

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 ثليجي 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 :

KECIBA Amina

THEME

Modélisation d'un système de contrôle par méthode électromagnétique

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

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

Pr
MAA
MAA
MCA

*Président
Examineur
Examineur
Rapporteur*

2018- 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَقَدْ

رَزَقْنِي مِنْهَا

*A la mémoire de mon grand-père qui ma pris la main la
première fois à la voie du savoir*

A mes très chers parents

A ma chère sœur

A mon cher frère

A ma belle grande famille

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 que pour ces qualités humaine, avec sa grande rigueur scientifique et ces remarques toujours utiles, j' ai beaucoup appris en travaillant avec lui.

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 mon jury de soutenance

Messieurs **Ismail NOUIOUA** maître assistant class A à l'université de Laghouat, **Saïd MAABAD** maître assistant class A à l'université de Laghouat

Mes remerciements vont aussi à tous les membres du laboratoire pour les encouragements qu'ils n'ont cessé de me prodiguer, en particulier Mme. **Safia KHELFI** pour son aide durant la préparation de ce travail, je l'a remercie également pour tous les conseils qu'elle m'a apporté

J'exprime également mes sincères remerciements au personnel de la bibliothèque de la faculté de science et technologie de l'université de Ammar Thleidji 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, tant à l'intérieur du laboratoire qu'à l'extérieur, trop nombreux pour être cités de peur d'en oublier certains.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Introduction générale.....	1
I. Contrôle non destructif par courants de Foucault.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Approche du phénomène physique	3
I.3 Contrôle non destructif par courants de Foucault	3
I.3.1 Objectifs du Contrôle Non Destructif	3
I.3.2 Procédure de CND	4
I.3.3 Les techniques de CND	4
I.3.4 Comparaison des techniques de CND	4
I.4 Techniques et instrumentations.....	5
I.4.1 Courants de Foucault sinusoïdaux et courants de Foucault pulsés	5
I.4.2 Appareils mono et multi-paramètres	5
I.4.3 Signaux d'excitation et exploitation	6
I.4.4 Éléments de mesure.....	6
I.5 Génération de courants de Foucault dans une pièce conductrice.....	8
I.5.1 Profondeur de pénétration et effet de peau	9
I.5.2 Variation d'impédance	10
I.5.3 Impédance normalisée et plan d'impédance normalisé	10
I.6 Caractérisation électromagnétique : identification de la conductivité électrique du matériau.....	11
I.7 Principaux paramètres influant le contrôle	12
I.8 Champ d'application du CND par CF	12
I.9 Avantages du CND par courants de Foucault.....	13
I.10 Limites du CND par courants de Foucault	13
I.11 Conclusion	13

II.	Modèles mathématique et modélisation.....	14
II.1	Introduction.....	14
II.2	Problématique – Système modélisé.....	14
II.3	Mise en Equations	15
II.3.1	Equations de Maxwell	15
II.3.2	Comportement des matériaux	16
II.3.3	Hypothèses simplificatrices	17
II.3.4	Formulation magnétodynamique	18
II.3.5	Conditions de continuité.....	20
II.3.6	Conditions aux limites.....	21
II.3.7	Courants de Foucault.....	21
II.3.8	Profondeur de pénétration électromagnétique	22
II.4	Résolution numériques basés sur les éléments finis.....	23
II.4.1	Discretisation géométrique	23
II.4.2	Approximation par la MEF.....	25
II.5	Modèle direct et modèle inverse	27
	Modèle direct.....	27
	Modèle inverse	27
II.6	Simulation du CND par CF	28
II.6.1	Logiciel COMSOL Multiphysics	28
II.6.2	Développement du modèle direct.....	29
II.6.3	Génération de maillage et simulation.....	30
II.6.4	Résultat en termes d'induction magnétique et densité de courant	31
II.6.5	Résultats en termes de variation d'impédance	32
II.7	Conclusion	36
III.	Procédures expérimentales.....	37
III.1	Introduction	37
III.2	Protocol expérimental et matériaux utilisés	37
III.2.1	Le capteur (bobine)	38
III.2.2	Matériaux à inspecter	39
III.2.3	Appareillage de mesure (Lock-in amplifier)	39
III.3	Choix des paramètres opératoires.....	40

Table des matières

III.3.1	Les grandeurs exploitables	40
III.3.2	Fréquence d'excitation	40
III.4	Méthode de mesure de l'impédance	40
III.4.1	Variation d'impédance et impédance normalisée	41
III.4.2	Diagramme d'impédance normalisée	42
III.5	Conclusion.....	44
IV.	Traitement du probleme inverse	45
IV.1	Introduction	45
IV.2	Problème Inverse	45
IV.3	Problèmes « mal posés » et régularisation	45
IV.4	Méthode d'optimisation de type « simplexe »	46
IV.5	Stratégie de traitement du problème inverse	46
IV.6	Estimation d'une grandeur par la méthode du problème inverse	48
IV.6.1	Identification de deux paramètres : conductivité et Lift-off.....	48
IV.7	Conclusion.....	52
IV.8	Conclusion générale et perspectives	53
V.	Références bibliographiques	55



Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Comparaison des techniques de CND

Tableau 2.1 : Paramètres du dispositif de CND

Tableau 3.1 : Composants du montage expérimental

Tableau 3.2 : Caractéristiques de la bobine utilisée

Tableau 3.3 : Caractéristiques des pièces conductrices

Figure 1.1 - Schéma générale d'un système CND.....	4
Figure 1.2 - Bobine encerclant (a) à 3D, (b) à 2D.....	7
Figure 1.3- Bobine à noyau d'air (a) à 3D (b) à 2D.....	7
Figure 1.4 - Bobine interne	7
Figure 1.5 - Génération des courants de Foucault dans un matériau conducteur.....	8
Figure 1.6 - Variation de l'amplitude de la densité des courants de Foucault	9
Figure 1.7 - Principe de la variation d'impédance d'une bobine suite à la génération de courants de Foucault.....	10
Figure 1.8 Impédance normalisée pour des variations d'épaisseur et de lift-off	11
Figure 2.1- Schéma de principe des problèmes électromagnétiques des matériaux non magnétiques.....	14
Figure 2.2 - Couplage entre les phénomènes électriques et magnétiques	16
Figure 2.3 - Interface entre deux milieux	20
Figure 2.4 - Schéma du maillage triangulaire	24
Figure 2.5 - Schéma du maillage tétraédrique	24
Figure 2.6 - Géométrie et maillage réalisés par COMSOL	24
Figure 2.7 - Mise en oeuvre de la simulation éléments finis	26
Figure 2.8 - Schéma général d'un modèle direct	27
Figure 2.9 - Schéma fonctionnel d'un système de CND.	27
Figure 2.10 - plateforme COMSOL multiphysics	28
Figure 2.11 - fonctions de modélisation du module AC/DC	28
Figure 2.12 - Système magnétodynamique du dispositif étudié	30
Figure 2.13 - Maillage du système sous COMSOL	30
Figure 2.14 : Induction magnétique calculé par COMSOL	31

Liste des figures

Figure 2.15 : Courants de Foucault par COMSOL	31
Figure 2.16 - Diagramme d'impédance normalisé de la plaque en aluminium par COMSOL.....	32
Figure 2.17 : Diagramme d'impédance normalisé de la plaque de cuivre	33
Figure 2.18 - Effet du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée	34
Figure 2.19 - Effet de la conductivité sur le diagramme d'impédance normalisée.....	35
Figure 3.1 - Montage expérimental (banc d'essai)	38
Figure 3.2- Lock-in Amplifier	40
Figure 3.3- Détail du montage expérimental	41
Figure 3.4 - électrique explicatif pour mesurer l'impédance Z du capteur	41
Figure 3.5 - Diagramme d'impédance normalisée expérimental de la plaque d'Aluminium.....	42
Figure 3.6 - Diagramme d'impédance normalisée expérimental de la plaque de Cuivre.....	42
Figure 3.7- Plans d'impédance normalisée comparatifs de la plaque en Aluminium	43
Figure 3.8 - Plans d'impédance normalisée comparatifs de la plaque en Cuivre	43
Figure 4.1 - Schéma général d'un modèle d'inversion de CND-CF	46
Figure 4.2 - Algorithme itératif de minimisation de fonction objectif	47
Figure 4.3 - Evolution du lift-off estimée en fonction des itérations	48
Figure 4.4 Evolution de la conductivité de la plaque en Al estimée en fonction des itérations....	49
Figure 4.5- Evolution de la fonction objectif en fonction des itérations pour la plaque en Al	49
Figure 4.6-Diagramme d'impédance normalisée calculé et mesuré pour la plaque en Al	50
Figure 4.7- Evolution du lift-off de la plaque en Cu estimée en fonction des itérations	50
Figure 4.8-Evolution de la conductivité de la plaque en Cu estimée en fonction des itérations...	51
Figure 4.9-Evolution de la fonction objectif en fonction des itérations pour la plaque en Cu	51
Figure 4.10- Diagramme d'impédance normalisée calculé et mesuré pour la plaque en Cu	52

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/m ²)
J	Densité de courant.	(A/m ²)
A	Potentiel Vecteur magnétique.	(T.m).
V	Potentiel scalaire électrique.	(V)
J	Densité de courant électrique.	A/m ²
J_s	Densité de courant électrique de la source.	A/m ²
ρ	Densité volumique des charges électriques	C/m ³

Constantes et paramètres

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

Nomenclature

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

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 Cuivre ou en Aluminium 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

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 quatre 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 ainsi que l'effet de la conductivité et l'épaisseur de revêtement (lift-off) sur le diagramme d'impédance normalisée.

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, aussi les résultats obtenus sont utilisés pour le traitement des problèmes inverse.

Le quatrième chapitre vient compléter le chapitre précédent, car il se consacre à l'identification de grandeurs physiques essentielles pour la modélisation des matériaux, en l'occurrence la conductivité électrique et le lift-off (ou épaisseur de revêtement), ces grandeurs ne sont généralement pas connues dans le cas réel. Ainsi, une modélisation 2D éléments finis et une inversion des données par algorithme type simplex via des mesures d'impédance en multifréquence nous permettent de remonter aux grandeurs inconnues. Nous terminons ce travail par une conclusion générale et perspectives.

CHAPITRE 1

Contrôle non destructif
par courants de
Foucault

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 Cuivre ou en Aluminium 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

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 quatre 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 ainsi que l'effet de la conductivité et l'épaisseur de revêtement (lift-off) sur le diagramme d'impédance normalisée.

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, aussi les résultats obtenus sont utilisés pour le traitement des problèmes inverse.

Le quatrième chapitre vient compléter le chapitre précédent, car il se consacre à l'identification de grandeurs physiques essentielles pour la modélisation des matériaux, en l'occurrence la conductivité électrique et le lift-off (ou épaisseur de revêtement), ces grandeurs ne sont généralement pas connues dans le cas réel. Ainsi, une modélisation 2D éléments finis et une inversion des données par algorithme type simplex via des mesures d'impédance en multifréquence nous permettent de remonter aux grandeurs inconnues. Nous terminons ce travail par une conclusion générale et perspectives.

I.1 Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation

Dans ce chapitre, nous présentons, d'une manière non exhaustive, les différentes méthodes de CND et particulièrement celle utilisant les courants de Foucault, les modes d'excitation, les principaux paramètres influant l'inspection, et on terminera par présenter la caractérisation électromagnétique, il s'agit de l'identification conductivité électrique d'un matériau.

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 [1].

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 [2]:

- **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.

1 Contrôle non destructif par courants de Foucault

I.3.2 Procédure de CND

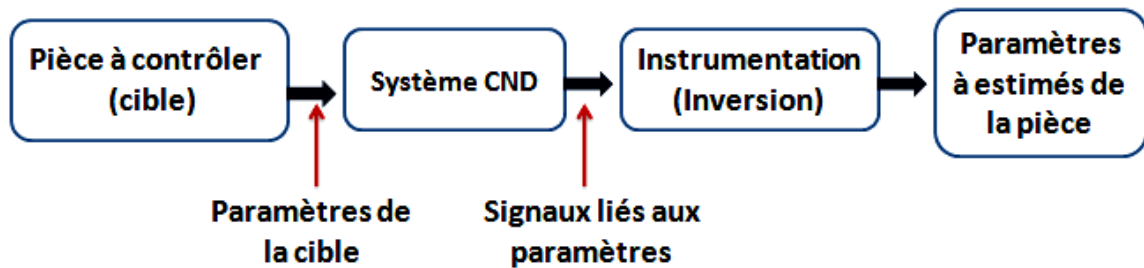


Figure 1.1 - Schéma générale d'un système CND

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 [3].

I.3.3 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.

1 Contrôle non destructif par courants de Foucault

I.3.4 Comparaison des techniques de CND

Tableau 1.1- Comparaison des techniques de CND [4]

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

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 [5].

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.

1 Contrôle non destructif par courants de Foucault

- **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 [4,5]:

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,... etc

1 Contrôle non destructif par courants de Foucault



Figure 1.2- 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.

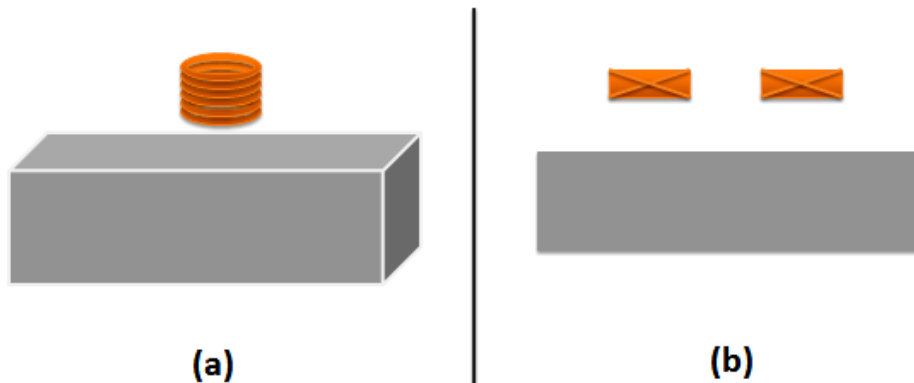


Figure 1.3 - Bobine à noyau d'air (a) à 3D (b) à 2D

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

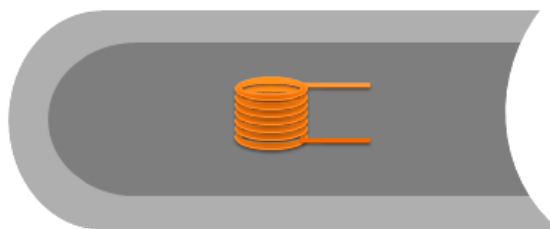


Figure 1.4 - Bobine interne

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 [4].

1 Contrôle non destructif par courants de Foucault

- **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 [5].

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 excitateur) génère de tels courants induits au sein de la pièce [5]

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.

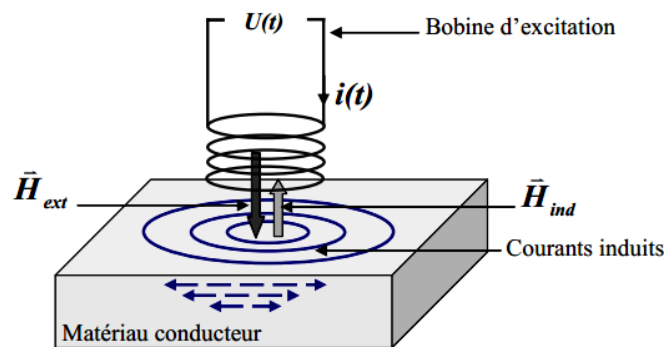


Figure 1.5 - Génération des courants de Foucault dans un matériau conducteur

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 ;
- de la conductivité électrique σ ;
- de la perméabilité magnétique μ du matériau ;
- d'éventuels défauts superficiels tels que fissures, hétérogénéités chimiques ou microstructurales,...

1 Contrôle non destructif par courants de Foucault

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 [4-7] :

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

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 [8].

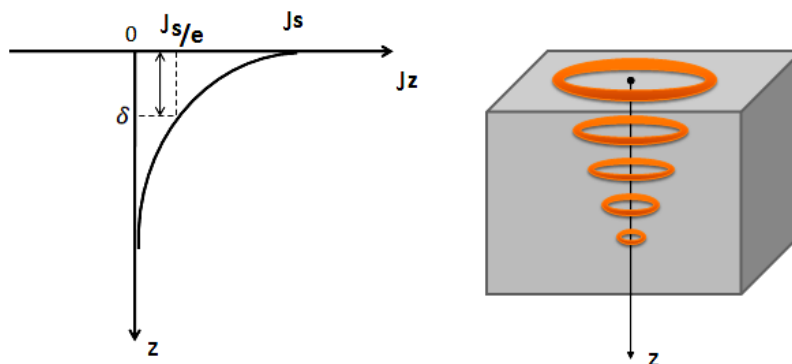


Figure 1.6 - Variation de l'amplitude de la densité des courants de Foucault

1 Contrôle non destructif par 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 [4].

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 [6] [7].

Dans la figure 1.7, est présentée le principe de la variation d'impédance d'une bobine.

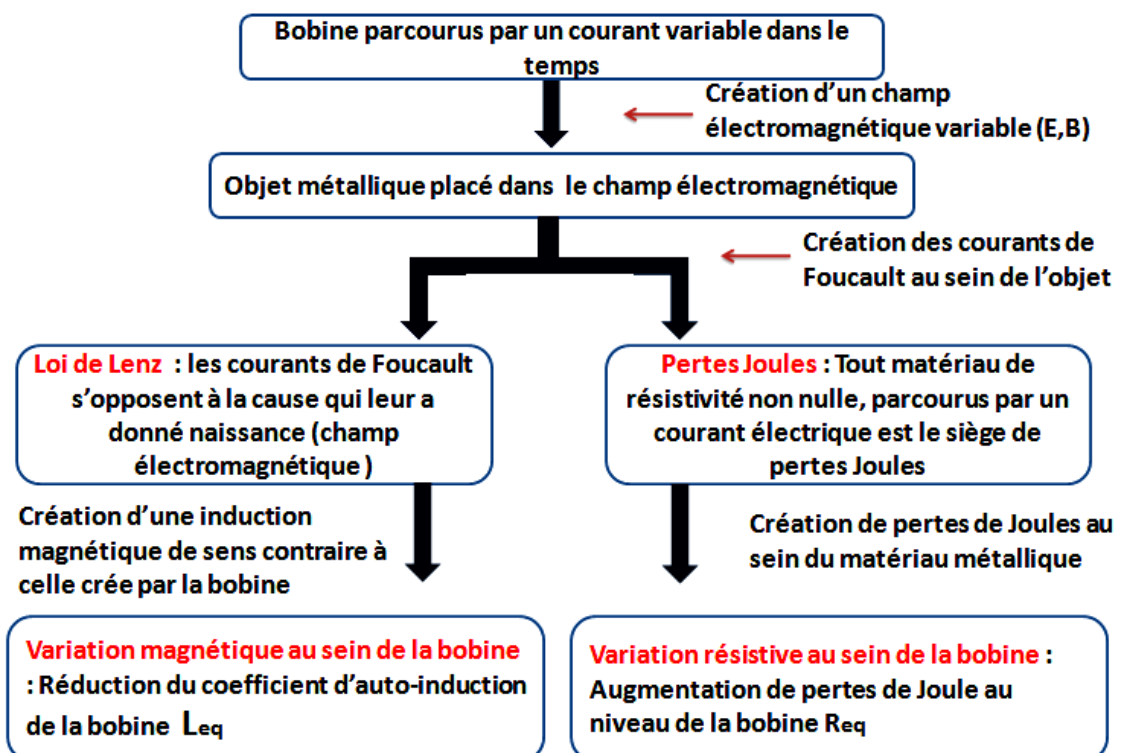


Figure 1.7- Principe de la variation d'impédance d'une bobine suite à la génération de courants de Foucault

1 Contrôle non destructif par courants de Foucault

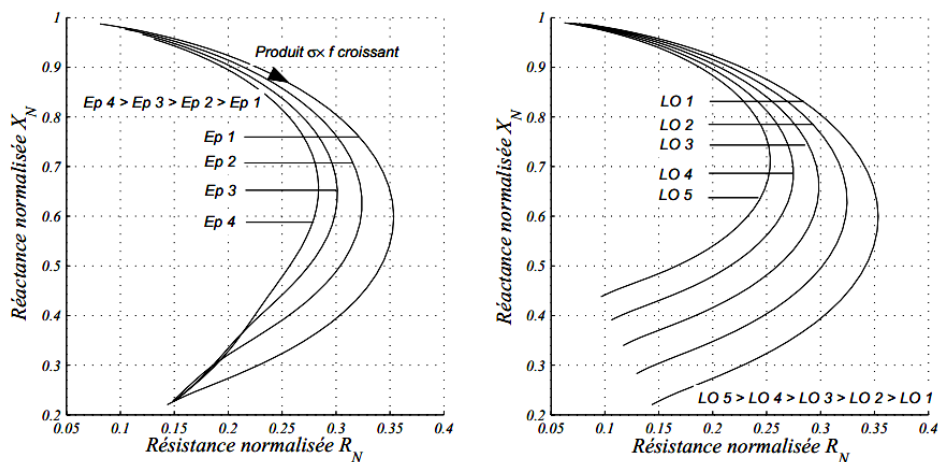
Le diagramme d'impédance est une représentation dans un plan complexe de l'impédance d'un enroulement. Inspecter un matériau, cela revient à examiner l'impédance complexe Z du capteur en interaction avec la cible.

Les courbes représentant les paramètres influents dans le plan de l'impédance peuvent être normalisées dans une courbe standard appelée le 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 Z_0 pour avoir une impédance dite normalisée Z_n .

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 1.8).



(a) Variation de l'épaisseur de la pièce

(b) Variation du lift-off (LO)

Figure 1.8 : Impédance normalisée pour des variations d'épaisseur et de lift-off [6]

I.6 Caractérisation électromagnétique : identification de la conductivité électrique du matériau

La conductivité électrique est l'aptitude d'un matériau ou d'une solution à laisser les charges électriques se déplacer librement ; ce qui permettra le passage du courant électrique. D'autre part, la conductivité électrique est l'inverse de la résistivité. Elle correspond à la conductance d'une portion de matériau de 1 m de longueur et de 1 m² de section [8].

1 Contrôle non destructif par courants de Foucault

Le développement des courants de Foucault est lié à la conductivité électrique σ , l'impédance d'une bobine plate de courant de Foucault sera mesurée dans une gamme de fréquences de 50 Hz à 100 kHz. Puis des corrections seront faites du fait que la bobine n'est pas un inducteur pur, mais expose finie résistance et la capacité dans et entre les enroulements. Ensuite, la conductivité des plaques en Cuivre et en Aluminium est déterminée avec une incertitude de 3 et 2% entre les mesures expérimentales et les valeurs calculées théoriquement. L'erreur résiduelle dans le processus d'ajustement s'est révélé être le principal indicateur d'incertitude mesure de conductivité[9].

I.7 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 [3].

- **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'elles masqueront 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.8 Champ d'application du CND par CF

Le CND s'applique, en général, dans les industries à fiabilité élevée [8]. On peut citer:

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

1 **Contrôle non destructif par courants de Foucault**

I.9 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.10 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.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit quelques notions sur la création des courants de Foucault et le principe du capteur inductif. Ensuite on a passé en revue 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. Egalement sont décrits la forme et la profondeur de pénétration des courants induits, la détermination de l'impédance du capteur, le champ d'application, les avantages et les limites du CND par CF et les principaux paramètres influant sur l'inspection.

CHAPITRE 2

Modèles mathématiques et modélisation

II.1 Introduction

Lors de la réalisation 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, multiplication du nombre d'essais ou encore coût de fabrication d'un prototype de test , 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.2 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 non 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 [6, 10, 11]

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

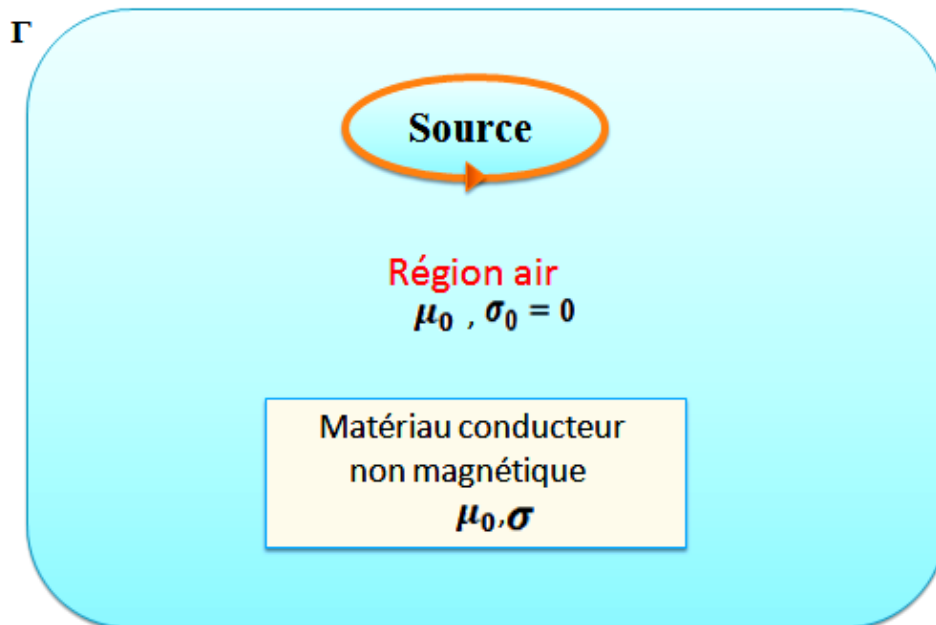


Figure 2.1- Schéma de principe des problèmes électromagnétiques des matériaux non magnétiques

II.3 Mise en Equations

II.3.1 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 [12]:

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

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2.1)$$

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.

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

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

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

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

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

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{B} = \mu \vec{j} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.4)$$

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]

2 Modèles mathématique et modélisation

Le schéma de la figure 2.2 illustre le couplage entre les phénomènes électriques et magnétiques [13], que Maxwell a pu réunir sous une même théorie dite «Electromagnétisme».

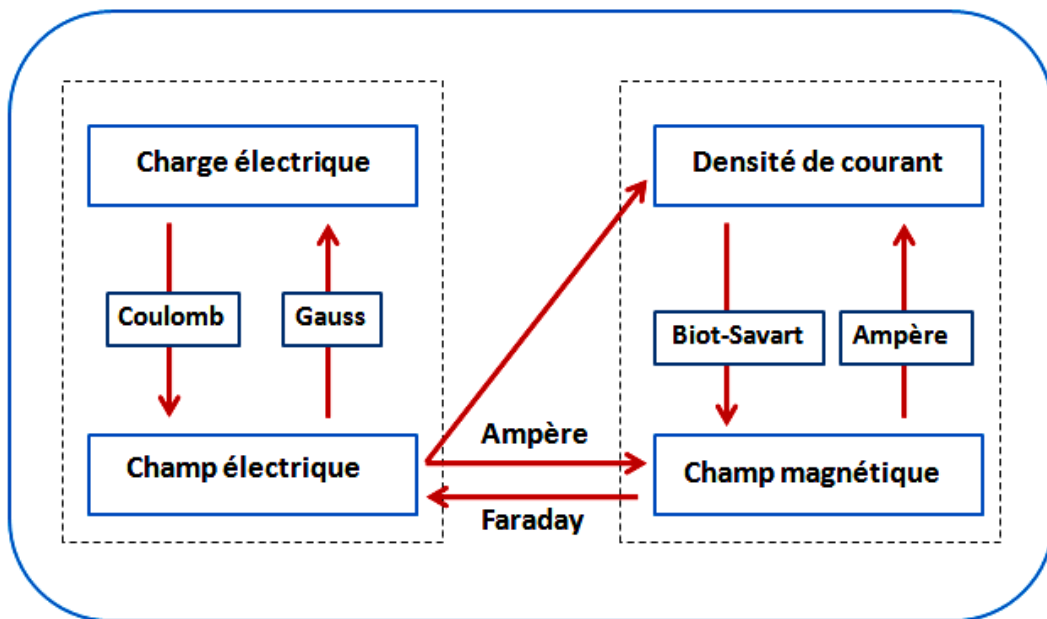


Figure 2.2- Couplage entre les phénomènes électriques et magnétiques

II.3.2 Comportement des matériaux

Pour définir complètement le phénomène électromagnétique, on ajoute aux équations précédentes les lois de comportement du milieu linéaire [14] [5], 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

μ : Perméabilité magnétiques.

ε : Perméabilité électrique

Méthodologie

Les équations de Maxwell offrent un cadre mathématique permettant la détermination du champ électromagnétique, par deux méthodes distinctes [5] [12]:

- 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.
- 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.3.3 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 [9, 13]:

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

Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité σE peut être décomposée en une partie imposée J_s (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit [9] [5], pour laquelle on gardera la notation σE qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault :

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

II.3.4 Formulation magnétodynamique

II.3.4.1 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 [12]:

$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \overrightarrow{rot} \vec{A}}{\partial t} = \overrightarrow{rot} \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$ 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

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

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

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.3.4.2 Transformation de Jauge

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

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

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 \vec{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.3.4.3 Relations en potentiels AV du model magnétodynamique

Avec les hypothèses précédentes, les équations à résoudre sont :

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

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

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

En combinant les équations (2.8) (2.10) (2.11), L'équation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire électrique s'écrit[5] [15] :

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

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

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

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[9] [1] [16]:

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

Cette jauge est généralement introduite par pénalité en ajoutant le terme :

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

Nous obtenons le système d'équations électromagnétique symétrique à résoudre, dit formulation \vec{A} -V [5] :

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

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

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 jauges.

II.3.5 Conditions de continuité

Les champs électromagnétiques subissent des discontinuités lors du passage entre deux milieux de propriétés physiques différentes (Figure 2.2). 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 :

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \times \vec{n} = J_{sur} \quad (2.22)$$

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

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.23)$$

- Continuité de la composante tangentielle du champ électrique.

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = 0 \quad (2.24)$$

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

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_{sur} \quad (2.25)$$

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.

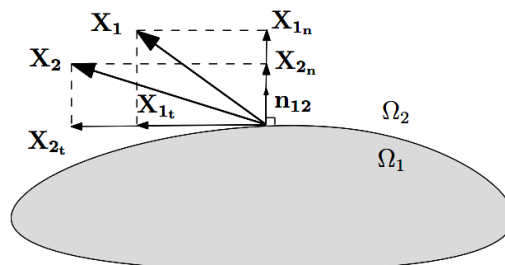


Figure 2.3 - Interface entre deux milieux

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.3.6 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 (2.20), soit normale à la surface (2.21) ce qui traduit :

- Condition de Dirichlet homogène $u \cdot \vec{n} = 0$ (2.20)

- Condition de Neumann homogène $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ (2.21)

II.3.7 Courants de Foucault

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

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

De même pour ρ , \vec{E} , \vec{B} :

$$\rho = \rho_0 \exp(j\omega t) \quad (2.23)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(j\omega t) \quad (2.24)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \exp(j\omega t) \quad (2.25)$$

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 (2.22 à 2.25), les équations de Maxwell réécrivent [3]:

$$\varepsilon \operatorname{div} \vec{E}_0 = \rho_0 \quad (2.26)$$

$$\operatorname{div} \vec{B}_0 = 0 \quad (2.27)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}_0 + j\omega \vec{B}_0 = \vec{0} \quad (2.28)$$

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\vec{B}_0) - j\omega \varepsilon \vec{E}_0 - \sigma \vec{E}_0 = \vec{J}_s \quad (2.29)$$

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

$$\varepsilon \operatorname{div} \vec{E} = \rho \quad (2.26)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.27)$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} + j\omega \vec{B} = \vec{0} \quad (2.28)$$

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

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 (2.29) se réécrit :

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\vec{B}) - \sigma \vec{E} = \vec{J}_s \quad (2.30)$$

II.3.8 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 [5] [6]

En combinant (2.26) et (2.28) et en utilisant (2.30) avec $\rho = 0$ (en tout point, le système est électriquement neutre), on obtient :

$$\Delta \vec{E} - j\omega \mu \sigma \vec{E} = j\omega \mu \vec{J}_s \quad (2.31)$$

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

$$J = J_s \exp\left[-\frac{z}{\delta}\right] \cos\left[\omega t - \frac{z}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right] \quad (2.32)$$

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

$$\delta = \frac{J_s}{e} = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}, \quad e = 2.718 \quad (2.33)$$

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 [17] [18].

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. [19]

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 [3].

II.4.1 Discrétisation géométrique

La géométrie et le maillage sont développés à l'aide du mailleur COMSOL. C'est un logiciel qui réalise des maillages bidimensionnels ainsi que tridimensionnels, pour cela on découpe le domaine d'étude en volumes élémentaires de taille réduite. Ces éléments dans le cas de 2D sont rectangulaires ou triangulaires, et dans le cas de 3D, soit de formes hexaédriques, tétraèdres ou des prismes [9] [20].

- **Forme triangulaire :**

Le volume élémentaire D_p est caractérisé par : le nœud principale P , trois arrêtes d_{e1} , d_{e2} et d_{e3} et trois volumes voisins D_1 , D_2 et D_3

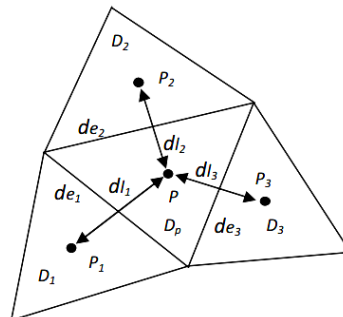


Figure 2.4 - Schéma du maillage triangulaire

2 Modèles mathématique et modélisation

- **Forme prismatique :**

Chaque élément (Fig.2.5) de volume D_p est caractérisé par quatre facettes $f_i (i=1 : 4)$, quatre voisins $D_i (i=1 : 4)$

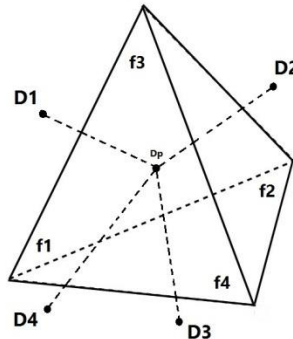


Figure 2.5 - Schéma du maillage tétraédrique

On rappelle que la géométrie et le maillage sont réalisés par COMSOL . Pour notre part on s'intéresse à la forme prismatique, dont sa mise en œuvre est plus facile lorsqu'on utilise l'option « extrude » du COMSOL. A titre d'illustration la Fig.2.6 représente la géométrie et le maillage d'un dispositif réalisé par COMSOL

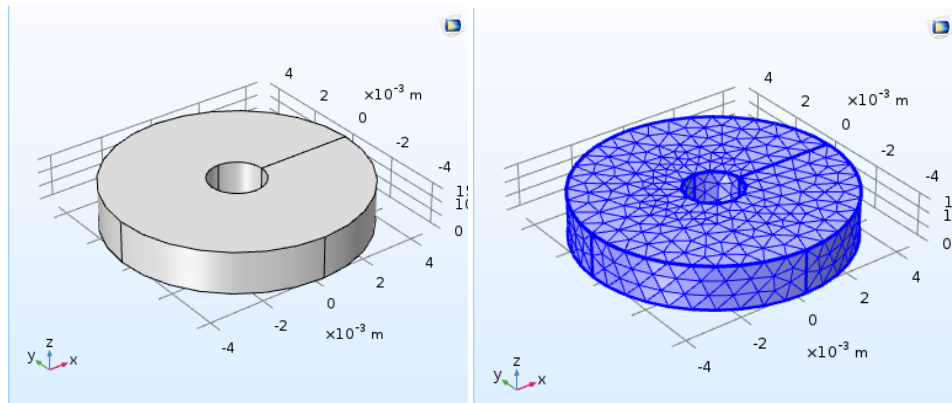


Figure 2.6 - Géométrie et maillage réalisés par COMSOL

II.4.2 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 [5].

2 Modèles mathématiques et modélisation

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).

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

Cette méthode est implémentée dans le logiciel COMSOL, cela conduit à résoudre un système d'équations algébriques d'une forme matricielle, le recours à des algorithmes de pré conditionnement ainsi que l'utilisation des méthodes itératives pour la résolution du système obtenu est nécessaire.

Ainsi, 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 2.7.

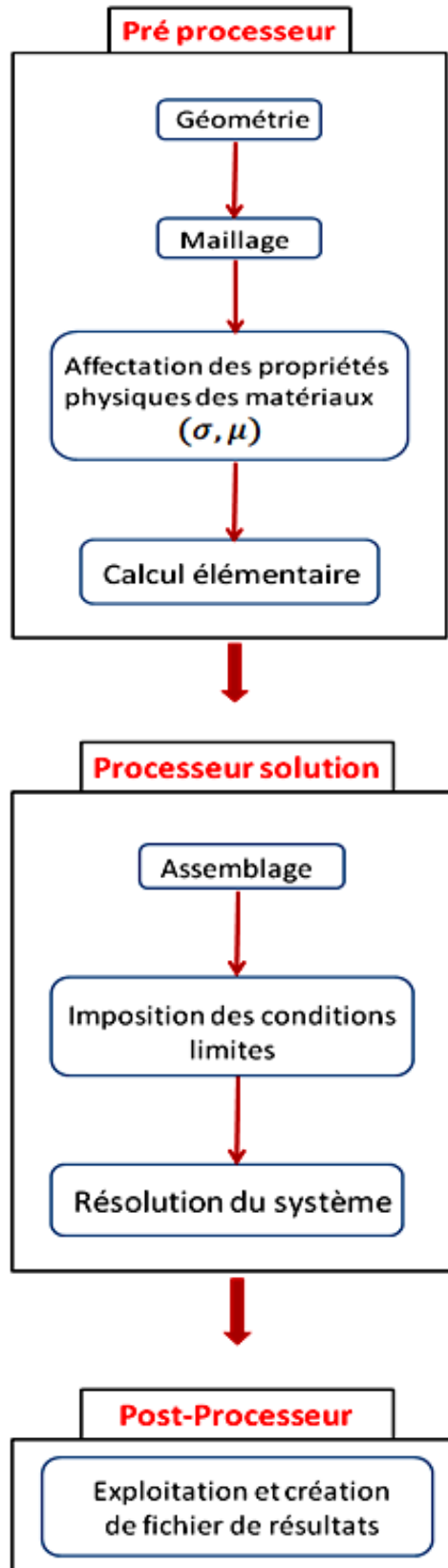


Figure 2.7 - Mise en oeuvre de la simulation éléments finis

II.5 Modèle direct et modèle inverse

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 [21]. Le schéma général des modèles directs est montré dans la figure 2.7.

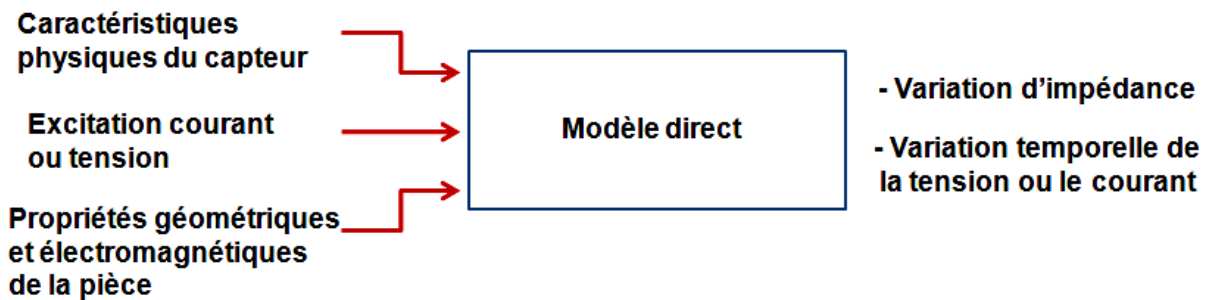


Figure 2.8 - Schéma général d'un modèle direct

Modèle inverse

La principale entrée du modèle inverse 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.

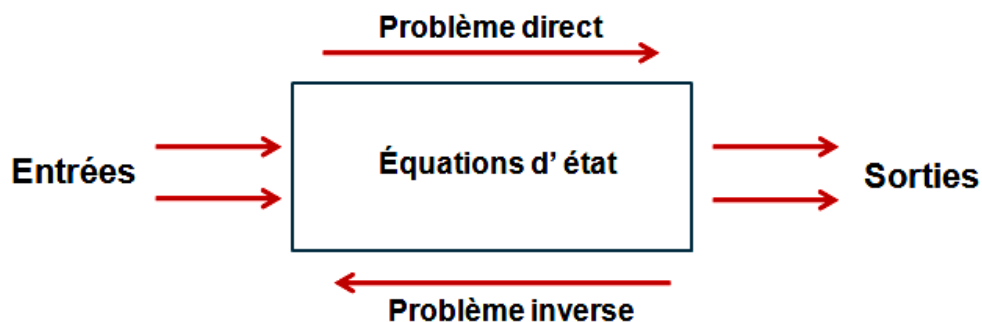


Figure 2.9 - Schéma fonctionnel d'un système de CND

II.6 Simulation du CND par CF

II.6.1 Logiciel COMSOL Multiphysics

II.6.1.1 Description du logiciel

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation polyvalent pour la modélisation de dispositifs dans les domaines de l'ingénierie, la production et de la recherche scientifique. Le produit plateforme peut être utilisé seul ou enrichi de fonctionnalités issues de n'importe quelle combinaison de modules complémentaires pour simuler l'électromagnétisme, la mécanique des structures, l'acoustique, la mécanique des fluides, le transfert thermique et le génie chimique [22].

Select Physics

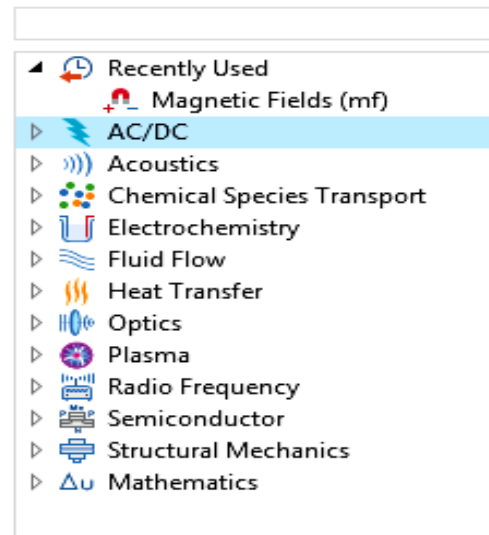


Figure 2.10 - plateforme COMSOL multiphysics

II.6.1.2 AC/DC module :

L'analyse des systèmes électromagnétiques qui englobent des basses fréquences nécessite un outil de simulation puissant et flexible. L'extension du module AC/DC à la plateforme COMSOL Multiphysics nous offre un large éventail de fonctions de modélisation et de méthodes numériques pour l'investigation des champs électromagnétiques en résolvant les équations de Maxwell.

Select Physics

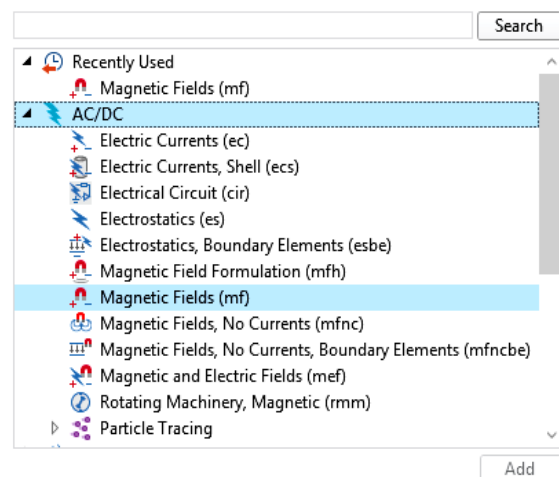


Figure 2.11 - fonctions de modélisation du module AC/DC

II.6.2 Développement du modèle direct

Il s'agit d'une bobine placée au dessus d'une plaque métallique dans un dispositif de CND-CF contenu dans une boîte d'air (figure 2.12). Ceci constitue notre domaine de calcul, les paramètres du système sont donnés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Paramètres du dispositif de CND-CF

Nom	Valeur	Description
R_{in}	1 [mm]	Rayon intérieur de la bobine
R_{out}	4.5 [mm]	Rayon extérieur de la bobine
H_b	1.5 [mm]	Hauteur de la bobine
N	800	Nombre de spire
L	0.14 [mm]	Lift-off
σ_{Al}	$3,85 \cdot 10^7$ [S/m]	Conductivité de l'Aluminium
σ_{Cu}	$5,998 \cdot 10^7$ [S/m]	Conductivité du Cuivre
Long	10 [cm]	Longueur de la plaque en Al
	15,5 [cm]	Longueur de la plaque en Cu
Larg	12 [cm]	Largeur de la plaque en Al
	15,5 [cm]	Largeur de la plaque en Cu
H_p	2 [cm]	Hauteur de la plaque en Al
	0,5 [cm]	Hauteur de la plaque en Cu
f	50 Hz - 100 kHz	Fréquence d'excitation

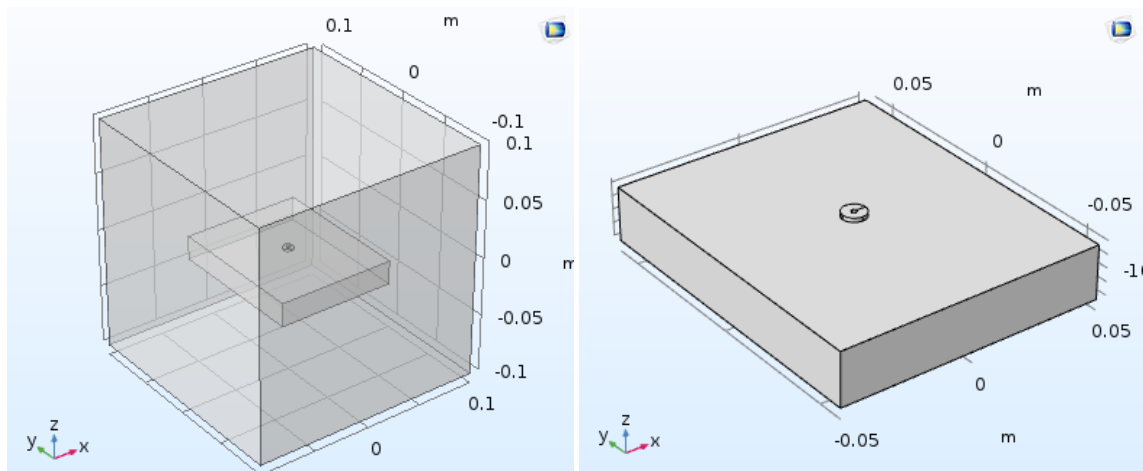


Figure 2.12 - Système magnétodynamique du dispositif étudié

Nous avons utilisé le logiciel de calcul par éléments finis COMSOL Multiphysics afin de pouvoir coupler les équations aux dérivées partielles correspondant aux différents phénomènes physiques impliqués [23].

II.6.3 Génération de maillage et simulation

La qualité du maillage est cruciale pour la qualité des résultats. Il permet d'obtenir une solution précise avec un nombre réduit d'éléments et donc un temps de calcul raisonnable. Le maillage est généré avec des éléments tétraédriques. Une maille fine est nécessaire dans la région où la variation des champs est importante. Comme par exemple, nous devons affiner le maillage autour la bobine ou dans la profondeur de la peau dans la plaque depuis le champ d'induction magnétique varie significativement dans ces régions[7,10].

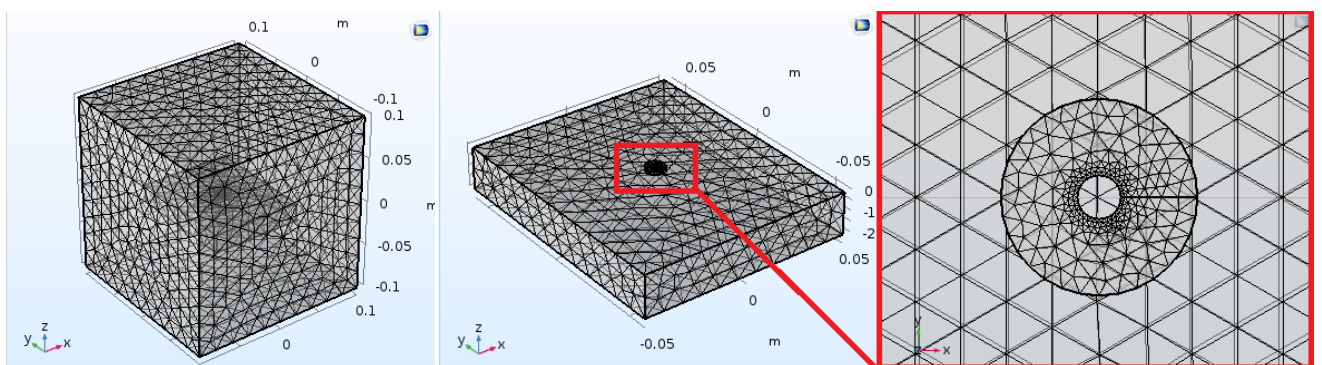
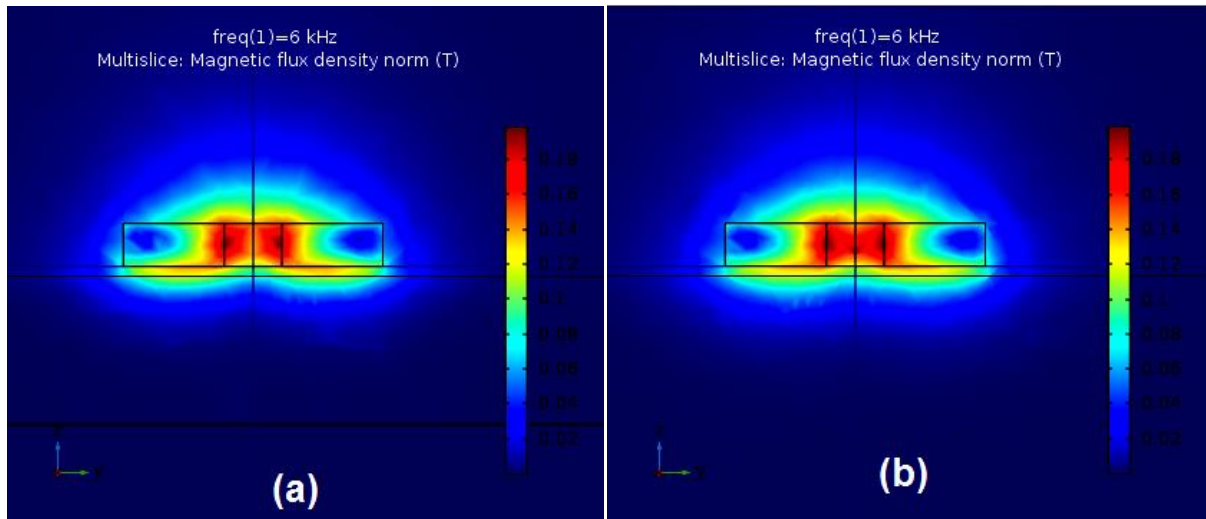


Figure 2.13 - Maillage du système sous COMSOL

II.6.4 Résultat en termes d'induction magnétique et densité de courant

II.6.4.1 Induction magnétique

La figure 2.14 représente la distribution de l'induction magnétique B simulé par COMSOL pour le système (plaque + bobine) utilisant un courant de fréquence de 6 kHz.



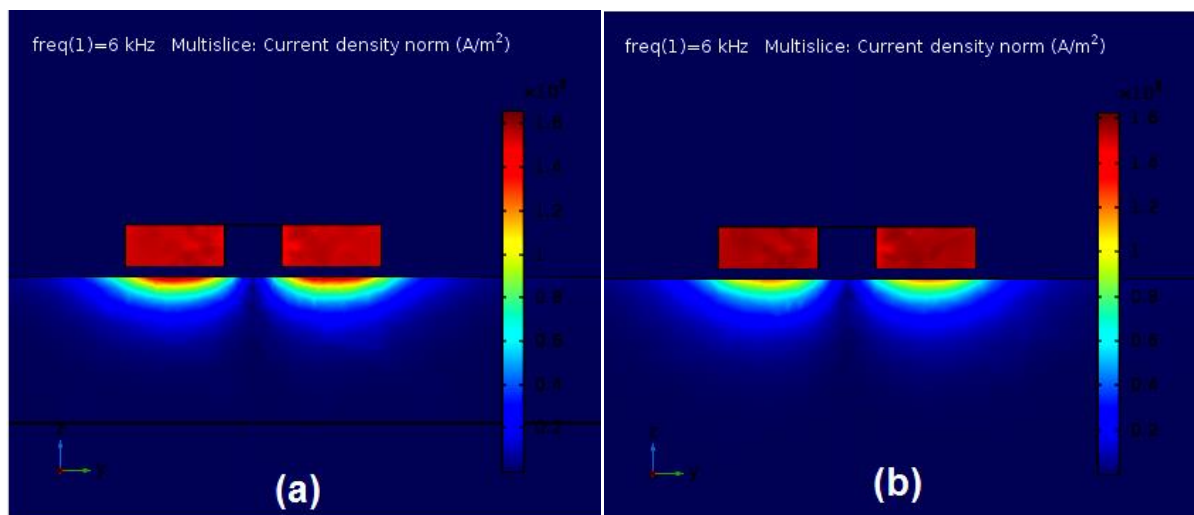
(a) Plaque de Cuivre

(b) Plaque d'Aluminium

Figure 2.14 : Induction magnétique calculé par COMSOL

II.6.4.2 Courants induits dans la plaque

La Figure 2.15 représente la distribution des courants de Foucault dans la plaque en Cuivre et la plaque en Aluminium pour une fréquence de 6 kHz.



(a) Plaque de Cuivre

(b) Plaque d'Aluminium

Figure 2.15 : Courants de Foucault par COMSOL

II.6.5 Résultats en termes de variation d'impédance

II.6.5.1 Diagramme d'impédance normalisé

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 X_0 et R_0 ($Z_0 = R_0 + jX_0$), nous introduisons la notion d'impédance normalisée qui se déduit de Z à l'aide de l'expression [10]:

$$Z_n = R_n + jX_n = \frac{Z - R_0}{X_0} \tag{2.33}$$

Avec R_n et X_n sont respectivement la résistance et la réactance normalisées

$$\left\{ \begin{array}{l} R_n = \frac{R - R_0}{X_0} \\ X_n = \frac{X}{X_0} \end{array} \right. \tag{2.34}$$

▪ **Charge 1 : Plaque en Aluminium**

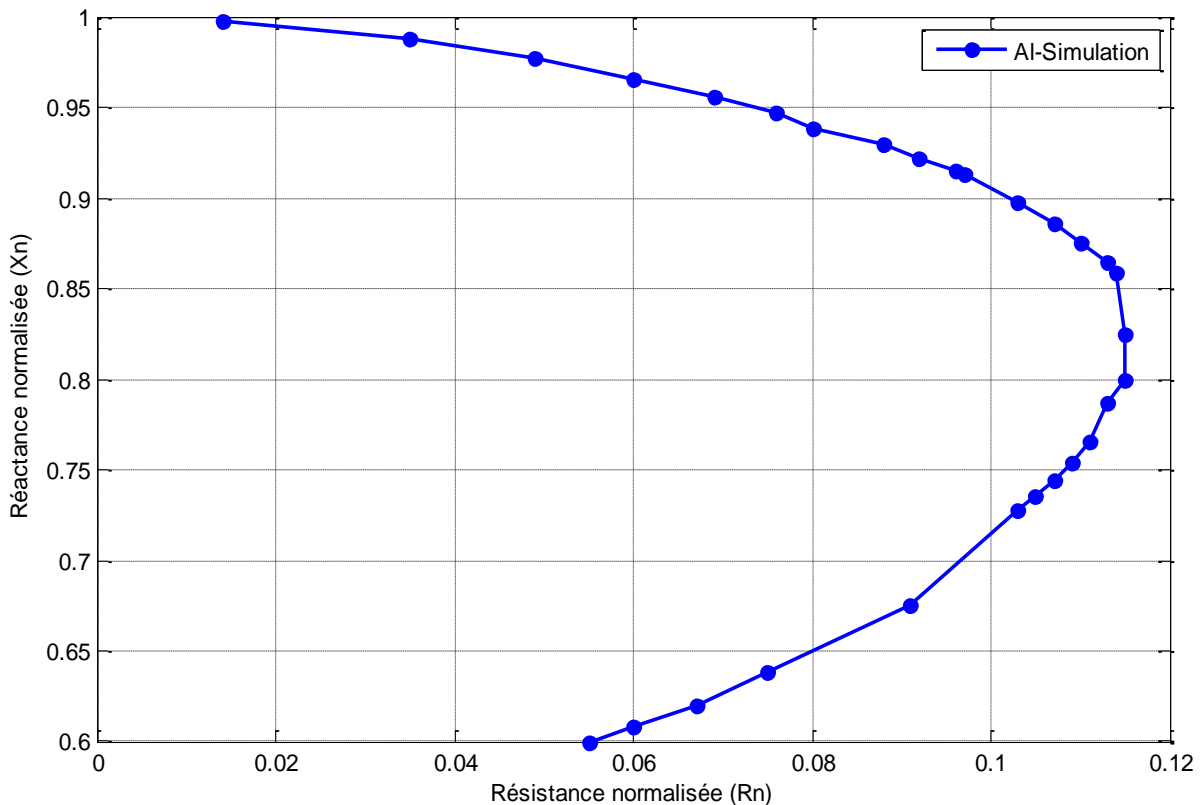


Figure 2.16 - Diagramme d'impédance normalisé de la plaque en aluminium par COMSOL

▪ Charge 2 : Plaque en cuivre

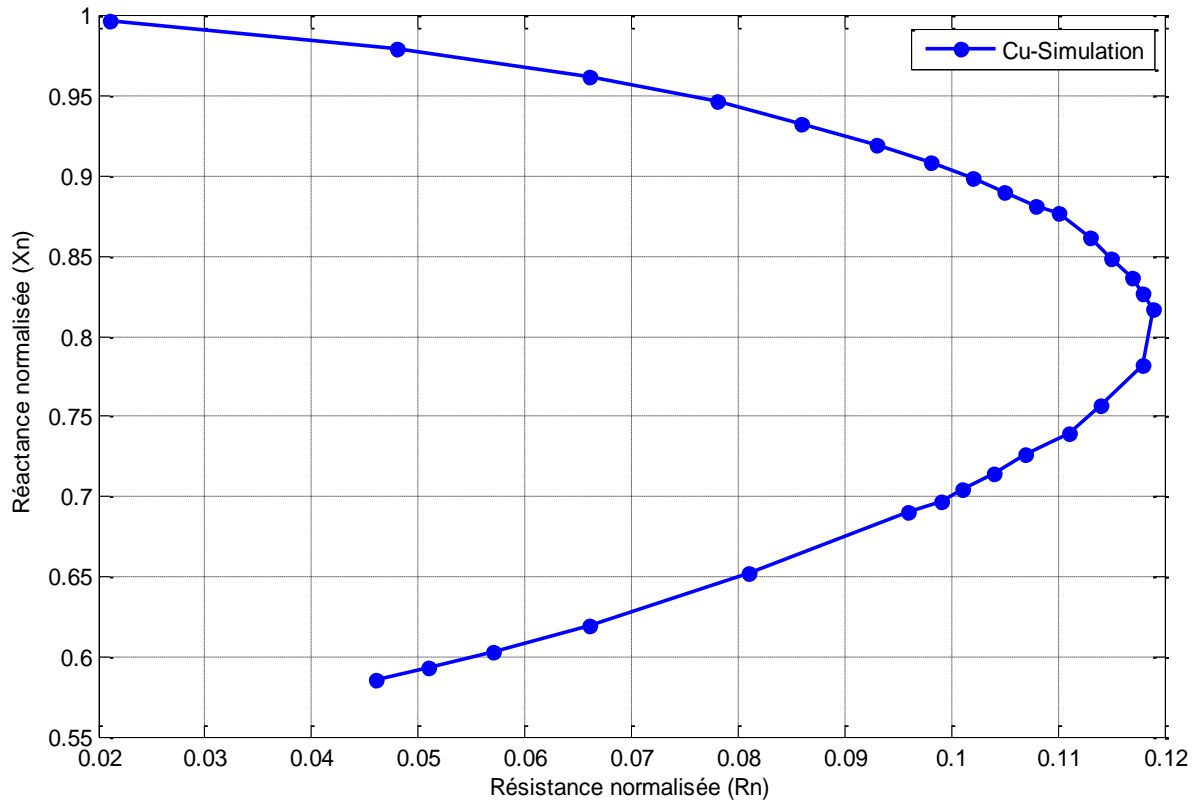


Figure 2.17 : Diagramme d'impédance normalisé de la plaque de cuivre

En variant la fréquence, la résistance normalisée augmente du fait qu'un matériau placé dans un champ électromagnétique est le siège de pertes Joules, plus la conductivité est élevée plus ces pertes sont importantes dans le matériau métallique.

D'une autre part, le matériau subit une création d'induction magnétique au sens contraire ce qui cause une réduction du coefficient d'auto-induction de la bobine ce qui explique la diminution de la réactance.

II.6.5.2 Effet du lift-off

La figure 2.16 représente le diagramme d'impédance normalisée du capteur en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la distance ente la pièce à contrôler et le capteur (lift off), soient $L1= 0.2 \text{ mm}$, $L2= 0.26 \text{ mm}$ et $L3= 0.32 \text{ mm}$

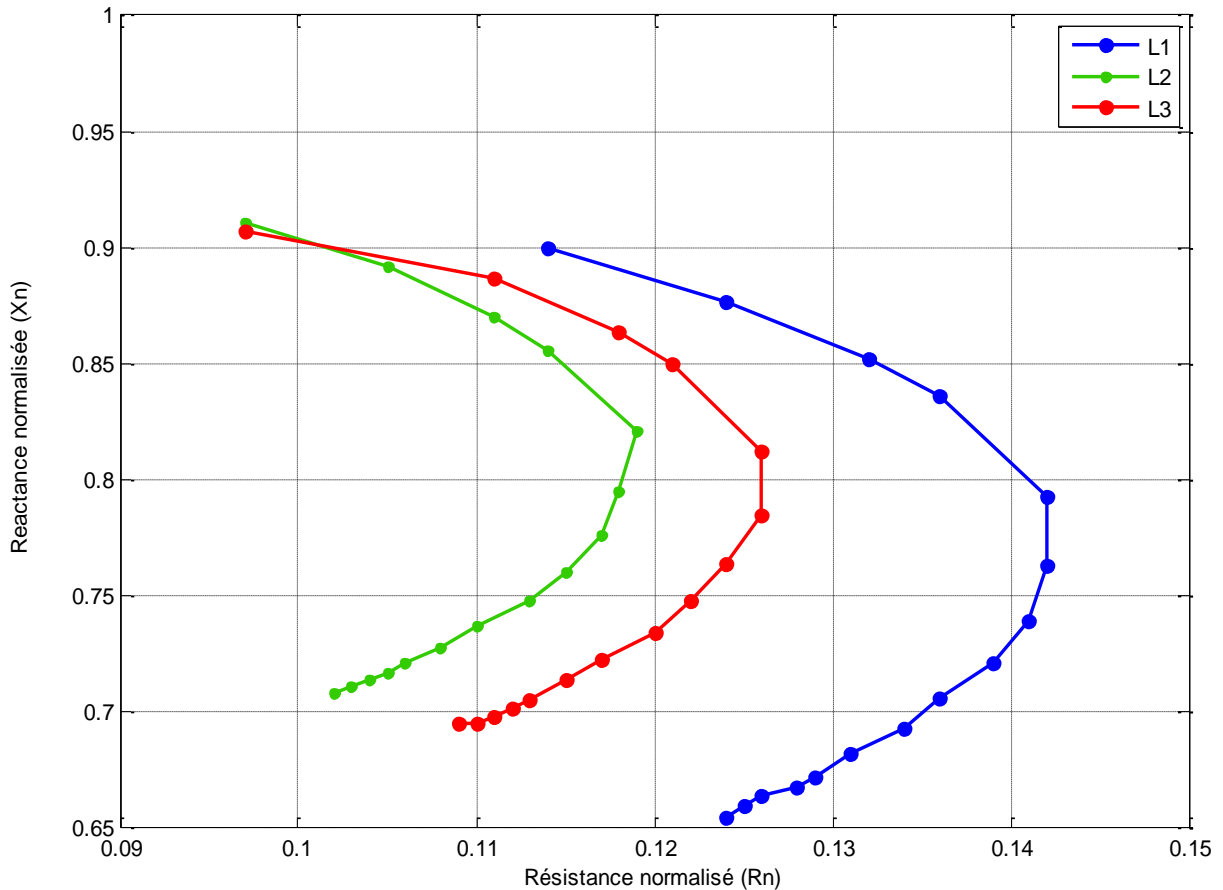


Figure 2.18 - Effet du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée

On remarque bien la sensibilité du modèle à la variation du lift-off. Ce résultat peut être exploité pour déterminer par exemple l'épaisseur d'un revêtement de la plaque.

II.6.5.3 Effet de la conductivité

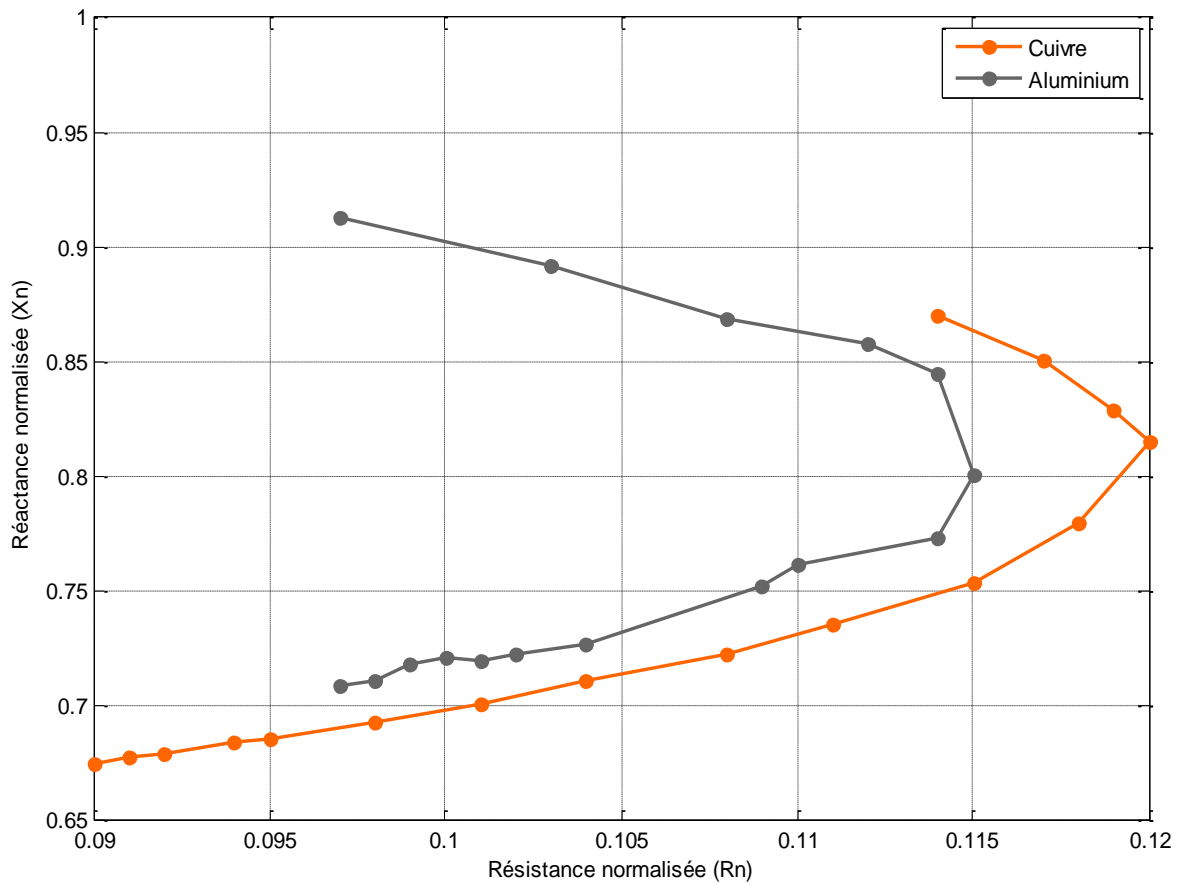


Figure 2.19 - Effet de la conductivité sur le diagramme d'impédance normalisée

On remarque que notre modèle est sensible à la variation de la conductivité. Ce résultat peut être exploité pour la distinction par exemple des matériaux revêtus

II.7 Conclusion

La simulation d'un problème de CND par CF implique une modélisation magnétodynamique. Ce modèle est décrit par les équations de Maxwell, des lois de comportement et des conditions aux limites. Dans ce chapitre, nous avons présenté une analyse physico-mathématique des équations électromagnétiques.

En se limitant aux configurations cartésiennes et aux caractéristiques électromagnétiques linéaires et en utilisant l'approximation quasi-stationnaire, nous avons réduit les équations de Maxwell en deux équations exprimant le couplage entre le potentiel vecteur magnétique et la densité de courant électrique

Nous avons présenté les courants de Foucault qui font l'objet de cette technique, l'effet de peau qui en décrit la décroissance en fonction de la profondeur de la pièce, aussi les différentes méthodes numériques de discrétisation, nous avons modélisé le problème relatif au CND par CF avec la méthode des éléments finis

L'étude de sensibilité nous a permis de mettre en évidence que le signal CF dépend fortement de la conductivité et du lift-off.

CHAPITRE 3

Procédures expérimentales

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le dispositif expérimental de mesure et les matériaux à inspecter, nous présentons l'appareillage de mesure (Lock-in amplifieur) ainsi que le choix des paramètres opératoires. Ces mesures serviront à valider le modèle développé par le logiciel COMSOL multiphysics et aussi à la construction d'une base de données pour le problème inverse

III.2 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
- Deux plaques en cuivre et en aluminium
- Un Lock-in amplifieur 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

3 Procédures expérimentales

Tableau 3.1 : Composants du montage expérimental

1	Capteur à double fonction
2	Echantillon à inspecter
3	Lock-in amplifieur
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 Amplifieur

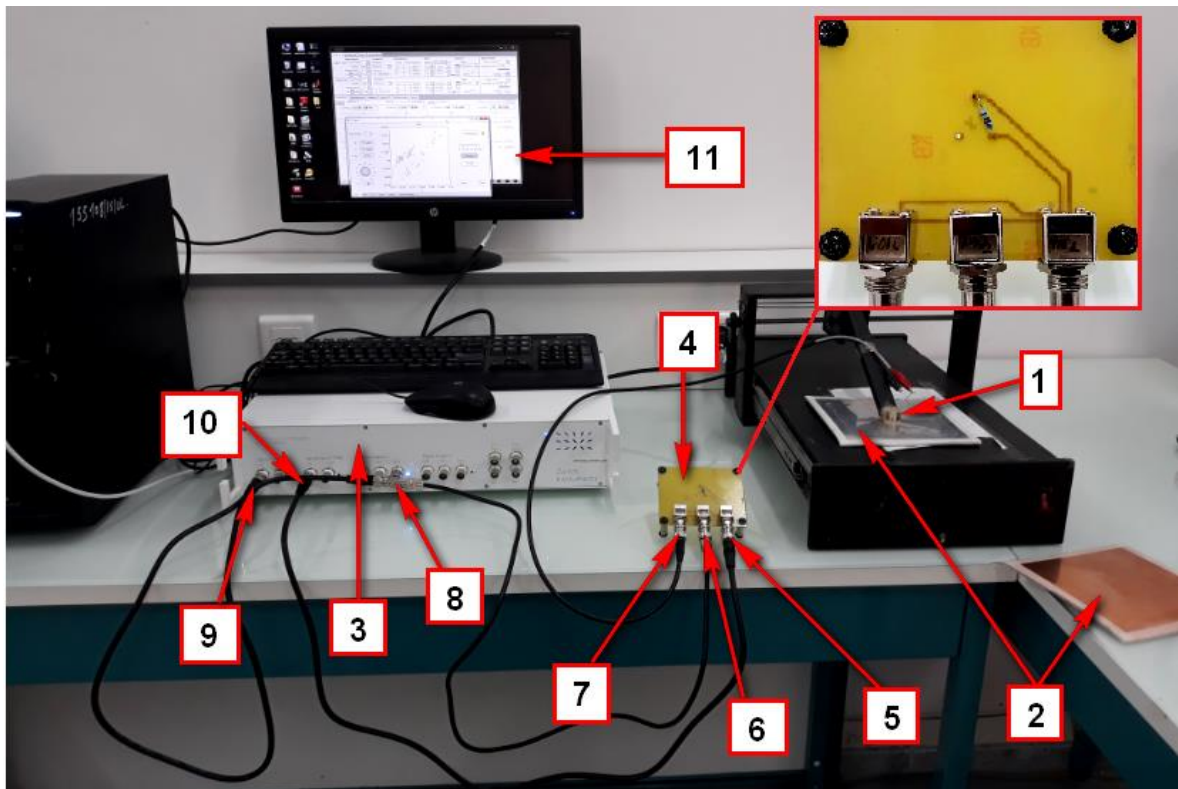



Figure 3.1 - Montage expérimental (banc d'essai)

III.2.1 Le capteur (bobine)

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.

Tableau 3.2 : Caractéristiques de la bobine utilisée

Bobine	Caractéristiques
	<p>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</p>

Le choix de cette bobine plate est lié à la problématique traitée qui consiste à caractériser des plaques sans défaut. À cet effet, il n'est pas nécessaire d'avoir des champs intenses, comme ceux des bobines cylindriques avec noyaux. Ceci nous permettra d'éviter ainsi la modélisation du noyau.

III.2.2 Matériaux à inspecter

Nous avons choisi de travailler avec des matériaux de différentes nuances et de différentes caractéristiques électriques.

Tableau 3.3 : Caractéristiques des pièces conductrices

Matériau	Dimension de l'échantillon	Conductivité
Cuivre	$(15,5 \times 15,5 \times 0,5)$ cm	$59,98 \cdot 10^6$ S/m
Aluminium	$(15,5 \times 15,5 \times 0,5)$ cm	$38,5 \cdot 10^6$ S/m

III.2.3 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 [24].



Figure 3.2- Lock-in Amplifier

III.3 Choix des paramètres opératoires

III.3.1 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.3.2 Fréquence d'excitation

La fréquence de l'analyseur d'impédance peut être modifiée dans une gamme allant de 1Hz à 2,5MHz. Toutefois, seule la gamme 50Hz à 100kHz a été utilisée dans nos expériences afin d'éviter les effets capacitifs.

III.4 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

3 Procédures expérimentales

MATLAB[16] 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).

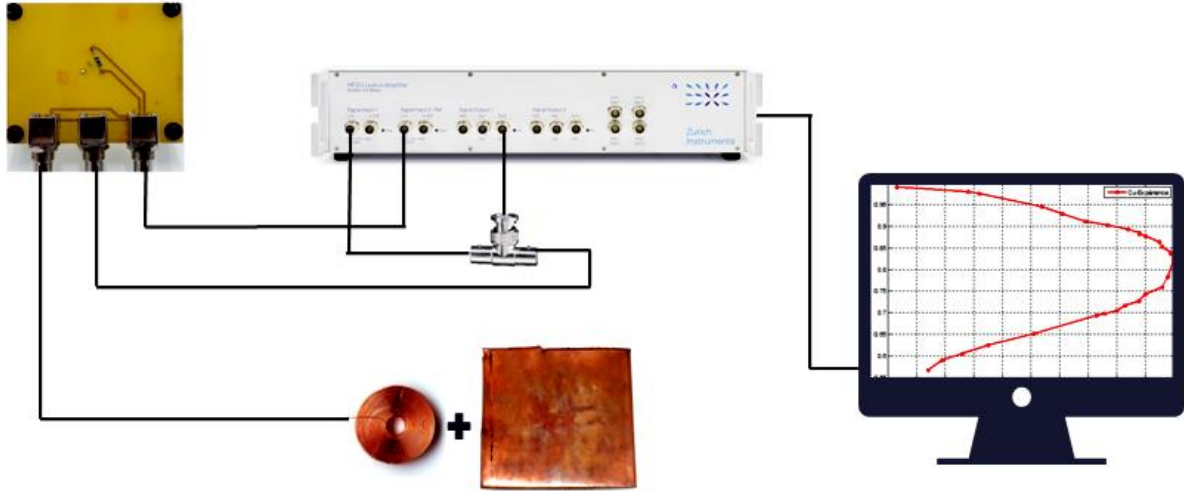


Figure 3.3- Détail du montage expérimental

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

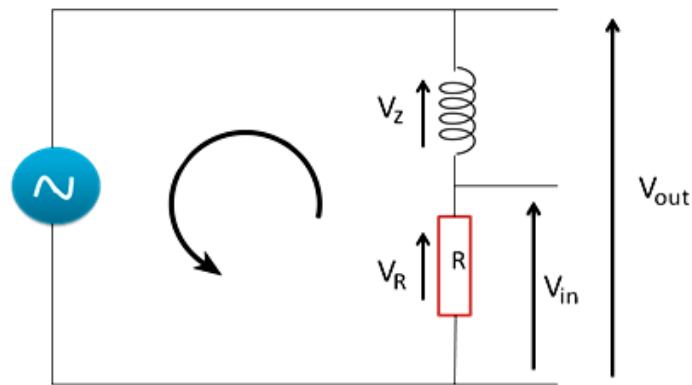


Figure 3.4 – Circuit électrique explicatif pour mesurer l'impédance Z du capteur

III.4.1 Variation d'impédance et impédance normalisée

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

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

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

3 Procédures expérimentales

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

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

De (3.3) et (3.5), nous obtenons :

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

On utilise ainsi les définitions de la résistance et la réactance normalisées (2.34) :

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

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.4.2 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 3.4 et 3.5 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 $X_n = f(R_n)$

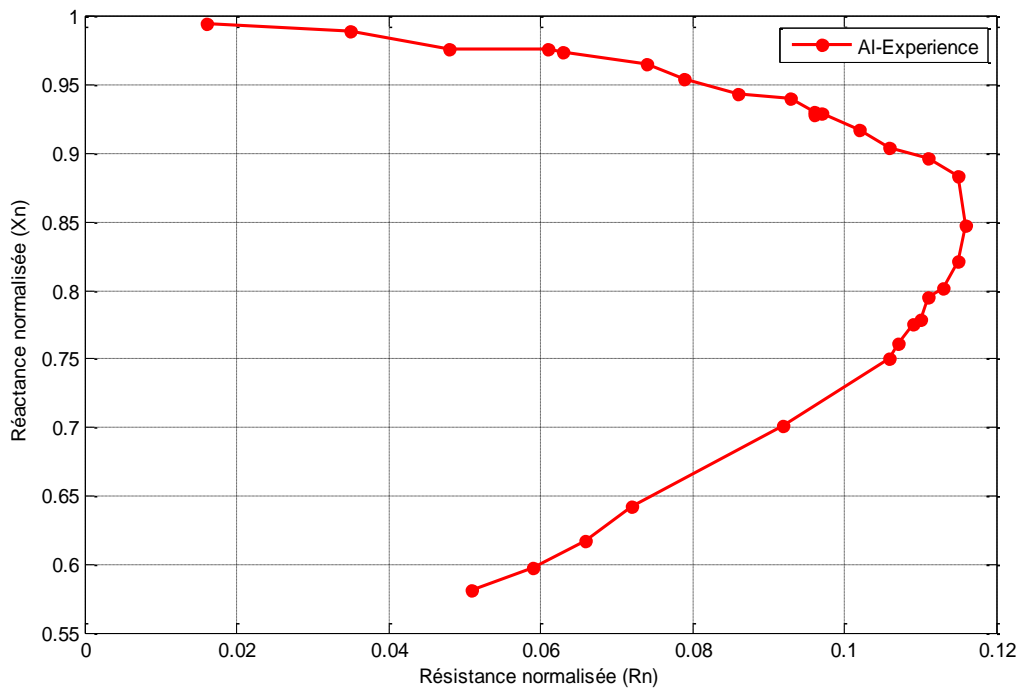


Figure 3.5 - Diagramme d'impédance normalisée expérimental de la plaque d'Aluminium

3 Procédures expérimentales

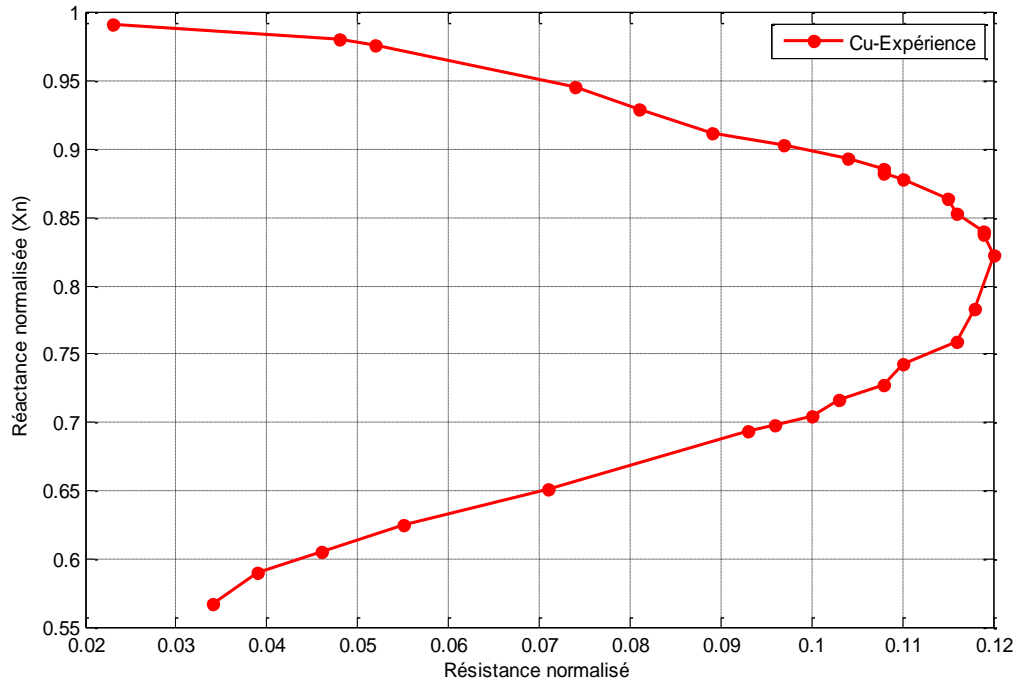


Figure 3.6 - Diagramme d'impédance normalisée expérimental de la plaque de Cuivre

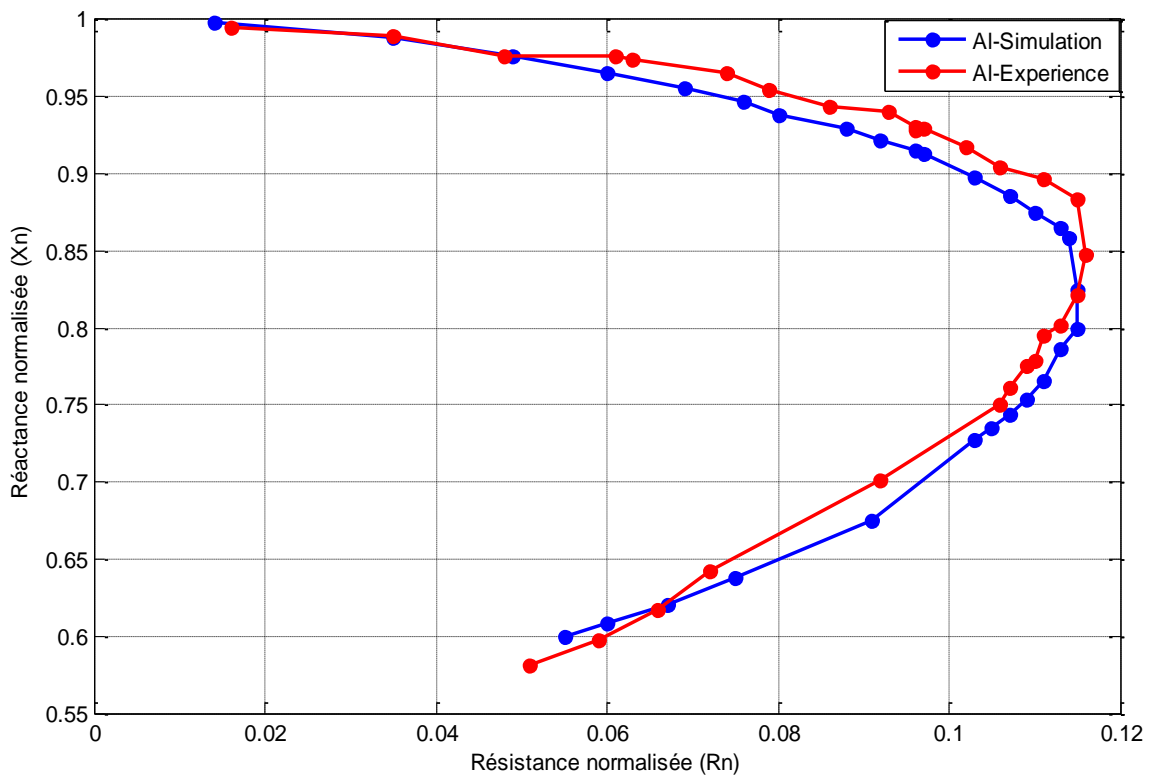


Figure 3.7- Plans d'impédance normalisée comparatifs de la plaque en Aluminium

3 Procédures expérimentales

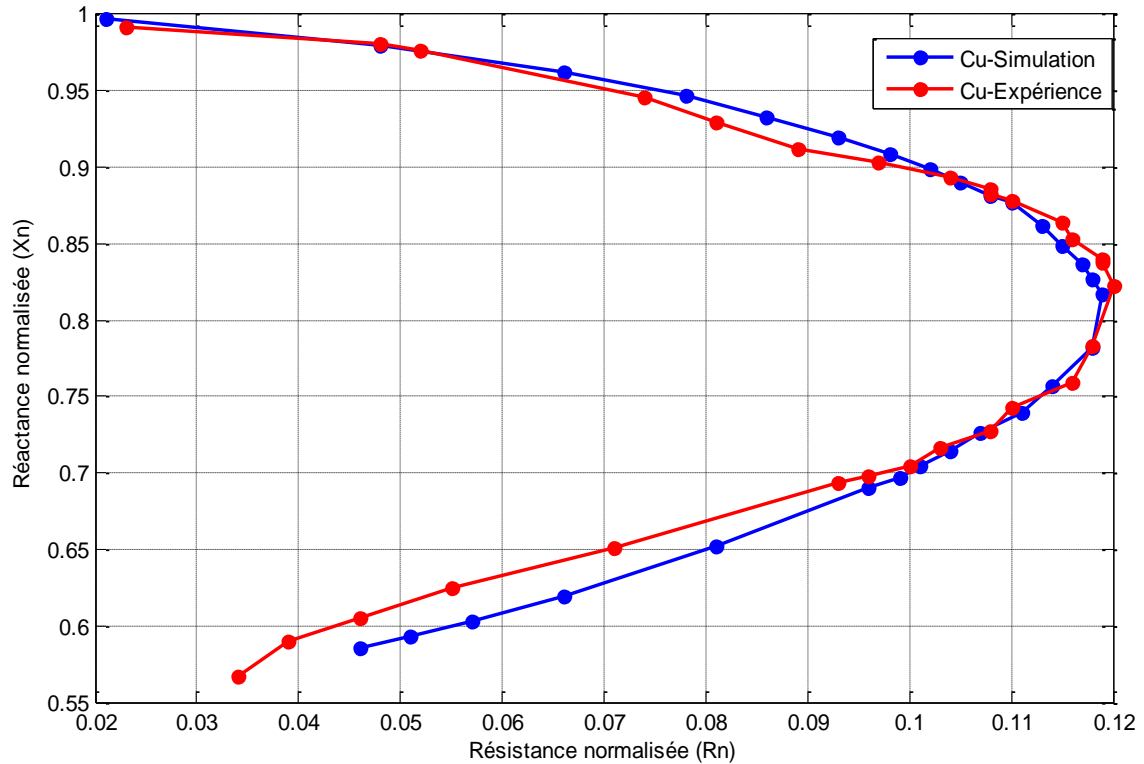


Figure 3.8 - Plans d'impédance normalisée comparatifs de la plaque en Cuivre

Nous remarquons une grande ressemblance des diagrammes d'impédances normalisées expérimentales et simulés ce qui valide le modèle développé

III.5 Conclusion

- Le Lock-in-Amplifier nous a permis d'obtenir le diagramme d'impédance normalisé expérimental pour différents échantillons.
- Les diagrammes d'impédance simulés qui ont été obtenus à partir du modèle direct (chapitre 2) ont été confrontés aux diagrammes expérimentaux.
- Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre ces diagrammes.
- Ces résultats valident ainsi le modèle direct développé.

CHAPITRE 4

Inversion de données

IV.1 Introduction

Dans le deuxième chapitre nous avons abordé le problème direct qui consistait à construire un modèle mathématique reliant les caractéristiques géométriques et physiques du système aux signaux courants de Foucault (CF).

L'objectif de ce chapitre est l'identification d'une des grandeurs physiques, en l'occurrence la conductivité électrique. Pour ce faire, nous employons une approche par la résolution du problème inverse.

IV.2 Problème Inverse

L'objectif est d'estimer les grandeurs caractéristiques du matériau non accessibles par la mesure directe. On ne dispose pour cela que des informations issues des acquisitions de capteur CF. On peut donc considérer ce problème comme un problème inverse car on détermine ces paramètres par une mesure indirecte. Pour remonter aux grandeurs d'intérêt à partir des grandeurs observées (différentes acquisitions issues du capteur CF) [17]

IV.3 Problèmes « mal posés » et régularisation

Les phénomènes expliqués au chapitre 2 sont régis par un modèle direct fortement non linéaire. Les signaux CF produits le sont donc nécessairement aussi. La résolution mathématique est rendue difficile par le fait que les problèmes inverses sont en général des problèmes mal posés

Ces problèmes ne répondent pas, au minimum, à une de ces trois conditions [5] :

- Existence d'une solution (Solubilité) pour toute donnée d'entrée,
- Unicité de la solution (non ambiguïté),
- Stabilité de la solution.

La condition d'existence ne pose en pratique pas de problème, car on recherche celle-ci dans un espace bien déterminé

En revanche, les conditions d'unicité et de stabilité ne sont pas toujours assurées. La condition de stabilité stipule que la solution doit être une fonction continue des données alors que, pour la plupart des problèmes inverses, une faible perturbation de ces données peut engendrer des bouleversements rédhibitoires sur la solution.

4 Traitement du problème inverse

Pour lever le problème d'unicité, nous travaillons en multifréquence, donc au lieu d'utiliser une seule mesure correspondant à une seule fréquence, nous utilisons un ensemble de mesures correspondant à une multitude de fréquences

IV.4 Méthode d'optimisation de type « simplexe »

Les problèmes inverses sont très fréquemment exprimés sous forme d'un problème d'optimisation ou plus exactement de minimisation de fonction objectif. Plusieurs méthodes de minimisation ont été développées dans la littérature. Elles s'appliquent aux fonctions à une ou plusieurs variables. Dans le cas de notre étude, l'algorithme du « *Simplex* » dû à Nelder et Mead [25], qui s'applique aux fonctions à plusieurs variables, est le plus adapté.

Cette méthode du *Simplex* consiste à considérer une figure géométrique composée en dimension n , de $(n + 1)$ points, de leurs segments d'interconnexion, de leurs faces polygonales, etc. Il s'agit généralement d'un polyèdre à $(n + 1)$ sommets appelé simplexe. A chaque itération, on recherche un nouveau simplexe permettant de se rapprocher du minimum de la fonction objectif [5]

IV.5 Stratégie de traitement du problème inverse

La figure 4.1 présente le schéma fonctionnel d'un système de CND par courants de Foucault

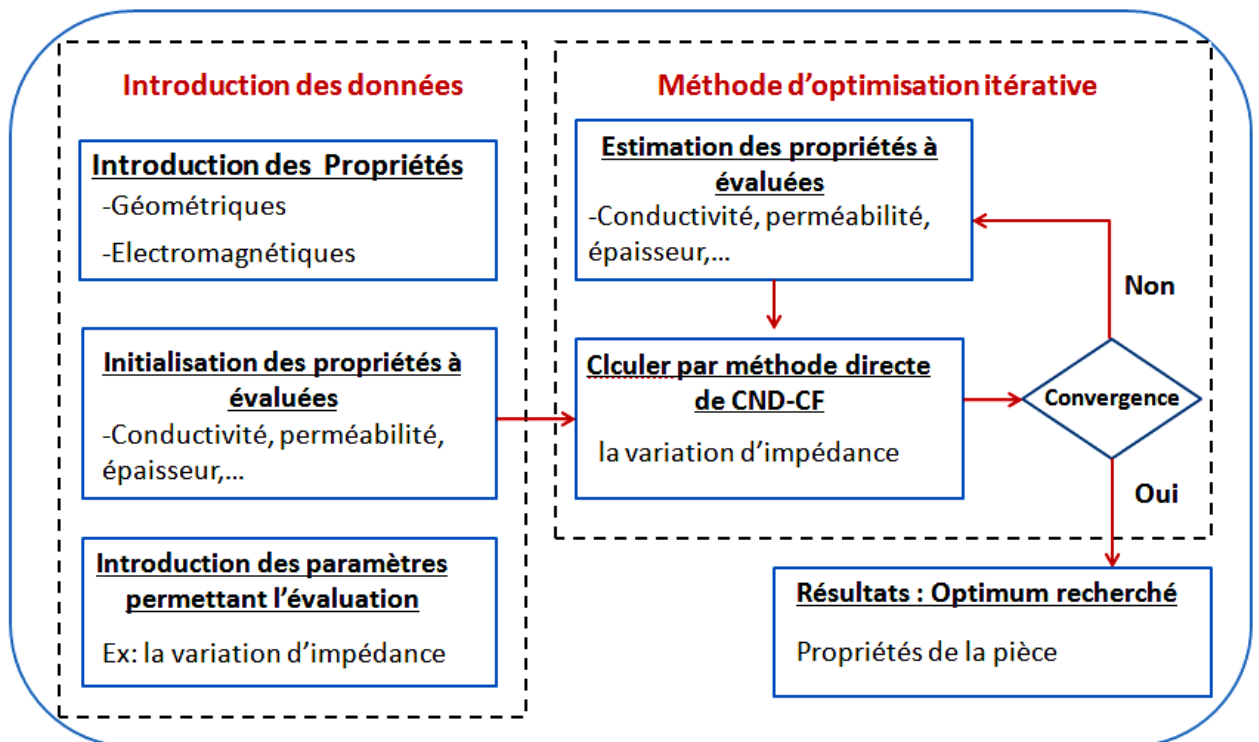


Figure 4.1 - Schéma général d'un modèle d'inversion de CND-CF [21]

4 Traitement du problème inverse

Il faut naturellement connaître la relation de dépendance entre les grandeurs d'intérêt et les grandeurs observées. Cette logique implique l'existence de deux grandes étapes dans la résolution de tout problème inverse :

- Construction et développement d'un modèle direct représentatif de la réalité physique.
- L'inversion des grandeurs observées en s'appuyant sur la résolution de ce modèle direct.

Cette méthode permet de déterminer la valeur d'un ou plusieurs paramètres à partir des mesures. Dans le cas général, les méthodes inverses cherchent à déterminer des grandeurs difficilement mesurables à partir de grandeurs facilement observables. Le modèle direct a été inversé via un algorithme utilisant une méthode d'optimisation de type simplex [9]

D'abord un modèle direct du système (matériau + bobine) doit être établi dans le but de calculer l'impédance du capteur en fonction des grandeurs d'intérêts telles que la conductivité électrique, la perméabilité magnétique et le lift-off pour configurations connues. Puis, le problème est résolu en faisant varier les paramètres recherchés dans un algorithme itératif « simplex » afin de minimiser une fonction objectif. On cherche donc à minimiser l'écart (ou erreur) entre l'impédance simulée Z_{cal} à partir du modèle direct et l'impédance mesurée Z_{mes} [17, 26]

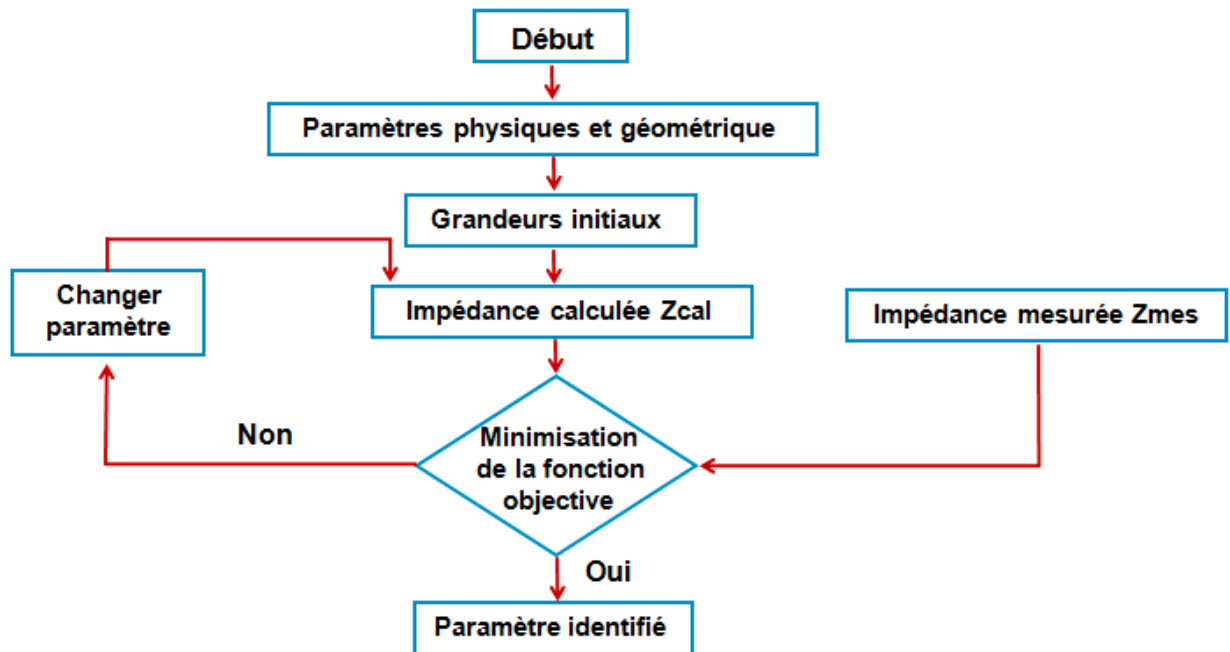


Figure 4.2 - Algorithme itératif de minimisation de fonction objectif

IV.6 Estimation d'une grandeur par la méthode du problème inverse

IV.6.1 Identification de deux paramètres : conductivité et Lift-off

Nous effectuons la mesure de la conductivité électrique d'un matériau en résolvant un problème inverse. La fonction objectif (fonction coût) que nous cherchons à minimiser est définie par [5] :

$$F_{obj} = \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{n=N_f} \left\{ \left[1 - \frac{R_N sim(n)}{R_N mes(n)} \right]^2 + \left[1 - \frac{X_N sim(n)}{X_N mes(n)} \right]^2 \right\}}$$

Avec $R_N mes$ et $X_N mes$ les résistances et les réactances normalisées issues des mesures,

$R_N sim$ et $X_N sim$ sont les résistances et les réactances normalisées calculées avec le modèle directe. N_f est le nombre de fréquences considérées.

Cette fonction est minimisée grâce à un algorithme de type simplex

Dans cette identification, nous visons la détermination de la conductivité des deux plaques en Cuivre et en Aluminium, Nous présentons sur les figures 4.3 et 4.4 les évolutions respectivement, du lift-off et de la conductivité Ainsi que la fonction Objectif correspondante, à chaque itération.

- **La plaque en Aluminium**

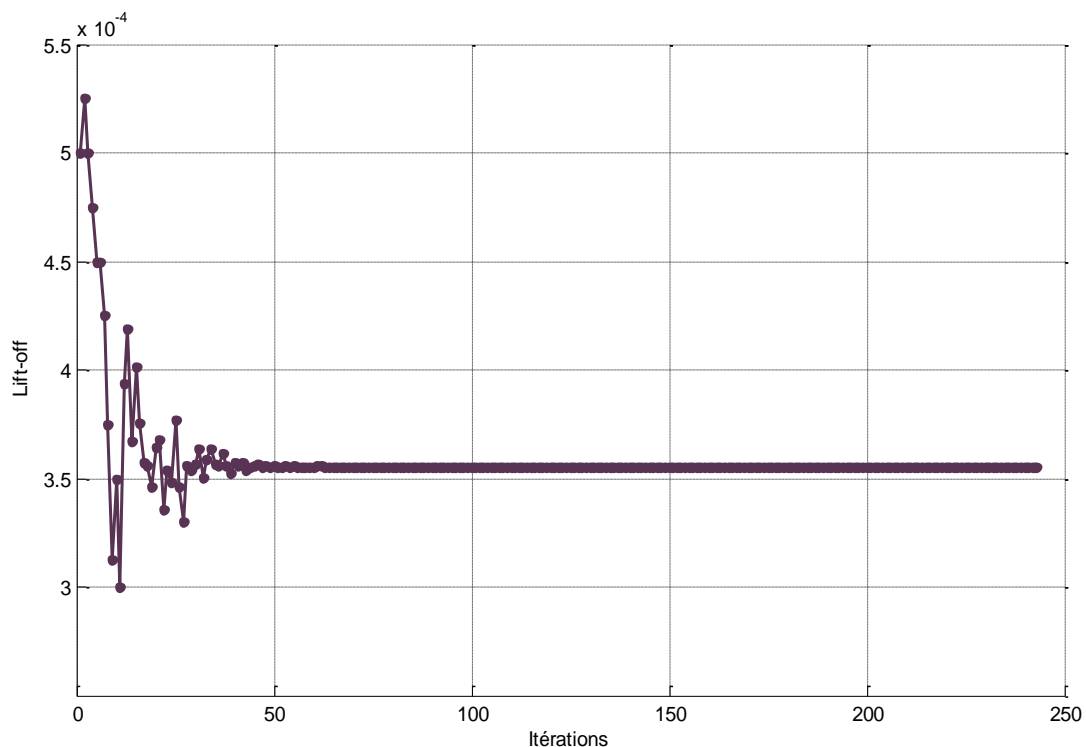


Figure 4.3 - Evolution du lift-off estimée en fonction des itérations

4 Traitement du problème inverse

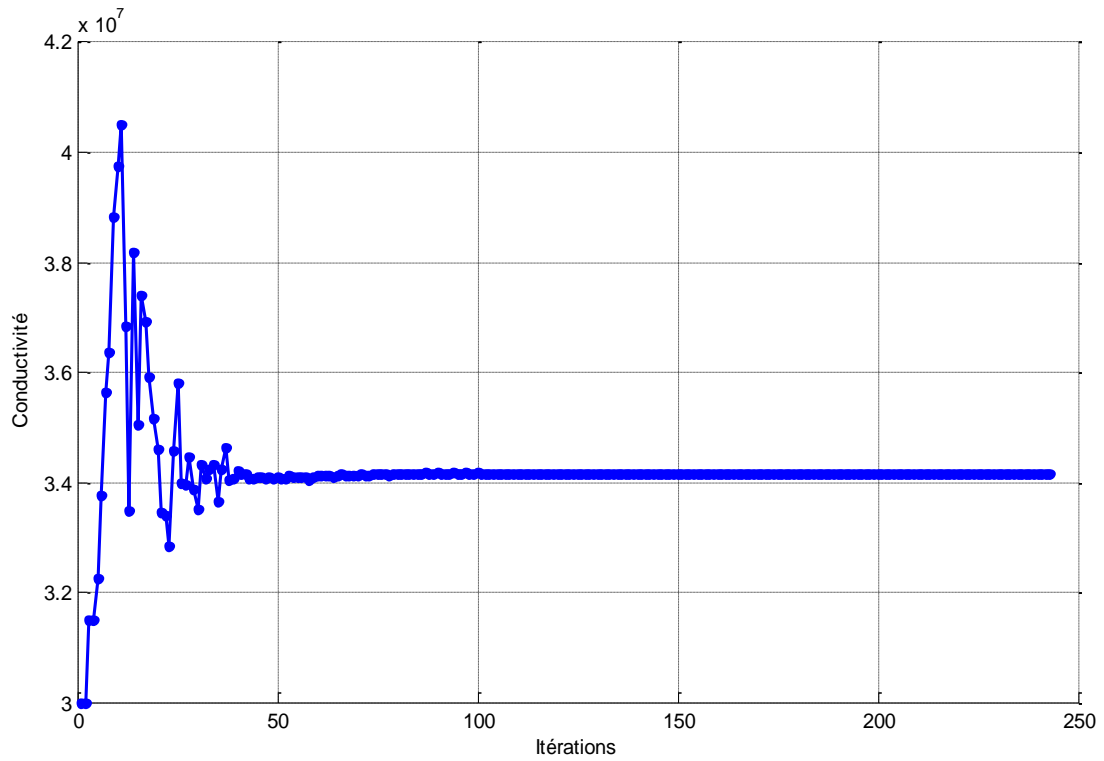


Figure 4.4 Evolution de la conductivité de la plaque en Al estimée en fonction des itérations

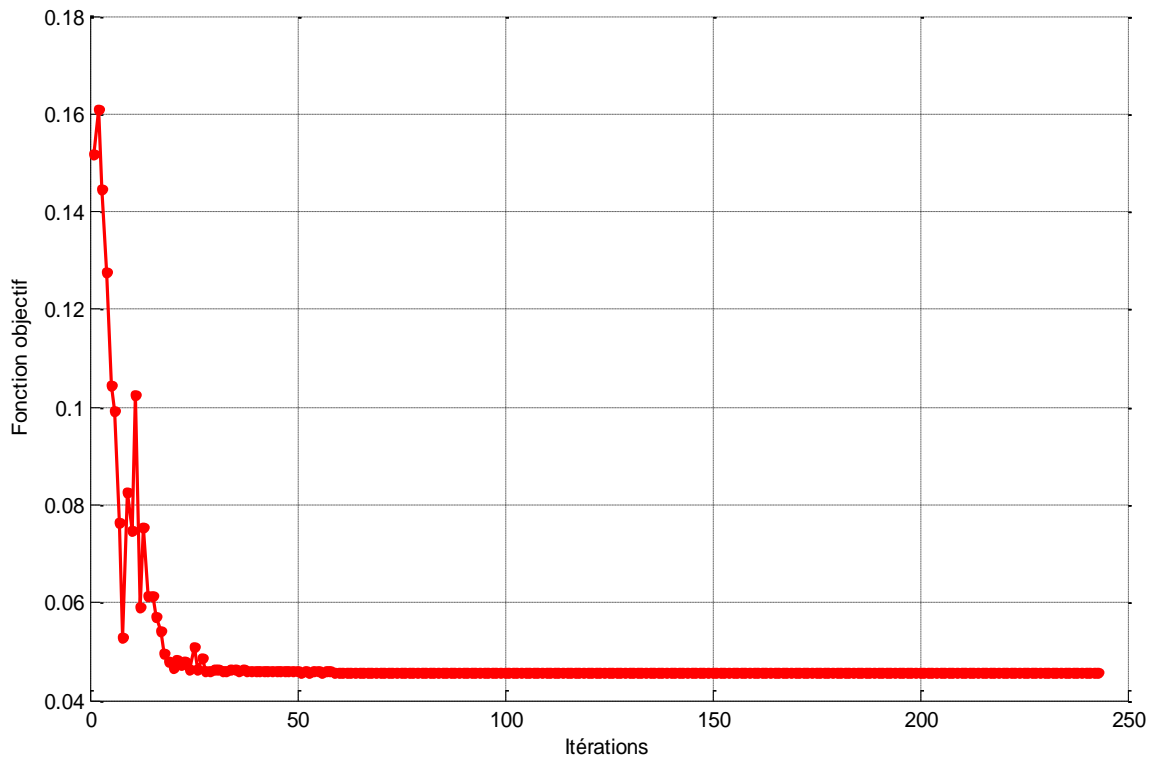


Figure 4.5- Evolution de la fonction objectif en fonction des itérations pour la plaque en Al

Nous pouvons remarquer que la valeur du lift-off ($L=0.35$ mm) de la conductivité ($\sigma = 34.10^6$ S/m) estimés se stabilise à partir de 50 itérations. Cette stabilisation est atteinte

4 Traitement du problème inverse

au bout de 168 secondes. Après minimisation de la fonction coût, nous constatons la juxtaposition des digrammes d'impédance normalisée calculé et mesuré

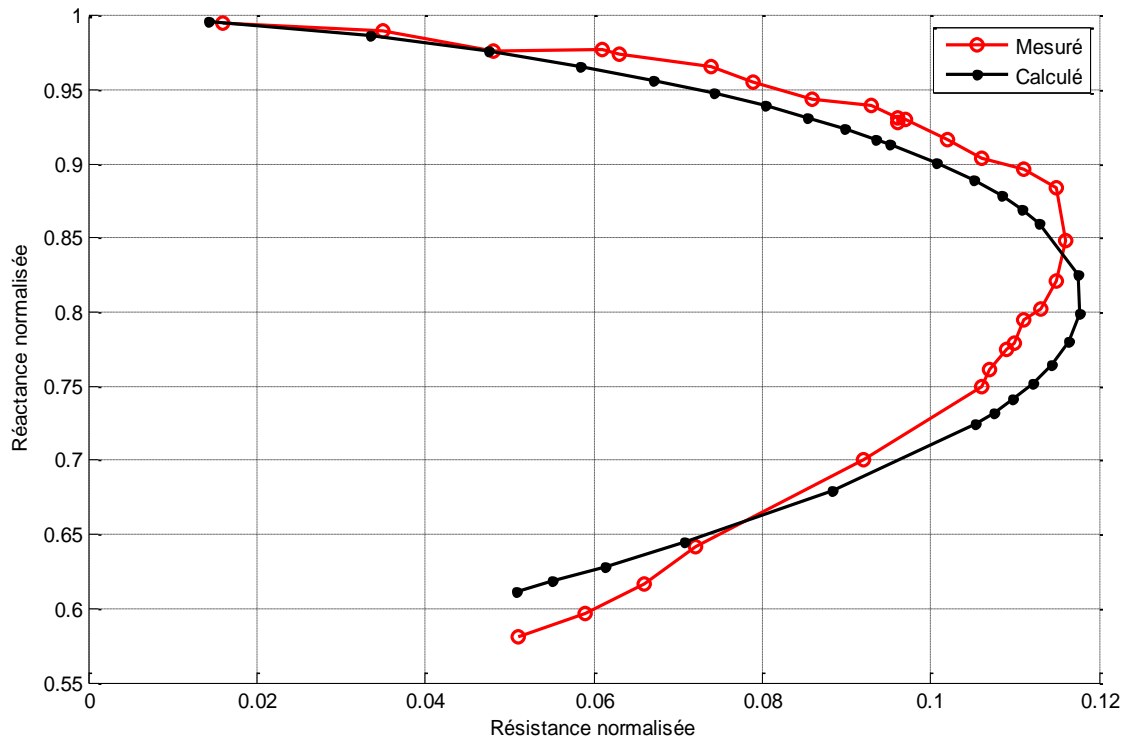


Figure 4.6-Diagramme d'impédance normalisée calculé et mesuré pour la plaque en Al

▪ La plaque en Cuivre

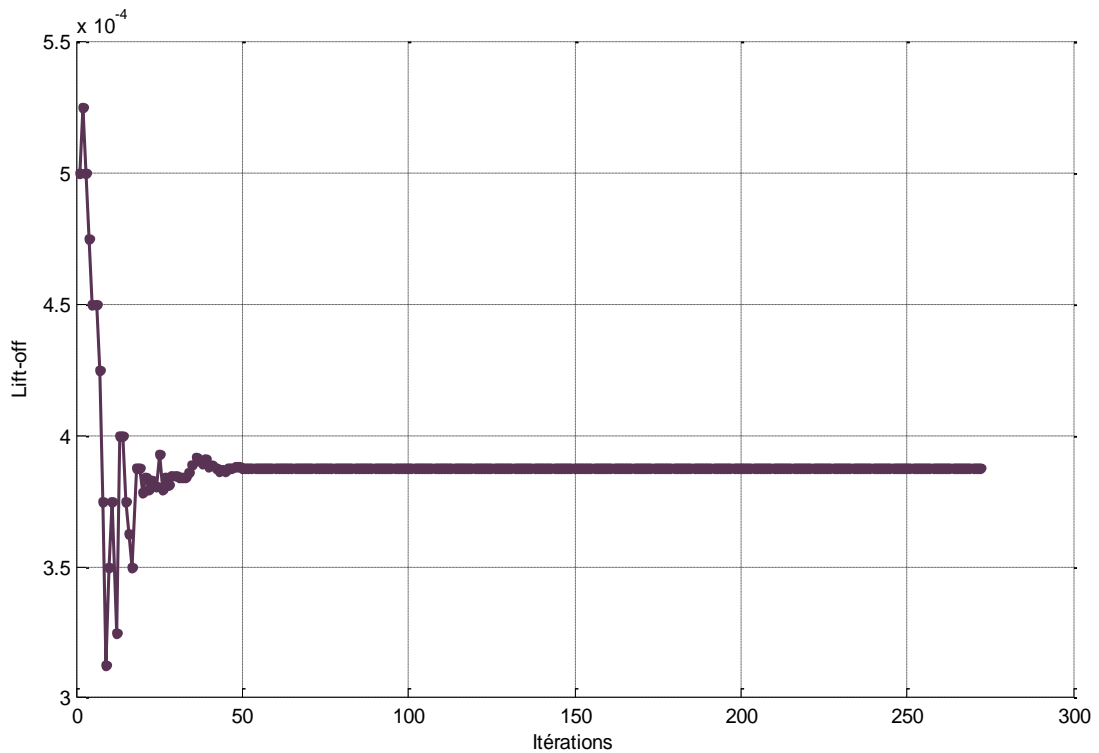


Figure 4.7- Evolution du lift-off de la plaque en Cu estimée en fonction des itérations

4 Traitement du problème inverse

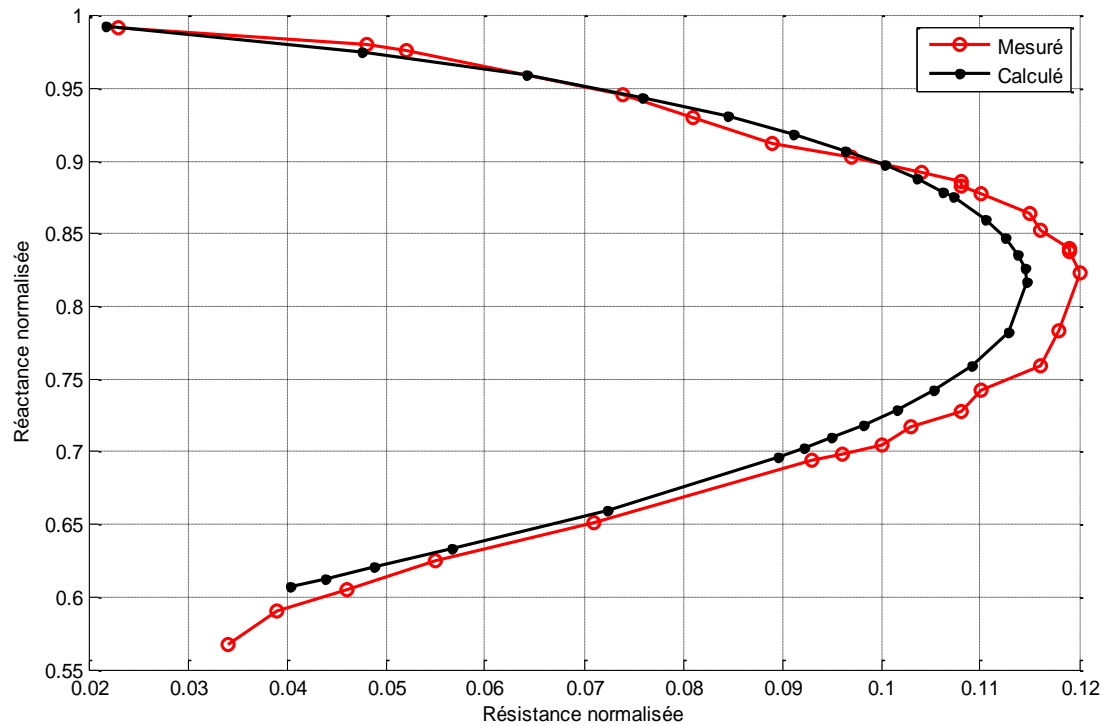


Figure 4.10- Diagramme d'impédance normalisée calculé et mesuré pour la plaque en Cu

IV.7 Conclusion

Les paramètres physiques de la pièce contrôlée ont été évalués pour la modélisation 3D. A travers cette approche, une modélisation en 2D éléments finis du système (bobine+matériau) a été réalisée.

Le modèle direct a été inversé via un algorithme du type simplex en vue de l'évaluation des paramètres physiques.

La méthodologie proposée peut être appliquée à différentes bobines et pour différents matériaux

Conclusion
générale

et perspectives

IV.8 Conclusion générale et perspectives

Ce travail rentre dans le contexte du contrôle non destructif par courants de Foucault d'un système de contrôle (plaque conductrice non magnétique + capteur inductif) dans le but d'une évaluation non destructive des caractéristiques électromagnétiques et géométriques d'une plaque.

Cette évaluation est structurée en deux parties, la première est de traiter notre problématique par la modélisation EF3D en utilisant la formulation magnétodynamique. Cette modélisation nous a permis d'étudier la sensibilité du modèle, dont l'effet des différents paramètres électromagnétique et géométrique tel que la conductivité et l'épaisseur de revêtement (considéré comme un lift-off supplémentaire) sur les performances du capteur a été abordé dans l'application

En ce qui concerne l'aspect pratique de ce travail, L'excitation du capteur ainsi que toutes les mesures sont réalisées grâce au Lock in Amplifier qui est piloté par ordinateur en vue de la construction d'une base de données pour l'inversion, la validation du model a été effectuée en comparant les résultats obtenus par simulation avec les résultats expérimentaux

La deuxième étape dans ce travail vient compléter la première, elle sert à une estimation des paramètres utiles pour toute modélisation d'un système électromagnétique par une méthode simple et performante, pour ce faire, nous avons employé une approche par la résolution du problème inverse. Un modèle EF 2D a été intégré dans un algorithme itératif de minimisation d'une fonction objectif (fonction coût). L'algorithme utilisé est celui du « simplex ». L'étude de sensibilité du modèle nous a permis d'examiner l'influence des différents paramètres qui interviennent dans la simulation numérique, en l'occurrence la conductivité électrique et le lift-off. Le modèle s'est montré efficace et rapide pour l'identification d'un seul ou de deux paramètres et donne des résultats avec une précision acceptable.

Le travail réalisé au cours de ce mémoire nous a permis d'acquérir une base solide dans la mise en œuvre d'outils logiciels et matériels pour l'analyse des problèmes relatifs au contrôle non destructif par courants de Foucault. Les algorithmes mis en place et les méthodes utilisées sont suffisamment généraux pour pouvoir être réutilisés dans des études ultérieures.

Conclusion générale et perspective

En termes de perspectives, nous visons à :

- Perfectionner la méthode en utilisant un analyseur d'impédance de précision.
- Traiter les matériaux ferromagnétiques
- Utiliser d'autres méthodes d'optimisation (d'inversion) telles que les algorithmes génétiques, ...

Références

bibliographiques

V. Références bibliographiques

1. Thollon, F., *Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques*, 1995, Ecole centrale de Lyon.
2. Ravat, C., *Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif*, 2008, Université Paris Sud-Paris XI.
3. LAKHDARI, A.-E., *ETUDE ET MODELISATION DE CAPTEURS EN CND PAR COURANTS DE FOUCAULT: APPLICATION A LA DETECTION DES FISSURES*, 2011, Université Mohamed Khider-Biskra.
4. Zemouri, N., *Etude et Réalisation d'un Système Multicapteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs*, 2016, Université Mouloud Mammeri.
5. Helifa, B., *Contribution à la Simulation du CND par Courants de Foucault en vue de la Caractérisation des Fissures Débouchantes*, 2012, Nantes.
6. 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, Université de Nantes.
7. Santandréa, L. and Y. Le Bihan. *Using COMSOL-multiphysics in an eddy current non-destructive testing context*. in *Proceedings of the COMSOL Conference*. 2010.
8. Zerguini, S., *Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault*. 2009.
9. Abdelli, D.E., *Modélisation par les volumes finis d'un problème de contrôle non destructif de forme complexe*, 2014, Université Mohamed Khider Biskra.
10. 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.
11. Choua, Y., *Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault*, 2009, Université Paris Sud-Paris XI.
12. Dinda, P.T. and P. Mathey, *Electromagnétisme: Ondes et propagation guidée*. DUNOD ed, ed. E.d. SAVOIRS2017.
13. BOUCHALA, T., *Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault*.
– *Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite* –, in *Département de l'électrotechnique*2008, niversité Elhadj Lakhder Batna.
14. Bensaid, S., *Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes*, 2006, Université de Nantes.

Références bibliographiques

15. 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.
16. salah, C.B., *Identification et localisation des défauts dans un matériau conducteur en CND par courants de Foucault*, in *Physique 2018*, Ecole nationale supérieure de Laghouat
17. Hamel, M., *Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques*, 2012, Université Mouloud Mammeri.
18. Belkhiri, Y., *Modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécaniques couplés par la méthode des volumes finis (CVM)*, 2005, Université de Batna 2-Mustafa Ben Boulaid.
19. Oukhellou, L., *Paramétrisation et classification des signaux en Contrôle non destructif. Application à la reconnaissance des défauts de Rails par courant de Foucault*, 1997, Université de Paris-Sud.
20. NAÏDJATE, M., *Développement d'un Code de Calcul pour l'Etude du Rayonnement Electromagnétique des Panneaux Solaires en Champ Proche*, 2012, Université Amar Telidji de Laghouat.
21. TITOUAH Lounis, Z.A., *Caractérisation Non Destructive par Courants de Foucault Pulsés d'une rainure par inversion associé à méthode des circuits électriques couplés.*, in *DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE 2014*, UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA.
22. COMSOL Multiphysics. *La Suite Logicielle COMSOL®*. 2019; Available from: <https://www.comsol.fr/products>.
23. Gerlaud, A. *Simulation multiphysique pour la conception busbars laminés*. in *Symposium de Génie Électrique 2014*. 2014.
24. KHELFI, M.S., *Détermination par éléments finis d'arêtes des dimensions d'un défaut dans un matériau amagnétique homogène*, in *Physique 2019*, Ecole normale supérieur de Laghouat
25. Nelder, J.A. and R. Mead, *A simplex method for function minimization*. The computer journal, 1965. **7**(4): p. 308-313.
26. Fan, M., et al., *Elimination of liftoff effect using a model-based method for eddy current characterization of a plate*. NDT & E International, 2015. **74**: p. 66-71.