

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمّار تليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT Sciences de la Matière



Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la matière
Filière : Physique
Option : Physique des matériaux

Par :
Mme. CHEKNANE Soumia

THEME

Modélisation et caractérisation électromagnétique d'un matériau magnétique

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr. LEFKAIER Iben Khaldoun
Mr. NOUIOUA Ismaïl
Mr. HELIFA Bachir

Prof
MCA
MAA

Président
Examineur
Rapporteur

Année Universitaire 2020- 2021

Remerciements

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit a été réalisé au sein de laboratoire de physique des matériaux.

Je voudrais tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire Monsieur **Bachir HELIFA** maître de conférence dans l'université de Laghouat, pour son aide précieuse et ces remarques toujours utiles.

Je remercie Monsieur **Ibn Khaldoun LEFKAIER**, Professeur à l'Université de Laghouat et directeur de LPM de m'avoir accueilli dans le laboratoire et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

Mes remerciements vont aussi à tous les membres du laboratoire pour les encouragements qu'ils n'ont cessé de me prodiguer.

J'exprime également mes sincères remerciements au personnel de la bibliothèque de la faculté de science et technologie de l'université de Ammar Telidji en particulier Monsieur **Attiat Aissa** pour leur serviabilité J'adresse mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé et encouragé tout au long de ce travail.

A MA TRES CHERE MERE

A Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes sacrifices. Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et Bonheur.

MON TRES CHER PERE

De tous les pères, tu es le meilleur. Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance et perfectionnisme.

Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur.

A MON MARI

Avec tout mon amour Je te remercie pour ton soutien inconditionnel durant toutes ces longues années d'études. Ton amour et ton affection remplissent mes jours de bonheur.

A MES CHERS ET ADORABLE FRERES ET SŒURS

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A MA BELLE FAMILLE

Je vous remercie tout particulièrement pour votre soutien et affection. Puissiez-vous trouver dans ce travail le témoin de mon affection et estime.

Table de matière

Table de matière

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Introduction générale.....	1
I. Introduction	3
I.1 Principes généraux	3
I.2 Approche du phénomène physique	4
I.3 Contrôle non destructif par courants de Foucault	4
I.3.1 Objectifs du Contrôle Non Destructif	4
I.3.2 Les techniques de CND	5
I.3.3 Comparaison des techniques de CND	6
I.3.4 CND par courants de Foucault	6
I.4 Techniques et instrumentations	7
I.4.1 Courants de Foucault sinusoïdaux et courants de Foucault pulsés....	7
I.4.2 Appareils mono et multi-paramètres.....	7
I.4.3 Signaux d'excitation et exploitation.....	8
I.4.3.1 Gamme de fréquences.....	8
I.4.3.2 Générateur mono fréquence.....	8
I.4.3.3 Générateur multifréquence.....	8
I.4.4 Eléments de mesure.....	8
I.4.4.1 Classification selon la géométrie.....	8
I.4.4.2 Classification selon la fonction.....	9
I.5 Génération de courants de Foucault dans une pièce conductrice....	10
I.5.1 Profondeur de pénétration et effet de peau.....	11
I.5.2 Variation d'impédance.....	12
I.5.3 Impédance normalisée et plan d'impédance normalisé.....	12
I.6 Principaux paramètres influant le contrôle.....	14

Table de matière

I.7	Champ d'application du CND par CF.....	15
I.8	Avantages du CND par courants de Foucault.....	15
I.9	Limites du CND par courants de Foucault.....	15
I.10	Conclusion.....	15
II.	Introduction.....	17
II.1	Problématique – Système modélisé.....	17
II.2	Mise en Equations.....	18
II.2.1	Equations de Maxwell.....	18
II.2.2	Equation de Maxwell-Gauss	18
II.2.3	Equation de Maxwell et conservation du flux magnétique.....	18
II.2.4	Equation de Maxwell-Faraday	18
II.2.5	Equation de Maxwell-Ampère.....	19
II.3	Comportement des matériaux.....	19
II.3.1	Méthodologie.....	20
II.3.2	Hypothèses simplificatrices.....	20
II.3.3	Formulation magnétodynamique.....	21
II.3.3.1	Relations champ-potentiels.....	21
II.3.3.2	Transformation de Jauge.....	21
II.3.3.3	Relations en potentiels AV du model magnétodynamique...22	
II.3.4	Conditions de continuité.....	23
II.3.5	Conditions aux limites.....	24
II.3.6	Courants de Foucault.....	24
II.3.7	Profondeur de pénétration électromagnétique.....	25
II.4	Résolution numériques basés sur les éléments finis.....	26
II.4.1	Construction de la géométrie du système.....	27
II.4.2	Discrétisation de la géométrie.....	28
II.4.3	Conditions aux limites.....	29
II.4.4	Approximation par la MEF.....	30
II.5	Modèle direct et modèle inverse.....	33

Table de matière

II.5.1	Modèle direct.....	33
II.5.2	Modèle inverse.....	33
II.6	Développement du modèle direct	34
II.6.1	Impédance normalisée	35
II.7	Conclusion.....	37
III.	Introduction.....	38
III.1	Protocole expérimental et matériaux utilisés.....	38
III.1.1	Capteur.....	39
III.1.2	Matériaux à inspecter.....	39
III.1.3	Appareillage de mesure (Lock-in amplifieur).....	40
III.2	Choix des paramètres opératoires.....	40
III.2.1	Les grandeurs exploitables.....	40
III.2.2	Fréquence d'excitation.....	40
III.3	Méthode de mesure de l'impédance.....	41
III.3.1	Variation d'impédance et impédance normalisée	42
III.3.2	Diagramme d'impédance normalisée.....	42
III.4	Conclusion.....	45
	Conclusion générale et perspectives	46

Liste des figures

Figure 1.1- Schéma synoptique de CND.....	3
Figure 1.2 - Schéma générale d'un système CND.....	5
Figure 1.3- Bobine encerclante (a) à 3D, (b) à 2D.....	9
Figure 1.4 - Bobine simple avec noyau.....	9
Figure 1.5 - Bobine interne glissante avec noyau.....	9
Figure 1.6 - Génération des courants de Foucault dans un matériau conducteur.....	10
Figure 1.7 - Variation de l'amplitude de la densité des courants de Foucault.....	12
Figure 1.8- Principe de la variation d'impédance d'une bobine suite à la génération de courants de Foucault.....	13
Figure 1.9 : Impédance normalisée pour des variations d'épaisseur et de lift-off.....	14
Figure 2.1- Schéma de principe des problèmes électromagnétiques des matériaux Magnétiques.....	18
Figure 2.2- Couplage entre les phénomènes électriques et magnétiques.....	19
Figure 2.3 - Interface entre deux milieux.....	24
Figure 2.4- Système électromagnétique du dispositif étudié.....	27
Figure 2.5- Géométrie du système axisymétrique en 2D.....	28
Figure 2.6 - Discrétisation de la géométrie du système.....	29
Figure 2.7- Conditions aux limites.....	30
Figure 2.8 - Mise en oeuvre de la simulation éléments finis.....	32
Figure 2.9 - Schéma général d'un modèle direct.....	33
Figure 2.10 - Schéma fonctionnel d'un système de CND.....	33
Figure 2.11 : Système axisymétrique bobine – pièce.....	34
Figure 2.12 - Diagramme d'impédance normalisée.....	36
Figure 2.13 - Diagramme d'impédance normalisée pour deux épaisseurs de Revêtements.....	37
Figure 3.1 - Montage expérimental (banc d'essai).....	39
Figure 3.2- Lock-in Amplifier.....	41
Figure 3.3- Détail du montage expérimental.....	41
Figure 3.4 – Circuit électrique explicatif pour mesurer l'impédance Z du capteur.....	42
Figure 3.5 - Diagramme d'impédance normalisée expérimental de la plaque en acier.....	43
Figure 3.6 - Diagramme d'impédance normalisée simulé de la plaque en acier.....	44
Figure 3.7- Plans d'impédance normalisée comparatifs de la plaque en acier.	44

Liste des tableaux

Tableau 1.1- Comparaison des techniques de CND.....	6
Tableau 3.1- composants du montage expérimentales.....	39
Tableau 3.2 : Caractéristiques de la bobine utilisée.....	40
Tableau 3.3-dimension de la plaque en acier.....	40

Nomenclature

Abréviations

CND Contrôle non destructif.
CND-CF CND par courant de Foucault.
C.F.S Courants de Foucault sinusoïdaux.
C.F.P Courants de Foucault pulsés.
FEM Force électromotrice.
LHI Linéaire Homogène Isotrope
MEF Méthode Eléments Finis
AC/DC Courant Alternatif/Courant Direct
F_{obj} Fonction Objective

Grandeurs électromagnétiques et potentiels

H Champ magnétique.(A/m).
 B Induction magnétique. (T).
 E Champ électrique.(V/m).
 D Induction électrique. (C/m²).
 J Densité de courant. (A/m²).
 A Potentiel Vecteur magnétique.(T.m).
 V Potentiel scalaire électrique. (V).
 J Densité de courant électrique. (A/m²).
 J_s Densité de courant électrique de la source.(A/m²).
 ρ Densité volumique des charges électriques (C/m³).

Constantes et paramètres

R Résistance électrique.(Ω)
 X Réactance. (Ω)
 R_n Résistance normalisée. (Ω)
 R_0 Résistance à vide.(Ω)
 X_n Réactance normalisée. (Ω)
 X_0 Réactance à vide. (Ω)
 Z Impédance.(Ω)

ΔZ Variation d'impédance

Z_0 Impédance à vide.

f Fréquence. (Hz)

N_f Nombre de fréquences considérées

t Temps. (s)

ω Pulsation électrique. (rad/s)

δ Epaisseur de peau

σ Conductivité électrique. (S/m)

ϵ Permittivité électrique (F/m)

μ Perméabilité magnétique. (H/s)

Ω Domaine d'étude.

Γ Frontière du domaine.

Notations mathématiques

∇f Gradient de f

$\nabla \cdot f$ Divergence de f

$\nabla \times f$ Rotationnel de f

x, y, z Coordonnées cartésiennes

$\frac{\partial f}{\partial x}$ Dérivée partielle de f par rapport à la variable x

Résumé

Ce travail vise la modélisation et la caractérisation d'un matériau magnétique dans le cadre du Contrôle Non destructif (CND) par courants de Foucault (CF). Le matériau étudié est l'acier X70 utilisé pour le transport des hydrocarbures. Une modélisation en 2D éléments finis du système (bobine +matériau) a été réalisée et une campagne expérimentale à l'aide du Lock-in-Amplifier a été menée pour la validation du modèle développé. Ainsi, les diagrammes d'impédance normalisée simulés ont été tracés et confrontés au diagramme d'impédance mesuré.

Mot clés : Modélisation 2D éléments finis, matériau ferromagnétique X70, Lock-in-Amplifier, diagramme d'impédance normalisée, CND par courants de Foucault.

Abstract

This work aims at the modeling and the characterization of a magnetic material within the framework of the Non destructive testing (NDT) by eddy currents (CF). The material studied is X70 steel used for the transport of hydrocarbons. A 2D finite element model of the system (coil + material) was carried out and an experimental companion using the Lock-in-Amplifier was carried out for the validation of the developed model. Thus, the simulated normalized impedance diagram was plotted and compared to the measured impedance diagram.

Keywords : 2D finite element modeling, ferromagnetic material X70, Lock-in-Amplifier, normalized impedance diagram, eddy current CND.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى نمذجة وتوصيف مادة مغناطيسية في إطار الاختبار غير المدمر بواسطة التيارات الدوامة. المادة المدروسة هي فولاذ X70 المستخدم في نقل الهيدروكربونات. تم تنفيذ نموذج العنصر المحدود ثنائي الأبعاد للنظام (ملف + مادة) وتم إجراء رفيق تجريبي باستخدام مكبر الصوت Lock-in-Amplifier للتحقق من صحة النموذج المطور. وهكذا ، تم رسم مخططات المعاوقة الطبيعية المحاكاة ومقارنتها بمخطط المعاوقة المقاسة.

الكلمات الرئيسية: نمذجة العناصر المحدودة ثنائية الأبعاد ، المادة المغناطيسية الحديدية X70 ، مكبر الصوت القفل ، مخطط المعاوقة المعياري ، بواسطة التيارات الدوامة

Introduction générale

Introduction générale

Le CND prend une place de plus en plus importante dans tous les secteurs industriels de pointe. Les enjeux économiques associés au CND sont toujours très importants. Dans certains secteurs, comme le nucléaire ou les transports, en particulier aéronautiques et maritimes, ils se doublent d'un enjeu majeur lié à la sécurité du public. L'évaluation et le contrôle non destructif par courants de Foucault (E&CND-CF) sont utilisés dans toutes les pièces industrielles faites de matériaux électriquement conducteurs. Ils s'effectuent dès la fabrication des pièces, dans une installation et dans les chaînes de production en fonctionnement et au moment de la maintenance.

L'augmentation de la productivité, la fabrication des produits de qualité et la méfiance de l'insécurité sont des préoccupations de tous. Ces préoccupations associées à la complexité croissante des pièces à contrôler obligent les techniques de CND à évoluer. Cette évolution est faite et elle se poursuit grâce au développement des moyens électroniques et informatiques. Les systèmes électromagnétiques n'échappent pas à cette évolution. Parmi ces systèmes, nous intéressons au contrôle non destructif par courants de Foucault « CND-CF ».

Le principe de fonctionnement du CND-CF est basé sur le phénomène de l'induction électromagnétique. Dans ces dispositifs, l'élément principal est le capteur. Souvent, une bobine (capteur) est alimentée par une source de courant alternative et placée au-dessus d'une pièce à identifier ou à contrôler, la grandeur électromagnétique essentiellement exploitée est l'impédance mesurée aux bornes du capteur.

Dans ce travail, nous nous intéressons à la modélisation d'un système de contrôle (plaque-bobine), la plaque étant en Acier x70 au dessous d'un capteur (bobine) inductif réalisé au laboratoire LMP. Pour modéliser un tel dispositif, plusieurs méthodes numériques de discrétisation peuvent être employées telles que: la méthode des éléments finis MEF, la méthode des volumes finis MVF, la méthode des différences finies MDF ...etc., Au cours de ce mémoire, nous avons choisi la méthode des éléments finis pour la modélisation numérique du capteur à courant de Foucault, une méthode très prometteuse du point de vue temps de calcul et consommation d'espace mémoire de stockage et prend en compte des géométries complexes de capteurs et de pièces

Introduction générale

Dans ce contexte, la modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction capteur-pièce et joue un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances.

Ce manuscrit est réparti en trois chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur les systèmes de contrôle non destructif, où les différentes techniques du CND sont citées, le contrôle basé sur les courants de Foucault est particulièrement détaillé

Le deuxième chapitre traitera brièvement les équations électromagnétiques de base qui décrivent la création et le comportement des courants de Foucault, les différentes méthodes de résolution des équations électromagnétiques, la méthode que nous avons retenue dans notre travail est la méthode des éléments finis, elle est présentée plus en détail. Ce chapitre est également dédié à la validation du modèle proposé par la simulation du système par la méthode des éléments finis .

Quant au troisième chapitre, il est consacré au banc d'essai expérimental, portant une description globale des différents éléments qui le compose, Ce banc d'essai servira pour la validation de notre modèle.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale et perspectives.

Chapitre I :
contrôle non
destructif par
courants de
Foucault

I. Introduction

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production ,soit au cours de leur utilisation [1] [2].

Les domaines d'application sont nombreux :

- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.) ;
- L'aérospatiale ;
- L'industrie navale (contrôle des coques) ;
- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs) ;
- Autres (fabrication de mousquetons d'escalade, ouvrages d'art...)

Et en règle générale dans tous les secteurs produisant :

- des pièces à coût de production élevé en quantité faible, (Nucléaire, Pétrochimique...),
- des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique. (Nucléaire, canalisation de gaz...).

Dans ce chapitre nous exposerons en détail la technique utilisant les courants de Foucault.

I.1 Principes généraux

Quelque soit la technique adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND selon le synoptique de la figure 1.1.

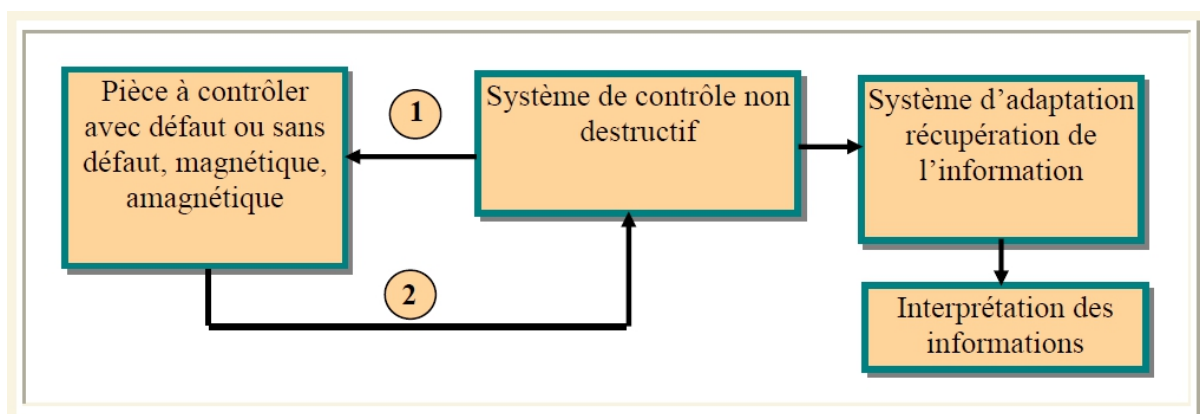


Figure 1.1- Schéma synoptique de CND [3]

Quelque soit la nature de la cible (pièce à tester), magnétique ou amagnétique, elle se caractérise par un ensemble de paramètres (σ , μ , lift-off, ...), que l'on va chercher à estimer afin de formuler un diagnostic d'intégrité.

Le système de contrôle non destructif représente la technique (ressuage, ultrason, magnétoscopie, contrôle par courants de Foucault.....) utilisée pour déterminer l'état de la cible.

Le système d'adaptation et récupération de l'information est un système d'acquisition, dont le rôle est de concrétiser les résultats du contrôle. Les moyens utilisés dans cette étape diffèrent suivant le type de procédé utilisé, on peut trouver un impédance mètre, un microscope, un caméscope ou l'œil nu [3]

I.2 Approche du phénomène physique

Le contrôle par courants de Foucault repose sur le phénomène de l'induction électromagnétique. Tout matériau conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège d'une force électromotrice d'induction. Cette FEM donne naissance à des courants induits appelés courants de Foucault [4].

De cette manière, on peut injecter de l'énergie électromagnétique dans un dispositif sans qu'il y ait contact. L'évolution de cette énergie va permettre, par l'intermédiaire de mesures adaptées, d'accéder à des informations concernant la pièce métallique (propriétés physiques comme la conductivité et la perméabilité, propriétés géométriques, présence de défaut).

I.3 Contrôle non destructif par courants de Foucault

I.3.1 Objectifs du Contrôle Non Destructif

Le contrôle non destructif comporte l'ensemble des procédés permettant de caractériser l'intégrité des structures ou des matériaux sans les altérer, ceci peut correspondre à deux types de contrôles [5]:



Estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple l'épaisseur d'une paroi, la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau (conductivité électrique, perméabilité magnétique).

- ♣ **Détection de présence de défauts** qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou de la fatigue mécanique.

Procédure du CND

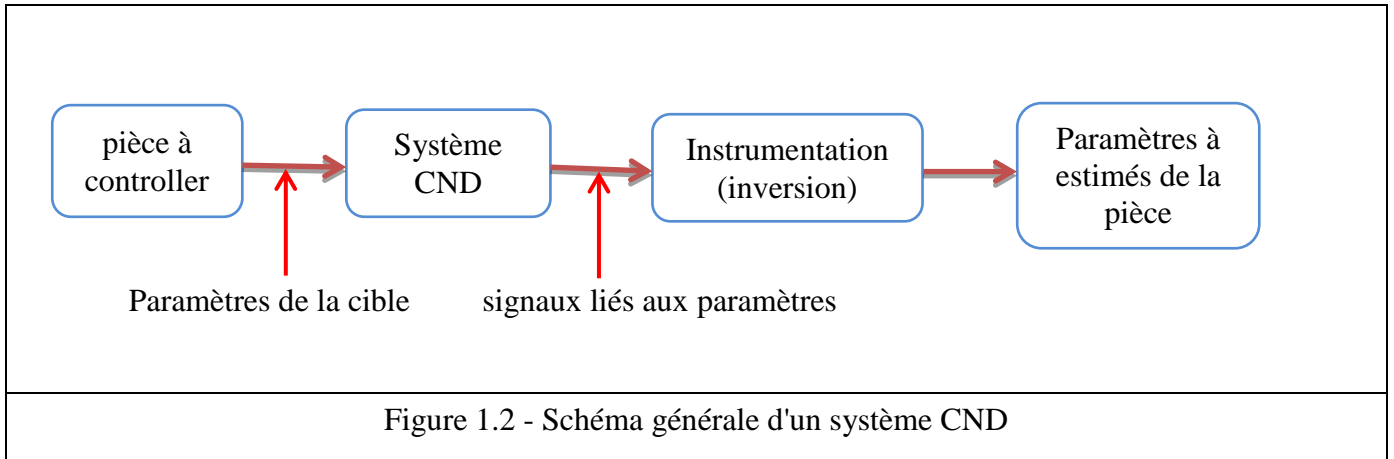


Figure 1.2 - Schéma générale d'un système CND

La cible se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic d'intégrité. La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape « d'inversion », plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce (figure 1.2) [6].

I.3.2 Les techniques de CND

On peut classer les techniques de CND en fonction de la nature des phénomènes physiques : méthodes optiques, électromagnétiques, vibrations mécaniques, thermographiques,...

La plupart des besoins des unités de production et de maintenance industrielle en matière de CND sont satisfaits par les techniques classiques, telles que :

- ♣ le ressuage ;
- ♣ la magnétoscopie ;
- ♣ les ultrasons ;
- ♣ les courants de Foucault ;
- ♣ la thermographie ;
- ♣ la radiographie et la gammagraphie.

I.3.3 Comparaison des techniques de CND :

Technique	Détection de défauts enfouis	Niveau d'expertise de l'opérateur	Durée de contrôle	Coût
Ressuage	Non	Moyen	Moyen	Moyen
Ultrasons	Oui	Elevé	Elevé	Elevé
Radiographie	Oui	Moyen	Moyen	Elevé
Thermographie	Oui	Elevé	Elevé	Très élevé
Courants de Foucault	Oui	Elevé	Moyen à élevé (dépend du type de contrôle)	Faible

Tableau 1.1- Comparaison des techniques de CND [7]

I.3.3 CND par courants de Foucault

Cette méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs de l'électricité. Elle consiste à placer une pièce conductrice dans un champ magnétique variable dans le temps. Celle-ci est alors parcourue par des courants induits, appelés "courants de Foucault" (physicien français 1819-1868).

Ainsi, une bobine placée à proximité d'une pièce conductrice et parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits dans la pièce. Ces courants créent eux-mêmes un flux magnétique induit qui s'oppose au flux d'excitation, modifiant par là-même la f.e.m de la bobine .C'est l'analyse de cette variation de f.e.m qui fournira les informations exploitables pour un contrôle ; en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré ,ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage). On

conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation de la f.e.m induite dans la bobine ou de manière équivalente la variation d'impédance (cas harmonique) décelable au niveau de la bobine d'excitation. Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault se développent principalement sur la surface des corps conducteurs (effet de peau). Si on considère une pièce plane infinie excitée par une nappe de courants extérieure, de fréquence f parallèle au plan, le module de la densité de courant dans la pièce est exprimé par la relation suivante :

$$J(z) = J_s \exp(-z\sqrt{\pi f \sigma \mu}) = J_s \exp(-\frac{z}{\delta})$$

Avec :

- z la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce.
- $J(z)$ le module de la densité de courant à la profondeur z .
- $J_s(z)$ le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$).

I.4 Techniques et instrumentations

I.4.1 Courants de Foucault sinusoïdaux et courants de Foucault pulsés

- ♣ Courants de Foucault sinusoïdaux (C.F.S.) : le champ électromagnétique est généré par un courant sinusoïdal. Cette méthode est applicable pour la recherche de défauts surfaciques ou très proches de la surface [8].
- ♣ Courants de Foucault pulsés (C.F.P.) : le champ électromagnétique est généré par une impulsion de courant d'amplitude et de durée variables. Cette technique permet de détecter des défauts situés à des profondeurs non accessibles aux courants de Foucault sinusoïdaux.

I.4.2 Appareils mono et multi-paramètres

La plupart des appareils à courants de Foucault se basent sur la mesure de l'impédance ou de la tension du bobinage de contrôle. Des dispositifs spéciaux ont donc été développés permettant la détection de petits changements d'impédance.

- **Appareils mono-paramètres** : Ces appareils sont dédiés à la mesure d'une seule caractéristique du signal : amplitude ou phase et assurent une fonction

spécialisée, par exemple la mesure d'épaisseur, de conductivité ou de perméabilité

- **Appareils multi-paramètres** : De conception complexe, tous les paramètres relatifs au contrôle sont réglables. Ces appareils versatiles assurent la mesure simultanée de l'amplitude et de la phase et conviennent au travail de laboratoire.

I.4.3 Signaux d'excitation et exploitation

I.4.3.1 Gamme de fréquences

- Basses fréquences : de 1 Hz à 1 kHz : ce domaine concerne surtout les produits ferromagnétiques et convient pour le contrôle de tôles de forte épaisseur.
- Moyennes fréquences : de 1 kHz à 1 MHz : c'est le domaine le plus employé et couvre aussi bien le contrôle de santé que le contrôle qualité.
- Haute fréquence : ce domaine s'étend sur quelques MHz : l'utilisation de ce domaine de fréquence est encore limitée (détection de microfissures de surface, par exemple).

I.4.3.2 Générateur mono fréquence

Lors d'un contrôle mono-fréquence, le champ magnétique est généré par une bobine ou un inducteur alimenté par un courant sinusoïdal de fréquence fixe. La caractérisation de la pièce conductrice se fait en mesurant la variation de l'impédance de la bobine d'excitation par rapport à celle mesurée dans le vide.

I.4.3.3 Générateur multifréquence

Fournissant simultanément deux à quatre fréquences fixes ou variables (réglage continu) : Le mode multifréquences permet d'obtenir plusieurs informations utiles concernant la structure testée, et aussi de rendre la caractérisation plus robuste.

I.4.4 Eléments de mesure

Les éléments de mesure peuvent être classés selon trois critères [7,8]:

I.4.4.1 Classification selon la géométrie

- **Bobine encerclante** : Les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Elle est utilisée pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes...(figure1.3).

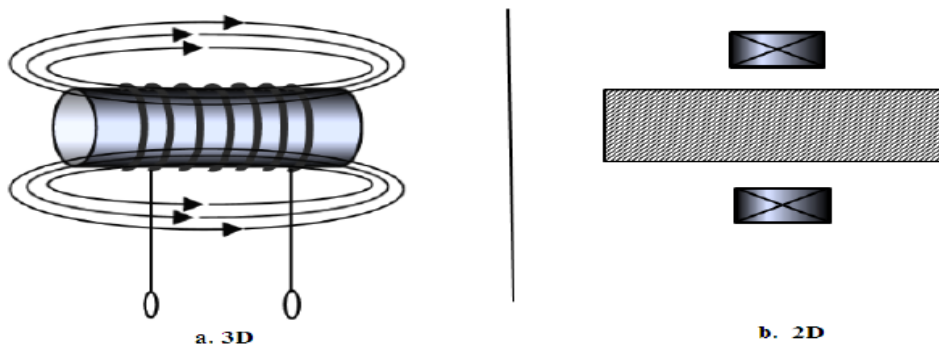


Figure 1.3- Bobine encerclante (a) à 3D, (b) à 2D

- **Palpeur ou bobine ponctuelle** : ses enroulements forment une petite bobine qui peut être placée près de la surface de la pièce pour inspection à endroits précis (figure 1.4).

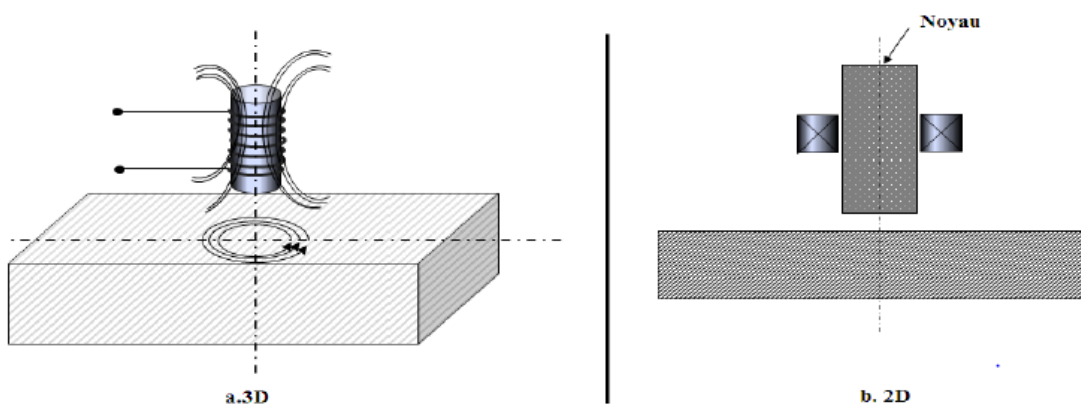


Figure 1.4 - Bobine simple avec noyau.

- **Sonde interne** : Destinée au contrôle d'un produit par l'intérieur, elle peut être déplacée à travers un tube ou une conduite (figure 1.5)

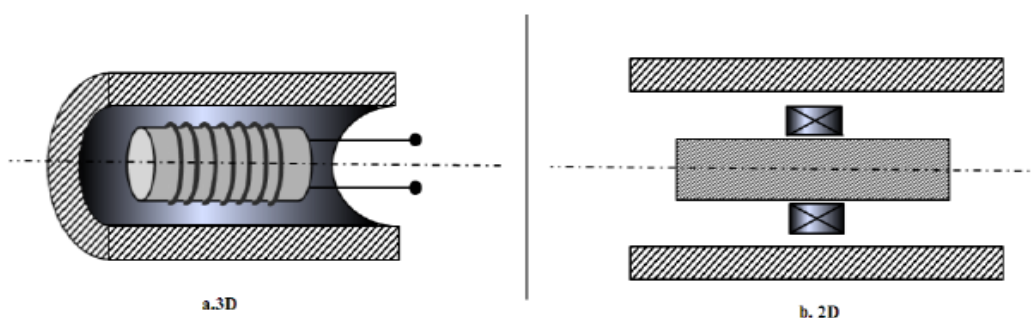


Figure 1.5 - Bobine interne glissante avec noyau.

I.4.4.2 Classification selon la fonction

- **Élément à double fonction** : Très utilisé dans les applications type courant de Foucault sinusoïdaux, les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par les mêmes enroulements. La bobine d'excitation sert aussi d'élément de mesure [7].
- **Élément à fonctions séparées** : Les fonctions d'excitation et de réception sont assurées par des enroulements distincts. Cette technologie est utilisée lorsque le contrôle nécessite des champs magnétiques intenses [8].

I.5 Génération de courants de Foucault dans une pièce conductrice

La génération des courants de Foucault (en anglais Eddy currents) dans un matériau conducteur consiste en une bobine placée à proximité d'une pièce conductrice et parcourue par un courant variable. Toute variation de flux d'un champ magnétique \vec{H}_{ext} (champ exciteur) génère de tels courants induits au sein de la pièce [8]

D'après la loi de Lenz, ces courants tourbillonnaires créent un champ magnétique \vec{H}_{ind} (champ induit) dont le flux magnétique tend à réduire le flux qui lui a donné naissance, modifiant par la même f.é.m de la bobine. C'est l'analyse de cette variation de f.é.m qui fournira des informations exploitables pour un contrôle (figure 1.6).

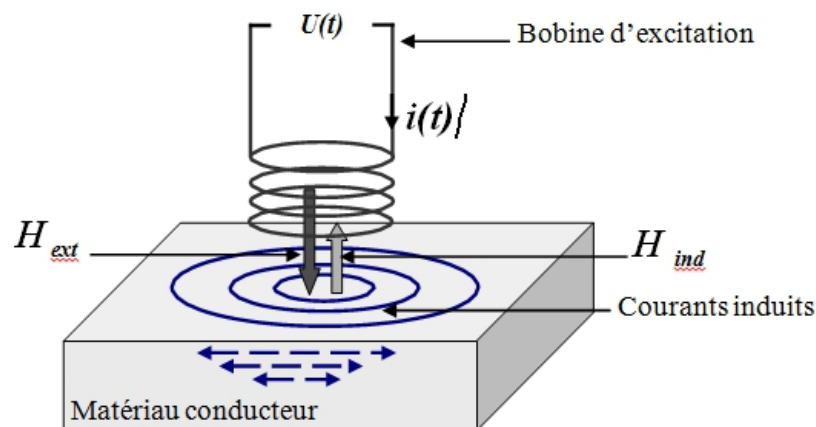


Figure 1.6 - Génération des courants de Foucault dans un matériau conducteur

Plus les variations de flux sont importantes, plus l'intensité des courants est importante à proximité du dispositif générant le flux, plus cette intensité décroît rapidement lorsqu'on s'éloigne du dispositif.

L'intensité et la répartition des courants de Foucault dépendent :

- du couplage électromagnétique entre le matériau et l'inducteur ;
- de la fréquence d'excitation f ;
- de la géométrie de la pièce car $j = j_s \exp(-\frac{\delta}{z})$ ou δ est un paramètre de la géométrie qui désigne l'épaisseur de peau et il est donné par $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$
- de la conductivité électrique σ ;
- de la perméabilité magnétique μ du matériau ;
- d'éventuels défauts superficiels tels que fissures, hétérogénéités chimiques ou microstructurales,...

I.5.1 Profondeur de pénétration et effet de peau

Afin de mettre en évidence la notion de profondeur de pénétration des courants de Foucault, on peut résoudre analytiquement le système d'équations de Maxwell dans un cas relativement simple d'un demi plan conducteur infini placé en-dessous d'une nappe de courant unidirectionnelle, la distribution de la densité de courant diminue avec la profondeur en dessous de la surface de façon exponentielle.

L'épaisseur de peau est définie comme étant la profondeur pour laquelle l'intensité des courants est égale à 63% de leur amplitude (figure 1.7) [7-10] :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}}$$

Avec :

δ : épaisseur de peau [m]

f : fréquence du courant [Hz]

μ : perméabilité magnétique [H/m]

σ : conductivité électrique [S/m]

Cette formulation, valable dans un cas simple, est souvent utilisée pour avoir une idée de la valeur de la profondeur de pénétration dans d'autres cas. Le seul paramètre qui peut être modifié pour contrôler cette épaisseur est la fréquence d'excitation de la sonde. Par exemple, Lors de la mesure de l'épaisseur d'une tôle, la fréquence doit être basse pour avoir une profondeur de pénétration supérieure à l'épaisseur estimée de la

tôle. Par contre, pour la mesure de la distance capteur-cible, la fréquence devra être grande afin que les caractéristiques de la plaque n'influencent pas la distribution des courants induits [11].

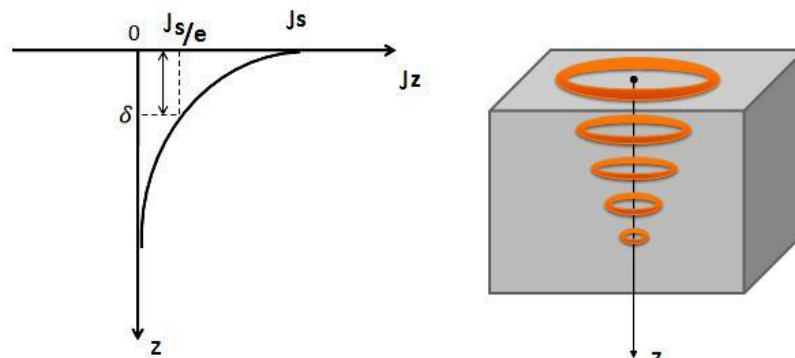


Figure 1.7 - Variation de l'amplitude de la densité des courants de Foucault

L'effet de peau dépend de :

- ▢ La géométrie de la pièce conductrice.
- ▢ Des caractéristiques physiques de la pièce conductrice.
- ▢ La fréquence d'excitation et des phénomènes électromagnétiques.

I.5.2 Variation d'impédance

Les courants de Foucault ne sont pas directement accessibles à l'expérience et il faut nécessairement passer par la mesure d'une grandeur annexe, en l'occurrence : l'impédance. L'impédance de la bobine est modifiée par la variation du champ magnétique qui traverse les spires de la bobine et par l'absorption de pertes Joule dans la charge [7].

I.5.3 Impédance normalisée et plan d'impédance normalisé

Dans le cas général, un palpeur (bobine) inductif est donc caractérisé par deux grandeurs : la composante résistive **R** qui englobe les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans la cible et les pertes internes du bobinage d'excitation, et le terme inductif **X** qui représente la réactance du bobinage d'excitation liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le palpeur [9] [10].

Chapitre I : Contrôle non destructif par courants de Foucault

Dans la figure 1.8, est présentée le principe de la variation d'impédance d'une bobine.

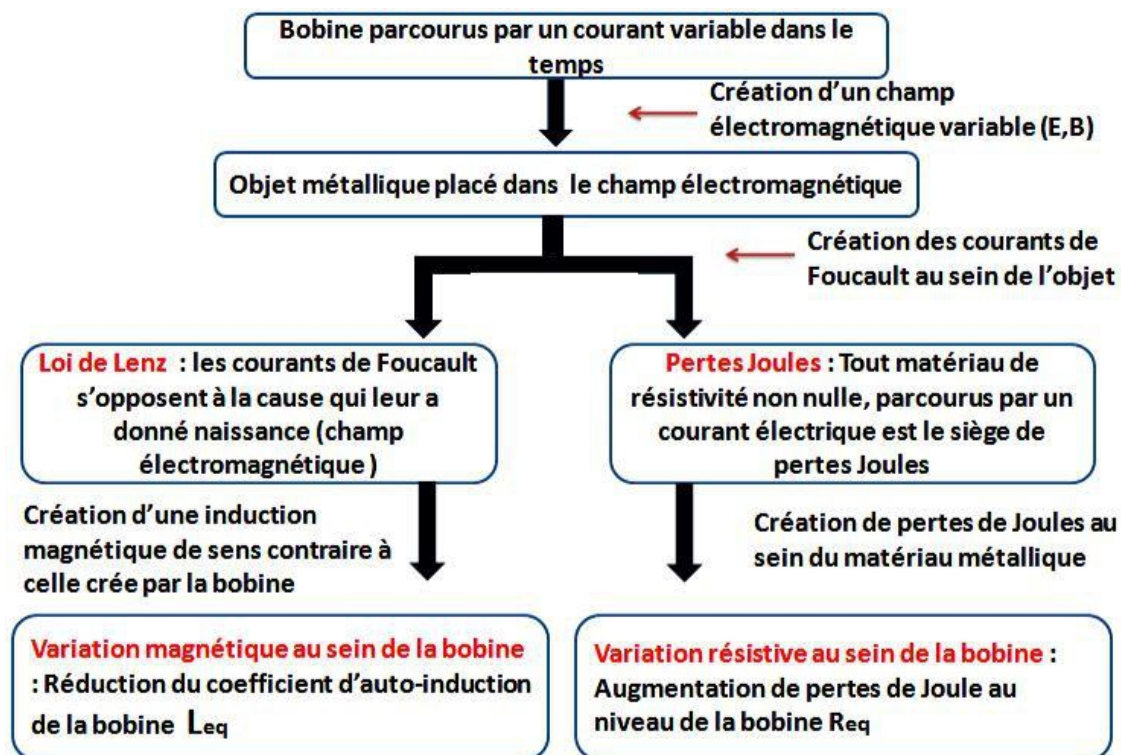


Figure 1.8- Principe de la variation d'impédance d'une bobine suite à la génération de courants de Foucault

Le diagramme d'impédance est une représentation dans un plan complexe de l'impédance d'un enroulement. Inspecter un matériau, cela revient à examiner l'impédance complexe du capteur en interaction avec la cible.

Les courbes représentant les paramètres influents dans le plan de l'impédance peuvent être normalisées dans une courbe standard appelée diagramme normalisé d'impédance. Pour ne garder dans l'expression de l'impédance que les variations dues à la présence de la cible, c'est-à-dire éliminer les composantes de l'impédance à vide 0 pour avoir une impédance dite normalisée .

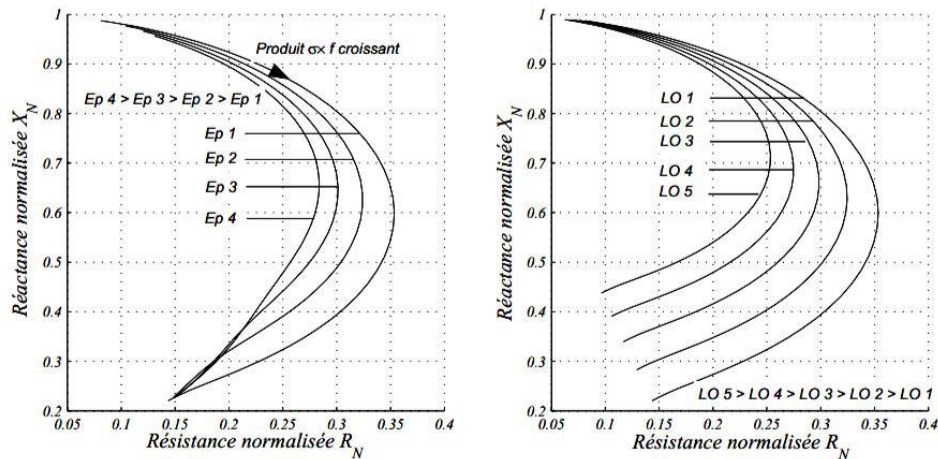
La normalisation rend la mesure indépendante des caractéristiques propres de la bobine qui ne dépend que :

- des paramètres de structure : la fréquence d'excitation f et la géométrie du capteur.

- de la distance capteur-cible (lift off).
- des paramètres géométriques de la cible.

Le plan d'impédance normalisé est le tracé de $X_n = f(R_n)$ (Figure 1.9) avec $X_n = \frac{X}{X_0}$ et

$$R_n = \frac{R - R_0}{X_0}$$



(a) Variation de l'épaisseur de la pièce (E_p) (b) Variation du lift-off (LO)

Figure 1.9 : Impédance normalisée pour des variations d'épaisseur et de lift-off [9]

I.6 Principaux paramètres influant le contrôle

- **Paramètres liés au matériau**

Outre ceux liés à la forme géométrique de la cible, ce sont sa conductivité électrique σ et sa perméabilité magnétique μ telle que toute variation locale de ces paramètres entraînent un déplacement du point de fonctionnement moyen de la sonde [6].

- **Paramètres liés au montage**

Ils gouvernent le couplage capteur-matériau : il s'agit soit du coefficient de remplissage pour les bobines encerclantes, soit de la position du capteur par rapport à la surface de la pièce (lift-off). Les variations du lift-off provoquent des fluctuations de l'impédance qui peuvent prendre une amplitude telle qu'elle masque les indications caractéristiques du défaut.

- **Paramètres électriques**

C'est essentiellement la fréquence d'excitation du capteur qui sera choisi en fonction des considérations précédentes.

I.7 Champ d'application du CND par CF

Le CND s'applique, en général, dans les industries à fiabilité élevée [11]. On peut citer:

- ↯ Métallurgie, fonderie.
- ↯ Industrie automobile.
- ↯ Aérospatial et armée.
- ↯ Industrie navale (contrôle des coques).
- ↯ Aéronautique.
- ↯ Ferroviaire.

I.8 Avantages du CND par courants de Foucault

)} Peut détecter les défauts de surface et ceux près de la surface dans tout matériau conducteur.

)} Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplants, ceci en facilite par conséquent l'utilisation.

)} Aucune nuisance ou pollution n'est engendrée ni pour l'utilisateur ni pour l'environnement.

)} Transportabilité : le CND par CF ne nécessite pas de dispositif encombrant, et peut donc être effectué à des endroits difficilement accessibles moyennement un équipement portable.

)} De même les contrôles à température élevée sont possibles

I.9 Limites du CND par courants de Foucault

- ♣ Il ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs.
- ♣ Il n'est pas adapté pour détecter des défauts de forte profondeur.
- ♣ L'interprétation des signaux est souvent complexe et nécessite un opérateur ayant un niveau élevé d'expertise.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur les techniques du contrôle non destructif dans lesquelles le contrôle par courants de Foucault tend à occuper une place de plus en plus importante. En effet, la technique est simple d'utilisation et permet des mesures sans contact. Nous avons décrit quelques notions sur la création des courants de Foucault et le principe du capteur inductif. Les formes principales d'enroulements du capteur, différents types de capteurs à courants de Foucault, différents dispositifs de contrôle, la disposition des capteurs et les différents modes d'excitation.

A partir de la mesure d'impédance ou la tension du capteur, il serait intéressant dans le domaine du contrôle, de pouvoir évaluer des propriétés de la cible. Ceci nous conduit dans le prochain chapitre à entamer la modélisation mathématique, ce qui permettra de prédire la réponse du capteur et d'étudier les phénomènes physiques mis en jeu dans l'interaction électromagnétique entre le capteur et la cible .

Chapitre II :
modélisation des
systèmes
électromagnétiques

II. Introduction

Lors de la mise en œuvre d'un outil de contrôle non destructif par courants de Foucault, l'étude paramétrique expérimentale peut s'avérer difficile pour plusieurs raisons : non disponibilité d'échantillons de matière pour étalons, multiplicité du nombre d'essais et des échantillons ou encore coût de fabrication d'un prototype de test. Depuis l'avènement des ordinateurs et, compte tenu en particulier de l'augmentation de leur puissance de calcul, la simulation numérique commence à remplacer l'expérimentation directe trop coûteuse et longue à mettre en œuvre [12,13].

Les outils de simulation sont par conséquent très utiles pour étudier l'influence de divers paramètres sur les phénomènes électromagnétiques mis en jeu. Ils mettent en œuvre les équations de Maxwell et les lois de comportement des matériaux qui régissent les interactions entre un capteur électromagnétique et une pièce conductrice. Ainsi, la conception, le développement et l'optimisation des procédés de CND par courants de Foucault sont rendus possibles grâce à la modélisation et la simulation numérique des systèmes électromagnétiques.

II.1 Problématique – Système modélisé

Les problèmes électromagnétiques traités dans ce mémoire peuvent se mettre sous la forme du schéma de principe représenté sur la figure 2.1. En effet, le contrôle non destructif par courants de Foucault que nous mettons en œuvre implique un inducteur (bobine) en présence d'une pièce électriquement conductrice magnétique, et le domaine global qui contient aussi l'air représente le domaine de résolution du problème électromagnétique où des conditions aux limites seront imposées sur sa frontière Γ [14,15,16]

L'objectif est d'évaluer la répartition spatiale du champ électrique et de l'induction magnétique dans le domaine globale.

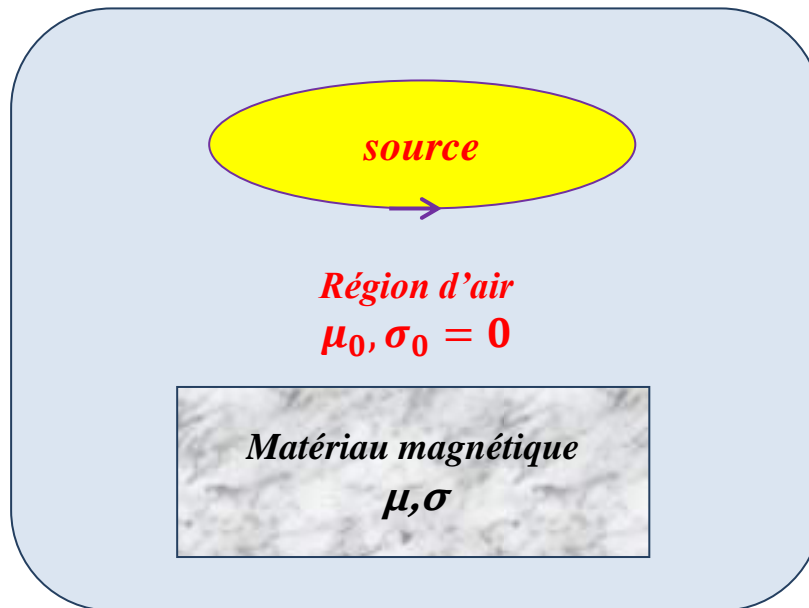


Figure 2.1- Schéma de principe des problèmes électromagnétiques des matériaux magnétiques

II.2 Mise en Equations

II.2.1 Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell constituent le modèle général de description du comportement et des interactions des champs électriques et magnétiques et de leurs sources respectives charges et densités de courant, et traduisent l'interdépendance de ces quatre grandeurs [17]:

II.2.2 Equation de Maxwell-Gauss : cette équation locale décrit comment un champ électrique \vec{E} est généré par des charges électriques (positives ou négatives) :

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

II.2.3 Equation de Maxwell et conservation du flux magnétique : Cette équation énonce que les lignes du champ magnétique \vec{B} sont obligatoirement fermées, et qu'il n'existe pas de monopoles magnétique (ou charges magnétiques isolées) analogue aux charges électrique.

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

On dit aussi que le champ magnétique est à flux conservatif.

II.2.4 Equation de Maxwell-Faraday : Cette équation décrit comment la variation d'un champ magnétique peut créer un champ électrique.

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

Chapitre II : Modélisation du système électromagnétique

II.2.5 Equation de Maxwell-Ampère : Cette équation énonce que tout courant électrique et toute variation de flux électrique génère un champ magnétique.

$$\text{rot}\vec{B} = \mu\vec{J} + \mu\varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \quad (2.4)$$

Les équations de Maxwell font intervenir les grandeurs physiques suivantes :

\vec{E} : Champ électrique [V/m]

\vec{B} : Induction magnétique [T]

\vec{J} : Densité de courant [A/m²]

ρ : Densité volumique des charges électriques [C/m³]

Le schéma de la figure 2.2 illustre le couplage entre les phénomènes électriques et magnétiques [18], que Maxwell a pu réunir sous une même théorie dite «Electromagnétisme».

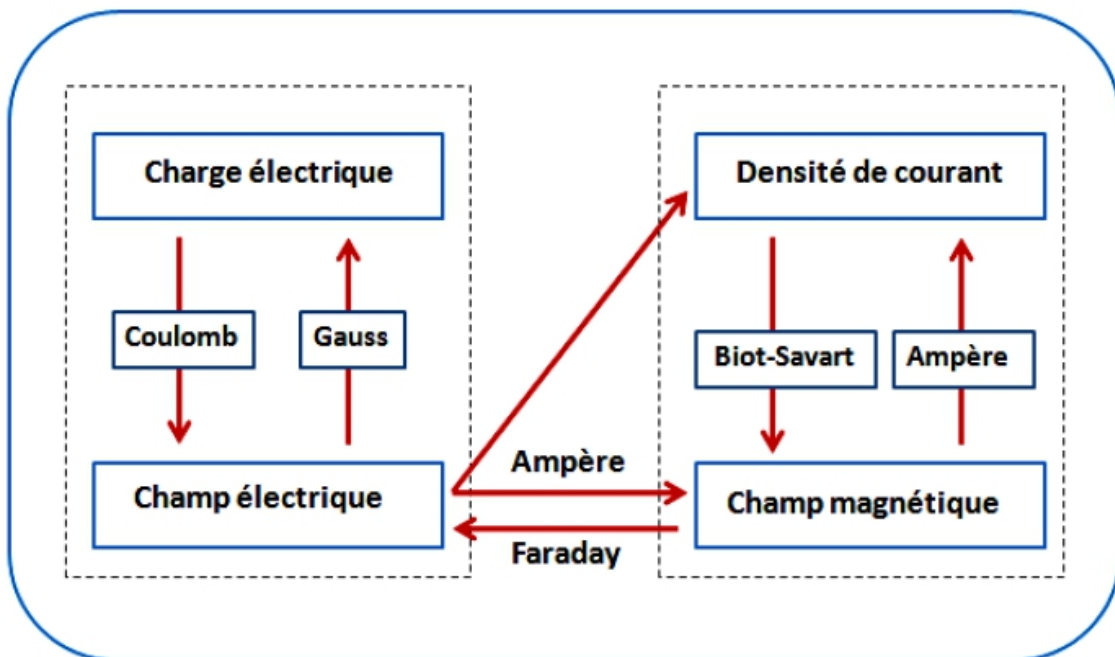


Figure 2.2- Couplage entre les phénomènes électriques et magnétiques

II.3 Comportement des matériaux

Pour définir complètement le phénomène électromagnétique, on ajoute aux équations précédentes les lois de comportement du milieu linéaire [19],[8], homogène et isotrope (LHI):

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

Avec : \vec{H} : Champ magnétique [A/m]

\vec{D} : Induction électrique [C/m²]

σ : Conductivité électrique (S /m).

μ : Perméabilité magnétiques (H/m).

ε : Perméabilité électrique (F/m).

I.3.1 Méthodologie

Les équations de Maxwell offrent un cadre mathématique permettant la détermination du champ électromagnétique, par deux méthodes distinctes [8],[17]:

- La première consiste à déterminer préalablement le couple de potentiels scalaire et vecteur (V, \vec{A}) associé au champ électromagnétique. Il s'agit ensuite de déduire le champ électromagnétique à l'aide des relations champ-potentiel :

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

- Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique T - ϕ .

Dans ce mémoire on s'intéresse qu'à la formulation de types potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique (\vec{A}, V)

II.3.2 Hypothèses simplificatrices

Les problèmes de CND-CF sont relatifs au modèle magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire ,et en conséquence le courant de déplacement est négligeable [14],[18]:

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0 \quad (2.8)$$

Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité $\sigma \vec{E}$ peut être décomposée en une partie imposée J_s (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit [8] , [14], pour laquelle on gardera la notation $\sigma \vec{E}$ qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (2.9)$$

Chapitre II : Modélisation du système électromagnétique

II.3.3 Formulation magnétodynamique

II.3.3.1 Relations champ-potentiels

Considérons les équations de Maxwell qui ne contiennent pas de termes de source matérielle

(2.2) et (2.3) et sachant que $\vec{B} = \overrightarrow{rot}\vec{A}$ on peut écrire que [17]:

$\overrightarrow{rot}\vec{A} = -\frac{\partial \overrightarrow{rot}\vec{A}}{\partial t} = \overrightarrow{rot}\left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$ et donc $\overrightarrow{rot}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0$, ce qui montre que $\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ est un champ de gradient.

Pour retrouver l'expression habituelle de l'électrostatique, il suffit de poser que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{grad}\vec{V}, \text{ soit :}$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}\vec{V} - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.10)$$

En remarque qu'en régime variable \vec{E} dépend à la fois de V et \vec{A} , alors que la relation entre \vec{B}

et \vec{A} garde la même expression qu'en régime statique

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot}\vec{A} \quad (2.11)$$

II.3.3.2 Transformation de Jauge

Une indétermination pèse sur V et \vec{A} , car à un même champ électromagnétique, on peut associer plusieurs couples de potentiels vecteur et scalaire. Par exemple, en considérons les couples (\vec{A}, V) et (\vec{A}', V') :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot}\vec{A} \text{ et } \vec{B} = \overrightarrow{rot}\vec{A}' \text{ soit } \overrightarrow{rot}(\vec{A} - \vec{A}') = 0, \text{ et donc:}$$

$$\vec{A}' = \vec{A} + \overrightarrow{grad}\varphi \quad (2.12)$$

Où φ est une fonction quelconque de l'espace.

Cette transformation est appelé transformation de Jauge. Le fait que \vec{B} ne soit pas modifié par cette transformation est appelé invariance de Jauge.

Chapitre II : Modélisation du système électromagnétique

Pour le champ électrique, on introduit le potentiel V tel que $\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ une transformation de Jauge sur A ne modifie pas \vec{E} à condition que l'on transforme aussi le potentiel V selon :

$$V' = V - \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2.13)$$

Les équations (2.12) et (2.13) représentent la transformation de Jauge la plus générale. Dans certains cas, il peut être judicieux de profiter de cette liberté du choix de Jauge pour imposer une condition sur les potentiels, afin de faciliter les calculs tel que la Jauge de Coulomb ou la Jauge de Lorentz.

II.3.3.3 Relations en potentiels AV du model magnétodynamique

Avec les hypothèses précédentes, les équations à résoudre sont :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.12)$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{B} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.14)$$

En combinant les équations (2.8) (2.10) (2.11), L'équation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire électrique s'écrit[8],[20] :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) + \sigma \left(-\overrightarrow{grad}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_s \quad (2.15)$$

A cette équation s'ajoute la conservation de la densité de courant :

$$\text{div} \vec{J} = \text{div} \left(-\sigma \left(\overrightarrow{grad}V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \right) = 0 \quad (2.16)$$

L'unicité du potentiel doit être assurée par l'utilisation d'une jauge. En $A - V$ la jauge de Coulomb semble être la plus efficace[4],[14],[21]:

Chapitre II : Modélisation du système électromagnétique

$$\text{div}\vec{A} = 0 \quad (2.17)$$

Cette jauge est généralement introduite en ajoutant le terme :

$$-\overrightarrow{\text{grad}}\left(\frac{1}{\mu}\text{div}\vec{A}\right) \quad (2.18)$$

Nous obtenons le système d'équations électromagnétique symétrique à résoudre, dit formulation $A-V$ [8] :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}\right) - \overrightarrow{\text{grad}}\left(\frac{1}{\mu}\text{div}\vec{A}\right) + \sigma\frac{\partial}{\partial t}(-\overrightarrow{\text{grad}}V - \vec{A}) = \vec{J}_S \quad (2.19)$$

$$\text{div}(-\sigma(\overrightarrow{\text{grad}}V + \frac{\partial\vec{A}}{\partial t}))=0 \quad (2.20)$$

La connaissance des potentiels (V, \vec{A}) permet de déterminer \vec{E} et \vec{B} à l'aide des relations champ-potentiels (2.10) et (2.11).

Pour assurer l'unicité de la solution du système (2.1) à (2.7), il est nécessaire d'ajouter trois types de conditions : les conditions de continuité, les conditions aux limites, ainsi que les jagues.

II.3.4 Conditions de continuité

Les champs électromagnétiques subissent des discontinuités lors du passage entre deux milieux de propriétés physiques différentes (Figure 2.3). Pour cette raison des conditions de transmission entre deux milieux différents sont définies comme suit :

- Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique en présence de courants surfaciques :

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = \vec{J}_{sur} \quad (2.21)$$

- Continuité de la composante normale de l'induction magnétique à l'interface :

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.22)$$

- Continuité de la composante tangentielle du champ électrique :

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = 0 \quad (2.23)$$

- Discontinuité de l'induction électrique en présence de charges surfaciques :

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_{sur} \quad (2.24)$$

Où ρ_{sur} est la densité surfacique de charge, J_{sur} la densité surfacique de courant et \vec{n} le vecteur normal à la surface de séparation des deux milieux Ω_1 et Ω_2 et dirigé vers l'extérieur du milieu 1.

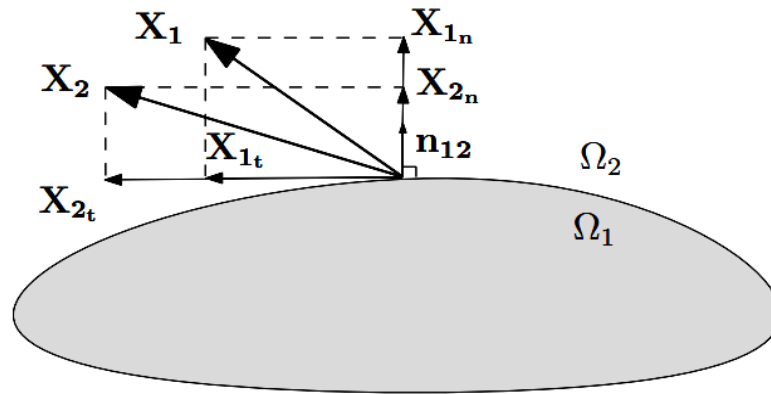


Figure 2.3 - Interface entre deux milieux

Il convient également de borner le domaine afin d'étudier le système pour une géométrie finie. Des conditions supplémentaires sur les frontières du domaine d'étude sont alors nécessaires.

II.3.5 Conditions aux limites

Les conditions aux limites (spatiales) s'énoncent de façon générale pour un domaine Ω de frontière Γ avec \vec{n} un vecteur normal (unitaire) à Γ pour la variable u qui peut être soit une valeur connue (2.25), soit normale à la surface (2.26) ce qui traduit :

- Condition de Dirichlet homogène $u = 0$ (2.25)
- Condition de Neumann homogène $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ (2.26)

II.3.6 Courants de Foucault

Dans le cas des courants de Foucault sinusoïdaux, nous pouvons réécrire la densité de courant d'excitation sous la forme suivante :

$$\vec{i}_0 = \vec{I}_0 \exp(j\omega t) \quad (2.21)$$

Chapitre II : Modélisation du système électromagnétique

De même pour ρ , \vec{E} , \vec{B} :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \exp(j\omega t) \quad (2.22)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(j\omega t) \quad (2.23)$$

$$\rho = \rho_0 \exp(j\omega t) \quad (2.24)$$

Dans le cas des milieux LHI, en utilisant les lois de comportement, les champs \vec{D} , \vec{H} , \vec{J} de (2.1) et (2.4) sont remplacés par \vec{E} et \vec{B} en utilisant les équations (2.21 à 2.24), les équations de Maxwell réécrivent [6]:

$$\varepsilon \operatorname{div} \vec{E}_0 = \rho_0 \quad (2.25)$$

$$\operatorname{div} \vec{B}_0 = 0 \quad (2.26)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}_0 + j\omega \vec{B}_0 = \vec{0} \quad (2.27)$$

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{B}_0 - j\omega \varepsilon \vec{E}_0 - \sigma \vec{E}_0 = \vec{J}_s \quad (2.28)$$

Pour simplifier les notations, nous supprimons l'indice 0, nous obtenons les équations de Maxwell harmonique :

$$\varepsilon \operatorname{div} \vec{E} = \rho \quad (2.25)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.26)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} + j\omega \vec{B} = \vec{0} \quad (2.27)$$

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{B} - j\omega \varepsilon \vec{E} - \sigma \vec{E} = \vec{J}_s \quad (2.28)$$

Le terme $j\omega \varepsilon \vec{E}$ représente les courants de déplacement. Le terme $\sigma \vec{E}$ est celui des courants de conduction, nous avons $\omega \varepsilon \ll \sigma$. De ce fait les courants de déplacement sont négligeables par rapport aux courants de conduction. Sous cette condition (2.28) se réécrit :

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{B} - \sigma \vec{E} = \vec{J}_s \quad (2.29)$$

II.3.7 Profondeur de pénétration électromagnétique

Nous allons donner l'expression de la profondeur de pénétration, à partir du cas idéal d'un demi-espace conducteur de conductivité σ excité par une nappe de courant plane infinie sinusoïdale de pulsation ω . La nappe du courant est supposée parallèle à la surface du conducteur. Elle est définie par le vecteur \vec{j} de direction parallèle à l'axe des x . [8][9]

Chapitre II : Modélisation du système électromagnétique

En combinant (2.25) et (2.27) et en utilisant (2.29) avec $\rho = 0$ (en tout point, le système est électriquement neutre), on obtient l'équation de diffusion de \vec{E}

$$\Delta \vec{E} - j\mu\sigma\omega\vec{E} = j\mu\omega\vec{J}_s \quad (2.30)$$

La solution de l'équation donne la densité des courants de Foucault en fonction de la profondeur z :

$$J = J_s \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cos\left(\omega t - \frac{z}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (2.31)$$

J_s : Densité de courant à la surface du conducteur

ω : Pulsation électrique de courantes sources

Par définition, « la profondeur de pénétration standard » des courants induits, notée δ , correspond à la profondeur z à laquelle l'amplitude des courants induits à la valeur :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}, e = 2.718 \quad (2.32)$$

II.4 Résolution numériques basés sur les éléments finis

Les méthodes numériques ont pour objectif de remplacer un problème continu défini avec un modèle mathématique souvent différentiel par un problème discret sous une forme algébrique. Dans les formulations issues de la physique de l'électromagnétisme, on peut citer les méthodes : différences finis (MDF), éléments finis (MEF), volumes finis (MVF) et les intégrales de frontières (MIF) qui sont de plus en plus utilisées [22][23].

La modélisation par éléments finis constitue une approche intéressante des problèmes d'optimisation de structure de capteurs. Elle permet, en un temps relativement court, d'évaluer les performances de plusieurs structures sans avoir à réaliser physiquement ou en développer des modèles analytiques, qui dans la majorité des cas s'avèrent complexes à mettre en œuvre. [24]

Les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes; ainsi ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul par la prise en compte de différents types de fonctions d'interpolations des variables. La diversité dans le choix de l'élément de maillage donne une flexibilité importante à la méthode [6].

II.4.1 Construction de la géométrie du système

Dans la figure 2.4 est présenté le système électromagnétique modélisant notre dispositif.

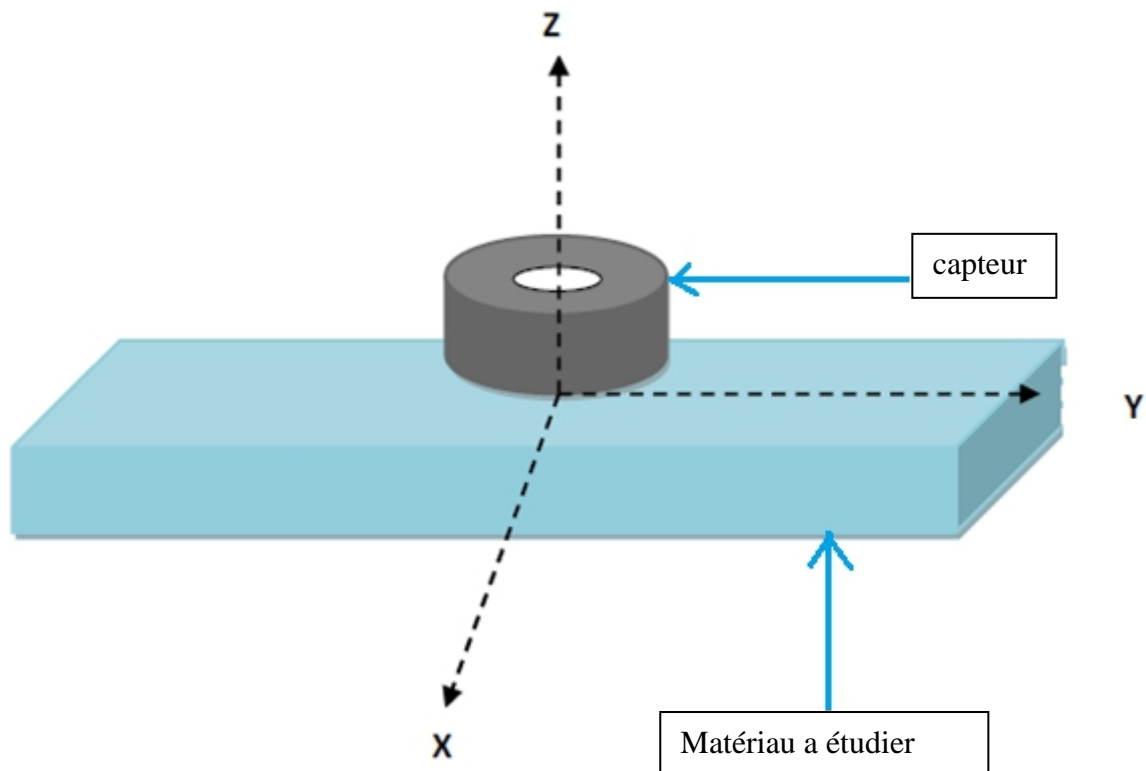


Figure 2.4- Système électromagnétique du dispositif étudié

La présence d'un axe de symétrie a permis de restreindre le domaine d'étude à la moitié de la section transversale (figure 2.5). Les N spires constituant la grille métallique dans lesquelles circule un courant I peuvent être modélisées par un seul anneau (de rayon interne r et externe R) sur lequel est appliquée une densité de courant J_s donné par [25]:

$$J_s = \frac{NI}{S} \quad (2.33)$$

Où S est l'aire de la section de l'anneau.

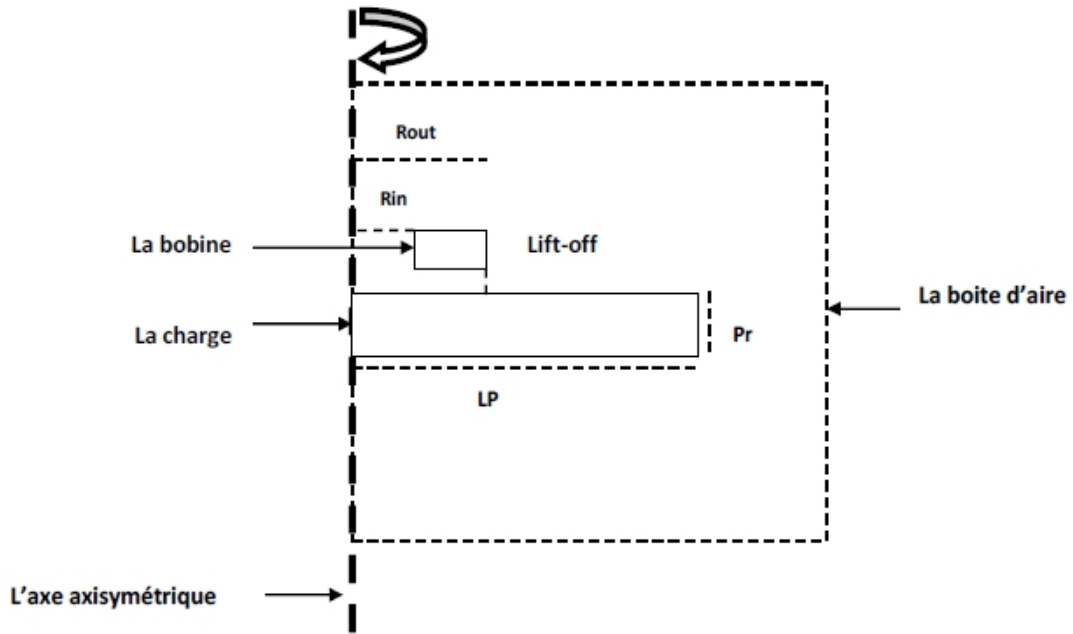


Figure 2.5- Géométrie du système axisymétrique en 2D

La figure 2.5 illustre la géométrie du système bidimensionnelle élaborée sous Matlab, la structure est composée de trois sous domaines : une boîte d'air, la charge (matériau) et la source (bobine).

Une fois que la géométrie est construite on passe à la discrétisation.

II.4.2 Discrétisation de la géométrie

Pour générer le maillage, nous avons utilisé le mailleur de PDE Toolbox de Matlab en utilisant la commande *initmesh* qui permet d'obtenir des maillages non conformes basés sur la triangulation de Delaunay (figure 2.6).

On utilise le mailleur de Matlab au domaine d'étude présenté par la figure , il en résulte les trois matrices caractéristiques suivantes :

- La matrice "p", ou matrice des points (nœuds), comprend les coordonnées du maillage.
- La matrice "e", ou matrice des segments (arrêtes), englobe les indices et les sous domaines de chaque segment.
- La matrice "t", ou matrice des triangles (éléments), contient les indices des points et les sous domaines de chaque triangle.

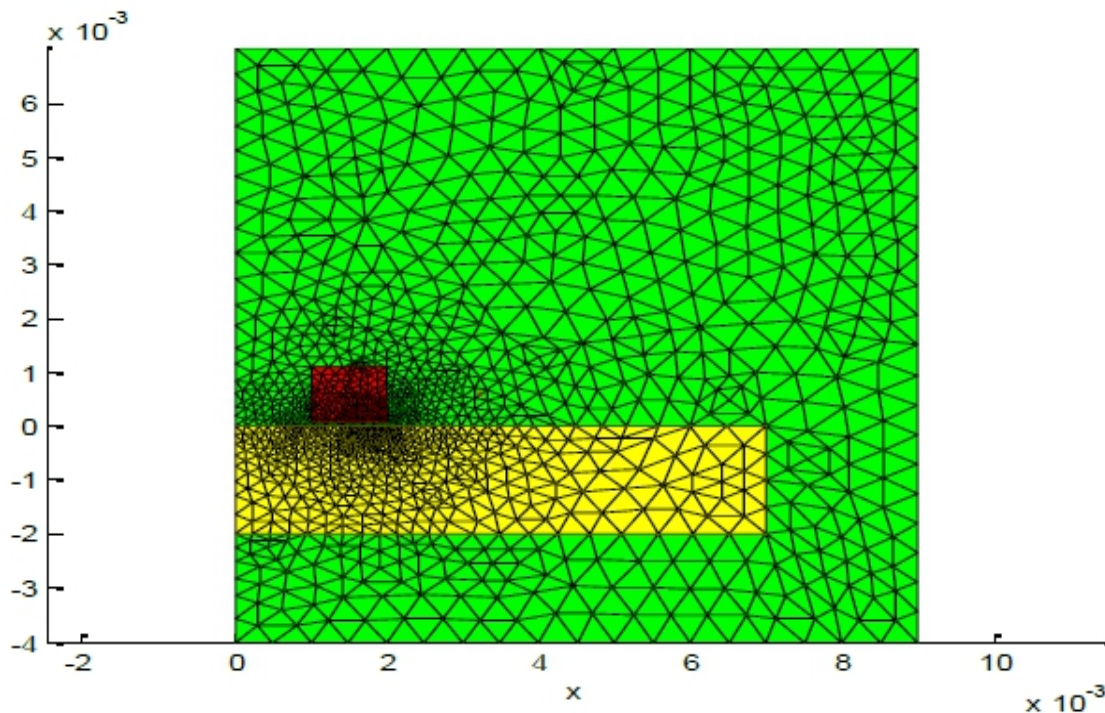


Figure 2.6 - Discretisation de la géométrie du système

II.4.3 Conditions aux limites

La figure 2.7 montre les conditions introduites au bord du domaine. Nous supposons qu'à une certaine distance, généralement prise égale à la plus grande dimension de dispositif à étudier [26], ou encore à une distance égale à 4 ou 5 fois le diamètre de la bobine, les champs peuvent être considérés comme nuls (condition de type Dirichlet). Quant à l'axe de symétrie, et puisqu'il s'agit d'une symétrie de révolution, la direction du potentiel vecteur magnétique \vec{A} est opposée d'un côté par rapport à l'autre ce qui implique que le champ va s'annuler au voisinage sur l'axe.

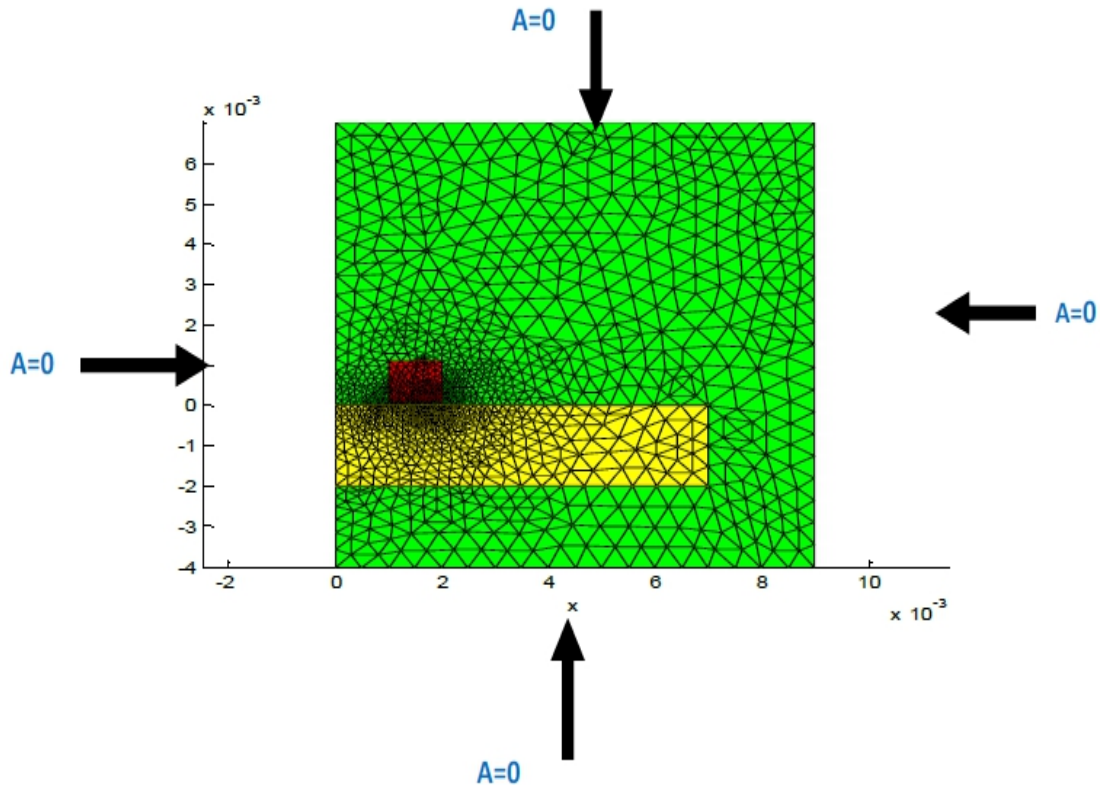


Figure 2.7- Conditions aux limites

II.4.4 Approximation par la MEF

La méthode des éléments finis consiste en une double discrétisation : une discrétisation spatiale (maillage du domaine) qui permet de définir les fonctions de base (scalaires ou vectorielles) donnant naissance aux sous-espaces d'approximation des espaces continus et une discrétisation des champs qui consiste en la discrétisation de l'équation différentielle et des conditions aux limites pour obtenir un système algébrique où le vecteur solution de ce système contient les valeurs approximatives des champs sur les points du maillage [8].

Pour calculer une grandeur dans un domaine discrétisé, il existe plusieurs méthodes d'approximation. On peut discrétiser cette valeur :

- aux nœuds du maillage (approximation nodale) ;
- par sa circulation le long des arêtes des éléments (approximation par des éléments d'arêtes) ;
- par son flux à travers les facettes des éléments (approximation par des éléments de facettes) ;
- par sa valeur au volume de l'élément (éléments de volume).

Chapitre II : Modélisation du système électromagnétique

Dans le domaine de l'électromagnétisme, les variables scalaires et vectorielles comme le potentiel vectoriel magnétique \vec{A} et le potentiel scalaire électrique V (continus au travers des deux éléments voisins), les éléments nodaux sont les plus adaptés.

Pour un élément e ayant m nœuds, les trois composantes A_x , A_y et A_z du potentiel vecteur magnétique ainsi que le potentiel scalaire électrique V sont approximées par

$$A_s^e = \sum_{j=1}^m N_j^e A_{sj}^e \quad S = x, y, z \quad (2.34)$$

$$V^e = \sum_{j=1}^m \alpha_j V_j \quad (2.35)$$

α_j et N_j^e sont des fonctions d'interpolation.

Nous obtenons les valeurs approchées du potentiel vecteur magnétique et du potentiel scalaire électrique en chaque point du maillage.

Enfin, le schéma classique détaillant les différentes étapes d'une modélisation par la méthode des éléments fins est présenté par la figure 2.8

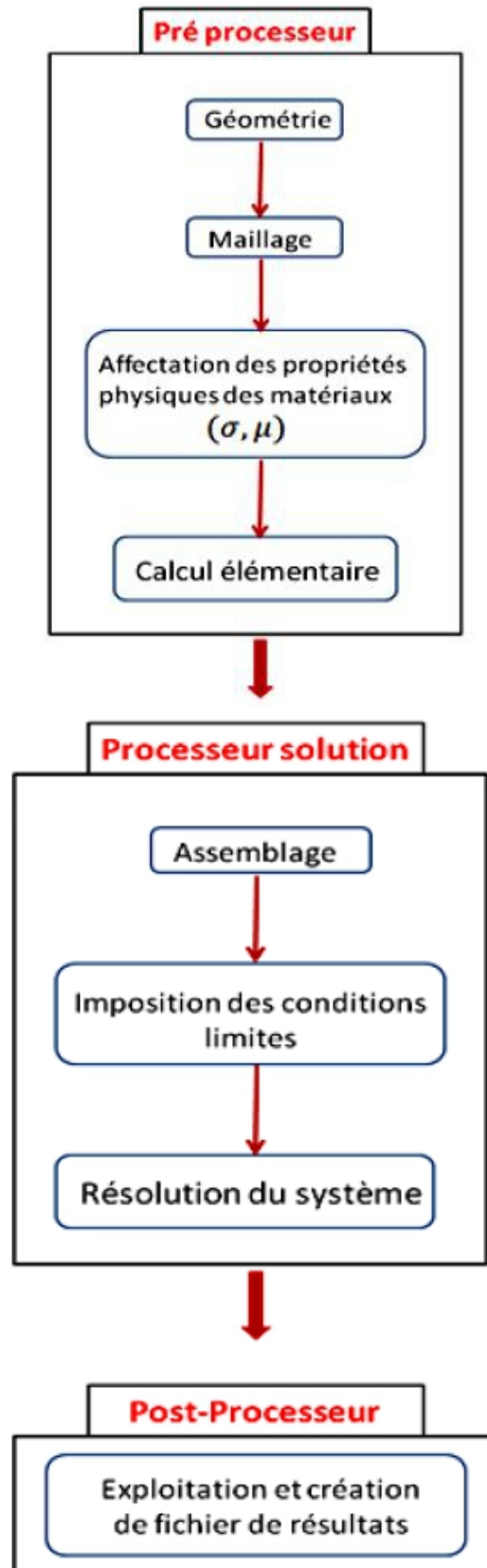


Figure 2.8 - Mise en oeuvre de la simulation éléments finis

II.5 Modèle direct et modèle inverse

II.5.1 Modèle direct

Les entrées du modèle direct sont les différentes propriétés géométriques et électromagnétiques du dispositif capteur-pièce. Sa sortie se résume au calcul de la réponse (appelée parfois signature) vue par le capteur [31]. Le schéma général des modèles directs est montré dans la figure 2.9.

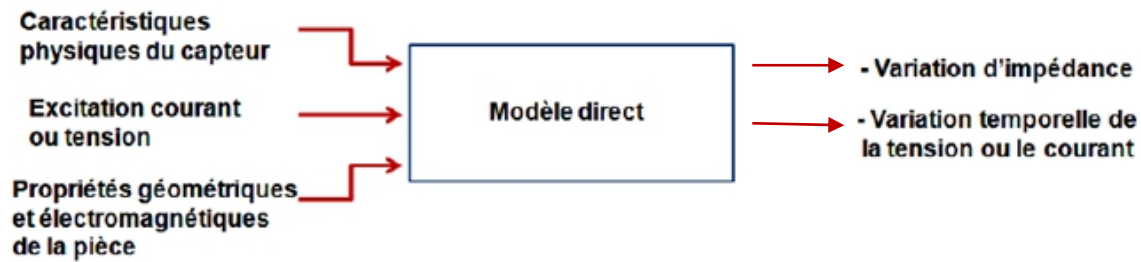


Figure 2.9 - Schéma général d'un modèle direct

II.5.2 Modèle inverse

La principale entrée du modèle inverse figure 2.10 est la réponse mesurée aux bornes du capteur, cependant parmi les caractéristiques géométriques et électromagnétiques certaines sont des entrées. La sortie du modèle dépend de la nature du contrôle à réaliser ; recherche de défaut ou évaluation d'une propriété.

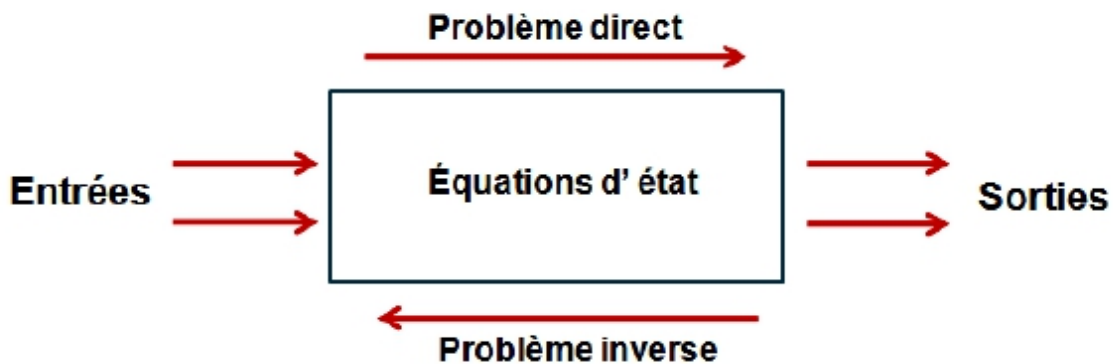


Figure 2.10 - Schéma fonctionnel d'un système de CND

Chapitre II : Modélisation du système électromagnétique

II.6 Développement du modèle direct

Dans le cas général, il est toujours possible de trouver une partie saine de la pièce loin de toute fissure. Sur cette zone et avec un choix adéquat du capteur de mesure, on peut considérer le système (pièce+bobine) comme un système axisymétrique et par voie de conséquence une modélisation 2D du système dépourvue de fissure est réalisée. Le modèle électromagnétique adopté est celui du potentiel vecteur magnétique.

Pour déterminer les paramètres non identifiés de la pièce, nous utilisons une bobine circulaire plate type pancake. Cette bobine est placée au-dessus de la pièce à une hauteur donnée.

Sur la figure 2.11 est présenté le système considéré.

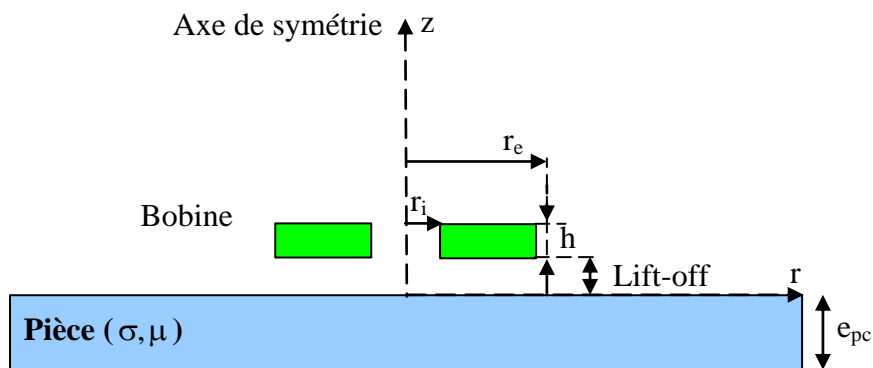


Figure 2.11 : Système axisymétrique bobine – pièce

Le système étant axisymétrique, il est donc invariant par rotation autour de l'axe Oz. Ainsi la densité de courant \vec{J} , le vecteur potentiel magnétique \vec{A} et le champ électrique \vec{E} sont colinéaires et sont perpendiculaires au plan d'étude (Orz). Par conséquent ces trois vecteurs n'ont qu'une seule composante suivant l'axe d'invariance.

Sur la base de ces considérations seul le potentiel vecteur magnétique apparaît et la formulation se réduit au modèle simple axisymétrique suivant :

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(A)}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial(A)}{\partial r} \right) + j\omega \frac{\sigma}{r} A = J_s \quad (2.36)$$

avec $A = rA_\theta$

La résolution de (2.36) est effectuée en développant un programme de calcul par éléments finis implémenté sous environnement MATLAB en utilisant quelques fonctions de sa toolbox « pde »

Chapitre II : Modélisation du système électromagnétique

Une fois que le potentiel vecteur magnétique \vec{A} est calculé en tout point de l'espace du système, nous calculons ensuite l'impédance de la bobine.

II.6.1 Impédance normalisée

Le capteur (bobine) inductif est caractérisé par les grandeurs suivantes : la composante résistive R qui englobe les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans la cible et les pertes internes du bobinage d'excitation, et le terme inductif X qui représente la réactance du bobinage d'excitation liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le palpeur.

$$Z = R + jX \quad (2.37)$$

Connaissant W_m et P_j , nous pouvons remonter facilement à la résistance R et la réactance X équivalentes du capteur. Les expressions reliant la résistance aux pertes Joule, et la réactance à l'énergie magnétique sont données par les relations suivantes :

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint \frac{1}{\mu} |\vec{B}|^2 dv$$

$$P_j = \frac{1}{2} \iiint \frac{1}{\sigma} |\vec{J}|^2 dv$$

$$\text{Et } R = \frac{1}{I^2} P_j, \quad X = \frac{2\omega}{I^2} W_m$$

La variation d'impédance peut aussi être déterminé en calculant l'énergie électromagnétique de la bobine constituant le capteur, nous tirons l'expression de cette impédance :

$$I^2 Z = j\omega \int_{\Omega_s} \vec{A} \cdot \vec{J}_s d\Omega_s \quad (2.38)$$

où \vec{A} est le potentiel vecteur magnétique. I est l'intensité du courant parcourant la bobine et Ω_s représente le volume occupé par la bobine.

Pour ne conserver dans l'expression de l'impédance que les variations dues à la présence de la cible, on introduit la notion d'impédance normalisée Z_n qui se déduit de Z à l'aide de l'expression :

$$Z_n = R_n + j X_n = \frac{Z - R_0}{X_0} \quad (2.40)$$

Chapitre II : Modélisation du système électromagnétique

où :

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (2.41)$$

est l'impédance à vide du palpeur [27, 28, 29].

En procédant à cette normalisation, la mesure devient indépendante des caractéristiques propres de la bobine excitatrice (nombre de spires, pertes à vide). Elle dépend uniquement de la fréquence d'excitation f , de la géométrie du palpeur, de la distance palpeur/cible (*lift-off*) et des paramètres de la cible, à savoir sa géométrie, sa conductivité électrique σ et sa perméabilité magnétique μ . L'étude des variations de Z_n s'effectue dans le plan d'impédance normalisée en traçant X_n en fonction de R_n (figure II.12).

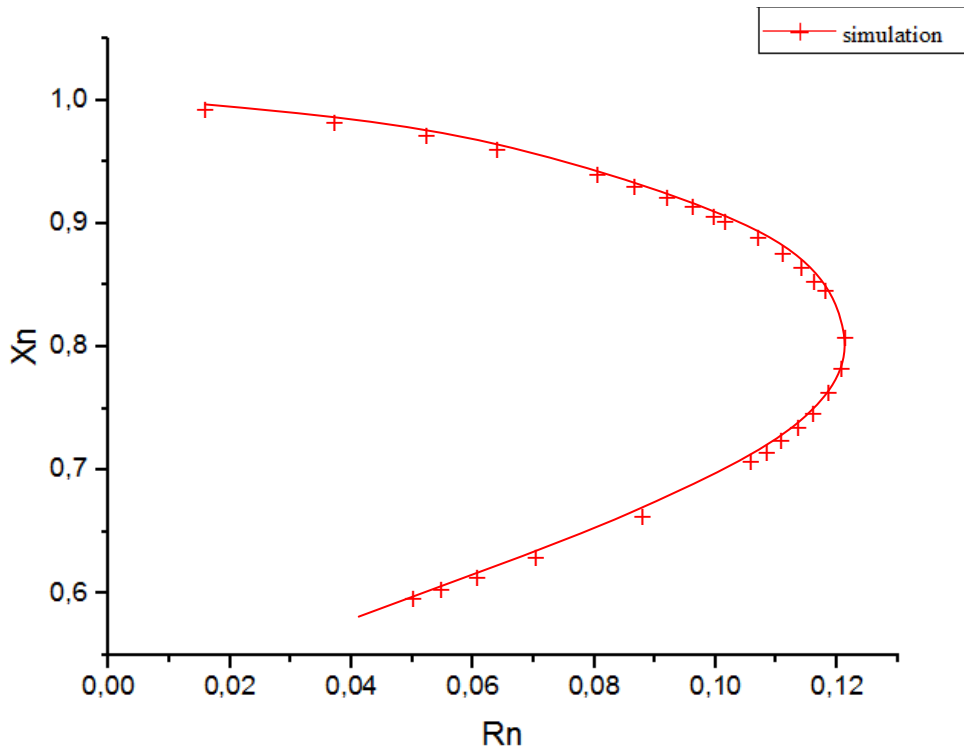


Figure II.12 - Diagramme d'impédance normalisée

Qu'ils soient théoriques ou expérimentaux, les travaux d'analyse d'impédance se traduisent par un type de graphique de plus en plus répandu dit graphique d'impédance normalisée.

Pour un capteur donné, toute variation de l'un de ces paramètres induit un déplacement du point représentatif de Z_n dans le plan d'impédance normalisée. La figure (II.13) illustre l'allure des trajectoires que décrit le point d'impédance de la bobine pour deux variations de l'épaisseur de revêtement diélectrique sur échantillon en Alliage d'Aluminium 2017A.

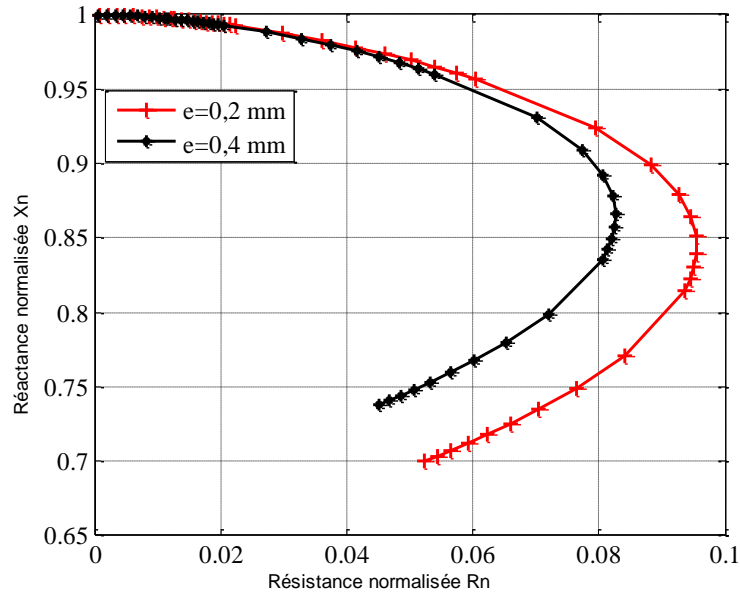


Figure II.13 - Diagramme d'impédance normalisée pour deux épaisseurs de revêtements [30]

La détermination de ces trajectoires pour un matériau quelconque est un problème relativement complexe qui a nécessité une modélisation complète du dispositif.

L'étude et la mesure des composantes de l'impédance des bobines inductrices sont à la base des progrès considérables réalisés dans les applications des courants de Foucault.

La modification de l'un ou de plusieurs des trois paramètres σ , μ et *lift-off* se traduit, dans le plan d'impédance complexe (R_n, X_n) , par un déplacement du point représentatif de la bobine.

II.7 Conclusion

- A travers cette approche, une modélisation en 2D éléments finis du système (bobine +matériau) a été réalisée.
- Le diagramme d'impédance normalisée a été tracé, ce diagramme sera confronté à un diagramme expérimental afin de valider le modèle développé.
- La méthodologie proposée peut être appliquée à différentes bobines et pour différents matériaux.

Chapitre III:
mesures
expérimentales

III. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le dispositif expérimental de mesure et les matériaux à inspecter, nous présentons l'appareillage de mesure (Lock-in amplifier) ainsi que le choix des paramètres opératoires. Nous traçons le diagramme d'impédance expérimental et nous le confrontons au diagramme d'impédance simulé afin de valider le modèle 2D éléments finis développé.

III.1 Protocol expérimental et matériaux utilisés

Des acquisitions ont été effectuées au sein du laboratoire de physique des matériaux de l'université de Laghouat, l'ensemble du matériel utilisé comprend :

- Le capteur (bobine) à noyau d'air
- Plaque en acier X70.
- Un Lock-in amplifier qui mesure la variation de la tension aux bornes du capteur.
- Un programme développé sur MATLAB pour avoir accès directement à l'impédance

Le montage expérimental est présenté dans la figure 3.1 et ces composants dans le tableau 3.1

1	Capteur à double fonction
2	Echantillon à inspecter
3	Lock-in amplifier
4	Interface de connexion
5	Fiche pour connecter la résistance
6	Fiche pour connecter la résistance et la bobine en même temps
7	Fiche pour connecter la bobine
8	Excitation de la bobine et la résistance
9	Mesure de la tension (V_{out}) aux bornes de la résistance et la bobine
10	Mesure de la tension (V_{in}) aux bornes de la résistance
11	PC de pilotage du Lock-in Amplifier

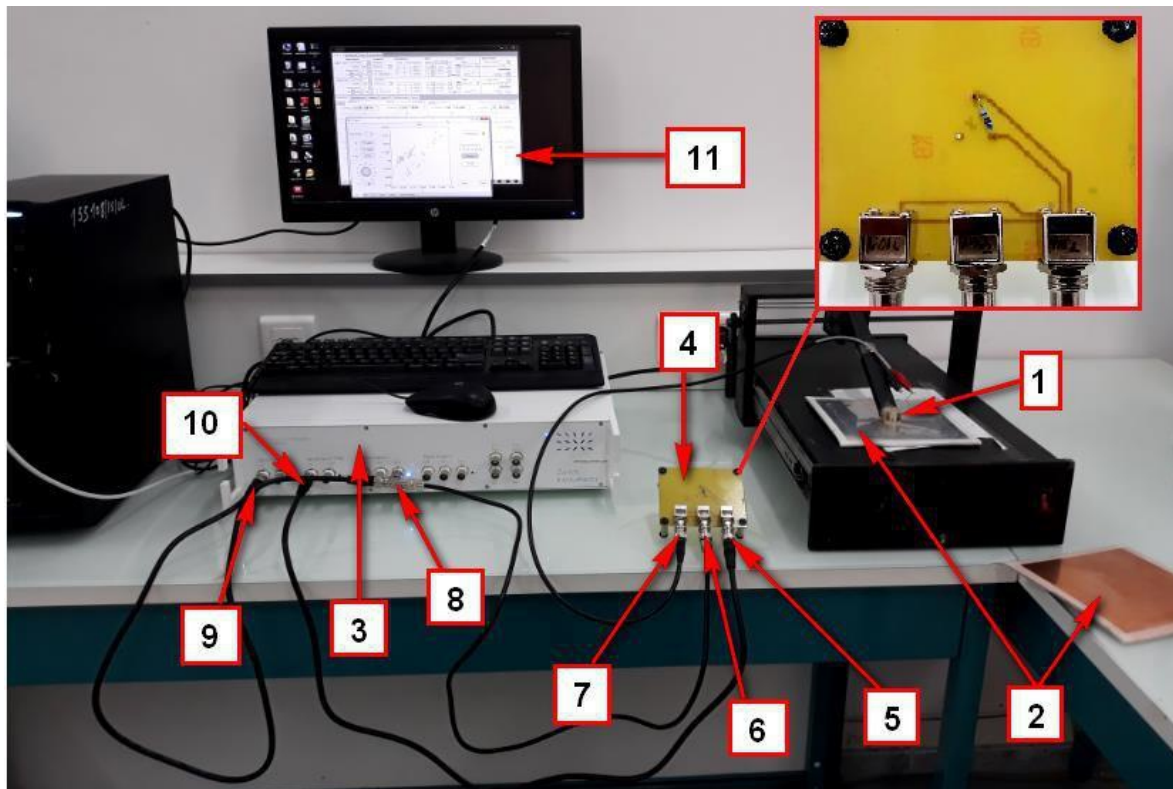


Figure 3.1 - Montage expérimental (banc d'essai)

III.1.1 Capteur

Un capteur ponctuel est utilisé dont l'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce et à double fonction (la bobine d'excitation sert aussi élément de mesure). C'est la même bobine qui a été utilisée dans la modélisation. Toutes les caractéristiques de la bobine sont données dans le tableau 3.2.


Bobine	Caractéristiques
	Diamètre extérieur : 4,5 mm Diamètre intérieur : 1 mm Hauteur : 1,5 mm Nombre de spires : 800 Epaisseur d'une couche : 0,07 mm Diamètre du fil : 0,06 mm Conductivité du fil : celle du cuivre Fréquence de résonance : $f_c = 717$ kHz

Tableau 3.1 : Caractéristiques de la bobine utilisée

III.1.2 Matériaux à inspecter

Nous avons choisi de travailler avec l'acier X70.

Longueur (cm)	Largeur (cm)	Epaisseur (cm)
5	4.7	1.7

III.1.3 Appareillage de mesure (Lock-in amplifieur)

La détection synchrone est utilisée pour traiter le signal. Très souvent, le signal est de très faible amplitude et de fréquence élevée et est noyé dans un bruit de mesure qui est, lui, de très basse fréquence. La détection va servir à déterminer l'amplitude du signal bien qu'il soit minime. L'amplitude de ce signal peut être de l'ordre des *nano Volts* et être détectée grâce à cette méthode. Pour pouvoir récupérer ce signal, il est isolé de toutes les autres fréquences et phases indésirables. Ainsi le bruit ne peut pas affecter la mesure. Pour pouvoir être isolé, il faut avoir une fréquence de référence. Pour réaliser cette mesure on utilise un amplificateur à détection synchrone ou « Lock-in amplifieur » (figure 3.2) afin d'extraire l'amplitude recherchée [31].



Figure 3.2- Lock-in Amplifier

III.2 Choix des paramètres opératoires

III.2.1 Les grandeurs exploitables

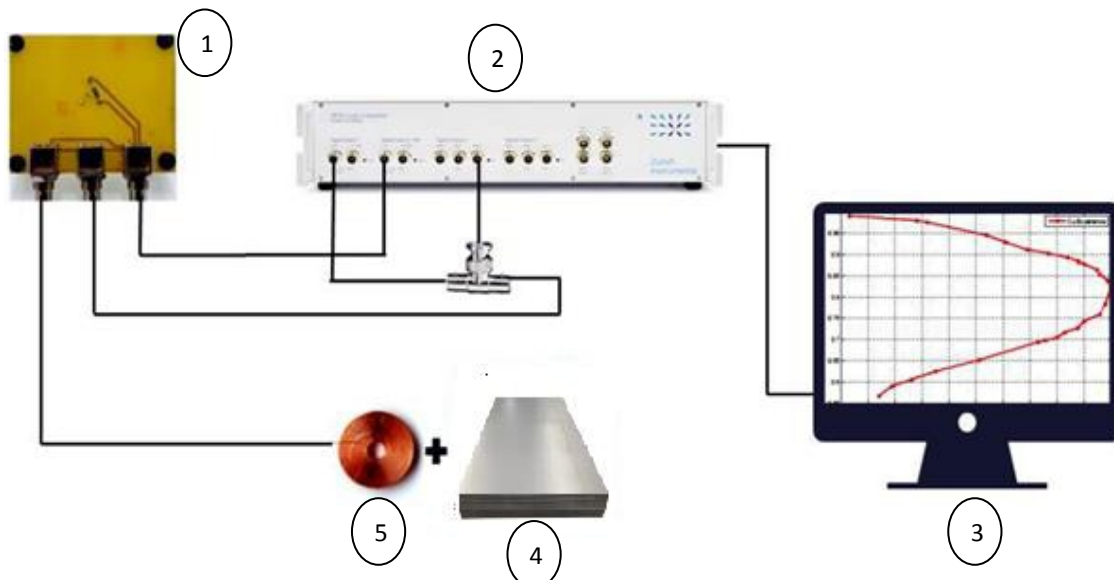
Notre choix s'est porté sur la mesure des deux composantes de l'impédance du système bobine/pièce, dans toutes nos expériences, nous caractériserons le signal de mesure par les deux paramètres : la résistance R et la réactance X de l'impédance Z .

III.2.2 Fréquence d'excitation

La fréquence de l'analyseur d'impédance peut être modifiée dans une gamme allant de 1Hz à 2,5MHz.

III.3 Méthode de mesure de l'impédance

L'amplificateur à détection synchrone ne donne pas la mesure directe de l'impédance de la bobine mais la tension aux bornes de celle-ci .Pour cela un programme établi sous MATLAB[21] est utilisé pour accéder directement à l'impédance du capteur comme s'est montré dans les figures 3.2 et 3.3 et les relations de base (3.1 à 3.6).



1-interface de connexion , 2-lock in-Amplifier, 3-PC de pilotage du lock in amplifieur
4-échantillon à inspecter ,5-capteur à double fonction

Figure 3.3- Détail du montage expérimental

Cette figure montre le montage détaillé du lock-in Amplifier, de l'interface de connexion et de la bobine, cette dernière est placée au dessus de l'échantillon de test.

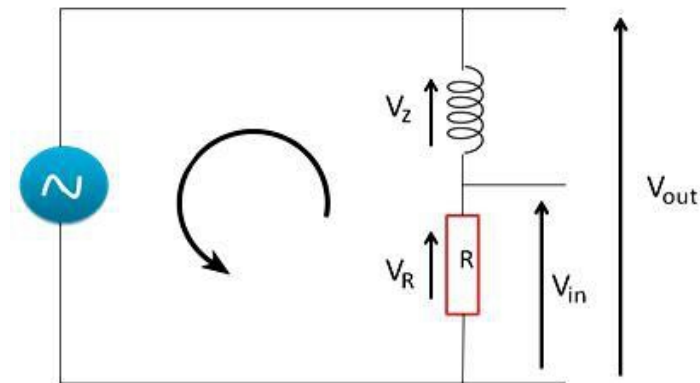


Figure 3.4 – Circuit électrique explicatif pour mesurer l'impédance Z du capteur.

III.3.1 Variation d'impédance et impédance normalisée :

$$Z = \frac{V_Z}{I} \quad (3.1)$$

$$V_R = V_{in} = R \cdot I \quad \text{ou} \quad I = \frac{V_R}{R} \quad (3.2)$$

$$Z = \frac{V_Z}{V_R} \cdot R = \frac{V_Z}{V_{in}} \cdot R \quad (3.3)$$

$$V_{out} = V_R + V_Z \quad (3.4)$$

$$V_Z = V_{out} - V_R \quad (3.5)$$

De (3.3) et (3.5), on obtient :

$$Z = \left(\frac{V_{out} - V_{in}}{V_{in}} \right) \cdot R \quad (3.6)$$

On utilise les définitions de la résistance et la réactance normalisées :

$$R_N = \frac{R - R_0}{X_0}$$

$$X_N = \frac{X}{X_0}$$

Les mesures de la variation d'impédance de la bobine en présence des échantillons de test et dans le vide nous permet de calculer l'impédance normalisée et de tracer le diagramme d'impédance normalisée.

III.3.2 Diagramme d'impédance normalisée

Pour une bobine donnée, toute variation de l'un de ces paramètres induit un déplacement du point représentatif de Z_n dans le plan d'impédance normalisée. Les figures 3.5 et 3.6 illustrent l'allure des trajectoires que décrit le point d'impédance de la bobine pour des variations de la fréquence d'excitation.

Le plan d'impédance normalisé est le tracé de $X_N = f(R_N)$

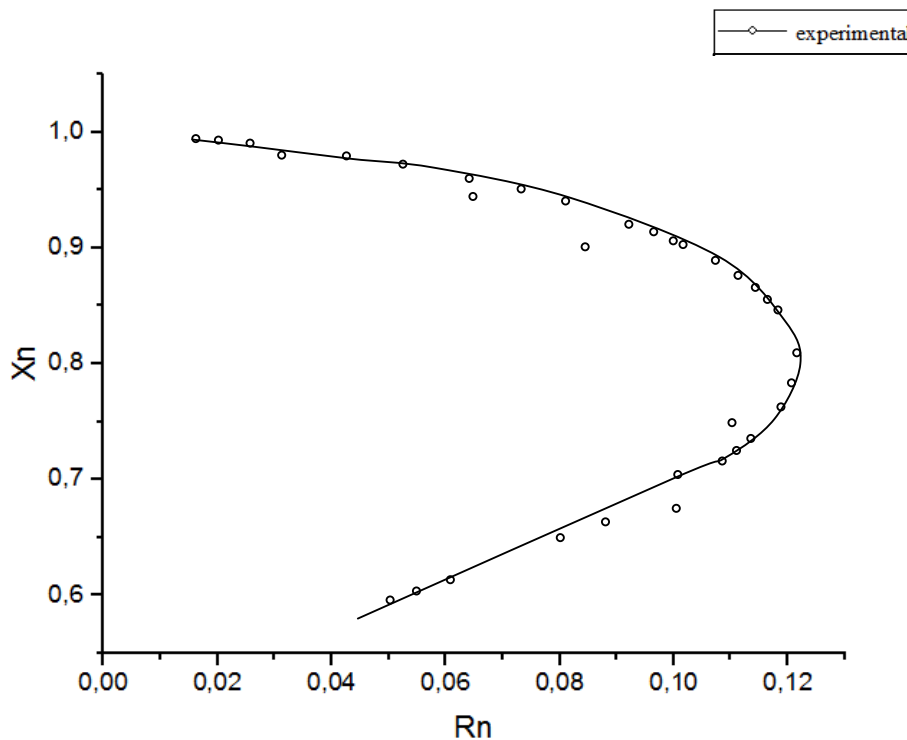


Figure 3.5 - Diagramme d'impédance normalisée expérimental de la plaque en acier.

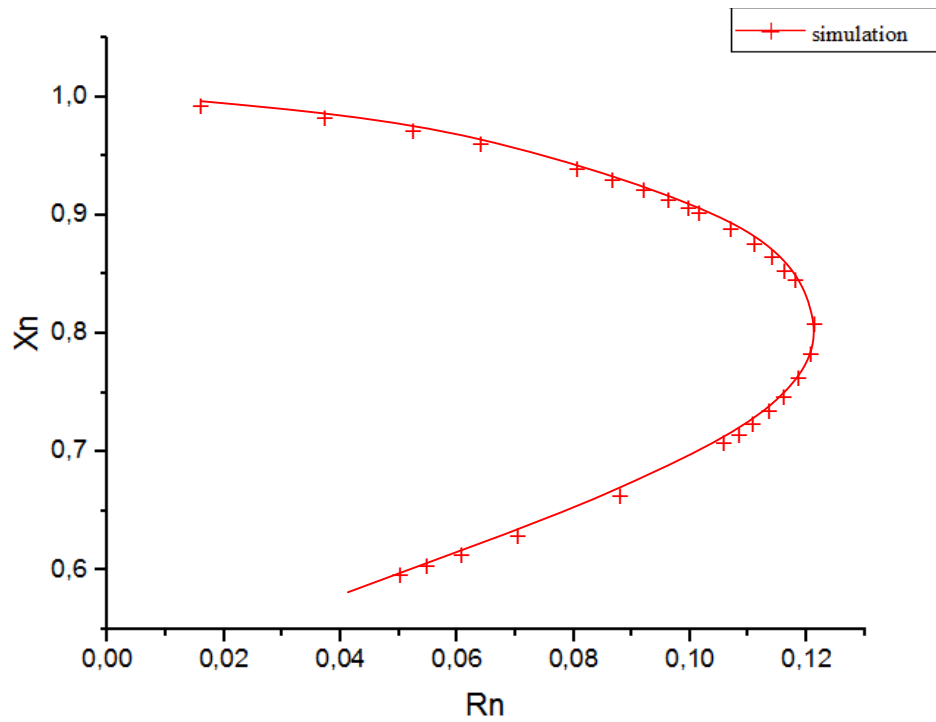


Figure 3.6 - Diagramme d'impédance normalisée simulé de la plaque en acier.

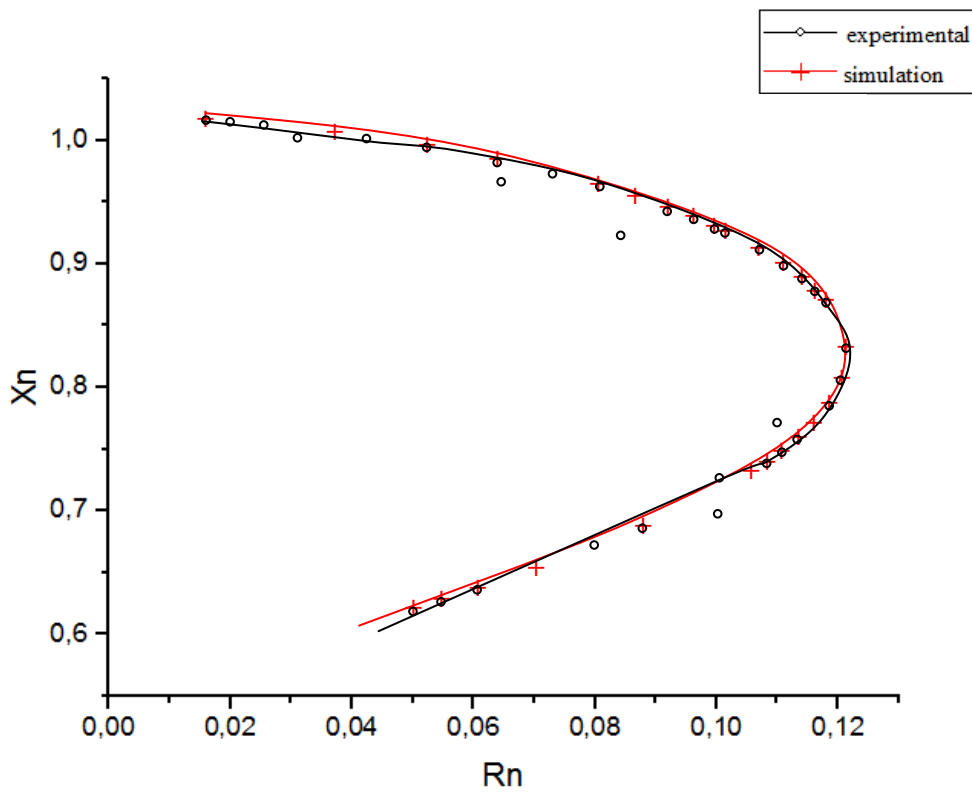


Figure 3.7- Plans d'impédance normalisée comparatifs de la plaque en acier.

Chapitre III :Procédure expérimentale et validation

Nous remarquons une grande concordance des diagrammes d'impédances normalisé expérimental et simulé ce qui valide le modèle développé

III.4 Conclusion

- Le Lock-in-Amplifier nous a permis d'obtenir le diagramme d'impédance normalisé expérimental pour notre échantillon.
- Le diagramme d'impédance simulé qui a été obtenu à partir du modèle direct a été confronté au diagramme expérimental.
- Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre ces diagrammes.
- Ces résultats valident ainsi le modèle direct développé.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail, nous avons abordé une étude sur les matériaux magnétiques dans le cadre du contrôle non destructif (CND) pour une modélisation et une caractérisation de l'acier X70.

Nous pouvons ainsi tirer les conclusions suivantes :

- Une modélisation en 2D éléments finis du système (bobine +matériau) a été réalisée.
- Le diagramme d'impédance normalisée a été tracé, ce diagramme est confronté à un diagramme expérimental afin de valider le modèle développé.
- La méthodologie proposée peut être appliquée à différentes bobines et pour différents matériaux.
- Une campagne expérimentale a l'aide du Lock-in-Amplifier qui nous a permis d'obtenir le diagramme d'impédance normalisé expérimental pour l'acier X70 étudié.
- Le diagramme d'impédance simulé obtenu à partir du modèle direct a été confronté au diagramme expérimental.
- Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre ces diagrammes.
- Ces résultats valident ainsi le modèle direct développé.

En termes de perspectives, nous visons à :

- } Perfectionner la méthode en utilisant un analyseur d'impédance de précision.
- } Aborder d'autres matériaux ferromagnétiques

Références bibliographiques

- [1] **DELABELLE .J.**, "*Cahier technique n° 149 : la compatibilité électromagnétique*", Schneider Electric, CT 149, édition décembre 2001.
- [2] **HACHI Dahmane**, *Evaluation Non Destructive des propriétés physiques et géométriques des tôles par Courants de Foucault Pulsés*. Mémoire de Magister, ECOLE MILITAIRE POLYTECHNIQUE, JUIN 2009.
- [3] **BENHADDA .Nabil**, *Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault*, Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar Batna, Septembre 2006.
- [4] **THOLLON, F.**, *Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques*, 1995, Thèse de Doctorat, l'école centrale de Lyon.
- [5] **RAVAT, C.**, *Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif*, 2008, Thèse de Doctorat, l'université Paris Sud-Paris XI.
- [6] **LAKHDARI, A.-E.**, *Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : application a la detection des fissures*, 2011, thèse de Université Mohamed Khider-Biskra.
- [7] **ZEMOURI, N.**, *Etude et Réalisation d'un Système Multicapteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs*, 2016, Thèse de magister, l'université Mouloud Mammeri.
- [8] **HELIFA, B.**, *Contribution à la Simulation du CND par Courants de Foucault en vue de la Caractérisation des Fissures Débouchantes*, 2012, Thèse de doctorat l'université de Nantes.
- [9] **DOIRAT, V.**, *Contribution à la modélisation de systèmes de Contrôles Non Destructifs par Courants de Foucault. Application à la caractérisation physique et dimensionnelle de matériaux de l'aéronautique*, 2007, Thèse de Doctorat Université de Nantes.
- [10] **SANTANDREA, L. and Y. Le Bihan**. *Using COMSOL-multiphysics in an eddy current non-destructive testing context*. in Proceedings of the COMSOL Conference. Paris 2010.

Références bibliographiques

- [11] **ZERGUINI, S.**, *Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault*. Thèse de doctorat, université de Constantine 2009.
- [12] **H. Hashizume, Y. Yamada, K. Miya, S. Toda, K. Morimoto, Y. Araki, K. Satake, N. Shimizu**, *Numerical And Experimental Analysis Of Eddy Current Testing For A Tube With Cracks*, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 28, N0.2, March 1992, pp. 1469-1472
- [13] **B. Helifa, A. Oulhadj, A. Benbelghit, I.K. Lefkaier, F. Boubenider, D. Boutassouna**, *Detection and measurement of surface cracks in ferromagnetic materials using eddy current testing*, NDT&E International, Elsevier, Vol. 39, Issue 1, March 2006, pp.384-390.
- [14] **Abdelli, D.E.**, *Modélisation par les volumes finis d'un problème de contrôle non destructif de forme complexe*, 2014, thèse de doctorat l'université Mohamed Khider Biskra.
- [15] **Bensetti, M., et al.**, *Adaptive mesh refinement and probe signal calculation in eddy current NDT by complementary formulations*. IEEE Transactions on Magnetics, 2008. **44**(6): p. 1646-1649.
- [16] **Choua, Y.**, *Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault*, 2009, thèse de doctorat l'université Paris Sud-Paris XI.
- [17] **Dinda, P.T. and P. Mathey**, *Electromagnétisme: Ondes et propagation guidée*. DUNOD ed, ed. E.d. SAVOIRS 2017.
- [18] **BOUCHALA, T.**, *Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault.- Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite –*, Département de l'électrotechnique, 2008, thèse de doctorat , université Elhadj Lakhder Batna.
- [19] **Bensaid, S.**, *Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes*, 2006, thèse de doctorat l'université de Nantes.
- [20] **Biro, O. and K. Preis**, *On the use of the magnetic vector potential in the finite-element analysis of three-dimensional eddy currents*. IEEE Transactions on Magnetics, 1989. **25**(4): p. 3145-3159.

Références bibliographiques

- [21] **C.B.salah**, *Identification et localisation des défauts dans un matériau conducteur en CND par courants de Foucault*, in *Physique* 2018, Ecole nationale supérieure de Laghouat.
- [22] **Hamel, M.**, *Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques*, 2012, thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri.
- [23] **Belkhiri, Y.**, *Modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécaniques couplés par la méthode des volumes finis (CVM)*, 2005, thèse de doctorat, l'université de Batna 2-Mustafa Ben Boulaid.
- [24] **Oukhellou, L.**, *Paramétrisation et classification des signaux en Contrôle non destructif. Application à la reconnaissance des défauts de Rails par courant de Foucault*, 1997, thèse de doctorat, Université de Paris-Sud.
- [25] **K. Mohamed**, " *Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif* ", Mémoire de magister, Université de Constantine, 2007.
- [26] **Jianming Jin**, " *The Finite Element Method in Electromagnetics* ", 2ed., ISBN: 0-471-43818-9, John Wiley & Sons, 2002.
- [27] **Yann LE BIHAN**, *Conception et caractérisation d'un dispositif à courants de Foucault pour l'évaluation non destructive de l'épaisseur de paroi d'aubes de turbines creuses*, Thèse de doctorat, Ecole Normale supérieure de Cachan, 2000
- [28] **L. Oukhellou**, *Paramétrisation et classification de Signaux en Contrôle Non Destructif : application à la reconnaissance des défauts de Rails par courants de Foucault*, Thèse université de Paris-sud, France, 1997.
- [29] **Yahya Choua**, *Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault*, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, 2009.
- [30] **Bachir HELIFA**, « *Contribuatiion a la simulation du CND par courants de foucault en en vue de la caractérisation des fissure débouchant* ». Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes 2012.
- [31] **TITOUAH Lounis, Z.A.**, *Caractérisation Non Destructive par Courants de Foucault Pulsés d'une rainure par inversion associé à méthode des circuits électriques couplés.*, mémoire de master in DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE 2014, UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA.