la simulation sont donnés par la figure III.26 et la figure III.27

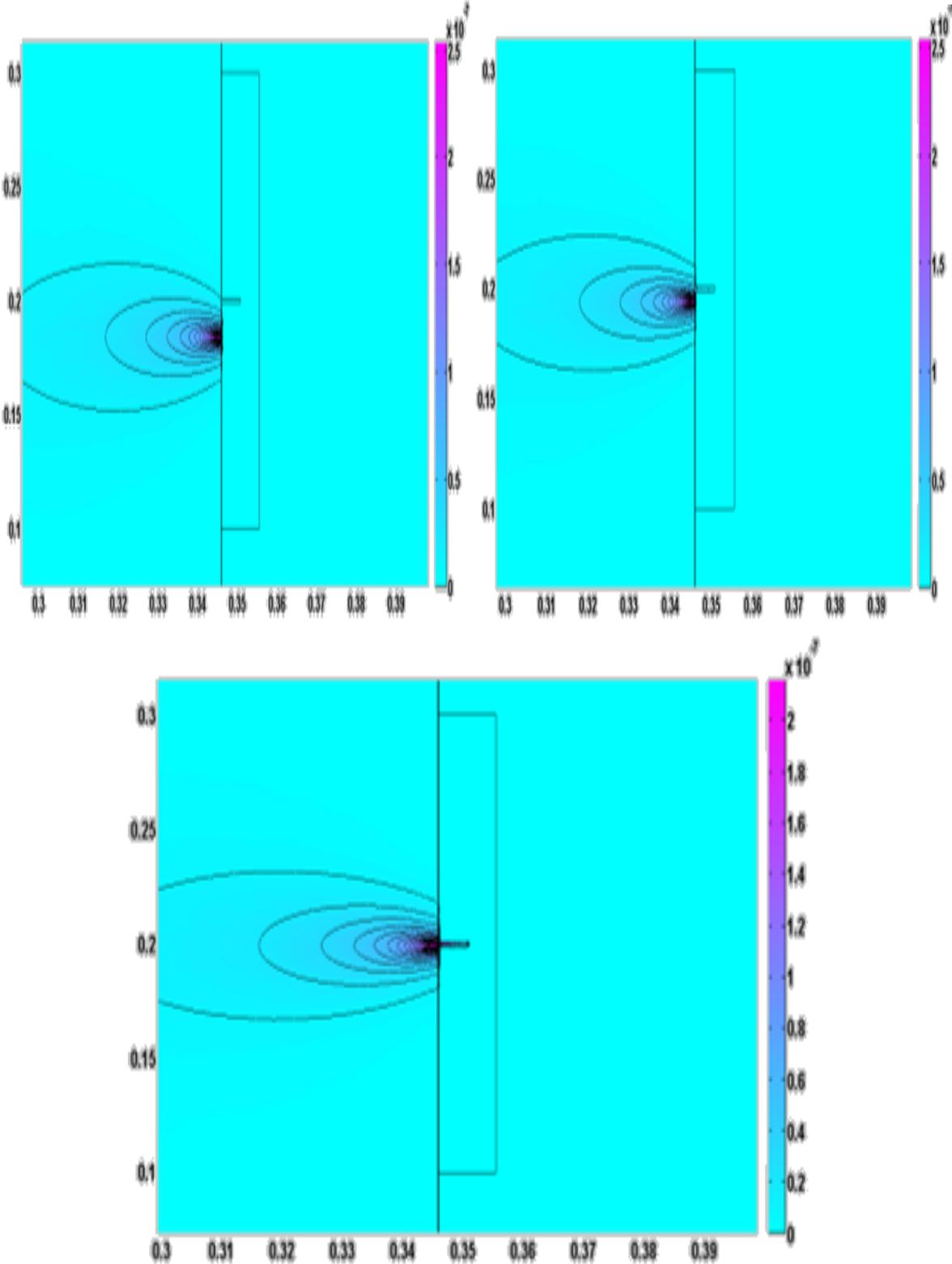


Figure III.26: Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique A

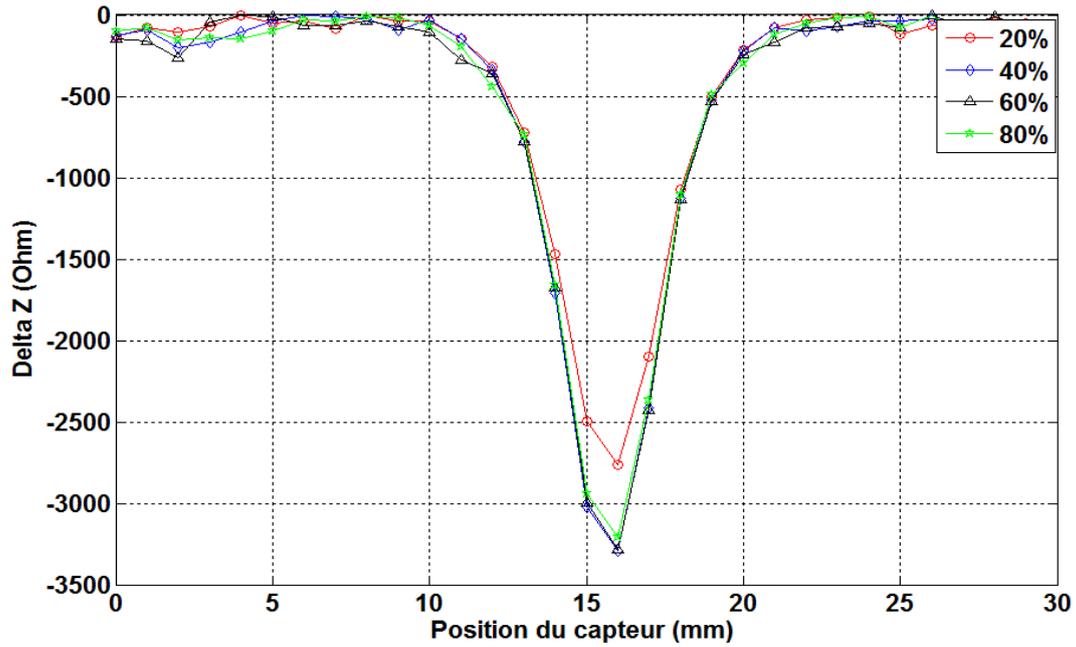


Figure III.27 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur du défaut pour la fréquence 50KHZ

Avec une fréquence de 50 kHz, nous n'avons pas pu détecter convenablement les défauts de 40 ,60 et 80 de l'épaisseur du mur de notre tube.

Pour pallier à ce problème nous avons fait baisser la fréquence de l'excitation du capteur à 5 kHz. Les graphes obtenus sont regroupés dans la figure III.28

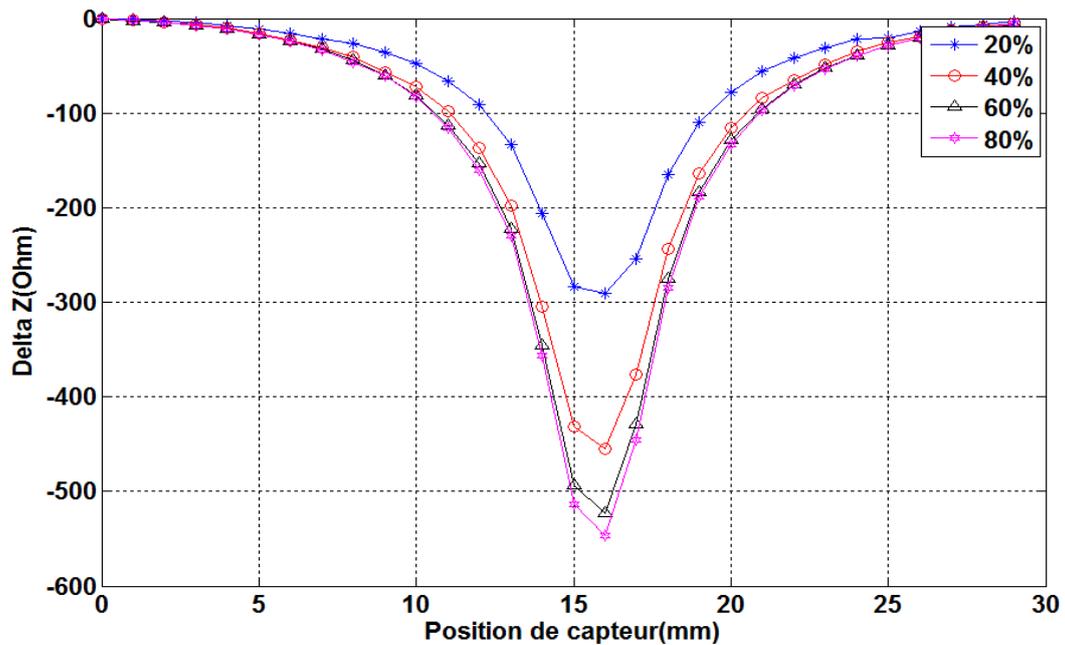


Figure III.28 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur du défaut pour la fréquence 5KHZ

En baissant la fréquence de l'excitation du capteur nous avons pu obtenir une meilleure réponse et différencier entre les signaux des différents défauts. Baisser la fréquence est synonyme de changer la distribution spatiale des courants de Foucault.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons testé un code de calcul par éléments finis 2D sur différents types de problèmes de CND-CF axisymétriques. Le premier problème est constitué d'un tube conducteur amagnétique comportant un défaut interne. Par la suite nous avons considéré une application qui traite avec le contrôle industriel en ligne de tubes métalliques avec défauts externes, inspectés par une bobine encerclant. Enfin, et lors de la dernière application nous avons simulé le CND-CF d'un tube fabriqué en acier magnétique par l'entreprise EPE ANABIB SPA. Les résultats obtenus concordent bien avec ceux trouvés dans la littérature.

Conclusion
Générale

Les exigences croissantes en termes de sûreté de fonctionnement d'un produit industriel ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces qui le constituent, conduisent à mettre en place des contrôles qualités de plus en plus poussés. L'utilisation des courants de Foucault permet un contrôle non destructif fiable, rapide et peu coûteux des milieux conducteurs. La simplicité de ce contrôle et sa robustesse d'utilisation en font une technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies.

Avant d'aborder les objectifs de cette étude, nous avons jugé utile, à travers une recherche bibliographique, de rappeler et de synthétiser les éléments constituant les dispositifs du CND-CF, et les grandeurs électriques mesurables. De même, un bref rappel est consacré aux équations de Maxwell, leurs simplifications relatives aux données géométriques et électromagnétiques et les méthodes générales de résolution du modèle simplifié de Maxwell ainsi que les différentes techniques de calcul d'impédance. A travers cette recherche et en fonction des objectifs à atteindre, nous avons sélectionné : pour les capteurs ; la forme circulaire, la fonction double et le type absolu. Pour la cible, elle est de type cylindrique. L'impédance électrique constitue l'élément qui traduit la détection. La technique de son calcul est celle à travers le flux magnétique.

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent de la modélisation par la méthode des éléments finis de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault. Un code de calcul programmé sous MATLAB, s'appuyant sur la discrétisation en deux dimensions des équations de Maxwell en régime harmonique par la méthode des éléments finis a été développé. L'effet des différents paramètres géométriques et électromagnétiques sur les performances du capteur a été abordé dans l'application les résultats obtient concordent bien avec les résultats trouvés dans la littérature.

Comme perspectives de ce travail, il est souhaitable de simuler d'autres types de capteurs et de réaliser le dispositif modélisé en utilisant des cartes d'acquisition.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Lakhdari, "Etude et modélisation de capteur en CND par courants de Foucault: application a la detection des fissures ", mémoire de magister, Biskra, 2011.
- [2] Y. Choua, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault", thèse de doctorat, Paris, 2009.
- [3] M .Hamel, "Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques ", mémoire de magister, Tizi-Ouzou, 2012.
- [4] B. Maouche, " Elaboration de modèles couplés basés sur la méthode des moments pour la modélisation de structures électromagnétiques: Application à l'étude du Contrôle Non Destructif par Induction ", thèse de doctorat, Sétif, 2007.
- [5] B. Ramdane, "Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision", thèse de doctorat, Saint Nazaire, 2009.
- [6] J. Dumont-Fillon, " Contrôle non destructif (CND) ", techniques de l'ingénieur R1400, 1996.
- [7] P. Durouchoux, "La recherche en contrôle non destructif", la direction des recherches, étude et technique(DRET), Paris, 1985.
- [8] M. Lacroix, " Essais non destructifs ", techniques de l'ingénieur, 1986.
- [9] N. Benhadda, "Modélisation des capteurs inductifs à courants de Foucault", mémoire de magister, Batna, 2006.
- [10] W. Slimane, "Conception d'un système multi-capteurs à courants de foucault pour le contrôle non destructif (CND) ", mémoire de magister, Batna ,2008.
- [11] M. Wanin, " Evaluation non destructive de la qualité des matériaux", techniques de l'ingénieur R4130, 1996.
- [12] P.J. Shull, "Non destructive evaluation theory techniques and applications", edition Marcel Dekker, New York, 2002.

- [13] N. El Ghoul, " Réalisation d'un banc d'essais pour l'inversion des signaux en Contrôle non destructif par courants de foucault ", thèse de doctorat, Biskra.
- [14] P. Weber, " Application des courants de Foucault pulsés au contrôle non destructif. Approches théoriques et expérimentales ", thèse de doctorat, Lyon, 1990.
- [15] B. Thidé, "Electromagnetic field theory", edition epsilon, Uppsala, 2001.
- [16] B. Delabre, "Développement de capteurs flexibles à courants de Foucault : applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique", thèse de doctorat, 2016.
- [17] E. Durand, "Magnétostatique ", université de Paris -VI, 1969.
- [18] P. Lorrain, D.P. Corson, F. Lorrain, "Electromagnetic fields and Waves", W.H. Freeman and Co. New York, 1988.
- [19] N. Zemouri, " Etude et réalisation d'un Système multi-capteurs destiné au diagnostic des matériaux conducteurs", mémoire de magister, Tizi-Ouzou, 2016.
- [20] F. Deneuille, E. Desdoit, B. Bisiaux, M. Mayos, "Comparaison de deux méthodes de simulation des contrôles par courants de foucault sur tubes en acier", Cofrend, 2011.

L'objectif du contrôle non destructif (CND) est de détecter des dégradations ou inhomogénéités dans les matériaux sans les altérer. Le CND est par conséquent un enjeu crucial dans le milieu industriel et notamment lors des opérations de maintenance. Parmi le panel de procédés (optique, électromagnétique, thermique, chimique, ultra-sonores, etc...), ceux basés sur les courants de Foucault (CF) se distinguent dès lors que l'on a affaire à des matériaux électriquement conducteurs. Leur robustesse et leur simplicité de mise en œuvre en font une des méthodes les plus utilisées.

Ce mémoire est consacré à l'étude et la modélisation d'un capteur destiné au diagnostic des pièces conductrices de structure cylindrique en exploitant le phénomène des courants de Foucault. Avant de passer à la modélisation, nous avons à travers une recherche bibliographique donné un aperçu sur les diverses techniques du CND en mettant l'accent sur la technique exploitant les courants de Foucault que ce soit du point de vue physique, technologique ou modélisation.

Afin de modéliser le contrôle et l'évaluation non destructive des caractéristiques physiques et géométriques nous avons exploité le modèle général de Maxwell dans la modélisation des courants de Foucault et le calcul de l'impédance du capteur. Comme les méthodes analytiques sont souvent inefficaces pour résoudre les problèmes CND-CF, on fait appel à des méthodes numériques notamment l'incontournable méthode des éléments finis pour sa prise en compte des géométries complexes des pièces et des bobines, c'est cette dernière qui a été retenue dans notre travail.

Mots-clés: Contrôle non destructif, CND par courants de Foucault, modélisation magnétothermique, formulation A-V, éléments finis