

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



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES

THEME

**" Détection de défauts surfaciques par
Contrôle Non Destructif « CND »
par Courants de Foucault
en mode absolu"**

Proposé et Dirigé par :

-Mr. ABDOU Abdelhak

Présenté par :

-MENASRI Mohammed

Année Universitaire : 2011/2012

N° d'ordre : 042

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à :

Mes chers parents: la mère fadila le père Abed RaZak (رحمة الله عليه) avec toute ma gratitude pour toutes ces années de sacrifices et d'encouragement.

Mon frère : AHMED et AYMEN, Mes très chers sœurs SARA, FATIMA, et particulièrement l'enfant de ma sœur: FORAT et MOUHAMMED YASSINE.

A tous les membres de ma famille grande et petite.

A tous mes amis que je ne vais pas nommer car ils sont Nombreux & je ne sais pas qui choisir.

DJRIOU Ali et sa famille

Mon amis et frères BERRA Ibrahim, ISMAILI Yassine et leurs familles.

MENASRI MOUHAMMED

Remerciements

Je remercie en premier lieu le bon Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la force et l'énergie d'accomplir ce modeste travail.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à :

Monsieur **ABDOU Abdelhak**, maître de conférences à l'université de M'sila et rapporteur, de ce mémoire pour la confiance qu'il m'a fait en me proposant ce thème ainsi que son aide et pour les précieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer en toutes occasions.

Je remercie vivement le Dr **BEN SAID Samir**, maître assistant à l'Université M'sila pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée. Ses éclaircissements ont été d'un grand secours.

De même, je remercie vivement le Mr **LADGHEM CHICOUCHE brahim**, maître assistant à l'Université M'sila pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée. Ses éclaircissements ont été d'un grand secours.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer au jury.

Je suis aussi redevable à tout les enseignants et personnel administratif du département Génie électrique de l'université de M'sila, qui ont instauré un environnement d'entraide et de soutien tant au plan scientifique qu'au plan humain.

Une pensée particulière à Oussama Ben Saleh, Khaled Mahdi, et Youcef Mekhiche, pour leurs collaborations étroites et soutient.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué à l'achèvement de ce travail, et de mener à bien ce mémoire de master.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans mentionner, tous mes amis de la promotion Master 2011/2012 spécialité Ingénierie des Système Electromécaniques.

MENASRI MOUHAMMED

Table des matières

Table des Figures	i
Liste de tableau	iv
Notations et Symboles	v

Introduction Générale

Introduction Générale	2
Généralités et Problématique	2
Objectifs du travail.....	3
Présentation du travail.....	3

Chapitre I : Généralité sur Les Contrôles Non Destructifs

I.1. Introduction	6
I.1.1. Définition	6
I.1.2. Le but de Contrôle Non Destructif.....	6
I.1.3. Les domaines d'application sont nombreux.....	7
I.1.4. Principes Généraux.....	9
I.1.5. Quand utiliser le contrôle non destructif, [10]?	9
I.2. Les différentes techniques de CND	9
I.2.1. Examen visuelle	10
I.2.2. Ressuage.....	10
I.2.3. Radiographie	12
I.2.4. Magnétoscopie	14
I.2.5. Les ultrasons.....	16
I.2.6. La thermographie	17
I.2.7. Courants Foucault	19
I.2.8. Les méthodes couplées.....	20
I.3. Tableau récapitulatif	21
I.4. Méthodologie de développement des systèmes de CND.....	22
I.5. Principes de détection des défauts	23
I.6. Classement des défauts détectés en CND.....	23

I.6.1. Défauts de surface	23
I.6.1.1. Défauts ponctuels	23
I.6.1.2. Défauts d'aspect	24
I.6.2. Défauts internes.....	24
I.7. Limite de détection	24
I.7.1. Le rapport signal/bruit.....	24
I.7.2. Le pouvoir séparateur.....	25
I.8. Principe des capteurs inductifs	25
I.8.1. Capteur à courants de Foucault (CCF).....	25
I.8.2. Capteur magnétique (CM).....	26
I.8.3. Inspection des pièces magnétiques (CCF et CM)	27
I.9. Conclusion	27

Chapitre II : Contrôle Non Destructif par Courant Foucault

II.1. Introduction	29
II.2. Principe physique de CND-CF.....	29
II.3. Objectifs des CND par CF	30
II.4. Les caractéristiques du CND par CF	31
II.4.1. Paramètres liés au matériau à sonder	31
II.4.2. Paramètres liés au montage.....	32
II.4.3. Paramètres électriques	32
II.4.4. Effet de peau	32
II.5. Modélisation simplifié du CND par CF	33
II.5.1. Effet de la conductivité.....	35
II.5.2. Effet de la distance capteur/cible (lift off)	36
II.5.3. Effet de la fréquence	37
II.6. Les différents capteurs dans le CND par CF	38
II.6.1. Capteurs à double fonction	38
II.6.2. Capteurs à fonctions séparées	38
II.6.3. Capteurs différentiels	39
II.7. Différentes géométries des bobines à CF	39
II.7.1. Bobine encerclant	39
II.7.2. Bobine interne.....	40
II.7.3. Bobine ponctuelle	40

II.7.4. Bobine plate	41
II.8. Différentes structures des circuits magnétiques des CCF	41
II.9. Les types de sondes	42
II.9.1. Les sondes, les émetteurs et les récepteurs	43
II.9.2. Les sondes à fonction double ou à fonctions séparées.....	44
II.9.2.1. Sondes à fonctions séparées.....	44
II.9.2.2. Sondes à fonction double	44
II.9.3. Les sondes à mesure absolue ou différentielle.....	45
II.9.3.1. Mesures absolues	45
II.9.3.2. Mesures différentielles.....	45
II.10. Modes d'excitation	47
II.10.1. Excitation mono-fréquence	47
II.10.2. Excitation multifréquences	47
II.10.3. Excitation pulsée.....	48
II.11. Domaine d'application	48
II.11.1. Mesure de conductivité électrique	48
II.11.2. Mesure de l'épaisseur de revêtements isolants.....	49
II.11.3. Tri de matière par la nuance état de traitement thermique	49
II.11.4. Détection de fissures	49
II.11.5. Contrôle des tubes, barres et fils.....	50
II.12. Performance et limitations.....	50
II.13. Conclusion.....	51

Chapitre III : Phénomènes électromagnétiques et méthodes de résolution

III.1. Introduction.....	53
III.2. Lois classiques de l'électromagnétisme	53
III.2.1. Loi d'Ampère	53
III.2.2. Loi de Faraday	54
III.2.3. Loi de Lenz.....	54
III.2.4. Loi de Biot et Savart.....	54
III.3. Mise en équation	54
III.3.1. Expression locale des équations de bases.....	55

III.3.2. Relations constitutives des matériaux	56
III.3.3. Conditions de passage	57
III.3.4. Conditions aux limites	58
III.3.5. Conditions de jauge	58
III.3.6. Hypothèses simplificatrices	59
III.4. Différentes formulation électromagnétiques	59
III.4.1. Formulation AV	60
III.4.2. Formulation A*	60
III.4.3. Formulation $T\emptyset$	61
III.4.4. Formulation $\emptyset\emptyset_r$	61
III.5. Méthodes de résolution	63
III.5.1. Méthodes analytiques	63
III.5.2. Méthodes numériques	63
III.5.2.1. Méthode des différences finis	64
III.5.2.2. Méthode des volumes finis	64
III.5.2.3. Méthode des éléments de frontières	64
III.5.2.4. Méthode des éléments finis	64
III.5.3. Les méthodes spécifiques	65
III.6. Résolution en 2D par la méthode des éléments finis	65
III.7. Densité de courants induits	66
III.8. Formulation généralisé pour une plaque conductrice	67
III.9. Les équations dans les différentes régions	68
III.10. Présentation et définition du modèle d'étude	68
III.10.1. Cas d'un capteur absolu ponctuel	68
III.10.2. Cas d'un capteur absolu en E	69
III.11. Calcul d'impédance	70
III.11.1. Méthode directe	70
III.11.2. Méthode de l'énergie	72
III.11.3. Comparaison de la méthode directe et la méthode de l'énergie	73
III.12. Conclusion	74

Chapitre IV : Simulation et analyse des résultats par MEF

IV.1. Introduction	76
IV.2. Organigramme de calcul par MEF en2D	76

IV.3. Applications proposées	78
IV.4. Présentation et définition du modèle d'étude	78
IV.4.1. Simulation d'un (capteur absolu – plaque amagnétique)	78
IV.4.1.1. Interprétation des résultats de simulation	81
IV.4.2. Simulation d'un (capteur absolu – plaque magnétique)	81
IV.4.2.1. Interprétation des résultats de simulation	84
IV.4.3. Simulation d'un (capteur absolu en E–plaque amagnétique)	84
IV.4.3.1. Interprétation des résultats de simulation	87
IV.4.4. Simulation d'un (capteur absolu en E– plaque magnétique)	87
IV.4.4.1. Interprétation des résultats de simulation	89
IV.5. Conclusion	90

Conclusion Générale

Conclusion Générale :	92
-----------------------------	----

Annexes

Annexe A : Formulation de A par MEF en 2D	II
Annexe B : Modèle Dodd et Deeds	V
Annexe C : Densité Courants de Foucault	VIII
Annexe D : Formulation générale pour une plaque isotrope	IX

Référence Bibliographique

Bibliographie	XIV
---------------------	-----

Table des Figures

Chapitre I : Généralité sur les Contrôle Non Destructifs

Figure I.1 : Schéma synoptique de CND.....	09
Figure I.2 : Principe du ressuage.....	11
Figure I.3 : Principe du Radiographie.....	13
Figure I.4:principe de magnétoscopie.....	14
Figure I.5 : Principe d'US.....	16
Figure I.6 : Schéma de principe du contrôle par thermographie.....	18
Figure I.7 : Principe de courant de Foucault.....	19
Figure. I.8 : Méthodologie usuelle pour l'étude et développement des systèmes de CND.....	22
Figure I.9 : Capteur à courants de Foucault.....	26
Figure I.10 : Lignes de champ en présence et en absence de la pièce magnétique.....	26

Chapitre II : Contrôle Non Destructif par Courants Foucault

Figure II.1: Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault.....	30
Figure II.2: Nature du CND par CF.....	31
Figure II.3 : Modèle réel du contrôle non destructif.....	33
Figure II.4 : Schéma équivalent d'un transformateur.....	33
Figure II.5 : Montage d'une bobine en regard d'une pièce conductrice.....	35
Figure II.6 : Influence de la conductivité sur l'enroulement d'impédance.....	35
Figure II.7 : Différentes positions de la par rapport à la cible.....	36
Figure II.8 : Influence du coefficient de couplage « lift off » bobine sur l'enroulement d'impédance.....	36
Figure II.9 : Illustration de l'effet de la conductivité et de la fréquence sur l'impédance.....	37
Figure II.10 : Capteur à double fonction.....	38
Figure II.11 : Capteur à fonction séparée.....	39
Figure II.12: Bobine encerclant.....	40
Figure II.13 : Bobine interne glissante avec noyau.....	40
Figure II.14 : Bobine simple avec noyau.....	41
Figure II.15 : Bobine plate.....	41
Figure II.16 : Différentes géométries du capteur.....	42
Figure II.17: Définition d'un dispositif de mesure.....	43
Figure II.18 : Sonde à double fonctions.....	44
Figure II.19 : Sonde à fonctions séparées.....	44
Figure II.20 : Sonde absolue.....	45
Figure II.21 : Sonde différentielle.....	46

Chapitre III : Phénomènes électromagnétiques et méthodes des résolutions

Figure III.1 : Domaine d'étude.....	55
Figure III.2 : Couplage entre l'électrostatique et magnétisme.....	56
Figure III.3 : La frontière entre M1et M2.....	57

Figure III.4 : Répartition des courants de Foucault pour une pièce.....	68
Figure III.5 : Equations dans les différents milieux.....	68

Chapitre IV : Simulation et analyse des résultats par MEF

Figure IV.1 : Organigramme de calcul par éléments finis.....	77
Figure IV.2 : Modèle Géométrique du dispositif étudié.....	79
Figure IV.3 : Maillage du domaine de résolution.....	79
Figure IV.4 : Représentation du Potentiel Vecteur.....	79
Figure IV.5 : Circulation des lignes du champ.....	79
Figure IV.6 : Représentation de l'induction.....	79
Figure IV.7 : Représentation des vecteurs d'induction B.....	79
Figure IV.8 : Zoom des vecteurs d'induction.....	80
Figure IV.9 : Distribution de la densité des courants induits.....	80
Figure IV.10 : L'allure de l'impédance.....	80
Figure IV.11 : Modèle Géométrique du dispositif étudié.....	82
Figure IV.12 : Maillage du domaine de résolution.....	82
Figure IV.13 : Représentation du Potentiel Vecteur.....	82
Figure IV.14 : Circulation des lignes du champ.....	82
Figure IV.15 : Représentation de l'induction.....	82
Figure IV.16 : Représentation des vecteurs d'induction B.....	82
Figure IV.17 : Zoom des vecteurs d'induction.....	83
Figure IV.18 : Distribution de la densité des courants induits.....	83
Figure IV.19 : L'allure de l'impédance.....	83
Figure IV.20 : Modèle Géométrique du dispositif étudié.....	85
Figure IV.21 : Maillage du domaine de résolution.....	85
Figure IV.22 : Représentation du Potentiel Vecteur.....	85
Figure IV.23 : Circulation des lignes du champ.....	85
Figure IV.24 : Représentation de l'induction.....	85
Figure IV.25 : Représentation des vecteurs d'induction B.....	85
Figure IV.26 : Zoom des vecteurs d'induction.....	86
Figure IV.27 : Distribution de la densité des courants induits.....	86
Figure IV.28 : L'allure de l'impédance.....	86
Figure IV.29 : Modèle Géométrique du dispositif étudié.....	87
Figure IV.30 : Maillage du domaine de résolution.....	87
Figure IV.31 : Représentation du Potentiel Vecteur.....	88
Figure IV.32 : Circulation des lignes du champ.....	88
Figure IV.33 : Représentation de l'induction.....	98
Figure IV.34 : Représentation des vecteurs d'induction B.....	98
Figure IV.35 : Zoom des vecteurs d'induction.....	98
Figure IV.36 : Distribution de la densité des courants induits.....	98
Figure IV.37 : L'allure de l'impédance.....	90

Annexes

Figure A.1 : Un élément triangulaire du maillage éléments finis.....	II
--	----

Figure B.1 : Géométries axisymétriques avec bobine à air.	V
Figure B.2 : Schéma de principe de la spire au dessus d'une plaque.....	VI
Figure D.1 : Représentation du problème.	IX
Figure C.2 : Notation du problème éléments coques.	X

Liste de tableau

Tableau I.1 : Tableau récapitulatif des différentes techniques de CND.....	21
Tableau II.1 : Comparatif des principales techniques de CND.....	43
Tableau II.2 : Comparaison entre les sondes absolues et différentielles.....	46
Tableau III.1 : Résumé sur les formulations.....	62

Notations et Symboles

CND	Contrôle Non Destructif.	
CF	Courants de Foucault.	
END	Evaluation Non Destructive.	
US	Ultrasons.	
CCF	Capteur à Courants de Foucault.	
CM	Capteur Magnétique.	
CFS	Courant Foucault Sinusoïdaux.	
CFP	Courant Foucault Pulsés.	
MEF	Méthode Eléments Finis.	
EDP	Equations Dérivées Partielles.	
2D	Bidimensionnel.	
3D	Tridimensionnel.	
CIVA	Plateforme de simulation pour le CND.	
f_c	Fréquence de contrôle.	
δ	Epaisseur de peau.	
f	Fréquence d'excitation.	
f_g	La fréquence limite.	
σ	Conductivité électrique du matériau.	
μ	Perméabilité magnétique du matériau.	
μ_0	Perméabilité magnétique du vide.	
ϵ	permittivité électriques.	
V_{exc}	Grandeur complexe associée à la tension d'excitation.	
I_{exc}	Grandeur complexe associée à courant d'excitation.	
X_n	Réactance normalisée.	
R_n	Résistance normalisée.	
Z_n	Impédance normalisée.	
Z_0	l'impédance à vide.	
E	Champ électrique.	[V/m].
H	Champ magnétique.	[A/m].
D	Induction électrique.	[C/m ²].

B	Induction magnétique.	[T].
J	Densité de courant.	[A/m ²].
ρ	Densité volumique de charge.	[A/m ³].
ρ_s	Densité surfacique de charge.	
K_s	Densité surfacique de courant.	
N	la normale sortante du milieu 1 vers l'extérieur.	
\vec{A}	Potentiel vecteur magnétique.	
V	Potentiel scalaire électrique.	
J_{cf}	Les courants de Foucault.	
T	Potentiel vecteur électrique.	
\emptyset	Potentiel scalaire magnétique.	
\emptyset_r	Potentiel scalaire magnétique réduit.	
ϕ	Flux magnétique.	
e	Force électromotrice induite.	
H_s	Le champ du à la courante source.	
A_{ci}	La valeur du potentiel vecteur magnétique central pour l'élément (i).	
Γ	Frontière.	
Ω	Domaine d'étude.	
T	Variable temporaire.	

Introduction Générale

Introduction Générale

Généralités et Problématique

Les processus industriels et les pièces fabriquées sont devenus de plus en plus complexes tout au long du siècle dernier. Le CND, dernière étape du processus industriel, vise à contrôler sans endommager la qualité des pièces, en particulier mécanique. Le CND est devenu une nécessité industrielle, la défaillance de ces pièces pouvant entraîner des conséquences plus ou moins importantes. Par exemple, dans les domaines aéronautique et nucléaire, ces conséquences s'expriment souvent en termes de sécurité des personnes ou de dégâts environnementaux. L'enjeu du CND est aussi d'ordre économique: la rapidité et la fiabilité des techniques employées sont capitales pour la réduction des coûts de maintenance et l'optimisation de la durée de vie des installations, [1].

Les méthodes de contrôle non destructif sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité), soit pour déceler la présence de défauts qui, s'ils sont jugés dangereux, provoque le rejet de la pièce ou un arrêt d'exploitation pour réparation. Dans le premier cas, on parle d'évaluation non destructive (END) et dans le second, de contrôle non destructif (CND), [2, 3].

L'objectif du contrôle non destructif est de détecter des dégradations ou homogénéités dans les matériaux sans les altérer. Le CND est par conséquent un enjeu crucial dans le milieu industriel et notamment lors des opérations de maintenance. Parmi le panel de procédés (optique, électromagnétique, thermique, chimique, ultrasonores, etc...), ceux basés sur les courants de Foucault (CF) se distinguent dès lors que l'on a affaire à des matériaux électriquement conducteurs. Leur robustesse et leur simplicité de mise en œuvre en font une des méthodes les plus utilisées, [4].

Les méthodes électromagnétiques sont fréquemment utilisées pour le contrôle des pièces électriquement conductrices et /ou magnétiques. Par exemple, le contrôle de pièces de fonderie (industrie automobile, industrie pétrolière) peut se faire par magnétoscopie. Les tubes (nucléaire, industrie pétrolière...) peuvent être testés par courants de Foucault (CF), soit en cours de fabrication, soit lors des phases de maintenance, [3].

Le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault des matériaux et des structures est d'une grande importance dans plusieurs domaines de l'industrie : L'industrie aéronautique et l'industrie nucléaire, transport pétrolier par « pipe line »...etc. A l'heure actuelle, c'est une nécessité dans tous les secteurs, [5].

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

La technique numérique la plus prometteuse pour le calcul du champ est la méthode des éléments finis (MEF). Elle est encore aujourd'hui la méthode la plus utilisée pour résoudre les systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) issus de problèmes de modélisation électromagnétique et physique, en particulier en mécanique des matériaux, [5]

La problématique du CND consiste à détection des défauts dans une pièce, c'est à dire à mettre en évidence la présence d'une hétérogénéité dans le matériau contrôlé, [6].

Objectifs du travail

Deux objectifs seront visés à travers ce travail:

- Une recherche bibliographique sur le CND tout en mettant l'accent sur les techniques utilisant les courants de Foucault.
- L'élaboration d'un programme de calcul pour la simulation du CND par courants de Foucault utilisant MEF.

Présentation du travail

Notre mémoire comporte quatre chapitres dont nous présentons brièvement les lignes principales ci-après :

Au premier chapitre, nous présenterons des généralités sur le CND et le but et le principe du contrôle non destructif, les domaines d'applications actuels. Ensuite nous évoquerons les différents procédés de contrôle de CND ; principe physique, champs d'application, avantages et inconvénients. Et enfin nous terminerons par une analyse comparative des techniques les plus utilisées.

Au second chapitre nous exposerons avec plus détails la technique de contrôle non destructif par courants de Foucault. Nous rappelons aussi les avantages, les inconvénients et les applications du contrôle par courants de Foucault.

Le troisième chapitre sera dédié à la description des phénomènes électromagnétiques dans le cadre d'hypothèses de l'électrotechnique. Le modèle mathématique, que nous allons présenter,

comprendra l'équation de Maxwell, les lois de comportement des matériaux et les conditions aux limites. Puis, nous donnons les formulations de l'électromagnétique. Nous terminerons par des méthodes de résolution les plus utilisées.

Le dernier chapitre sera dédié aux différentes applications et aux résultats de simulation par Méthode d'Eléments Finis « MEF » et l'exploitation de la méthode, pour les cas suivants :

- ❖ La première application : un capteur absolu et plaque amagnétique ;
- ❖ La deuxième application : un capteur absolu et plaque magnétique;
- ❖ La troisième application : un capteur absolu en « E » et plaque amagnétique;
- ❖ La quatrième application : un capteur absolu en « E » et plaque magnétique;

On terminera notre travail par une conclusion générale où on résumera les travaux réalisés à travers ce mémoire, les difficultés rencontrées et les perspectives envisagées.

Chapitre I : Généralités sur Les Contrôles Non Destructifs « CND »

I.1. Introduction

L'histoire des essais non destructifs END commence avec celle de la physique moderne à la fin du XIXe siècle. Le contrôle non destructif est très répandu en milieu industriel en particulier, l'industrie pétrolière, nucléaire, et automobile. Car vu la gravité des conséquences d'une rupture d'une tige en cours de forage, ou d'un tube de cuvelage ou de production, [3, 5, 7].

Le CND présente un spectre disciplinaire très large et il joue un rôle crucial dans le contrôle de qualité de produit en cours de fabrication en s'assurant par exemple qu'une soudure est de bonne qualité. Il est aussi utilisé pour le suivi de l'état d'un matériel en cours d'utilisation, lors d'opérations de maintenance ou μ a la suite de détection d'anomalies de comportement, afin de localiser et caractériser des défauts, [29].

Dans ce chapitre, en premier lieu nous présenterons le but et le principe du contrôle non destructif ; Les domaines d'application actuel, les différentes phases de contrôle. Puis nous aborderons avec plus de détail les différents procédés de contrôle de CND ; principe physique, champs d'application, avantages et inconvénients. Nous exposerons en détail la technique utilisant les courants de Foucault. Nous terminerons par une analyse comparative des techniques les plus utilisées.

I.1.1. Définition

On désigne par contrôle non destructif CND l'ensemble des méthodes permettant de caractériser l'intégrité de structures industrielles ou de matériaux sans les dégrader. L'emploi de ces procédés Intervient à différentes étapes de la vie d'un produit, que ce soit au cours de sa fabrication, de son utilisation ou dans le cadre d'opérations de maintenance, [4, 6, 7].

I.1.2. Le but de Contrôle Non Destructif

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce et le deuxième cas, il s'agit en général de défauts. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants, [1, 3]

✓ la rapidité d'exécution

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

✓ le coût

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

✓ la reproductibilité

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures: une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

✓ la fiabilité

Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

✓ la sensibilité

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

✓ la résolution

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite, [3].

I.1.3. Les domaines d'application sont nombreux

A l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique.

Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation. La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup ; on recherche les défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), mais aussi désormais des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire), [28].

- Détection de défauts et Evaluation.
- Détection de fuite ;
- Localisation de défauts ;
- Mesures Dimensionnelles ;
- Caractérisation des Structures et Microstructures ;
- Estimation des Propriétés Physiques et Mécaniques ;
- Mesures des contraintes et des réponses dynamiques ;
- Choix du matériau et Détermination de la Composition Chimique, [10].

On peut, par ailleurs, considérer que le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie, conduisant à trois types d'application se différenciant à la fois par le contexte industriel et par la nature du contrôle lui-même :

❖ **Le contrôle en cours de fabrication**

Les essais non destructifs au cours de la fabrication apparaissent de plus en plus comme un moyen d'économiser de l'argent, dans la mesure où ils permettent de rejeter les pièces défectueuses avant leur achèvement, plutôt que de contrôler les pièces une fois fabriquées. C'est un procédé souvent automatisé, impliquant alors un appareillage installé en ligne de fabrication, aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux.

❖ **Le contrôle en recette :**

Procède de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant, d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison. A ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi bien souvent d'en définir la nature et les dimensions.

❖ **Le contrôle en service :**

En maintenance prédictive, le CND permet également de réaliser des économies considérables en évitant le remplacement de pièces non défectueuses (ce qui est parfois le cas quand la durée de vie est estimée) et les interruptions imprévues d'activités pour réparation, toujours très coûteuses, lorsqu'une pièce critique casse avant la date estimée. C'est pourquoi les ventes de systèmes de contrôle non destructif augmentent rapidement dans ce domaine, [28].

I.1.4. Principes Généraux

Quel que soit la technique adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND selon le synoptique de la figure I.1.

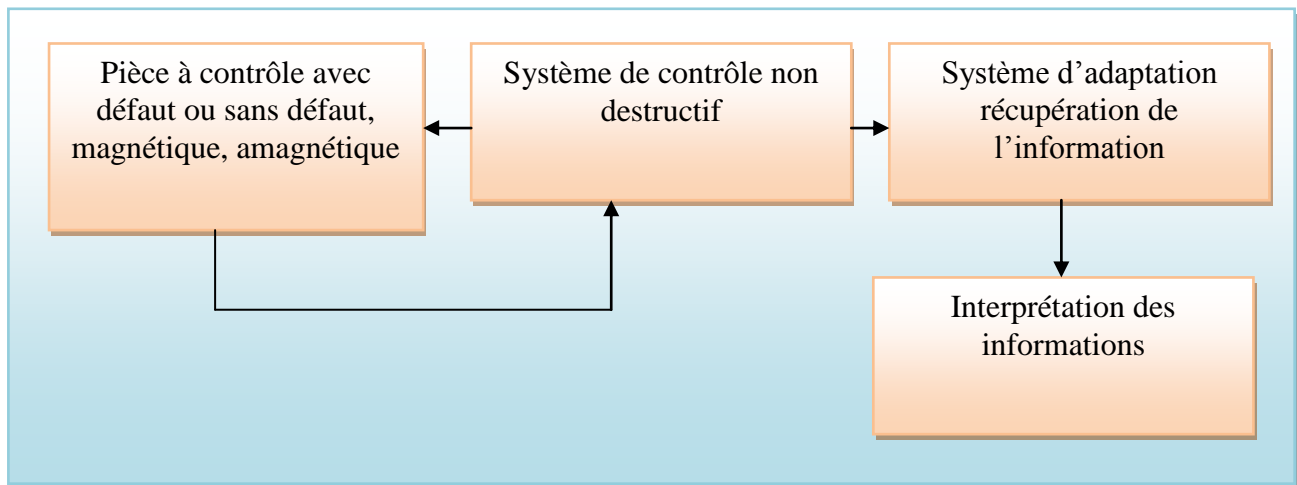


Figure I.1 : Schéma synoptique de CND, [8].

Quelle que soit la nature de la cible (pièce à tester), magnétique ou amagnétique, elle se caractérise par un ensemble de paramètres, que l'on va chercher à estimer afin de formuler un diagnostic d'intégrité, [8, 9].

I.1.5. Quand utiliser le contrôle non destructif, [10]

- Il existe des applications des essais non destructifs à tous les stades de la fabrication d'un composant ;
- Assistance dans le développement de la production ;
- Examen et choix des matériaux ;
- Gestion, amélioration ou contrôle du processus de fabrication, Vérification des assemblages.

I.2. Les différentes techniques de CND

Les techniques de CND utilisées sont diverses: la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, les courants de Foucault... Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...). Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Les différentes familles de CND sont représentées: les courant de Foucault (40%), les ultrasons (40%), la radiographie, le ressuage, la thermographie (20%), [1, 3, 11].

I.2.1. Examen visuelle

- **Principe**

L'examen visuel est le procédé de contrôle le plus ancien, le plus simple plus générale. Car le plus économique à mettre en œuvre. Il nécessite uniquement les "bons yeux" d'un opérateur, [3, 8, 11, 12].

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect réhilitaires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, [28].

- **Application**

la domaine d'application de cette technique est contrôlée industriel en ligne, qu'il s'agisse du contrôle des produits fabriqués en continu tels que les bandes de tôle, de papier, ou du contrôle de pièces fabriquées en grande série, [10].

- **Avantage**

- ✓ Examen simple,
- ✓ Rapide et moins coûteux, [5, 8].

- **Inconvénient**

- ✓ Détection limite aux défauts visibles,
- ✓ La surface doit être propre, [5, 8].

I.2.2. Ressuage

- **Définition**

Révéler la présence de défauts débouchant à la surface d'une pièce, [10].

- **Principe**

Cette méthode complète l'examen visuel en faisant apparaître des défauts de surface dans un contraste coloré ou fluorescent. Le liquide pénètre, en particulier par capillarité,

dans les ouvertures des défauts. Après un certain temps correspondant à la pénétration du liquide d'imprégnation dans les défauts, l'excès de liquide présent à la surface de la pièce est éliminé par lavage (Figure (I.2)). La surface est ensuite séchée puis recouverte d'un révélateur du liquide. L'éclairage approprié de la pièce, qui dépend du liquide utilisé, permet l'observation visuelle des défauts à la surface de la pièce. Cependant cette méthode ne permet de mettre en évidence que les défauts débouchant en surface et ne donne pas une caractérisation complète du défaut, [1, 3, 4, 6, 12].

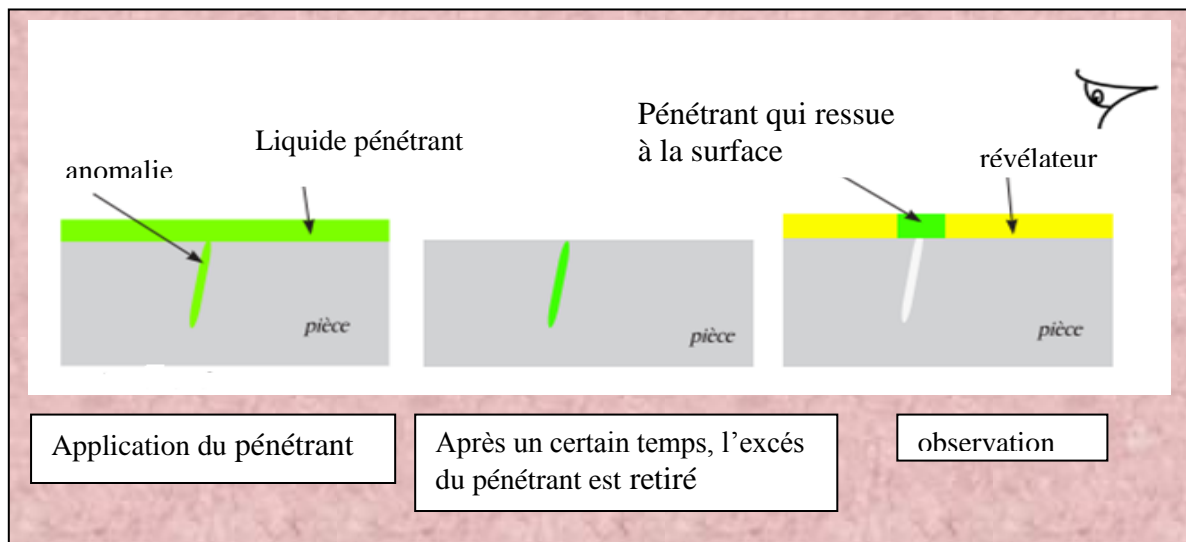


Figure I.2 : Principe du ressuage, [3].

• Application

Le domaine d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement avec le pénétrant. Le ressuage est une méthode que l'on peut utiliser à la fois pour le contrôle de pièces de sécurité en petite ou moyenne série et en contrôle de pièces à l'unité, au cours de leur fabrication ou au cours des opérations de maintenance, [3, 7, 8, 28].

• Avantage

- ✓ procédé de contrôle économique ;
- ✓ procédé de contrôle relativement rapide ;
- ✓ bonne sensibilité de détection des défauts débouchant avec appréciation de leur longueur ;

- ✓ détection possible de petit défaut ;
- ✓ procédé insensible à l'orientation des défauts par rapport à la surface ;
- ✓ utilisable sur les matériaux amagnétiques à l'inverse de la magnétoscopie ;
- ✓ possibilité d'automatisation du procédé, [5, 8].

- **Inconvénient**

- ✓ détection de défaut obligatoirement débouchant sur une surface ;
- ✓ accès d'un seul cote pour les éléments aux de faible diamètre ;
- ✓ impossibilité de contrôle les matériaux poreux ;
- ✓ la surface à contrôle ne doit être expérimentes pour certain technique ;
- ✓ impossible de révéler les défauts internes et obstrues ;
- ✓ gestion des déchets liquides rejetés à l'egnot, [5, 8].

I.2.3. Radiographie

- **Définition**

La radiographie est la technique de production de radiogramme. Le radiogramme est une image sur une émulsion sensible d'un objet traversé par un rayonnement ionisant, [10].

- **Principe**

Le principe de la radio graphie est le même que pour le domaine médical. La méthode met à profit l'absorption par la matière des rayonnements électromagnétiques ionisants. L'examen de la structure ou de l'état interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon X, ou γ) et à recueillir le rayonnement résiduel non absorbé sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la figure (I.3), [1, 3, 4].

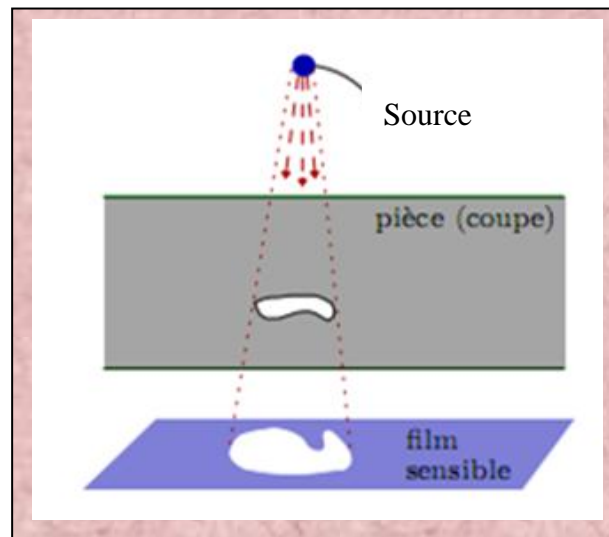


Figure I.3 : Principe du Radiographie, [1].

- **Application**

Traditionnellement, les domaines d'application du contrôle radiographique sont ceux de la fonderie et du soudage métallique avec la mise en évidence de porosités, soufflures, inclusions non métalliques, criques, manque de pénétration. Les nouvelles techniques de contrôle en temps réel sont en train d'élargir ce domaine d'application hors des industries métallurgiques, [3, 7, 8].

- **Avantage**

- ✓ facilité de détection des défauts internes des pièces ;
- ✓ rapidité relative d'obtention du résultat ;
- ✓ bonne sensibilité de détection des défauts ;
- ✓ traçabilité et archivage des résultats par l'intermédiaire d'une file ;
- ✓ numérisation possible avec un traitement d'image, [5].

- **Inconvénient**

- ✓ investissement relativement important ;
- ✓ mise en œuvre délicate sur chantier avec tube rayon X ;
- ✓ limitation du contrôle par l'épaisseur et par le matériel utilisé ;

- ✓ sensibilité de détection liée l'orientation du défaut par rapport au rayonnement ionisant ;
- ✓ les règles de sécurité sont rigoureuses et contraignantes ;
- ✓ les opérateurs doivent être très expérimentés, [5].

I.2.4. Magnétoscopie

• Définition

Le CND par magnétoscopie n'est utilisable que pour les matériaux ferromagnétiques. Cette technique est particulièrement efficace pour les défauts de surface de très petites dimensions, mais donne difficilement de bons résultats pour les défauts en fous, [10].

• Principe

La magnétoscopie consiste à créer un flux magnétique intense à l'intérieur d'un matériau ferromagnétique. En présence d'un défaut sur son chemin, le flux magnétique est dévié et il se crée une fuite magnétique. Des particules colorées ou fluorescentes de type limaille de fer faisant office de révélateur (par analogie avec le ressuage) sont projetées dans la zone inspectée. Si leur répartition est homogène, la pièce inspectée est saine, sinon celle-ci fournit une signature caractéristique de la présence d'un défaut. Figure (I.4), [1, 3, 4, 6].

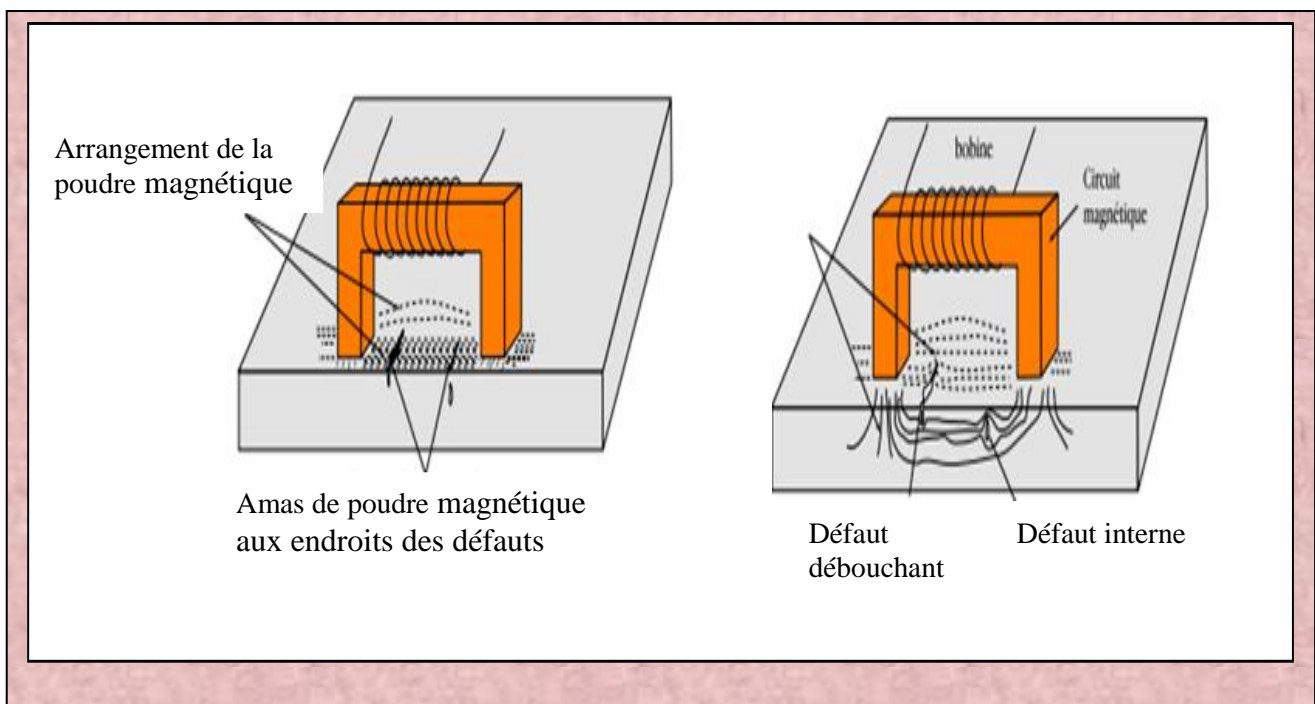


Figure I.4: principe de magnétoscopie, [3].

• Application

La magnétoscopie permet de détecter des défauts de densité débouchant en surface ou proches de la surface sur des matériaux ferromagnétiques tels que aciers ordinaire au carbone, aciers ferritiques ordinaires et au chrome (13 % de chrome), fontes, nickel, cobalt. Les aciers austénitiques ne sont pas ferromagnétiques. On considère qu'un matériau est ferromagnétique lorsque soumis à un champ continu de 2400 A/m, il présente une induction d'au moins 1 tesla, [8].

• Avantage

- ✓ procédé de contrôle économique ;
- ✓ méthode de mise en œuvre plus rapide que le contrôle par ressuage ;
- ✓ facilité de détection des défauts débouchant et immédiatement sous-jacents (à 2mm maximale) ;
- ✓ les défauts peuvent être on obstrués ;
- ✓ rapidité et relative d'obtention des résultats ;
- ✓ possibilité d'apprécier la longueur des défauts ;
- ✓ bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculairement au champ, [5,8].

• Inconvénient

- ✓ méthode de contrôle exclusivement réserve aux matériaux ferromagnétiques ;
- ✓ impossible de détecte des défauts en profondeur (> 2mm de profondeur) ;
- ✓ aimantation difficile des pièces à géométrie complexe ;
- ✓ risque électrique par direct de courant ;
- ✓ risque de microfissuration sur certains aciers sensibles ;
- ✓ démagnétisation obligatoire après contrôle, [5,8].

I.2.5. Les ultrasons

• Définition

Le contrôle par ultrasons(US) exploite les propriétés de propagation de son des ultrasonores (transmission, réflexion et absorption) dans les milieux et consiste à émettre une onde acoustique dans la pièce à contrôler et à en analyser l'écho de retour, [4].

• Principe

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. Le signal est maximal lors que le défaut st perpendiculaire aux ondes émises (figure I.5), [1, 3, 6].

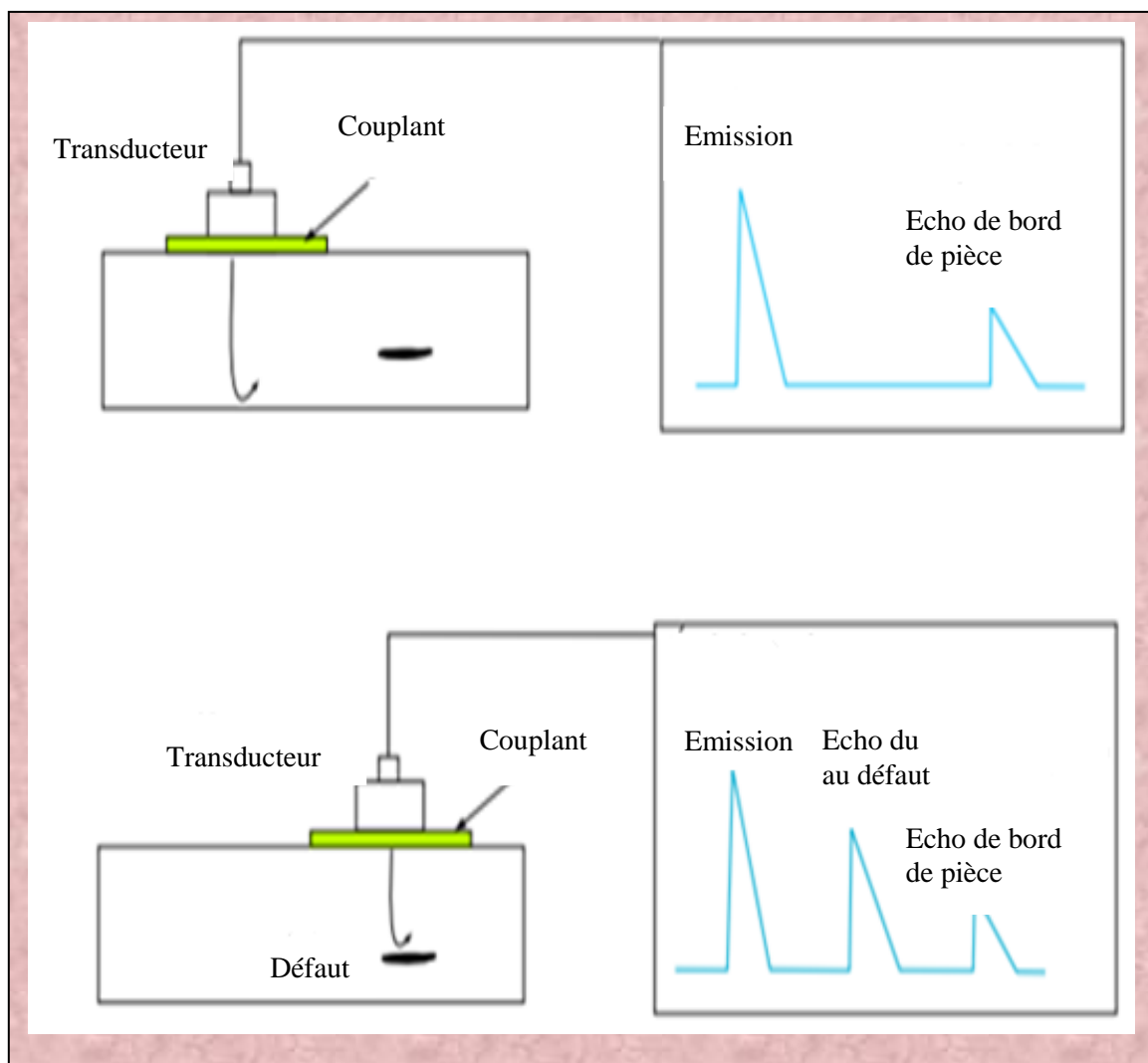


Figure I.5 : Principe d'US, [3].

• Application

L'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques. Ce champ s'élargit de plus en plus au contrôle des matériaux et assemblages non métalliques, céramiques, polymères, matériaux composites, cela s'effectue lentement, eu égard aux difficultés pratiques rencontrées et dues à la nature même de ces produits à structure peu homogène et anisotrope, [7, 8].

• Avantage

- ✓ Méthode très sensible à la détection des défauts plans correctement orientés ;
- ✓ Détection précise des défauts dans l'épaisseur de la pièce ;
- ✓ Accès sur une seule face pour contrôler la totalité du volume ;
- ✓ Souplesse d'utilisation sur les chantiers ;
- ✓ Automatisation possible du procédé, [5, 8].

• Inconvénient

- ✓ Utilisation obligatoire d'un couplant (eau, gel) entre le palpeur et la pièce ;
- ✓ Difficulté de mise en œuvre sur faibles épaisseurs ;
- ✓ Mise en œuvre fine sur matériau à structure métallurgique hétérogène (gros grains, fonte, moulé, centrifugé) ;
- ✓ Zone morte ou aveugle en surface de contact du palpeur, [5, 8].

I.2.6. La thermographie

Le CND par thermographie stimulée consiste à appliquer une source d'énergie (lampe à incandescence, faisceau laser, flux d'air chaud,...) sur la pièce à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La mesure de la distribution de la température à la surface de la pièce est obtenue au moyen d'une caméra infrarouge (mesure de rayonnements thermiques émis par la pièce). Ce qui permet,

après résolution du problème inverse et analyse de retrouver certaines propriétés physiques et/ou géométriques de la pièce. Voir figure (I.6), [3, 6].

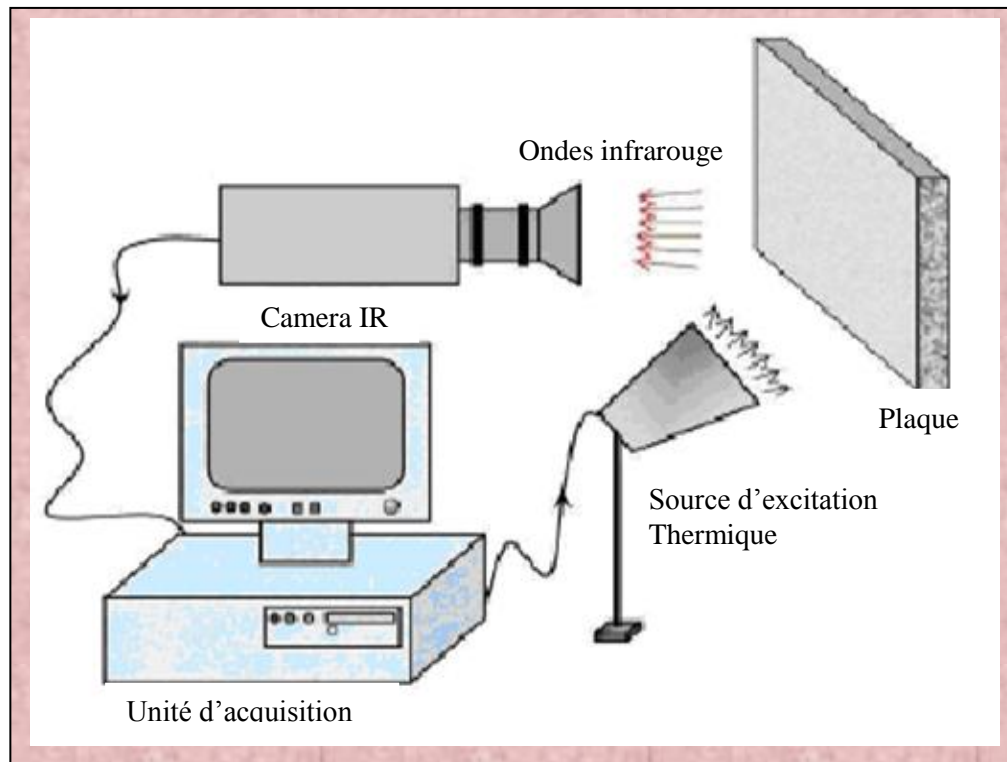


Figure I.6 : Schéma de principe du contrôle par thermographie, [6, 8].

• **Avantage**

- ✓ Méthode relativement rapide et sans contact ;
- ✓ Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée ;
- ✓ Les cavités (champs de bulles d'air, fissures, délaminages, ...) sont bien détectées ;
- ✓ La sensibilité à la détection des défauts de faibles dimensions ;
- ✓ L'archivage des résultats est garanti à l'aide de la caméra infrarouge,[24].

• **Inconvénient**

- ✓ Des difficultés de mesure liées aux effets perturbateurs ;
- ✓ Des difficulté de localisation de profondeur des défauts, du fait que l'image obtenue donne un projection de cas derniers sur le plan de la pièce testée ;
- ✓ L'interprétation des mesures pas toujours facile, surtout identifier la nature des défauts ;

- ✓ La phase d'interprétation des résultats présente des restrictions pour une automatisation totale de la technique, [24].

I.2.7. Courants Foucault

• Principe

Cette méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs de l'électricité. Elle consiste à placer une pièce conductrice dans un champ magnétique variable dans le temps. Celle-ci est alors parcourue par des courants induits, appelés "courants de Foucault" (physicien français 1819-1868). Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifient par la même l'impédance de cette bobine. Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault se développent principalement sur la surface des corps conducteurs (effet de peau), (voir figure (I.7)).

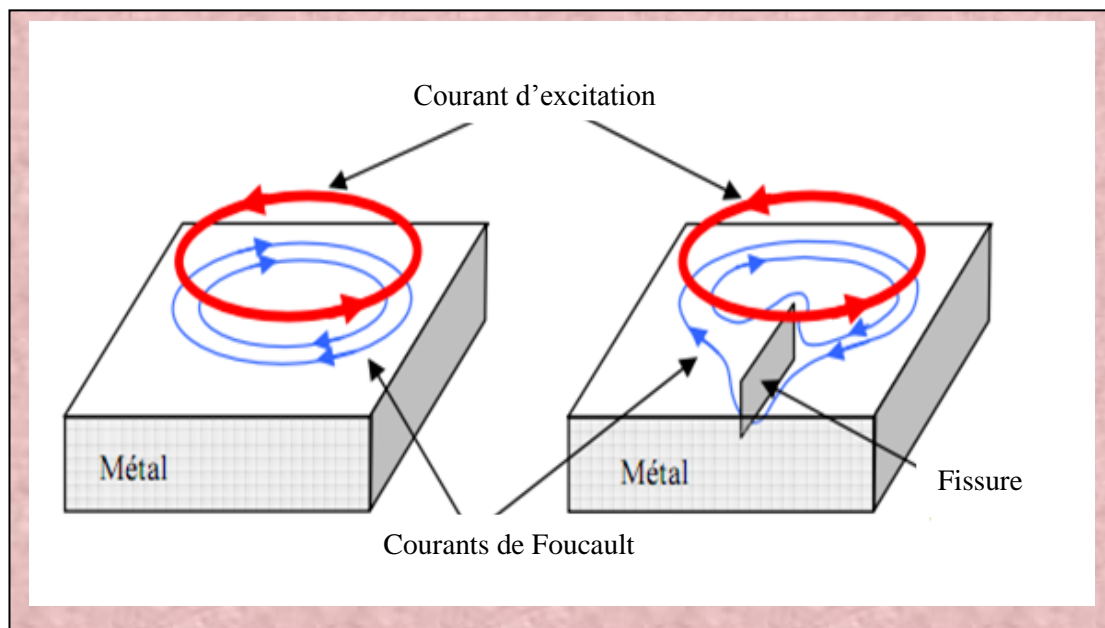


Figure I.7 : Principe de courant de Foucault, [6].

Généralement les courants de Foucault circulent au voisinage de la surface, c'est l'effet de Peau, [1, 3, 5, 14, 15].

• Application

L'utilisation des courants de Foucault dans les applications de CND est limitée aux pièces électriquement conductrices. Elle s'étend de l'inspection des tubes (échangeurs, générateurs de vapeurs de centrales nucléaires) à la recherche des défauts débouchant sur des surfaces

plus ou moins planes. Il est aussi possible de mesurer des épaisseurs de paroi ou la perméabilité magnétique du matériau, [1, 3, 5, 14, 15].

- **Avantage**

- ✓ Rapidité de palpation et de détection (3 fois plus rapide que la magnétoscopie) ;
- ✓ Détection possible à travers un revêtement surfacique ;
- ✓ Aucune préparation particulière de la surface à contrôler ;
- ✓ Qualité de détection indépendante de la vitesse de palpation ;
- ✓ Pas de nécessiter d'étalonnage de l'appareil, une simple calibration est suffisante ;
- ✓ Traitement informatique avec stockage des données de modélisation ;
- ✓ Contrôle non polluant, [5].

- **Inconvénient**

- ✓ Investissement important ;
- ✓ Effet de bords des pièces produisant des signaux parasites ;
- ✓ Détection de défauts débouchant en surface ;
- ✓ Le revêtement de surface doit être non magnétique et isolant électrique ;
- ✓ Importance du positionnement de la sonde par rapport au défaut existant ;
- ✓ Formation théorique et pratique des utilisateurs et intervenants, [5].

I.2.8. Les méthodes couplées

Récemment, des méthodes couplées ont vu le jour et certaines relèvent encore du domaine de la recherche les méthodes électromagnétiques acoustiques, électromagnétiques ultrasonores ou magnéto-optiques, Ces techniques tentent de s'affranchir des différents défauts des méthodes utilisées tout en conservant les avantages. Par exemple, la méthode laser-ultrasons permet de réaliser des contrôles par ultrason sans contact, et donc sans couplant. Ces techniques font actuellement l'objet d'intenses recherches, [1, 4, 6, 9].

I.3. Tableau récapitulatif

Le tableau ci-dessous, englobe les techniques de CND les plus utilisées, avec les caractéristiques essentielles de chacune d'elles.

Méthodes de contrôle	Principe physiques	Type de défaut détecte	Domaines d'application	Points forts	Points faibles
Examen visuel	Vision perturbation d'une réflexion	Défaut débouchant, fissures, criques, trous	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Souplesse	Productivité, fiabilité
Ressuage	Effet de capillarité	Défaut fins débouchant	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Simplicité faible cout	Productivité peu quantitatif
Magnétoscopie	Accumulation de poudre	Défaut fins débouchant et sous-cutanés	Produit ferromagnétiques (aciers)	Sensibilité	Reserve pour acier pour quantitatif
Courants de Foucault	Perturbation d'un courant	Défaut fins débouchant	Contrôle en ligne et sur chantier de tout produit métallique	Sensibilité automatisation	Matériaux non conducteurs interprétation
Radiographie X	Atténuation d'un flux	Défauts internes	Contrôle en atelier et sur site de tous matériaux	Cartographie souplesse de réglage	Protection détection des fissures
Ultrasons	Perturbation d'une onde acoustique	Défaut interne et défaut débouchant	Contrôle manuel ou automatique de la majorité de matériaux	Grande sensibilité nombreuses méthodes d'auscultation	Condition d'essai interprétation des échos couplage

Tableau I.1 : Tableau récapitulatif des différentes techniques de CND, [10].

I.4. Méthodologie de développement des systèmes de CND

Indépendamment de la technique de CND utilisée, l'élaboration d'un système peut être décomposée en cinq phases fortement couplées figure (I.8). Tout d'abord, on se fixe l'objectif du contrôle qui est souvent :

- Caractérisation (électrique, magnétique et géométrique) des matériaux ;
- Recherche des défauts dans la structure des matériaux ;
- Caractérisation des défauts.

La première phase consiste à essayer de comprendre et d'analyser l'interaction entre le champ émis par le capteur et la pièce à contrôler. Ensuite, vient la traduction des phénomènes mis en jeu par des modèles analytiques, semi-analytiques ou numérique. Ces outils de simulation sont à la base de la conception et l'optimisation des capteurs. Ils permettent aussi d'inverser le rapport capteur/pièce, cela permet à partir de signaux recueillis de s'informer des caractéristiques de la pièce (ou du défaut).

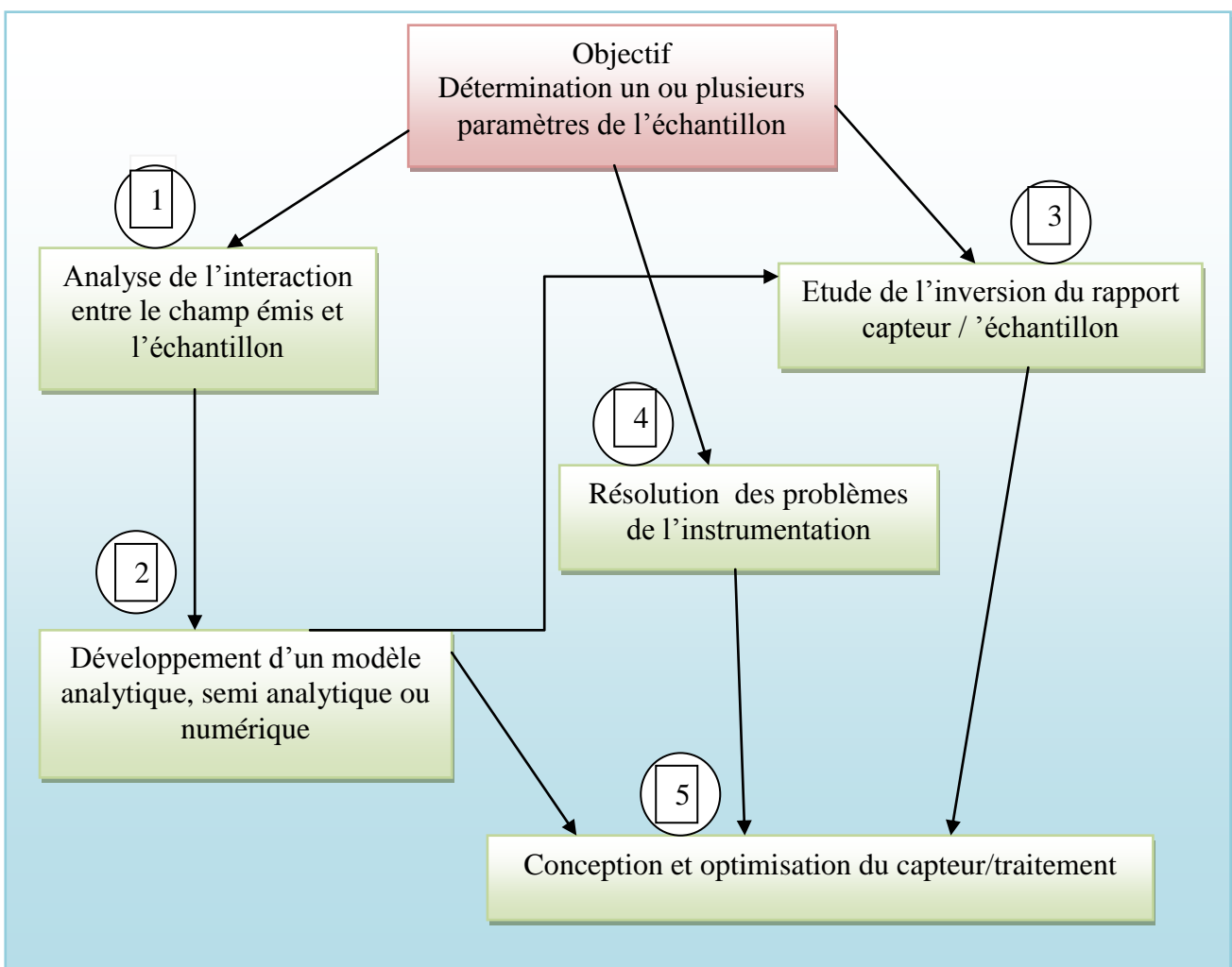


Figure. I.8 : Méthodologie usuelle pour l'étude et développement des systèmes de CND, [23].

Cependant, d'autres problèmes d'instrumentation interviennent. Ils dépendent des paramètres à déterminer (objectif); Par exemple, dans le cas des capteurs inductifs, la détermination des paramètres électriques nécessite un choix de la gamme de fréquences de l'alimentation, [23].

I.5. Principes de détection des défauts

Le défaut, se traduit soit par l'absence de matière (air), ou par une anomalie non conductrice, il peut être situé à la surface de la pièce, au milieu ou à l'intérieur de la pièce, [7, 8].

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

- mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;
- modulation ou altération de ce processus par les défauts ;
- détection de ces modifications par un capteur approprié ;
- traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée, [7].

I.6. Classement des défauts détectés en CND

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité, En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle ci. Brièvement les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement les défauts de surface, les défauts internes, [7, 8].

I.6.1. Défauts de surface

Se sont des défauts accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

I.6.1.1. Défauts ponctuels

Correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes

de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

I.6.1.2. Défauts d'aspect

C'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques, [7, 8].

I.6.2. Défauts internes

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler.

Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger dans le produit emballé.

Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'imagerie infrarouge, ... la majorité des techniques précédemment citées utilisent le capteur comme outil de détection des défauts. Les capteurs sont les premiers éléments rencontrés dans une chaîne de mesure, [7, 8].

I.7. Limite de détection

La limite de détection est liée à deux facteurs de nature différente: le rapport signal/bruit, le pouvoir séparateur.

I.7.1. Le rapport signal/bruit

En sortie d'appareil doit être suffisamment supérieur à 1 pour qu'une conclusion claire soit prise quant à l'absence ou la présence d'un défaut. Ce facteur dépend d'abord de la façon dont le défaut lui-même « émerge » de son environnement que l'on doit chercher à améliorer (nettoyage et meulage des surfaces très rugueuses, affinage des microstructures trop grossières des métaux) à chaque fois que cela est possible (impératifs techniques et de coût). Ensuite, les conditions d'examen (choix d'un éclairage approprié, d'un angle de tir, d'une fréquence d'excitation, etc.), la qualité de l'appareillage (bruit électronique) et la nature du traitement

de l'information (imagerie, renforcement des contrastes) devront concourir à accroître le rapport signal/bruit, [7].

I.7.2. Le pouvoir séparateur

Correspond à la limite physique de détection ; son fondement théorique est bien établi dans le cas des techniques utilisant une onde vibratoire telles que l'optique ou le contrôle ultrasonore. Les lois de la diffraction impliquent en effet que cette limite soit proportionnelle au rapport λ/D , λ étant la longueur de l'onde dans le milieu considéré et D l'ouverture de l'appareil, en fait généralement le diamètre de la sonde. Le paramètre $1/\lambda$ étant proportionnel à la fréquence de la vibration, on comprend ainsi pour-quoi, en contrôle ultrasonore par exemple, l'utilisation de fréquences élevées est favorable à la détection des défauts les plus fins (microscopie ultrasonore). On comprend d'autre part l'intérêt théorique d'accroître fortement le paramètre D (technique d'ouverture synthétique en hyperfréquence et ultrasons, holographie), [7].

I.8. Principe des capteurs inductifs

Un capteur inductif est constitué d'une bobine enroulée sur un noyau de ferrite. Ce capteur est alimenté par courant électrique variable. L'approche d'une cible conductrice et/ou magnétique du capteur modifie la répartition des lignes de champ et se traduit par une variation de l'impédance du capteur. Cette variation est due à la pénétration des lignes de champ à l'intérieur de la cible, [22].

I.8.1. Capteur à courants de Foucault (CCF)

L'effet résultant de l'approche d'une cible peut être mis en évidence, puis analysé en mesurant l'impédance du bobinage d'excitation. Lorsque la cible est purement conductrice, le champ incident induit des courants dénommés courants de Foucault. Ces derniers génèrent un champ magnétique réactif opposant au champ exciteur (loi de Lenz). Une variation de l'impédance ainsi apparaît. On parle dans ce cas de « capteur à courants de Foucault » figure (I.9).

L'amortissement des courants de Foucault dans le cas simple d'une onde plane harmonique d'incidence nulle, décroît exponentiellement en fonction de la profondeur du matériau en regard. On définit alors l'épaisseur de peau par :

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

f : La fréquence d'excitation ;

σ : La conductivité électrique de la cible.

μ : La perméabilité magnétique ;

Dans le cas général, cette formule n'est pas rigoureuse. Néanmoins elle renseigne sur la profondeur au-delà de laquelle les courants induits sont trop faibles pour être influents, [22].

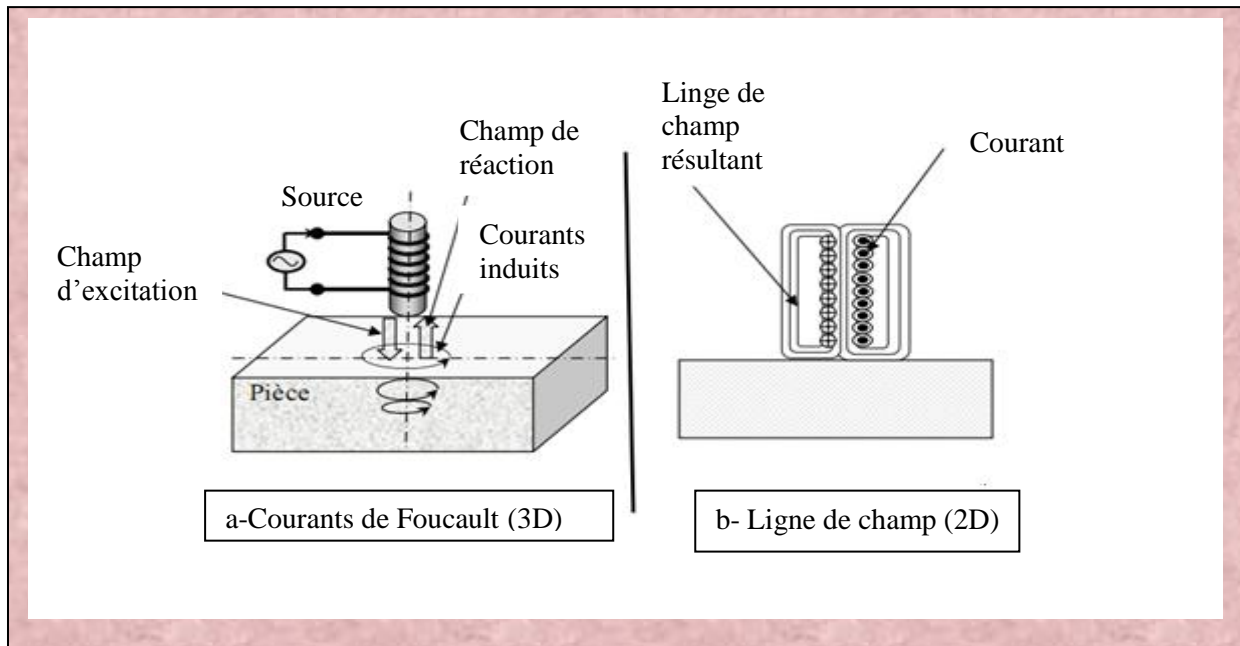


Figure I.9 : Capteur à courants de Foucault, [22].

I.8.2. Capteur magnétique (CM)

L'effet produit par l'approche d'une cible magnétique non conductrice se traduit par une modification des lignes de champ, qui se trouvent attirées par le matériau en regard. Le dispositif fonctionne alors en « capteur magnétique » figure (I.10).

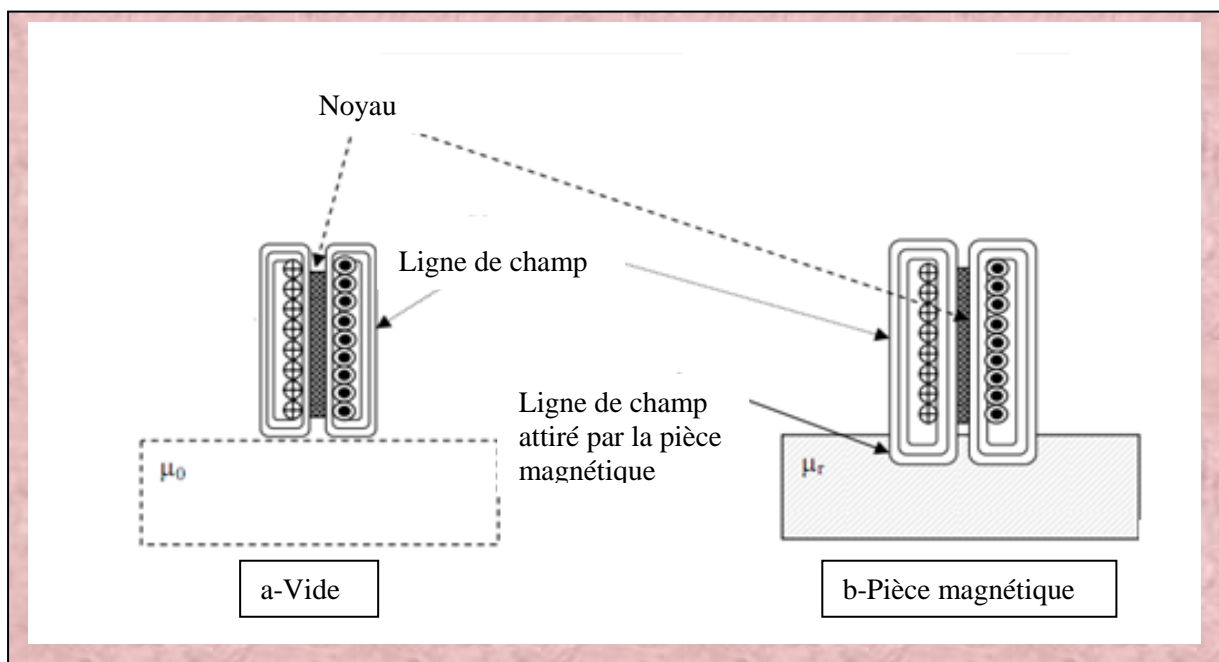


Figure I.10 : Lignes de champ en présence et en absence de la pièce magnétique, [22].

I.8.3. Inspection des pièces magnétiques (CCF et CM)

Dans le cas général où la cible présente à la fois de bonnes propriétés conductrice et magnétique, seule la gamme de fréquence de l'alimentation du capteur distingue les deux technologies CCF et CM. A fréquence élevée, le champ développé ne pénètre quasiment pas dans la cible. Le dispositif fonctionne en CCF. Par contre si la fréquence est faible le capteur fonctionne en CM. Pour des fréquences intermédiaires et à une certaine distance de mesure, les deux phénomènes d'attraction et de répulsion du champ s'équilibrent et le dispositif peut être qualifié à la fois de CCF et CM.

Cependant, un fonctionnement à champ continu (cas extrême des CM) a été évité car toutes pièces métalliques situées à proximité du capteur risquent alors de s'y coller.

D'autre part, si le capteur fonctionne à faible fréquence, l'environnement électromagnétique ne serait pas favorables (fréquence de hachage des courants de traction, tapis piloté automatique). Ces remarques, ont conduit à privilégier un fonctionnement en CCF, [22].

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre on a donné les différents procédés de contrôle de CND ; principe physique, champs d'application, avantages et inconvénients. Comme les matériaux les plus utilisés dans électrotechnique pour des conducteurs ils s'adaptent bien au contrôle par courant Foucault, il fera l'objet du partie suivant.

On constate qu'il n'y a pas de technique valable pour tous les matériaux et pour tous les types de défauts, chacune des techniques à ses particularités et son champ d'application privilégié.

Pour bien choisir une technique de CND, il faut en connaître les avantages et surtout les limites. Le choix d'un procédé est généralement conditionné par plusieurs facteurs, nous citerons principalement :

- ✓ nature et superficie de la cible,
- ✓ nature des fissures recherchées,
- ✓ Critères technico-économiques.

Comme les matériaux les plus utilisés dans électrotechnique pour des conducteurs ils s'adaptent bien au contrôle par courant Foucault, il fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II : Contrôle Non Destructif par Courants Foucault

II.1. Introduction

Au niveau du CND, les courants de Foucault sont de deux manières différentes : La méthode la plus utilisée est celle des Courant Foucault Sinusoïdaux CFS dans laquelle le champ électromagnétique est généré par un courant alternatif. La seconde méthode celle des Courant Foucault Pulsés CFP dans laquelle le champ électromagnétique est généré par une impulsion de courant, d'amplitude et de durée variable, [13].

Les capteurs à courants de Foucault (CCF) sont utilisés depuis plus d'un siècle pour le contrôle des pièces conductrices notamment métalliques. De nos jours, la théorie des capteurs à courants de Foucault est déjà largement développée. Ils trouvent leurs applications dans divers domaines industriels qui vont de la mesure des propriétés de la matière, des mesures dimensionnelles jusqu'à la détection de défauts dans les pièces mécaniques, [8].

Dans ce chapitre On a présenté avec plus de détaille le CND par courants de Foucault, son principe, avantages et inconvénients, Ensuite on passera en revue les différents modes de détection, différents types de capteurs à courants de Foucault, différentes géométries des circuits magnétiques et on terminera par les applications de ce type de contrôle.

II.2. Principe physique de CND-CF

L'alimentation de la bobine du capteur par un courant variable crée un champ d'excitation variable sous la loi de Maxwell Ampère. Toute pièce conductrice baignant dans ce champ sera le siège des courants induits appelés courants de Foucault (loi de Maxwell faraday et loi d'Ohm).

En vertu de la loi de Lenz, ces courants reproduisent à leur tour un champ magnétique opposant au champ qui leur a donné naissance. Le champ résultant (excitation et réaction) modifiera alors le courant dans la source et par conséquent l'impédance du capteur.

Par ailleurs, les courants de Foucault sont importants à la surface de la pièce et s'affaiblissent en allant sur la profondeur. L'utilisation des faibles fréquences peut assurer la capture des défauts profonds. La figure (II.1) résume le principe de CND par courant de Foucault, [22].

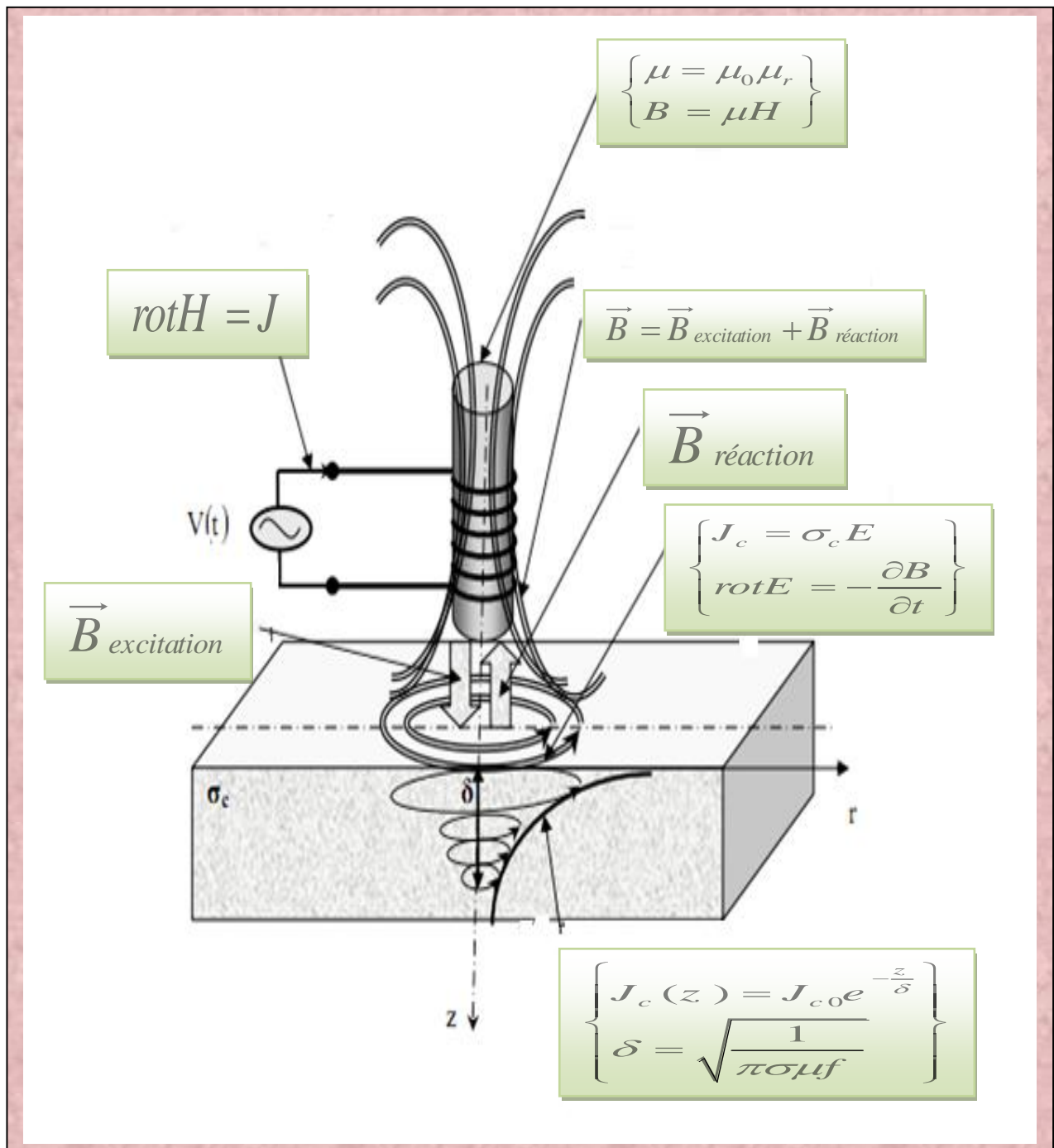


Figure II.1: Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault, [22].

II.3. Objectifs des CND par CF

Un capteur à courants de Foucault peut accomplir diverses tâches. Du fait que l'impédance du système Capteur/Pièce est fonction des différentes caractéristiques électromagnétiques et géométriques. Parfois utilisé pour la caractérisation géométrique et électromagnétique, d'autre fois pour le contrôle de l'état de santé en cherchant et caractérisant les défauts. La figure (II.2) illustre les différentes fonctions d'un capteur CF [22].

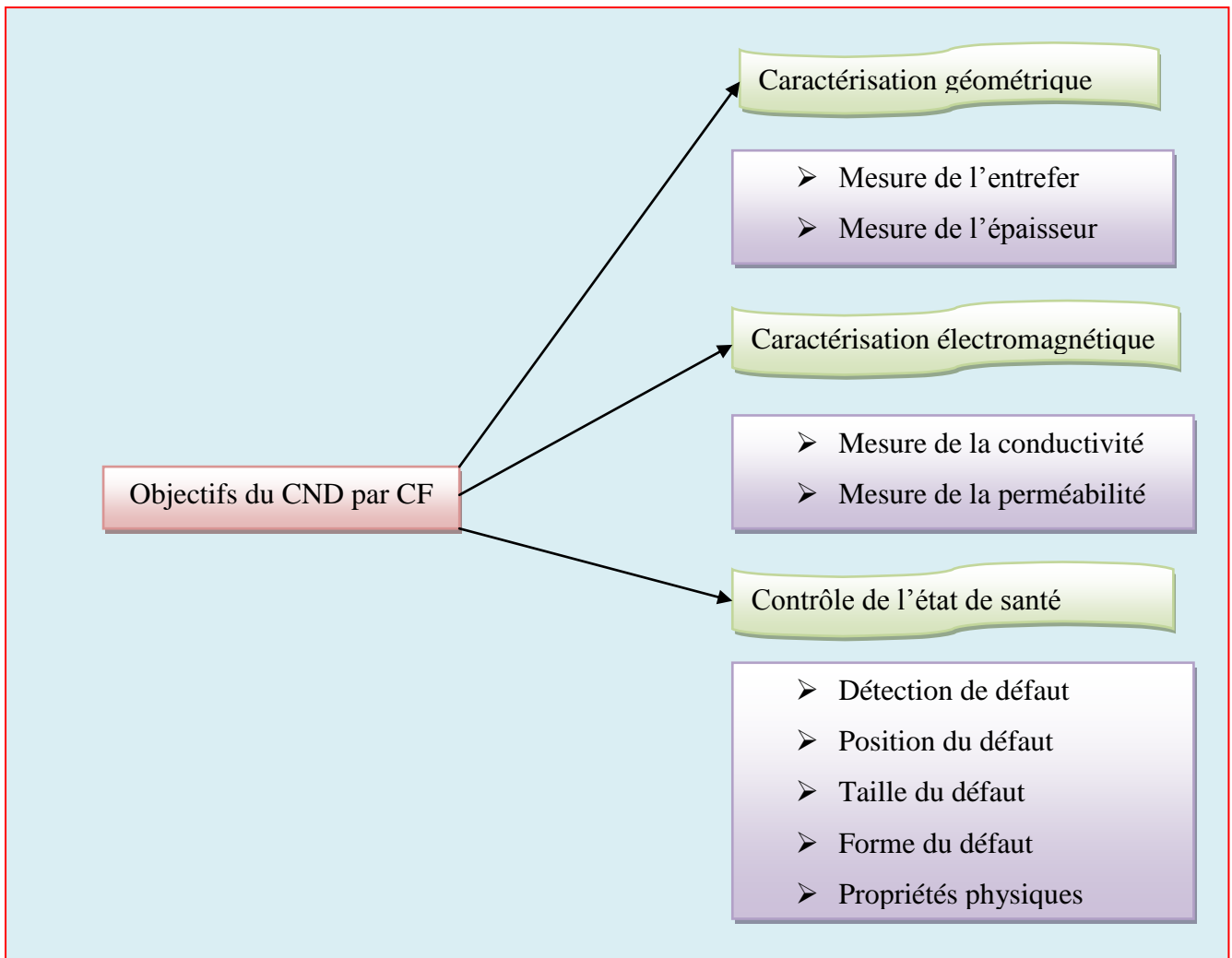


Figure II.2: Nature du CND par CF, [22].

II.4. Les caractéristiques du CND par CF

Les principaux paramètres à prendre en compte pour un contrôle résultent des considérations précédentes et peuvent se répartir en pratique en quatre catégories.

II.4.1. Paramètres liés au matériau à sonder

Outre ceux liés à sa forme géométrique (diamètre), ce sont sa conductivité électrique σ et sa perméabilité magnétique μ dont il importera de prendre en compte le niveau de stabilité le long de la pièce ou d'une pièce à l'autre, toute variation locale entraîne un déplacement du point de fonctionnement moyen de la sonde. La conductivité et la perméabilité du métal et surtout les variations locales parfois imprévisibles, sont absolument décisives sur la circulation des courants de Foucault ; ces variations ont des causes très diverses : présence de contraintes résiduelle importantes localement dues à la fabrication elle-même ou à des chocs ou martelage ultérieurs décarburée ou au contraire contenant des carbures importants, etc... , [5, 7, 8].

II.4.2. Paramètres liés au montage

Il s'agit de la distance ou l'assiette dans le cas de sonde plate ou du coefficient de remplissage et de variation de diamètres dans le cas de la sonde encerclé ou de contrôle interne des tubes ; soit du lift - off, terme désignant universellement la distance entre une sonde plate et la surface de la pièce. La constance de ces paramètres est aussi à rechercher pour éviter des effets perturbateurs trop importants sur le point moyen de fonctionnement, [5, 7, 8].

II.4.3. Paramètres électriques

C'est essentiellement la fréquence d'excitation de la bobine, paramètre dont on est maître et qui sera choisi en fonction des considérations précédentes, à savoir l'obtention d'un effet de peau adéquat eu égard en particulier à la profondeur des défauts, et d'un point de fonctionnement sur le diagramme complexe permettant une bonne discrimination des différents paramètres perturbateurs de l'impédance Z . L'intensité de magnétisation alternative, liée à l'intensité électrique envoyée dans la bobine, n'est pas un facteur déterminant du contrôle, dans la mesure où elle est choisie suffisamment faible pour éviter une saturation magnétique qui introduirait des non linéarités rendant l'exploitation des signaux très compliquée, et suffisamment forte pour que le rapport signal sur bruit soit convenable au niveau des amplifications et autres traitements électroniques, on peut estimer la fréquence de contrôle en fonction de σ , μ et de l'épaisseur de la pièce à examiner, telle que, [5, 7, 8, 28].

$$f_c = \frac{1}{\pi \sigma \mu \delta^2} \quad \text{II.1}$$

II.4.4. Effet de peau

L'amortissement des courants de Foucault dans le matériau, dans le cas simple d'une onde plane harmonique d'incidence nulle, décroît exponentiellement en fonction de la profondeur du matériau en regard. On définit l'épaisseur de peau par :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad \text{II.2}$$

Avec :

f : Fréquence d'excitation ;

σ : Conductivité électrique du matériau ;

μ : Perméabilité magnétique du matériau, [5, 8, 11, 12].

II.5. Modélisation simplifiée du CND par CF

La figure (II.3) illustre le modèle réel du contrôle non destructif, il s'agit d'un capteur à bobine unique (absolue) et une pièce conductrice, [5].

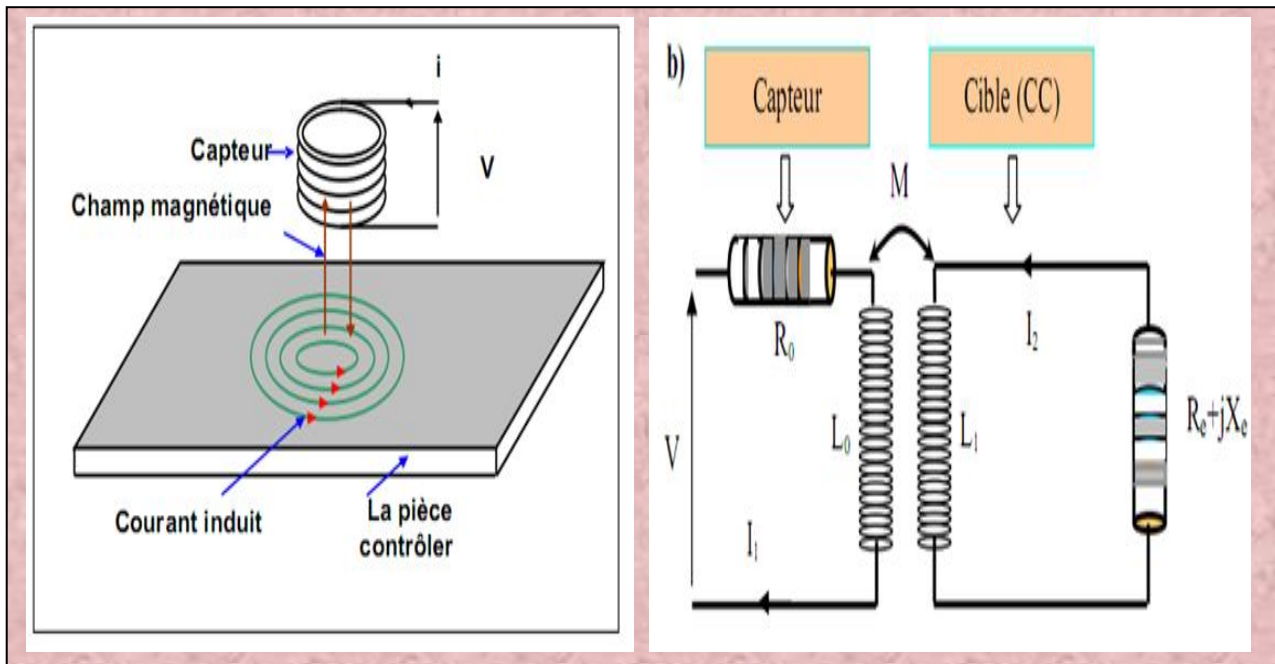


Figure II.3 : Modèle réel du contrôle non destructif, [5].

Figure II.4 : Schéma équivalent d'un transformateur, [8].

L'interaction physique entre le capteur et la pièce peut être représentée électriquement par un circuit équivalent d'un transformateur. Cependant il reste une différence importante : le circuit secondaire (cible) n'est pas de forme constante. La cible étant massive, la distribution des courants de Foucault dépend de plusieurs facteurs, figure(II.4), [8].

L'impédance de la cible $Z_2 = R_e + jX_e$ est une impédance perçue indirectement aux bornes de la sonde dépend de nombreux paramètres, notamment de la géométrie de la pièce contrôlée.

Le contrôle consiste alors à développer cette relation afin d'être en mesure de repérer la position d'un défaut et de déterminer ses paramètres à partir de la simple mesure de la tension V et du courant I_1 .

Quant il n'y a pas de cible devant le capteur, le coefficient de couplage k est nul. L'impédance mesurée est :

$$Z_0 = R_0 + jX_0$$

II.3

Étant donné que la résistance R_{cn} et l'inductance X_{cn} pour les capteurs usuelles sont définis par,

$$R_{cn} = \frac{R_c + R_0}{X_0} \quad \text{II.4}$$

Et

$$X_{cn} = \frac{X_c}{X_0} \quad \text{II.5}$$

À la présence de la cible conductrice cette impédance devient,

$$Z_c = R_0 + j\omega L_0 + \frac{k^2 L_0 L_1 \omega^2 R_e}{R_e^2 + j(L_1 \omega + X_e)^2} \quad \text{II.6}$$

R_e : Proportionnel $\frac{1}{\sigma}$.

X_e : L'inductance de fuite du circuit.

On obtient:

$$R_{cn} = \frac{k^2 L_1 \omega R_e}{R_e^2 + (L_1 \omega + X_e)^2} \quad \text{II.7}$$

Et

$$X_{cn} = 1 - \frac{k^2 L_1 \omega (L_1 \omega + X_e)^2}{R_e^2 + (L_1 \omega + X_e)^2} \quad \text{II.8}$$

Si le rapport $\frac{X_e}{R_e} = \text{constant}$ pour une distance donnée on obtient

$$[R_{cn} + \frac{k^2 X_e}{2R_e}]^2 + [X_{cn} - 1 + \frac{k^2}{2}]^2 = \frac{k^4}{4} [\frac{X_e^2}{R_e^2} + 1]^2 \quad \text{II.9}$$

L'équation (II.9) est une équation d'un cercle. Pour vérifier toutes ces considérations nous avons effectué des simulations à l'aide de logiciel Matlab, comme l'impédance est fonction de plusieurs paramètres $Z = \theta(k, \sigma, \mu, d, f)$ fixes, on arrivera à avoir une famille de courbes circulaire implantée sur le diagramme d'impédance normalisé. L'inductance X_{cn} en fonction de la résistance R_{cn} est défini par, [8] :

$$X_{cn} = 1 - \frac{L_1 \omega + X_e}{R_e} R_{cn} \quad \text{II.10}$$

II.5.1. Effet de la conductivité

La figure (II.5) montre un enroulement d'essai de courants de Foucault localisé à la distance D au-dessus d'un matériau conducteur. L'enroulement est considéré comme un enroulement "idéal" sans pertes résistives. L'impédance de l'enroulement dans le plan complexe est illustrée sur la figure (II.6). Cette impédance est fonction de la conductivité du matériau à la distance " D ". Si le matériau est un isolant, sa résistivité serait infinie. La réactance de l'enroulement demeure sans changement au point "P1". Cependant, si le matériau est un conducteur, les pertes par courants de Foucault se produiront, l'enroulement détecte ce changement par des augmentations des pertes résistives avec une diminution simultanée de la réactance, et le point de fonctionnement du système se déplacera au point "P2". Figure (II.6).

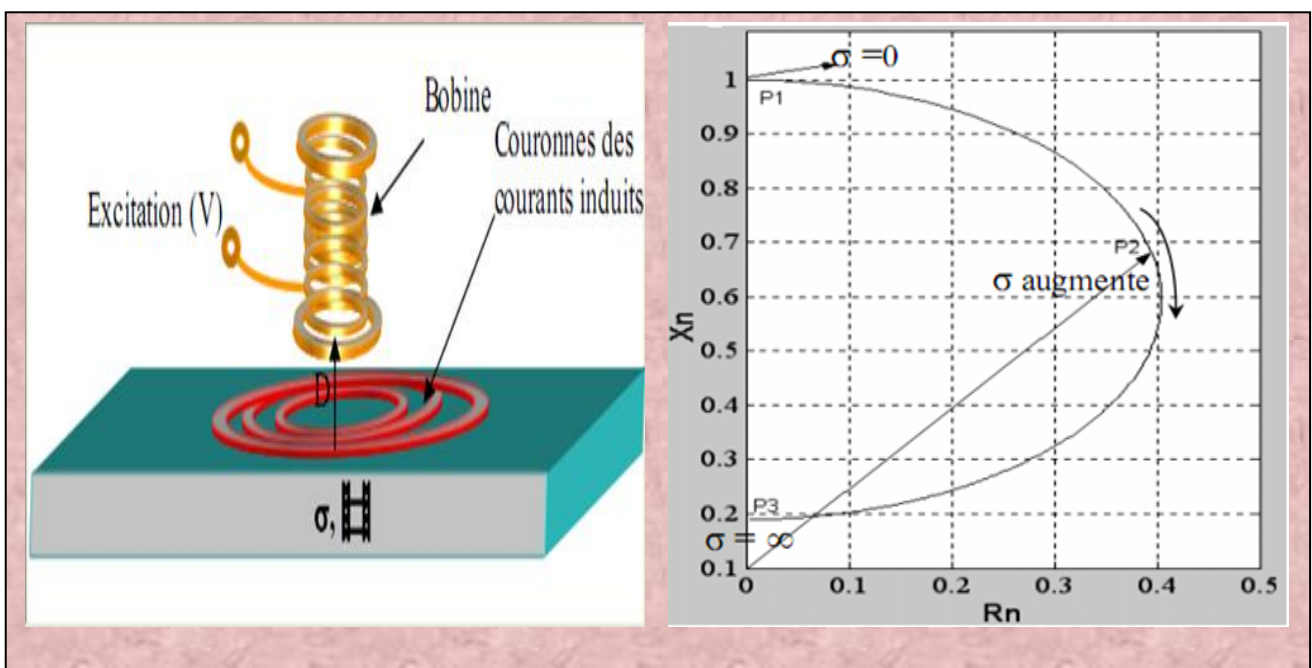


Figure II.5 : Montage d'une bobine en regard d'une pièce conductrice, [8].

Figure II.6 : Influence de la conductivité sur l'enroulement d'impédance, [8].

Quand la conductivité du matériau tend vers l'infini (un supraconducteur), les pertes résistives deviennent presque nulles, d'où le déplacement du point de fonctionnement au point "P3", (forte diminution de la réactance), [8].

On peut conclure que la conductivité d'un matériau à un grand effet sur l'impédance d'enroulement. Cette dernière dépend de la somme de vecteur de la réactance inductive et de la résistance de l'enroulement, [8].

II.5.2. Effet de la distance capteur/cible (lift off)

La figure (II.7) illustre les différentes positions de la bobine par rapport à la pièce. Pour des grandes distances capteur/cible le champ n'atteint pas la surface du matériau et n'induit pas des courants de Foucault. Dans ce cas, l'impédance de l'enroulement demeure indépendante de toutes variations de conductivité, [8].

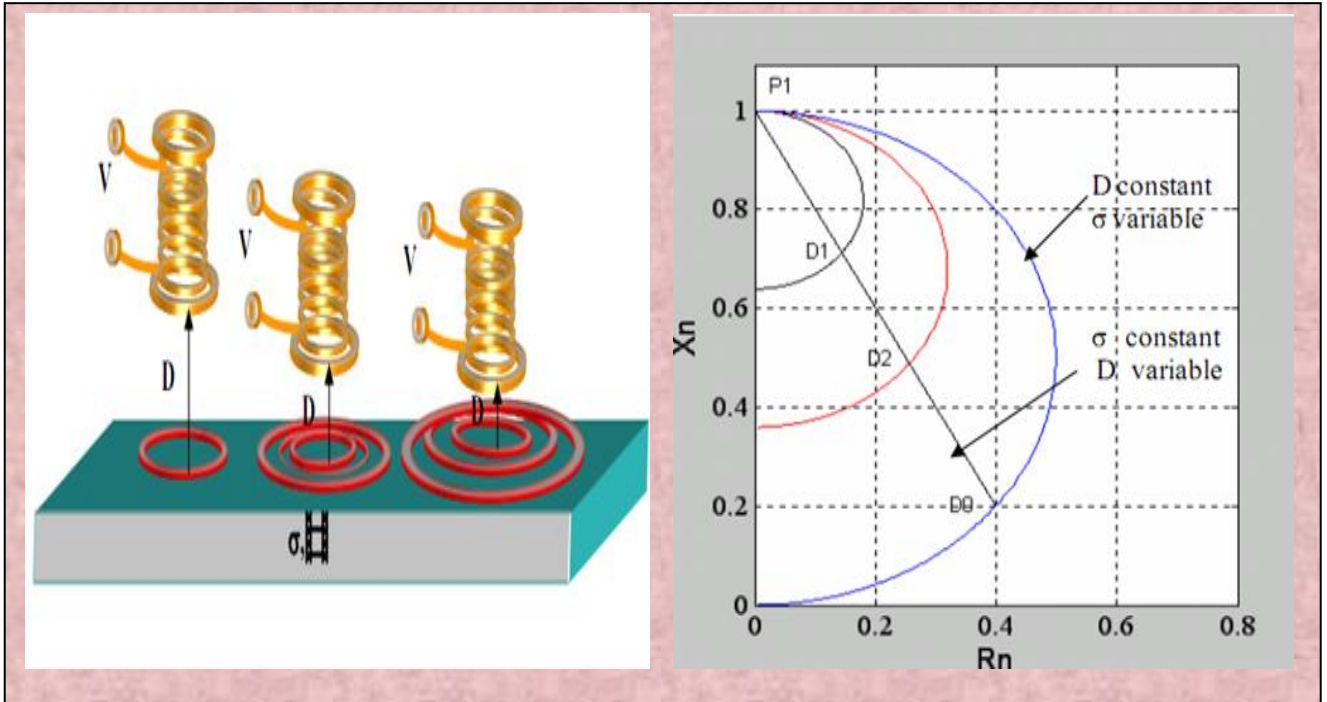


Figure II.7 : Différentes positions de la bobine par rapport à la cible, [8].

Figure II.8 : Influence du coefficient de couplage « lift off » bobine sur l'enroulement d'impédance, [8].

Cependant, comme l'enroulement s'approche progressivement de la surface, des courants de Foucault plus forts sont induits dans le matériau, ce qui se traduit par l'obtention de la famille des courbes dans le plan d'impédance figure (II.8). Si D est maintenue constante et la conductivité variable, une courbe circulaire s'aligne vers zéro est produite.

Si la conductivité du matériau est maintenue constante et "D" variable, la ligne droite du point "P1" à "Do" est générée en essayant de mesurer les variations de la conductivité, les changements de l'espacement ou le décollage sont fortement indésirables. Cependant, puisque l'effet de décollage est linéaire sur une gamme limitée de dégagement de sonde, des sondes de courant de Foucault peuvent être conçues pour mesurer les matériaux uniformément. L'impédance d'enroulement peut être calculée pour n'importe quelle combinaison connue du dégagement et la conductivité, [8].

II.5.3. Effet de la fréquence

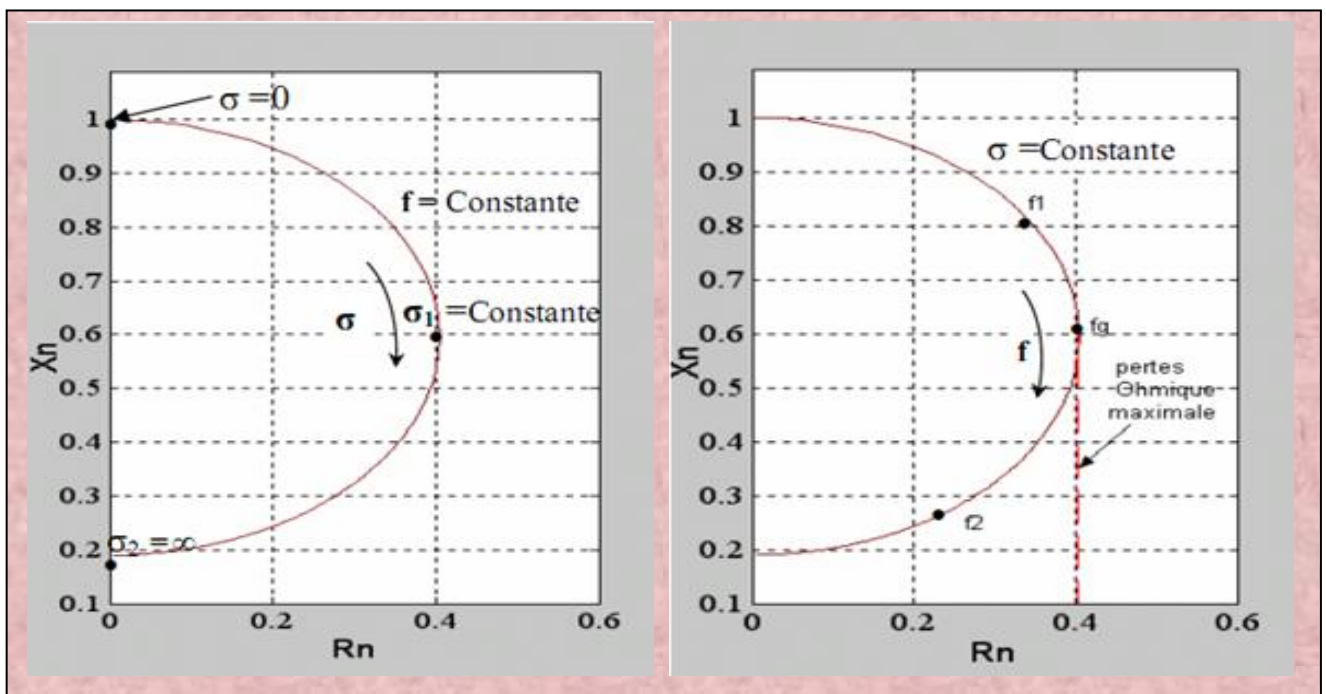
Nous savons que la réactance et l'impédance conductrices de l'enroulement sont affectées par la fréquence d'enroulement d'essai selon l'équation (II.11):

$$X_L = 2\pi fL \quad (\text{II.11})$$

La relation (II.11) montre que l'inductance et la fréquence affectent directement l'impédance d'enroulement. Ainsi, la conductivité et la fréquence ont exactement le même effet sur l'impédance d'enroulement.

La figure (II, 9 (a)) montre l'effet de la fréquence à σ constante et variable et vice versa. Supposant que la conductivité du matériau est constante, on peut choisir une fréquence d'enroulement d'essai qui créera un point favorable de fonctionnement pour détecter des fissures tout en différenciant contre des indications non relevâtes.

La fréquence "fg" est la fréquence limite ou le point des accroissements plus ultérieurs de la fréquence n'augmentera pas les pertes résistive dans le matériau à tester, figure (II.9 (b)). Quand la conductivité est connue, la fréquence optimale de fonctionnement d'enroulement d'essai peut être calculée ou déterminée expérimentalement, [8].



a-Effet de la conductivité sur Z

b-Effet de la fréquence sur Z

Figure II.9 : Illustration de l'effet de la conductivité et de la fréquence sur l'impédance, [8].

La fréquence limite (point où les pertes résistives du matériau sont plus grandes) peut être calculée précisément par l'équation (II.12), [8].

$$f_s = \frac{5056}{\sigma \mu \omega d} \quad (\text{II.12})$$

II.6. Les différents capteurs dans le CND par CF

L'excitation est assurée en pratique par une bobine alimentée sous une tension un courant variable, généralement les bobines sont de forme circulaire, nous distinguons plusieurs types de capteurs, [6, 11].

II.6.1. Capteurs à double fonction

Les courants de Foucault sont créés par un bobinage alimenté sous tension variable. Pour des raisons pratiques de réalisation, les bobinages sont de formes circulaires. La bobine d'excitation sert aussi d'élément de mesure d'où le nom capteur ou sonde pour cette bobine. Le calcul de l'impédance est basé sur le modèle du transformateur dont le primaire est la bobine d'excitation et le secondaire court-circuit est constitué par la pièce inspectée, [5, 6, 11, 14].

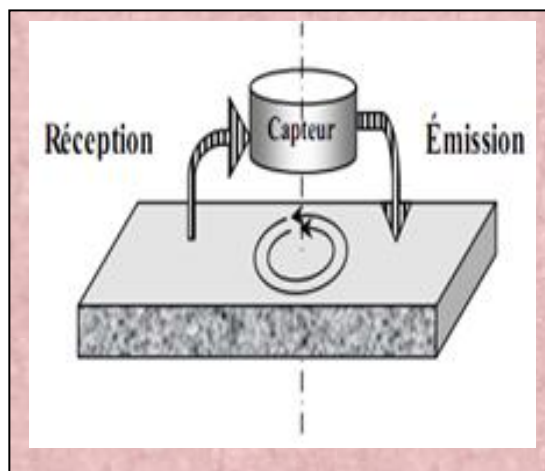


Figure II.10 : Capteur à double fonction, [22].

II.6.2. Capteurs à fonctions séparées

La bobine d'excitation et l'élément de mesure sont dissociés. Ce type est constitué de deux bobines, une pour créer le flux, l'autre pour recueillir les variations des couplages liées aux modifications dues aux matériaux. Ce montage est très utilisé pour les contrôles à basses fréquences ($f < 1000\text{Hz}$), [5].

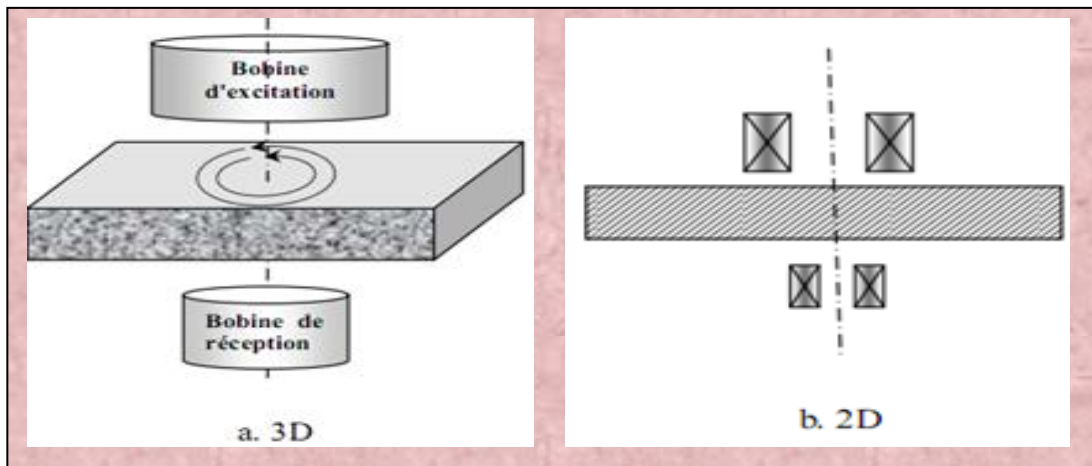


Figure II.11 : Capteur à fonction séparée, [22].

II.6.3. Capteurs différentiels

Ce mode utilise deux capteurs absolus écartés, montés en tête-bêche, parcourus par le même courant mais de signe opposé, la réponse est sensible juste aux variations de l'impédance au niveau de la pièce à contrôler, car l'impédance des deux capteurs est la même. Donc l'impédance mesurée par un capteur différentiel est nulle dans le cas des pièces saines, [5, 6].

II.7. Différentes géométries des bobines à CF

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les montages de base à partir desquels d'autres montages peuvent être envisagés selon la nature du produit à contrôler, [8].

II.7.1. Bobine encerclant

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner (figure II.12). Elle analyse un anneau de la pièce ayant une largeur égale à la largeur active de la bobine; afin d'obtenir un coefficient de remplissage le plus voisin possible de l'unité. Cette condition est nécessaire pour avoir une bonne sensibilité de détection sans avoir à utiliser un taux d'amplification trop fort apportant une dégradation du rapport signal/bruit ; les bobines sont immobilisées et protégées dans une pièce moulée dont l'alésage doit être de diamètre très peu supérieur à celui du produit. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, les barres, [5, 22, 28].

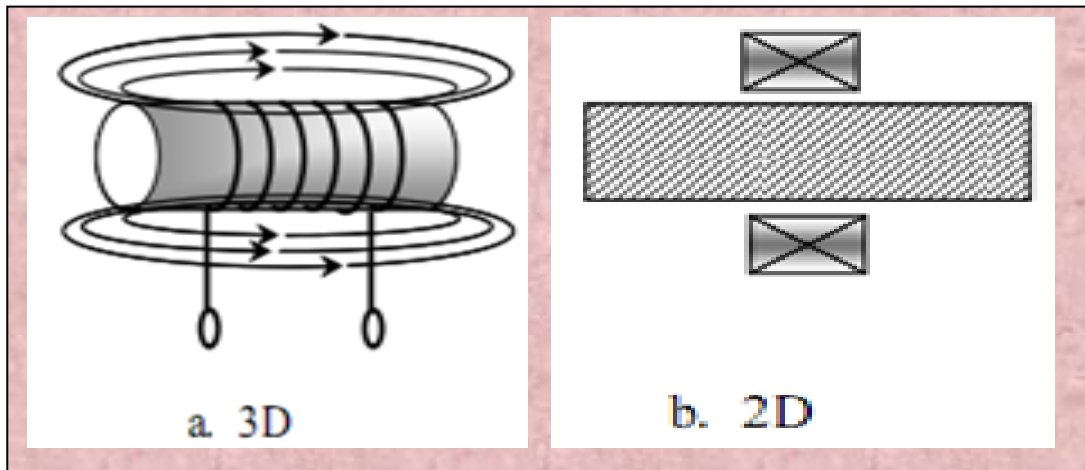


Figure II.12 : Bobine encerclant, [22].

II.7.2. Bobine interne

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau (figure II.13), les bobines sont moulées côte à côte de façon concentrique à l'axe du produit ; ce type de capteur est principalement utilisé pour le contrôle des multiples tubes de petit diamètre qui constituent les échangeurs thermiques, condensateurs ou les générateurs de vapeur dans l'industrie nucléaire, [5, 8, 22, 28].

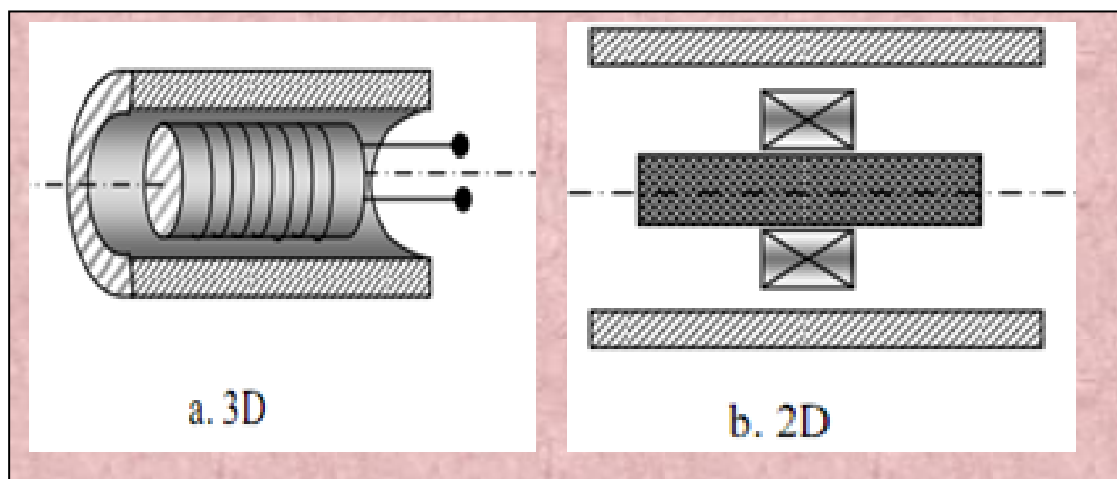


Figure II.13 : Bobine interne glissante avec noyau, [22].

II.7.3. Bobine ponctuelle

Elle est utilisée pour l'inspection des objets à des endroits précis. Ces sondes comportent un ou plusieurs bobinages et peuvent être placées sur, ou à proximité de la surface de la pièce à contrôler, ils sont généralement moulées sur un noyau de ferrite d'axe perpendiculaire à la surface, très perméable aux faibles champs alternatifs, tout en gardant une bonne sensibilité ponctuelle

de détection des défauts les plus fins. Ils analysent une zone quasiment égale à l'aire de leurs sections transversales. Ils permettent donc une inspection locale de la pièce et ils peuvent atteindre des régions d'accès réputées difficiles, (figure II.14), [5, 8, 22, 28].

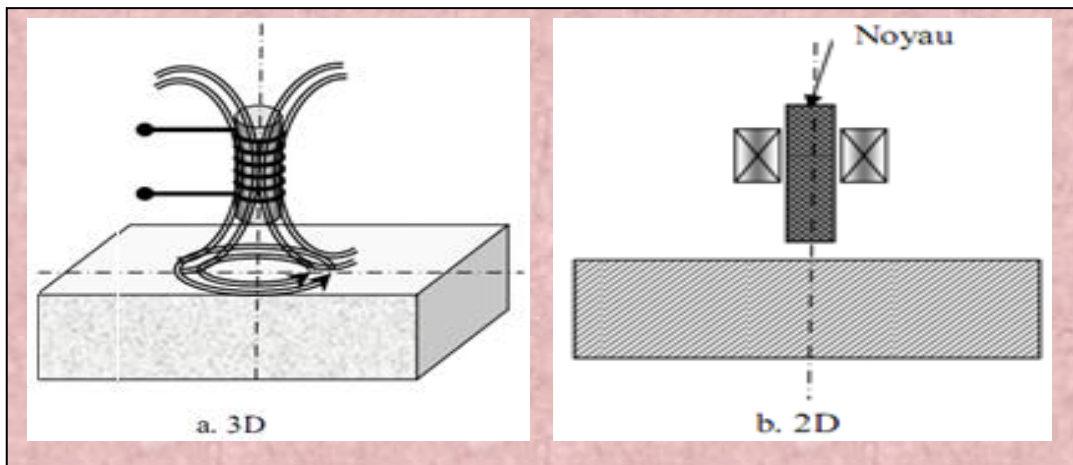


Figure II.14 : Bobine simple avec noyau, [22].

II.7.4. Bobine plate

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vu sa géométrie, sa zone d'action est plus large (figure II.15), [22].

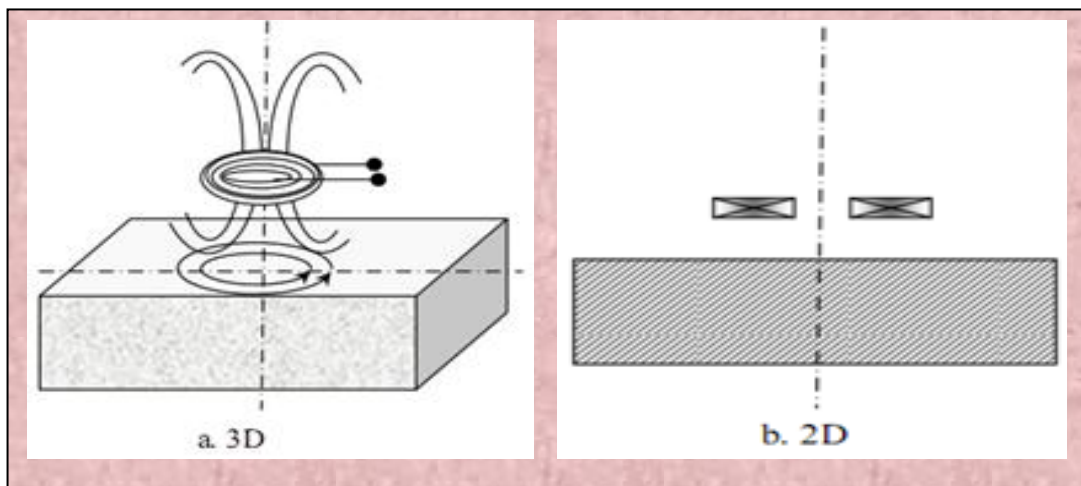


Figure II.15 : Bobine plate, [22].

II.8. Différentes structures des circuits magnétiques des CCF

La géométrie du circuit magnétique varie selon les applications et la figure II.16 en donne quatre exemples.

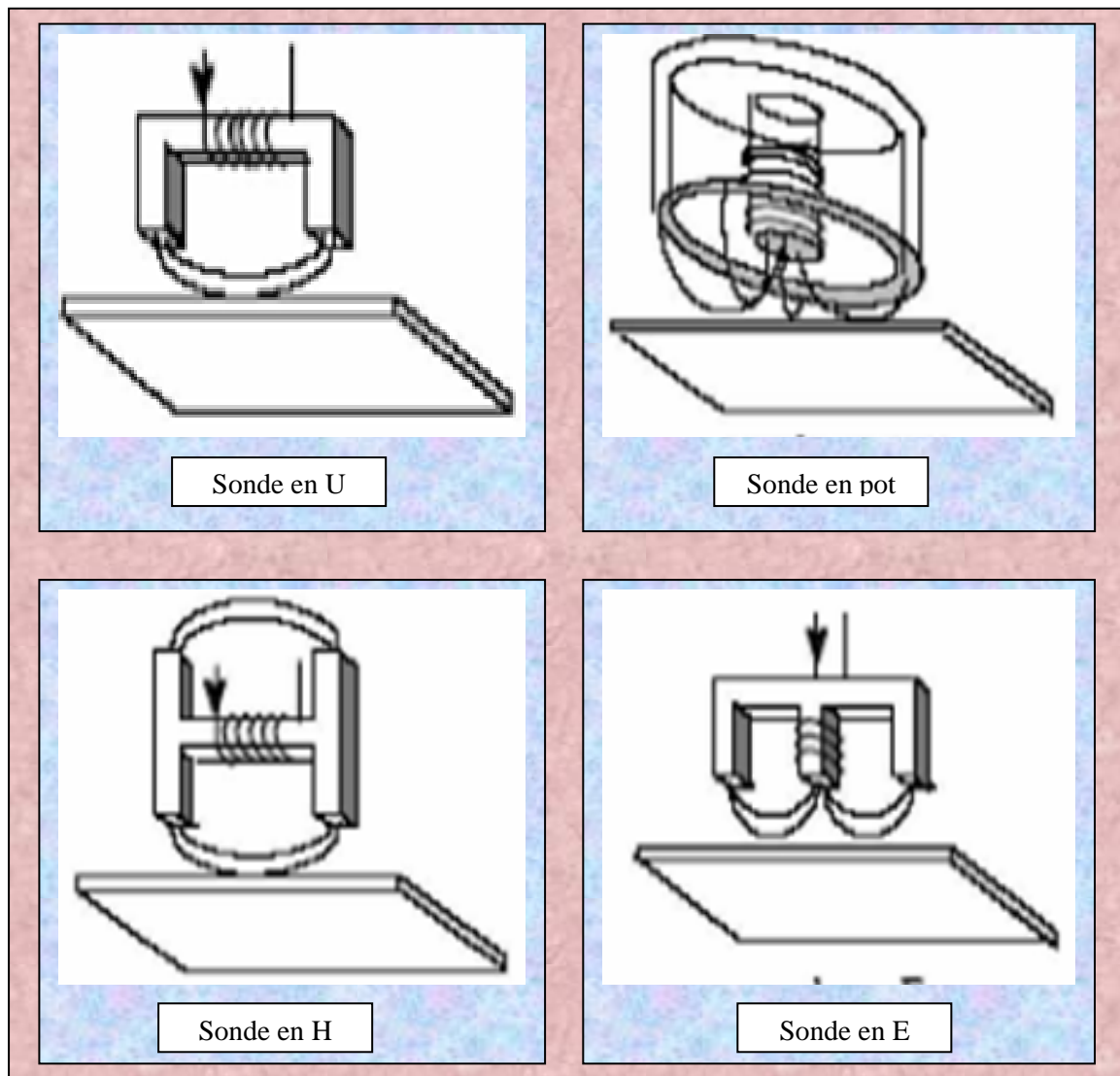


Figure II.16 : Différentes géométries du capteur, [5, 8, 12].

On constate que dans le cas d'un capteur en « U », la direction des lignes du champ est principalement celle reliant les deux pôles alors que la structure en « pot » ne privilégie aucune direction particulière des lignes du champ. Les structures en forme de « E » ou « H » sont plus complexes mais elles offrent la possibilité de réaliser des mesures par différences ce qui diminue fortement la sensibilité du capteur aux différentes dérives. Le choix d'une structure plutôt qu'une est étroitement lié à la cible à inspecter et aux type de défauts qu'elle contient, [5, 12].

II.9. Les types de sondes

La plupart des techniques présentées précédemment utilisent des sondes pour l'acquisition des mesures. Pour le CND par courants de Foucault comme pour d'autres techniques, plusieurs types de sondes et de mesures sont utilisables, [1].

	rapidité	cout	reproductibilité	fiabilité	sensibilité	résolution
Optique	-		-	--	--	-
Ressuage	++	++	-	-	--	-
Radiographie	++	-	+	+	-	-
Ultrasons	+	+	-	-	++	+
Magnétoscopie	+	+	-	-	++	+
Courant Foucault	+	+	++	+	+	-

Tableau II.1 : Comparatif des principales techniques de CND, [1].

II.9.1. Les sondes, les émetteurs et les récepteurs

Le principe des courants de Foucault nécessite l'emploi de deux « fonctions » :

- ❖ **L'émission (E)** d'un champ électromagnétique alternatif ;
- ❖ **La réception (R)** d'un autre champ électromagnétique, alternatif lui aussi.

Ces deux fonctions de base peuvent être individuellement réalisées par un ou plusieurs éléments. Une sonde comprend par conséquent un ou plusieurs éléments, dont certains sont émetteurs ou « excitateurs » et d'autres récepteurs ou « capteurs », [1].

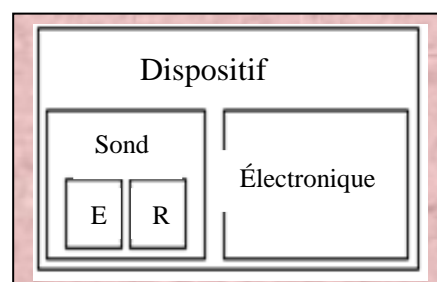


Figure II.17 : Définition d'un dispositif de mesure, [1].

II.9.2. Les sondes à fonction double ou à fonctions séparées

Certains éléments peuvent réaliser simultanément ces deux fonctions E et R, tandis que d'autres ne peuvent en assurer qu'une. Deux possibilités existent ainsi pour réaliser ces fonctions au sein d'une même sonde, [1].

II.9.2.1. Sondes à fonctions séparées

Le montage le plus simple est celui de la sonde à double fonctions constituée d'une seule bobine. Les fonctions d'émission et de réception sont assurées par la même bobine. L'exploitation se fait, en régime sinusoïdal, par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine dans son environnement, [3].

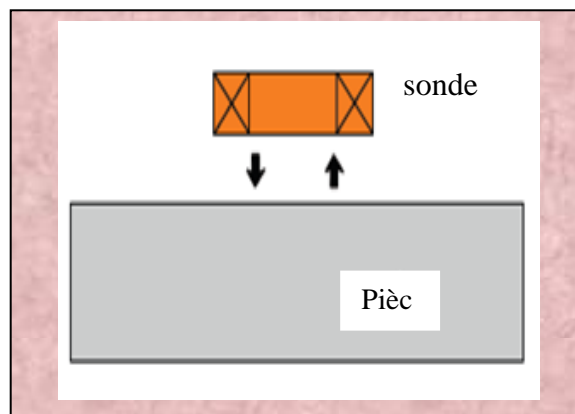


Figure II.18 : Sonde à double fonctions, [3].

II.9.2.2. Sondes à fonction double

Deux éléments ou groupes d'éléments y assurent séparément les deux fonctions. La grandeur mesurée est une image de la variation du champ électromagnétique. Il peut s'agir d'un capteur inductif bobiné ou d'un autre type de capteur de champ (GMR, GMI ...), [1,3].

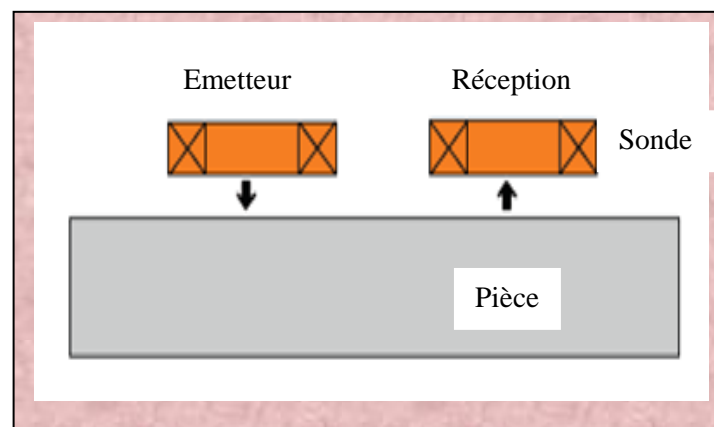


Figure II.19 : Sonde à fonctions séparées, [3].

II.9.3. Les sondes à mesure absolue ou différentielle

Indépendamment de la séparation des fonctions, le type de mesure doit être déterminé. Deux types de mesures existent, [1].

II.9.3.1. Mesures absolues

Les sondes absolues sont constituées de un ou plusieurs éléments sensibles, à fonctions séparées ou non, dont le signal est exploité individuellement. La grandeur mesurée est donc absolue, sans référence, [1].

Le schéma de la figure (II.20) montre la mesure en mode absolu par un pont d'impédance.

- La bobine d'examen est une branche d'un pont d'impédance alimenté par oscillateur. En absence de défaut, le pont est équilibré.
- Un signal apparaît dans le plan complexe dès que la sonde s'approche du défaut.
- L'amplitude du signal est liée au volume de la matière affectée par le défaut.
- De même, la phase est fonction du type du défaut et de sa profondeur, [22].

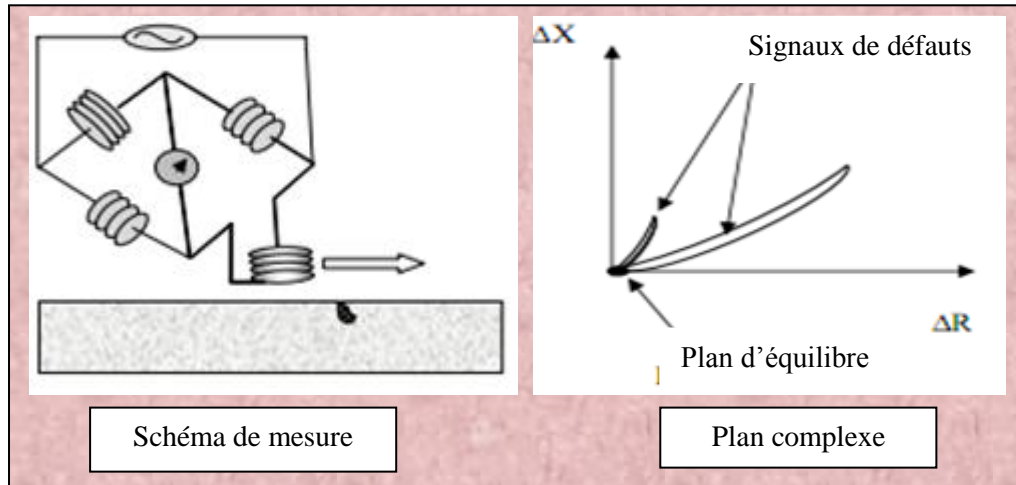


Figure II.20 : Sonde absolue, [22].

II.9.3.2. Mesures différentielles

Une sonde en mode différentielle est un système destiné à accéder aux seules variations locales des caractéristiques du produit examiné, par différence permanente de deux mesures simultanées en deux zones voisines. La sonde peut être constituée de deux enroulements identiques dont on mesure l'écart de l'impédance (figure II.21). La mesure différentielle équivaut à comparer deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins, [1, 3].

Le schéma de la figure (II.21) montre la mesure par un pont d'impédance :

- Deux branches du pont constituent des bobines d'examen. Le pont est équilibré en absence de défaut.
- Le passage de la sonde devant un défaut provoque l'apparition d'un signal (courbe de Lissajous) dans le plan complexe.
- L'amplitude du signal est fonction du volume de la matière affectée. De même, la phase est liée au type de défaut et à sa profondeur, [22].

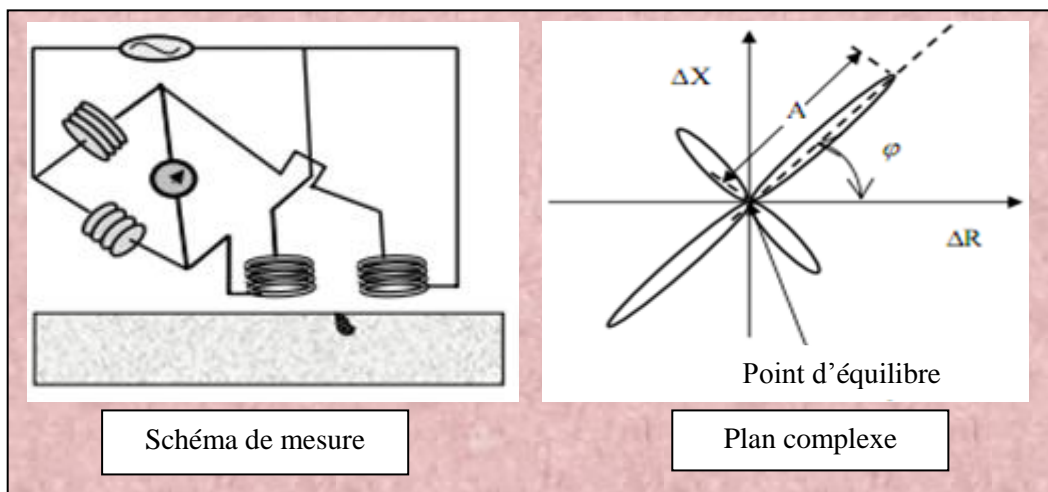


Figure II.21 : Sonde différentielle, [3].

Sondes absolues	Sondes différentielles
Sensitive à la fois des changements soudains et progressive dans les propriétés et les dimensions	Non sensible aux changements graduels propriétés de dimensions Peut ne pas sen longues failles progressives). Signaux
résultats généralement faciles à interpréter	Signaux pourrait être difficile à interpréter
Afficher longueur totale de défauts	Détecter seulement des défauts de longues extrémités
Sensitive à la dérive à partir des changements de température	Non sensible à la dérive à partir des changements tem
Sensible à sonder oscillation	Moins sensible aux oscillations de la sonde

Tableau II.2 : Comparaison entre les sondes absolues et différentielles, [25].

II.10. Modes d'excitation

L'extraction de l'information sur la pièce à contrôler est liée au mode d'excitation de la sonde. On peut distinguer trois modes d'excitation :

- Excitation mono-fréquence.
- Excitation multifréquences.
- Excitation pulsée, [2, 3, 6, 11].

II.10.1. Excitation mono-fréquence

Les courants de Foucault sont induits par une excitation sinusoïdale, de fréquence fixe. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés.

Pour une fréquence trop basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits.

Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés notamment par les capacités inter-spires de la sonde, [3, 6].

Cette méthode simple et par fois suffisante présente cependant des limitations car elle permet difficilement d'éliminer l'influence de l'ensemble des grandeurs perturbatrices. En effet on ne dispose alors au mieux que de deux observations réelles (ex: partie réelle et imaginaire de l'impédance). Le nombre d'inconnus que l'on peut espérer déterminer est alors limité à deux, [3].

II.10.2. Excitation multifréquences

Le contrôle par courants de Foucault multifréquences est très utilisé pour l'inversion des données fournies par la sonde en vue de déterminer des paramètres du matériau en regard. Selon les applications considérées, ces paramètres peuvent être de différentes natures :

- distance sonde / cible (lift-off) ;
- conductivité électrique de la cible (σ) ;
- perméabilité magnétique de la cible (μ) ;
- défauts dans le matériau ;

- épaisseur du matériau à contrôler, [3, 12, 30].

II.10.3. Excitation pulsée

Cette technique a vu le jour dans le milieu des années 50, avec pour application l'évaluation de l'épaisseur revêtement métallique, puis elle a été appliquée à la détection de défauts profonds. C'est une extension de la méthode multifréquences. L'utilisation d'une "impulsion" (signal à durée finie) permet d'avoir une excitation à large bande spectrale. L'analyse se fait alors soit de manière temporelle, soit de manière fréquentielle. La variation du contenu spectral de l'impulsion est obtenue en agissant sur la forme et la durée de l'impulsion. On utilise essentiellement des signaux rectangulaires, en forme de trapèze, de demi-sinusoïde, des impulsions de courtes durées, cette dernière étant la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Dans ce type de contrôle, c'est l'évolution temporelle des signaux qui est utilisée, [2, 6, 12].

II.11. Domaine d'application

Les courants de Foucault constituent un moyen de contrôle particulièrement fidèle, les plus faibles variations du signal étant exactement reproduites lors d'un second contrôle dans les mêmes conditions. Cette caractéristique est particulièrement intéressante en maintenance des matériels, notamment pour suivre leur évolution lors des contrôles périodiques.

L'automatisation des systèmes de contrôle ainsi que l'archivage électronique de "signatures" de défauts et le traitement du signal constituent des voies de développements actuels permettant de simplifier l'exploitation de la technique du CND par courants de Foucault et d'en étendre le champ d'application, on distingue :

II.11.1. Mesure de conductivité électrique

L'appareillage de ce type est directement étalonné pour effectuer des mesures absolues de σ . Pour éviter les erreurs, il faut s'assurer que :

- ✓ le paramètre μ est constant : seuls les matériaux amagnétiques sont donc concernés,
- ✓ les paramètres géométriques (forme de la pièce, état de surface et épaisseur) ne peuvent pas perturber la mesure,
- ✓ l'entrefer est constant.

II.11.2. Mesure de l'épaisseur de revêtements isolants

L'appareillage est directement étalonné pour effectuer des mesures de l'entrefer. On élimine ainsi l'influence de σ , μ et des paramètres géométriques.

Exemple : mesures de couches d'émail, de peinture, de revêtement plastique.

II.11.3. Tri de matière par la nuance état de traitement thermique

Le contrôle se fait par comparaison avec des pièces types, de caractéristiques connues.

On utilise alors des capteurs différentiels,

II.11.4. Détection de fissures

La concentration des courants de Foucault à la surface les rend aptes à la détection de défauts débouchants. Les sondes utilisées sont du type ponctuel.

Les phénomènes perturbateurs sont :

- ✓ variation d'entrefer : un réglage permet en général de diminuer son influence,
- ✓ état de surface (rugosité, aspérités, dépôt d'oxyde) : une préparation de la surface est parfois nécessaire pour éviter les signaux parasites,
- ✓ variations géométriques (présence d'épaulements...) : réglage du zéro pour en tenir compte,
- ✓ variations de structure : présence d'un cordon de soudure. L'examen des produits soudés est difficilement réalisable en raison des difficultés d'interprétations.

Les appareils portatifs existants pour réaliser ce type de contrôle indiquent l'amplitude du signal (sur galvanomètre). Un étalonnage est nécessaire pour obtenir la correspondance entre l'amplitude et l'importance du défaut ou pour vérifier l'échelle affichée sur l'appareil lorsque celle-ci est graduée directement en profondeur.

Exemples : contrôle d'assemblages rivetés, détection de fissures de corrosion sous tension...

Ce contrôle est très important sur les pièces de l'industrie aéronautique. L'examen des zones à forte concentration de contrainte, telles que les bords d'attaques des aubes de turbines (recherche des criques de fatigue).

II.11.5. Contrôle des tubes, barres et fils

Lors des contrôles sur chaîne de fabrication, le produit à contrôler défile (parfois plusieurs m/s) dans le bobinage fixe. L'appareillage est étalonné en sensibilité sur un produit identique (en nuance et dimensions) comportant des défauts connus. Un seuil d'alarme est déterminé pour classer les pièces bonnes ou mauvaises.

La détection peut-être :

- ✓ du type absolu : un seul bobinage réalise le contrôle. Ceci permet de détecter des défauts allongés, des variations lentes, des changements de nuance,
- ✓ du type différentiel : deux bobinages montés côte à côte en opposition assure une bonne sensibilité de détection des défauts ponctuels ou transversaux. Cette méthode permet, par rapport au mode absolu, de diminuer fortement l'influence de l'entrefer et des écarts de température.

De tels contrôles peuvent être réalisés à chaud car il n'y a aucun contact entre la sonde et la pièce, [5, 7, 28].

II.12. Performance et limitations

Les possibilités offertes par la sensibilité de détection et l'automatisation aisée du contrôle par courants de Foucault sont très appréciées sur le plan industriel. L'absence de contact entre la sonde et la pièce à contrôler, la possibilité de défilement à grande vitesse et la facilité d'intégration du procédé dans les chaînes de production donnent à cette technique de contrôle un avantage certain par rapport aux autres procédés.

Les courants de Foucault constituent par ailleurs un moyen de contrôle exceptionnellement fidèle et ce malgré la complexité des phénomènes électromagnétiques mis en œuvre et la multitude des paramètres d'action.

Ce caractère d'excellente reproductibilité est très important pour les contrôles en maintenance, ainsi que pour la qualité des procédures d'étalonnage du matériel.

Il est possible, avec les courants de Foucault, de détecter d'infimes hétérogénéités de surface, toutefois cette grande sensibilité concerne bien entendu tous les paramètres perturbateurs, ce qui fait que, pour certaines applications, on pourra avoir du mal, malgré des réglages optimisés

de la fréquence et de la phase, à obtenir un rapport signal/bruit satisfaisant et donc un contrôle fiable, sans fausses alarmes, [5, 7].

II.13. Conclusion

Dans ce chapitre On a présenté avec plus de détaille le CND par courants de Foucault, son principe, avantages et inconvénients ainsi que les applications de ce type de contrôle. Comme les outils numériques sont devenus indispensable pour la détection des défauts, on jugé utile de consacrer le chapitre suivant à la présentation des différentes méthodes de modélisations

Chapitre III : Phénomènes électromagnétiques et méthodes de résolutions

III.1. Introduction

Vers le milieu du XIX^{ème} siècle, M. Faraday et J. Henry ont découvert indépendamment l'un de l'autre qu'un champ magnétique variable produit un courant électrique dans un matériau conducteur. Avant cette découverte, H. Oersted avait déjà remarqué qu'un courant électrique pouvait créer son propre champ magnétique. Les interactions entre les champs magnétique et électrique ont lieu dans tous les dispositifs électromagnétiques, [6].

La technique de CND par CF est basée sur les interactions électromagnétiques entre une sonde à courants de Foucault et la pièce à contrôler. Dans le domaine du CND par CF la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu permet d'élaborer un modèle mathématique qui pourra prédire la réponse de la sonde en fonction des paramètres de la cible, qui doivent être connus. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell, Selon la complexité de la configuration cette résolution peut être analytique ou numérique, [3, 16].

Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu historique sur l'électromagnétisme et la présentation des équations de Maxwell. La méthode des éléments finis qui sera appliquée pour la résolution d'un problème du CND par CF dans une configuration bidimensionnelle. On déterminera l'impédance d'un capteur absolu à courants de Foucault par deux méthodes (méthode d'énergie et méthode directe), et on clôturera par une conclusion.

III.2. Lois classiques de l'électromagnétisme

III.2.1. Loi d'Ampère

André Marie Ampère (1775-1836), physicien Français, est impressionné par les travaux de Hans Christian Oersted. Il reprend en 1826 l'étude de l'action d'un courant électrique sur une aiguille aimantée et en quelques jours, il découvre la loi expérimentale qui porte son nom, [22].

$$\oint_l (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i \quad \text{III.1}$$

n : Nombre de spires.

l : Longueur du circuit magnétique.

B : Induction magnétique de chaque spire.

I : Courant électrique.

III.2.2. Loi de Faraday

Durant la décennie 1830, des expériences portant sur l'induction électromagnétique ont été réalisées par Michael Faraday (1791-1867) en Angleterre et par Joseph Henry (1797-1878) aux USA. Par une pure expérience, Faraday remarque qu'à chaque fois qu'il y a variation de flux magnétique ou variation du champ d'induction lui-même, un courant est alors mesuré par le galvanomètre. Ce courant est dit courant induit. En effet, cette loi relie la force électromotrice induite e à la variation de flux magnétique ϕ qui l'engendre, [22].

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

III.2

III.2.3. Loi de Lenz

Le signe (-) de la loi de Faraday a une signification bien précise donnée explicitement par la loi de Lenz. Cette loi a été formulée par Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865) en 1833 à Saint-Petersbourg et éclaircit mieux le phénomène d'induction que Faraday avait observé en 1831. C'est une loi qualitative. Elle indique que le sens du courant induit lors d'un phénomène d'induction électromagnétique dans un circuit électrique est tel qu'il s'oppose à la variation du flux initial. Donc la force électromotrice induite s'oppose à l'action qui leur a donné naissance, [22].

III.2.4. Loi de Biot et Savart

L'une des approches de la détermination de la valeur de l'induction B est la loi de Biot et Savart plus compliquée, mais plus générale. Jean Baptiste Biot (1774-1862) et Félix Savart (1791-1841) formulent en 1820 la loi expérimentale qui porte leurs noms. En un point p de l'espace, l'élément de conducteur $d\vec{l}$, parcouru par un courant I génère un champ d'induction magnétique élémentaire $d\vec{B}$ dans le vide. Cette induction est donnée par :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_u}{r^2}$$

III.3

III.3. Mise en équation

La compréhension des phénomènes physiques mis en jeu permet d'élaborer un modèle mathématique qui pourra prédire la réponse du capteur en fonction des paramètres physiques et géométriques de la cible. La modélisation des phénomènes électromagnétiques est basée sur les équations de Maxwell, [6].

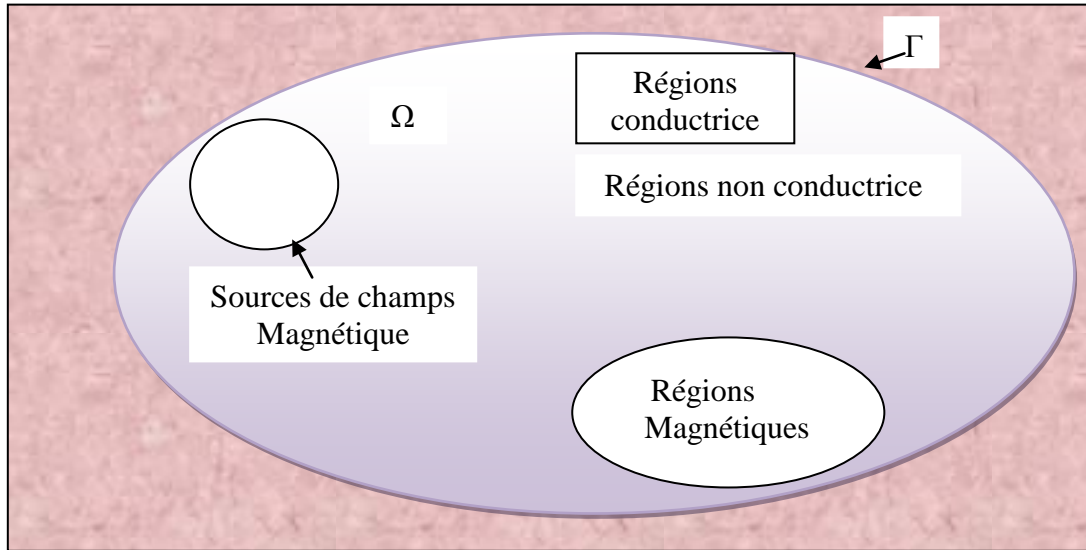


Figure III.1 : Domaine d'étude, [26].

Dans ce type de problème, les répartitions spatiale et temporelle du champ électrique E et du champ magnétique H sont recherchées dans tout le domaine Ω .

Si le système étudié présente des symétries ou des périodicités géométriques, il est possible de réduire l'étude à une partie du domaine, [26].

III.3.1. Expression locale des équations de bases

Les équations de Maxwell constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui régit l'ensemble des phénomènes électromagnétiques, [16, 17, 18, 26]. Soit:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad \text{Equation d'Ampère} \quad \text{III.4}$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad \text{Equation de Faraday} \quad \text{III.5}$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Equation de conservation du flux magnétique} \quad \text{III.6}$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad \text{Equation de Gauss : Conservation de charge électrique} \quad \text{III.7}$$

Où :

E : Champ électrique [V/m].

H : Champ magnétique [A/m].

D : Induction électrique [C/m^2].

B : Induction magnétique [T].

J : Densité de courant [A/m^2].

ρ : Densité volumique de charge [A/m^3].

Les lois Maxwell-Ampère (II-4) et Maxwell-Faraday (II-5) expriment le couplage entre les grandeurs électriques et magnétiques.

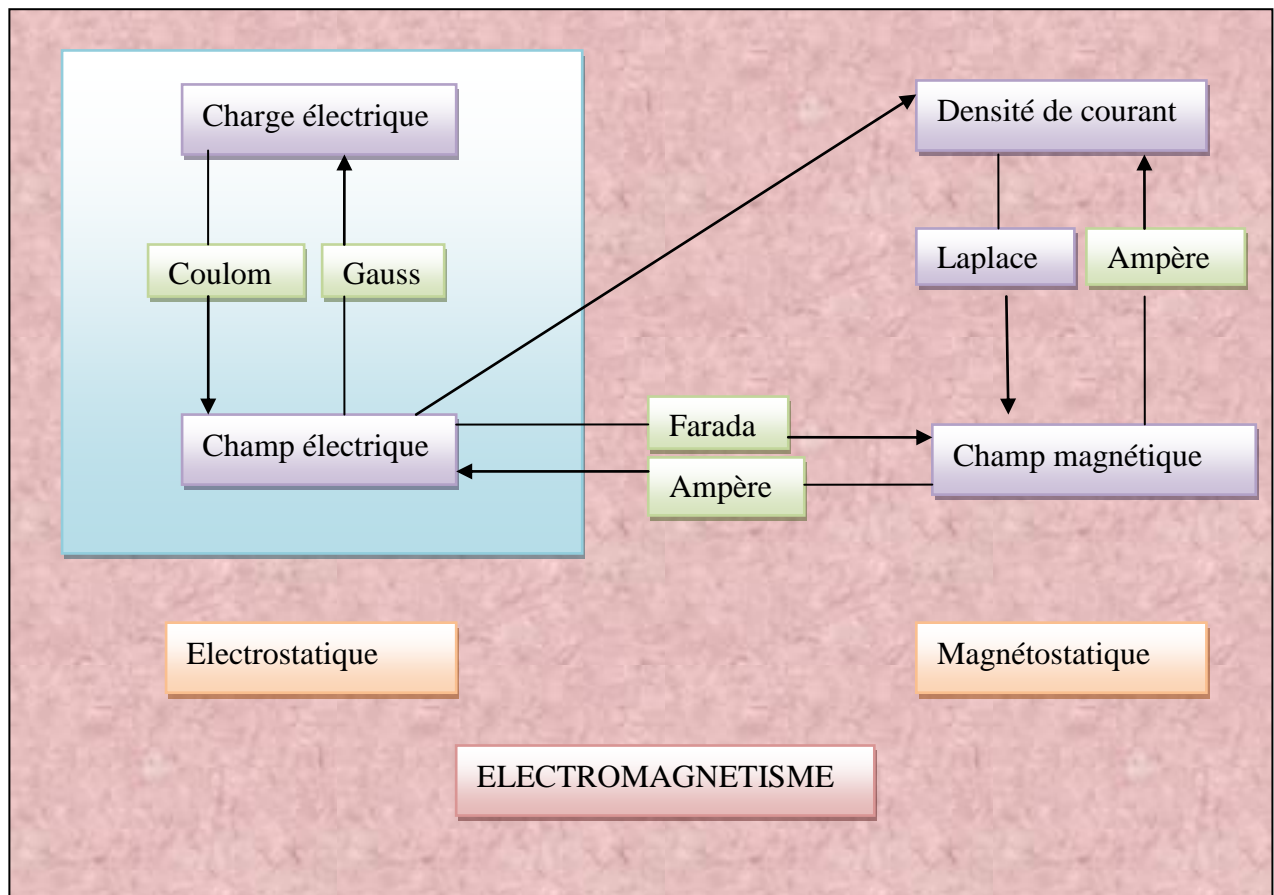


Figure III.2 : Couplage entre l'électrostatique et magnétisme, [22].

III.3.2. Relations constitutives des matériaux

En faisant les hypothèses classiques de linéarité, de non-dispersion et d'isotropie, les relations constitutives suivantes sont obtenues, [3, 5, 6, 19].

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{Milieu diélectrique} \quad \text{III.8}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{Milieu magnétique} \quad \text{III.9}$$

Avec,

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

Où μ_0 est la perméabilité du vide et μ_r est la perméabilité relative du milieu qui peut dépendre ou non de H, [26].

$$\vec{J} = [\sigma]\vec{E} + [\varepsilon]\frac{\partial E}{\partial t}$$

La loi d'Ohm

III.10

Où $[\sigma]$ et $[\varepsilon]$ sont respectivement les tenseurs de conductivité et de permittivité électriques qui dans le cas des matériaux anisotropes s'écrivent

$$[\sigma] = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad [\varepsilon] = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

μ : Perméabilité magnétique.

σ : Conductivité électrique

ε : Permittivité électrique.

III.3.3. Conditions de passage

Les grandeurs électromagnétiques pourraient être discontinues à l'interface entre deux milieux de propriétés différentes. Les conditions de passage, [20, 21].

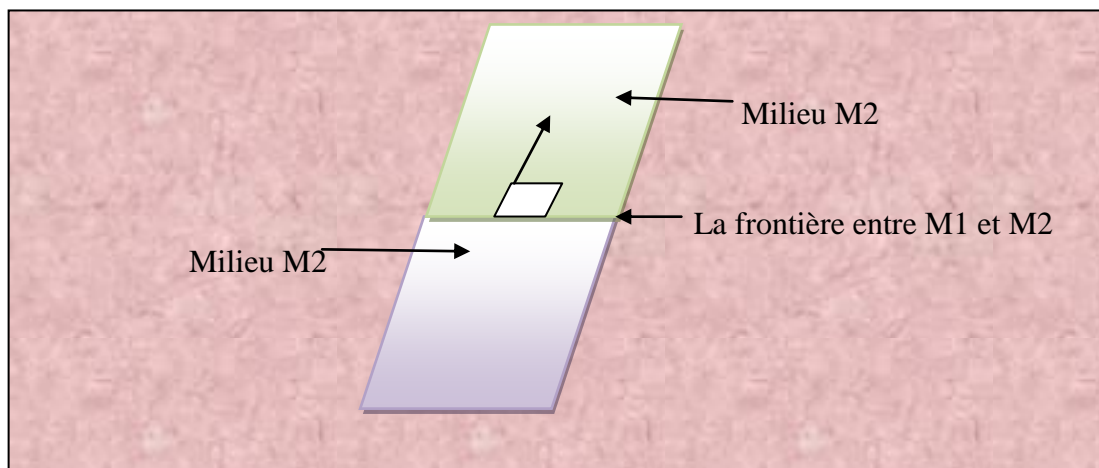


Figure III.3 : La frontière entre M1 et M2, [22].

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad \text{III.11}$$

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad \text{III.12}$$

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad \text{III.13}$$

$$\left(\vec{H}_1 - \vec{H}_2\right) \wedge \vec{n} = K_s \quad \text{III.14}$$

Où :

ρ_s : Densité surfacique de charge.

K_s : Densité surfacique de courant.

n : La normale sortante du milieu 1 vers l'extérieur.

Physiquement, on peut expliquer plus intuitivement les équations précédentes:

- La composante tangentielle du champ électrique à l'interface est continue.
- La composante normale de l'induction électrique à l'interface est discontinue et dépend des charges surfaciques à l'interface.
- La composante tangentielle du champ magnétique à l'interface est discontinue et dépend du courant surfacique à l'interface.
- La composante normale de l'induction magnétique à l'interface est continue, [5, 8, 19].

III.3.4. Conditions aux limites

Les valeurs d'un champ U aux frontières peuvent satisfaire principalement deux conditions simples, voire des formulations particulières. Ainsi aux limites du domaine, ce champ peut être soit normal (domaine symétrique) (III.15), soit de valeur connue (III.16), ce qui se traduit par :

$$\text{Condition de Neumann :} \quad \frac{dU}{dn} = 0 \quad \text{III.15}$$

$$\text{Condition de Dirichlet:} \quad U.n = 0 \quad \text{III.16}$$

Les conditions aux limites temporelles sont en général fixées à des valeurs nulles à l'instant initial, [11, 21].

III.3.5. Conditions de jauge

Les relations constitutives des matériaux, les conditions de passage, ainsi que les conditions aux limites ne suffisent pourtant pas à assurer l'unicité d'une solution et l'utilisation de jauges est nécessaire à la résolution des équations de Maxwell. Selon la formulation retenue et le type d'éléments de discrétisation (MEF), certaines jauges sont alors préférables. Les principales jauges sont :

$$\operatorname{rot} \vec{U} = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb} \quad \text{III.17}$$

$$\operatorname{rot} \vec{U} + K \left(\frac{d\vec{U}}{dt} \right) = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz} \quad \text{III.18}$$

III.3.6. Hypothèses simplificatrices

Matériaux magnétiques sans induction rémanente: $B_r=0$.

- $\frac{d}{dt} = j\omega$, car l'excitation est une tension périodique sinusoïdale d'amplitude constante.
- Le terme $\frac{d\vec{D}}{dt}$ peut être négligé. En effet, compte tenu des matériaux utilisés généralement dans les applications de l'électrotechnique et de l'utilisation de courants dits de 'basse fréquence' (de l'ordre de 10kHz), le terme des courants de déplacement est négligeable par rapport au terme des courants de conduction J .
- La densité volumique de charge est considérée nulle ($\rho=0$).

Après ces hypothèses, les équations précédentes deviennent, [5].

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad \text{III.19}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad \text{III.20}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{III.21}$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0 \quad \text{III.22}$$

III.4. Différentes formulation électromagnétiques

Les phénomènes électromagnétiques dans les régions conductrices du domaine d'étude sont régis par les équations de la magnétodynamique. Les formulations généralement utilisées pour exprimer l'équation finale à résoudre s'appuient sur des formulations en potentiel vecteur magnétique A ou champ électrique E et les formulations en champ magnétique H ou potentiel vecteur électrique T , [26].

III.4.1. Formulation AV

On introduit un vecteur \vec{A} tel que:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad \text{III.23}$$

\vec{A} est le potentiel vecteur magnétique.

On montre qu'il existe une grandeur scalaire V telle que:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \Rightarrow \text{rot} \left(\vec{E} + \frac{d\vec{A}}{dt} \right) = 0 \Rightarrow \vec{E} + \frac{d\vec{A}}{dt} = -\nabla V \quad \text{III.24}$$

Où

V est le potentiel scalaire électrique. On obtient alors la formulation AV

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) + \sigma \frac{d\vec{A}}{dt} + \sigma \nabla V = \vec{J}_s \quad \text{III.25}$$

Pour assurer l'unicité de la solution, il faut ajouter une condition sur A . Une des plus utilisées est la jauge de Gauss:

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad \text{III.26}$$

Le nombre d'inconnues est donc de 4 (un vecteur et un scalaire). Les courants de Foucault seront alors exprimés par:

$$\vec{J}_{cf} = -\sigma \left(\frac{d\vec{A}}{dt} + \nabla V \right) \quad \text{III.27}$$

Ils sont donc calculés directement à partir de A . L'induction, par contre, est obtenue par dérivation spatiale de la solution, ce qui peut poser des problèmes de précision lorsque la solution est obtenue de manière numérique, [2, 6].

III.4.2. Formulation \vec{A}^*

Si le domaine étudié présente une conductivité constante, on peut introduire la variable d'état A^* définie par:

$$\vec{A}^* = \int E dt \quad \text{III.28}$$

La formulation se met alors sous la forme:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\vec{A}\right)+\sigma\frac{d\vec{A}}{dt}=\vec{J}_s \quad \text{III.29}$$

Les courants induits s'expriment sous la forme:

$$\vec{J}_s=\sigma\frac{d\vec{A}^*}{dt} \quad \text{III.30}$$

Dans ce cas, le nombre d'inconnues est seulement de 3, [2, 6].

III.4.3. Formulation $T\varphi$

Cette formulation est duale de la formulation AV. On pose:

$$\vec{J}=\operatorname{rot}\vec{T} \quad \text{III.31}$$

T est le potentiel vecteur électrique.

Il existe une grandeur scalaire φ telle que:

$$\vec{H}+\vec{T}=-\nabla\varphi \quad \text{III.32}$$

Où

φ est le potentiel scalaire magnétique. On obtient la formulation $T\varphi$:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\sigma}\operatorname{rot}\vec{T}\right)+\mu\frac{d(\vec{T}+\nabla\varphi)}{dt}=\vec{J}_{ex} \quad \text{III.33}$$

Pour assurer l'unicité de la solution, il faut ajouter une condition sur T . La condition utilisée à l'heure actuelle est la jauge de Gauss:

$$\operatorname{div}\vec{T}=0 \quad \text{III.34}$$

Cette formulation conduit donc à quatre inconnues. Elle permet d'avoir directement l'induction. Par contre, les courants de Foucault s'obtiennent par dérivation spatiale de la solution (à mettre en parallèle avec la formulation AV), [2, 6].

III.4.4. Formulation $\varphi\varphi_r$

Alors que pour des régions conductrices, la présence des courants induits impose 3, voire 4 inconnues, dans les régions isolantes, le phénomène peut être représenté par une seule inconnue,

donc une grandeur scalaire. Dans une telle région, on peut exprimer le champ magnétique sous la forme:

$$H = H_s - \nabla \phi_r \tag{III.35}$$

Où

H_s est le champ dû à la courante source:

$$\text{rot} \vec{H}_s = \vec{J}_s \tag{III.36}$$

Et

ϕ_r est le potentiel scalaire magnétique réduit.

Dans une région isolante sans source de courant, on peut écrire:

$$H = -\nabla \phi \tag{III.37}$$

Où

ϕ est le potentiel scalaire magnétique total. On obtient ainsi une formulation scalaire ϕ_r , [2, 6].

	AV	A*	Tφ	ΦΦr
Equations	$B = \nabla * A$ $J_{cf} = -\sigma \left(\frac{dA}{dt} + \nabla V \right)$	$A^* = \frac{E}{j\omega}$ $J_{cf} = -\sigma \left(\frac{dA^*}{dt} \right)$	$J = \nabla * T$ $(H - T) = -\nabla \phi$	$H = H_s - \nabla \phi_r$ $H = -\nabla \phi$
Domaine d'application	S'applique dans tous les cas	S'applique qu'à des milieux où $\sigma = \text{constante}$	S'applique dans tous les cas	S'applique dans les milieux isolants
Induction	Obtenue par dérivation spatiale	Obtenue par dérivation spatiale	Obtenus directement	Obtenus directement
Courant de Foucault	Obtenus directement	Obtenus directement	Obtenue par dérivation spatiale	
Nombre d'inconnues	4 ou 3 si isolant	3	3	1

Tableau III.1 : résumé sur les formulations, [2, 6].

III.5. Méthodes de résolution

On peut envisager de résoudre les équations de Maxwell:

- de manière analytique : ceci n'est limité qu'à quelques cas particuliers: géométries simples (structures 2D ou 3D axisymétriques), excitations pour lesquelles on peut exécuter une transformée de Laplace inverse, [2, 6].
- de manière numérique: on distingue les différences finies, les éléments finis et les équations intégrales de frontière. La méthode des éléments finis (MEF) sera utilisée lorsque l'excitation s'effectue à basse ou moyenne fréquence (la profondeur de pénétration standard n'est pas négligeable devant les autres dimensions). La méthode des équations intégrales de frontière ne peut s'appliquer que si les courants de Foucault se développent sur une profondeur qui peut être considérée comme négligeable, [2, 6].

III.5.1. Méthodes analytiques

La résolution analytique des équations de Maxwell permet d'obtenir une solution mathématique exacte du problème, néanmoins elle reste limitée à des configurations simples. À titre d'exemple on peut citer les travaux de Dodd (Annexe B) et al qui ont procédé à des solutions directes des équations différentielles par la méthode de séparation des variables. Parmi ces travaux on retrouve, [3, 6]:

- Une bobine à air axisymétrique de section rectangulaire située au-dessus de Deux couches métalliques parallèles de matériaux déférents ;
- Une bobine de section rectangulaire en cerclant deux cylindres métalliques concentriques.

III.5.2. Méthodes numériques

La résolution par des méthodes analytiques est impossible dans le cas général où la géométrie des dispositifs étudiés est complexe, et/ou les matériaux ont des propriétés magnétiques non linéaires. Pour résoudre ce type de problèmes on fait appel à des méthodes dites numériques telles que : la méthode des éléments de frontières, la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis, méthodes mixtes qui sont une combinaison de deux méthodes numériques (éléments finis+intégrales de frontières par exemple...) dont on donne un aperçu dans les paragraphes suivants, [8].

III.5.2.1. Méthode des différences finis

Historiquement la première, consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mail les rectangulaires et à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs de différences entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Si cette méthode est simple à programmer, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes, [3, 6]

III.5.2.2. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis, appelée aussi méthode des volumes de contrôle et développée par Spalding et Patankar. C'est une méthode de résidus pondérés. Pour laquelle les fonctions de poids sont égales à l'unité dans des volumes finis donnés. Elle consiste à discrétiser des équations aux dérivées partielles par une intégration sur des volumes finis entourant les nœuds du maillage plutôt qu'au nœud lui-même (cas de la méthode des différences finies). En effet, dans le cas de cette méthode, le domaine d'intégration est subdivisé en volumes de contrôle, chacun englobant un nœud de maillage, [6, 8].

III.5.2.3. Méthode des éléments de frontières

La méthode des éléments de frontières repose sur la méthode plus générale des équations intégrales. Les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations intégrales. Les fonctions de Green, noyaux de ces intégrales, représentent la réponse due à une source ponctuelle (réponse impulsionnelle) dans le contexte de la géométrie étudiée. La difficulté de leur détermination limite l'application de cette méthode à des géométries canoniques.

III.5.2.4. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. D'une façon générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes, [3, 6] :

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

- Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème.

III.5.3. Les méthodes spécifiques

Parallèlement au développement des outils généraux de modélisation électromagnétique, ont été élaborées des modèles spécifiques au CND par CF, et pour chacune des applications industrielles. Le principal objectif est l'obtention des approximations nécessaires permettant de réduire le temps de calcul CPU. Ces modèles sont développement a voir, [14] :

- Les tubes de générateurs de vapeur ;
- Les brames ;
- Les rivets d'avions.

III.6. Résolution en 2D par la méthode des éléments finis

Certains problèmes peuvent se simplifier lorsqu'il invariance des variables d'état suivant une direction. On se ramène:

- ✓ soit à un problème plan: on utilise alors un repère cartésien (x, y, z) . Si on a invariance suivant un axe z , les grandeurs ne dépendent plus que de x et y .
- ✓ soit à un problème axisymétrique: on utilise un repère cylindrique (r, θ, z) . Si on a invariance suivant θ , les grandeurs ne dépendent plus que de r et z .

Lorsque B (donc H) n'a que deux composantes, on utilisera la formulation en potentiel vecteur A . En effet pour un problème plan, B n'a que deux composantes (B_x, B_y) où B_x et B_y ne dépendent que de x et y . Alors A n'a qu'une composante A_z ne dépendant que de x et y . De plus, la densité de courant n'a qu'une composante suivant z .

Pour un problème axisymétrique, B n'a que deux composantes (B_r, θ, B_z) où B_r et B_z ne dépendent que de r et z (coordonnées cylindriques). A n'a qu'une seule composante A_θ ne dépendant que de r et z . de plus, la densité de courant n'a qu'une seule composante suivant θ .

Dans ces conditions, l'équation (III.25) devient:

$$\frac{1}{\mu} \Delta A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -J_s \quad \text{III.38}$$

En effet, pour ce type de problème, on a $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$. C'est l'équation classique dite de la magnétodynamique. Les courants de Foucault ont alors pour expression:

$$J_{cf} = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad \text{III.39}$$

On obtient alors une seule équation scalaire :

$$\frac{1}{\mu} \Delta A_z - \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = -J_{sz} \quad \text{Pour un problème plan.} \quad \text{III.40}$$

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^2} A_\theta + \frac{\partial A_\theta^2}{\partial z^2} \right) - \sigma \frac{\partial A_\theta}{\partial t} = -J_{s\theta}(t) \quad \text{Pour un problème axisymétrique.} \quad \text{III.41}$$

La solution numérique de l'équation III.41 est donnée par (Annexe A).

On constate qu'on est passé d'un problème à 4 inconnues AV à un problème à une seule inconnue A, ou A0 suivant le cas.

Si l'excitation est sinusoïdale (III.25) peut se mettre sous la forme :

$$\frac{1}{\mu} \Delta A - j \omega \sigma A = -J_{ex} \quad \text{III.42}$$

Sinon, on peut soit utiliser la transformée de Laplace, soit discrétiser l'équation (différence finie temporelle). Parmi les différents choix possibles, on utilise en général le schéma implicite (inconditionnellement stable, mais dont la précision est liée à la valeur du pas de temps), qui aboutit à :

$$\frac{1}{\mu} \Delta A_{(t)} - \sigma \frac{A_{(t)}}{\Delta t} = -J_{ex(t)} + \sigma \frac{A_{(t-\Delta t)}}{\Delta t} \quad \text{III.43}$$

où Δt est le pas de temps, $A(t)$ le potentiel vecteur à l'instant t et $A(t-\Delta t)$ est le potentiel vecteur à l'instant $t-\Delta t$.

On voit tout de suite l'intérêt d'essayer de se ramener à un problème 2D. On obtient en effet une équation à une seule inconnue dans tous les cas. Le gros avantage de cette méthode réside dans le temps nécessaire à la résolution. En effet, il ne faut que quelques minutes avec une station de travail pour obtenir une solution d'une excellente précision d'un point de vue numérique (influence du maillage comprise), [2, 6].

III.7. Densité de courants induits

Dans la configuration la plus simple, l'onde plane électromagnétique générée par un dispositif d'excitation (bobine), se propage orthogonalement à une surface plane d'un matériau.

Il a été montré que la résolution des équations de Maxwell conduit alors à exprimer la densité de courants de Foucault induits J dans la cible en fonction de la profondeur z comme suit:

$$J_x(z, t) = J_0 e^{-z \sqrt{\pi f \mu \sigma}} \cos(\omega t - z \sqrt{\pi f \mu \sigma}) \quad \text{III.44}$$

Cette relation montre (Annexe C) que l'évolution du module et de la phase de la densité de courants induits sont fonction de la profondeur z et de la fréquence d'excitation f . Selon III.44, plus z est grand, c'est-à-dire plus on pénètre en profondeur dans la cible, plus le module de la densité de courant est faible.

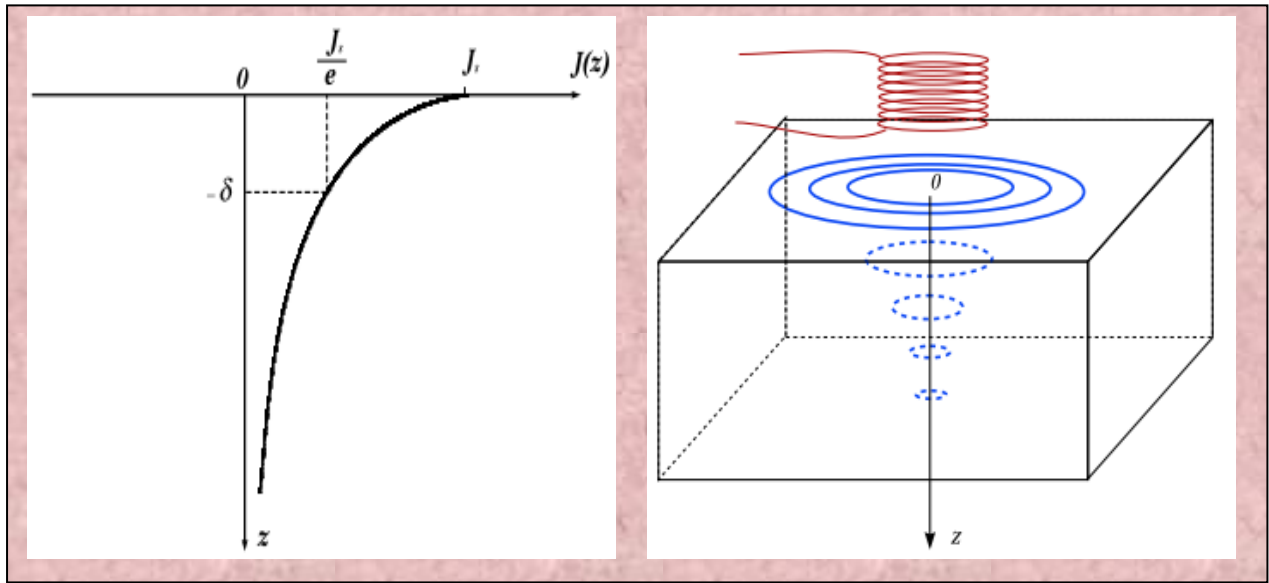


Figure III.4 : Répartition des courants de Foucault pour une pièce, [3].

III.8. Formulation généralisé pour une plaque conductrice

La solution analytique est donnée par l'équation suivante (Annexe D):

$$H_s(z) = \frac{1}{\sinh(e\gamma)} \left[H_{1s} * \sinh\left(\frac{e}{2}\gamma + \gamma z\right) + H_{2s} * \sinh\left(\frac{e}{2}\gamma - \gamma z\right) \right] \quad \text{III.46}$$

Où H_{s1} et H_{s2} sont les valeurs des champs sur les surfaces extérieures de la plaque,

$$\gamma = \frac{1+j}{\delta} \quad \text{III.47}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad \text{III.48}$$

III.9. Les équations dans les différentes régions

Les équations dans les différentes régions sont données sur la figure (III.5), dans :

- ❖ **Le vide** : La conductivité est nulle, l'équation (III.25) se réduit à l'équation de Laplace.
- ❖ **Le capteur** : En tout point, le courant dans la source est induit sous la variation spatiale du potentiel V et temporelle de A .
- ❖ **La charge** : En tout point, le courant est créé seulement par la variation temporelle de A (le gradient du potentiel scalaire est nul car le matériau est massif)

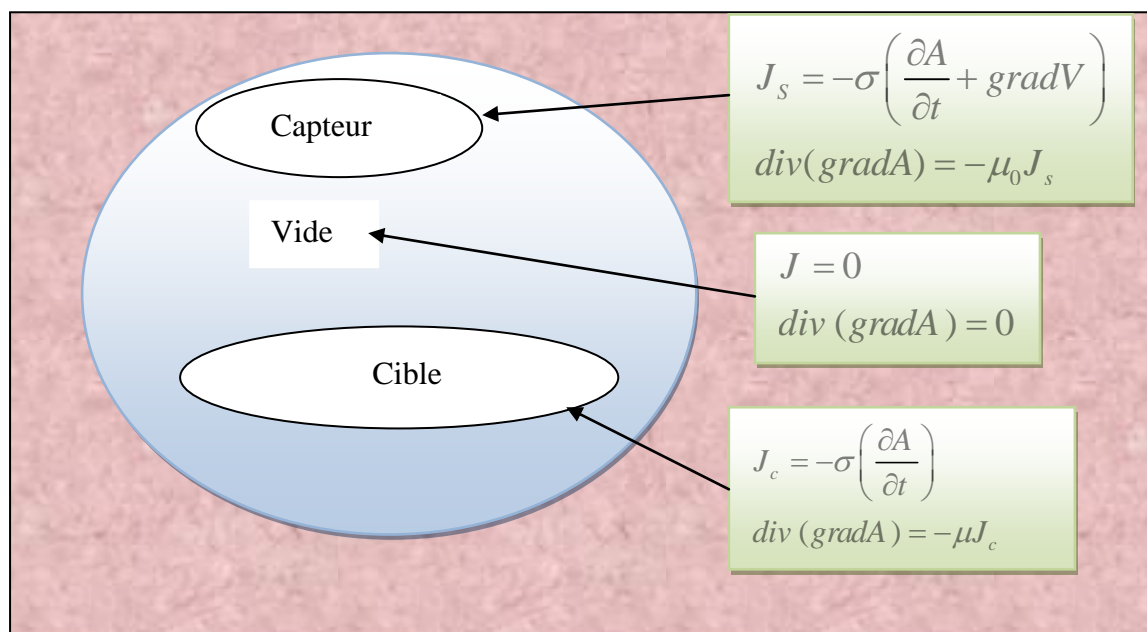


Figure III.5 : Equations dans les différents milieux, [22].

III.10. Présentation et définition du modèle d'étude

III.10.1. Cas d'un capteur absolu ponctuel

Le modèle à deux dimensions est constitué par les régions suivantes :

- ❖ La pièce conductrice,
- ❖ Un capteur,
- ❖ Défaut dans la pièce,
- ❖ L'air.

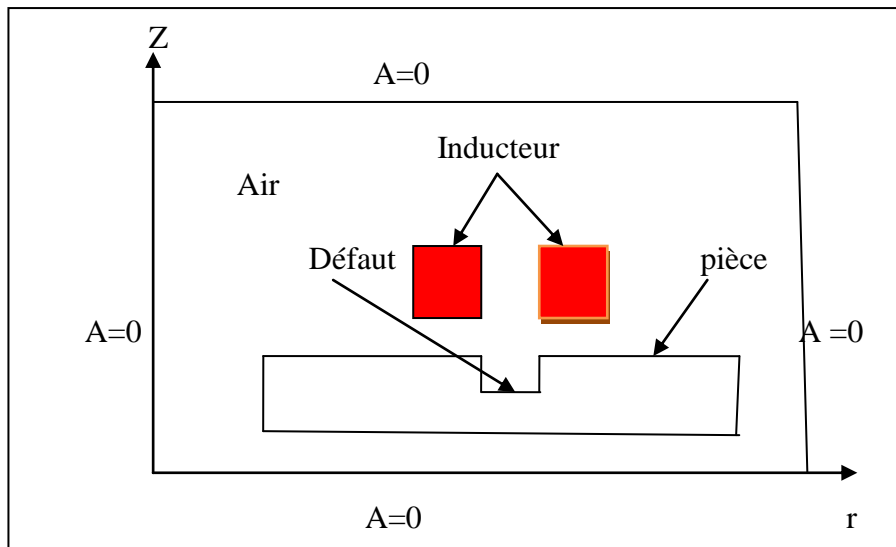


Figure III.5 : Capteur absolu ponctuel.

III.10.2. Cas d'un capteur absolu en E

Le modèle à deux dimensions est constitué par les régions suivantes :

- ❖ La pièce conductrice,
- ❖ Un capteur,
- ❖ Défaut dans la pièce,
- ❖ L'air,
- ❖ La ferrite (E).

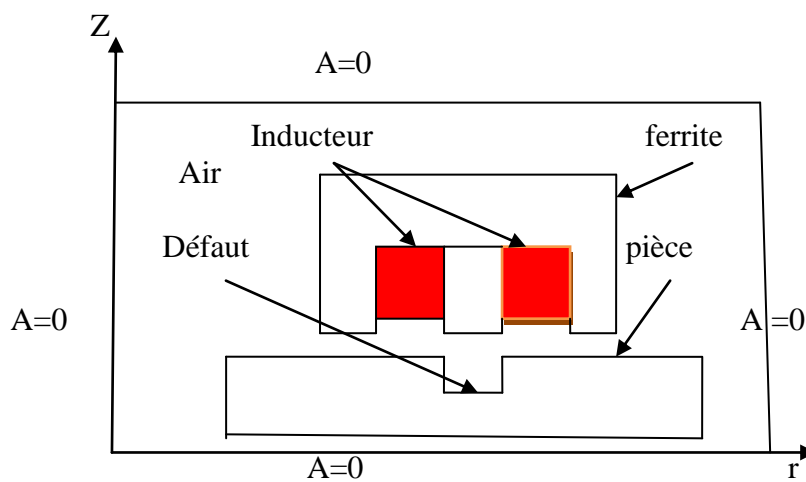


Figure III.5 : Capteur absolu en E.

III.11. Calcul d'impédance

Une fois les valeurs du potentiel vecteur magnétique tout nœud de la région maillé sont déterminées, l'impédance de la bobine qui est notre paramètre d'intérêt peut être calculée. Deux différentes approches couramment utilisées pour l'estimation de cette valeur, sont considérées : la méthode directe et la méthode l'énergie, [5, 23].

III.11.1. Méthode directe

L'impédance d'une seule spire de bobine (sonde) de rayon r portant un courant alternatif I_s est donnée par :

$$Z = \frac{V}{I_s} \quad \text{III.49}$$

Où

V est la tension induite dans la bobine, exprimée en termes de l'intensité de champ électrique E comme

$$V = -\int_c E \, dl \quad \text{III.50}$$

A partir de l'équation (III.24), nous avons :

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad}V \quad \text{III.51}$$

En régime harmonique:

$$\frac{\partial}{\partial t} = j\omega \quad \text{III.52}$$

Nous avons :

$$E = -j\omega A - \text{grad}V$$

De plus la tension induite est indépendante du potentiel scalaire ($\text{grad}V=0$), en remplaçant (III.52) dans (III.50), nous aurons:

$$V = j\omega \int_c A \, dl \quad \text{III.53}$$

A partir de l'équation (III.49) l'impédance de la bobine est donnée par:

$$Z = \frac{j\omega}{I_s} \int A dl \quad \text{III.54}$$

Qui, pour une seule spire de bobine de rayon r est

$$Z = j \frac{2\pi\omega r A}{I_s} \quad \text{III.55}$$

L'impédance du capteur est composée de deux parties, partie réel qui est la résistance et une partie imaginaire, la réactance.

L'impédance de la bobine est toutefois calculée de façon approximative en utilisant la méthode des éléments finis. Considérons l'échantillon de la bobine, discrétisé par éléments triangulaires. Si les dimensions de ces éléments sont petits alors le potentiel vecteur magnétique de toutes les spires couvertes par l'élément (i) peut être approximé par la valeur centrale A_{ci} et similaire les rayons de toutes les spires de l'élément, peuvent être approchés par la valeur centrale r_{ci} . A partir de l'équation (III.50) l'impédance pour chaque spire à l'intérieur de l'élément i est donnée par [5, 23]:

$$Z = j \frac{2\pi\omega r_{ci} A_{ci}}{I_s} \quad \text{III.56}$$

Si N_s est le nombre total de spire de la bobine dans l'échantillon, N_t tours/ m^2 , est la densité de spire de l'élément, et a_i la surface de l'élément, l'impédance totale de l'ensemble des spires dans l'élément (i) est donnée par:

$$Z = j \frac{2\pi\omega r_{ci} A_{ci} a_i N_t}{I_s} \quad \text{III.57}$$

Si le nombre d'éléments dans l'échantillon de la bobine est N_c alors l'impédance total est donnée par:

$$Z = j \frac{2\pi\omega N_i}{I_s} \sum_{i=1}^{N_c} r_{ci} A_{ci} a_i \quad \text{III.58}$$

L'impédance de la bobine dans un problème 2D ou axisymétrique peut être calculée en utilisant la méthode suivante : On prend la valeur du potentiel vecteur magnétique constante suivant la longueur du dispositif qui est parallèle à la source dans ce cas le plan d'étude est (xoy) ou dans la direction

circconférentielle de la bobine (cas axisymétrique). Une autre méthode de calcul de l'impédance est basé sur le calcul des énergies stocké et dissipé est expliqué dans la section suivante, [5, 23].

III.11.2. Méthode de l'énergie

L'impédance d'une bobine peut être calculée à partir de l'énergie du système, puisque l'inductance et la résistance sont respectivement associées à l'énergie stockée et l'énergie dissipée dans le système.

L'énergie stockée W dans le système peut être donnée par:

$$W = \frac{1}{2} \int_v B \cdot H \, dv \quad \text{III.59}$$

En supposant la réductivité constante dans chaque sens, l'énergie stockée dans un élément fini de volume V_i peut être écrite, en termes des composantes de B seule sous la forme :

$$W_i = \frac{1}{2} \nu (B_{ri}^2 + B_{zi}^2) V_i \quad \text{III.60}$$

En additionnant sur tous les éléments (N) de la région du maillage, l'énergie stockée totale est donnée par:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \nu (B_{ri}^2 + B_{zi}^2) V_i \quad \text{III.61}$$

L'inductance de la bobine peut alors être calculée par:

$$L = 2 \frac{W}{I_s^2} \quad \text{III.62}$$

Où

I est le courant dans la bobine de la source.

La résistance de la bobine est associée à l'énergie dissipée dans le système. L'énergie dissipée dans un élément fini de volume V_i est donnée par:

$$P_i = \frac{J_i^2 V_i}{\sigma} \quad \text{III.63}$$

Où

Ji est la densité du courant induit définie par :

$$J_i = -j \omega \sigma A_{ci} \quad \text{III.64}$$

Où

A_{ci} est la valeur du potentiel vecteur magnétique central pour l'élément (i).

Remplaçons l'équation (III.63) dans (III.62) et additionnons sur tous les éléments de la région du maillage, l'énergie dissipée total est donnée par:

$$P = \sum_{i=1}^N P = \sum_{i=1}^N V_i \omega^2 \sigma A_{ci}^2 \quad \text{III.65}$$

La résistance de la bobine est donnée par:

$$R = \frac{P}{I_s^2} \quad \text{III.66}$$

L'impédance de la bobine est défini par:

$$Z = R + j \omega L \quad \text{III.67}$$

III.11.3. Comparaison de la méthode directe et la méthode de l'énergie

Bien que l'approche de l'énergie soit une nécessité pour les applications 3D, elle comporte plusieurs limites, comparativement à la méthode directe :

- Les calculs d'énergie utilisent des valeurs au carré du potentiel vecteur magnétique. Conséquent les informations d'origine sur phase par rapport à la source est perdue ;
- Le calcul de l'énergie stockée implique la différenciation spatiale du potentiel vecteur magnétique qui est fait avec un effort supplémentaire très peu dans le modèle par élément finis. Cependant ce qui introduit des erreurs graves, lorsque la discrétisation de la grossier comme c'est le cas dans les calculs 3D ;
- Le calcul de l'énergie comporte en sommant sur la région entière et donc l'impédance résultante reflète la source dans son ensemble. Il n'est pas possible de calculer l'impédance des

bobines individuelles dans une sonde courant de Foucault différentielle. Une solution à cette difficulté dans le cas de problèmes linéaires, est discuté, [23].

III.12. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les équations de Maxwell le modèle mathématique et d'électromagnétique qui régissent le CND par CF puis enfin, on a évoqué les méthodes de résolutions utilisées. La méthode des éléments finis est très largement utilisée pour résoudre des problèmes physiques régis par des équations aux dérivées partielles. Elle s'avère très bien adaptée à la résolution des problèmes électromagnétiques, d'où son utilisation dans chapitre suivant.

Chapitre IV : Simulation et analyse des résultats par MEF

IV.1. Introduction

La simulation du contrôle non destructif par courants de Foucault a maintenant atteint une maturité industrielle à travers les produits commerciaux FLUX2D, FLUX3D et CIVA. Ces outils complémentaires permettent de traiter la majorité des configurations de contrôle : configurations planes ou tubulaires avec le logiciel CIVA par exemple qui est basé sur MEF, [8].

La méthode d'élément finis a été longuement utilisée dans le développement de modèle pour calculer l'impédance du capteur dans le contrôle non destructif (CND).

L'objectif de ce chapitre est de présenter une application de la MEF à des problèmes électromagnétiques pour l'étude du contrôle non destructif par courant de Foucault.

Les détails de son implémentation numérique ont été présentés avec une importance spécifique à travers des programmes écrits en MATLAB. Nous allons résoudre un problème électromagnétique à deux dimensions, [5].

En première étape de ce chapitre nous détaillerons, l'algorithme du programme MEF en deux dimensions constitué de trois processeurs. Puis en seconde étape nous présenterons les résultats obtenus et terminera, par les interprétations de ces derniers.

IV.2. Organigramme de calcul par MEF en2D

L'organigramme du programme MEF écrit sous MATLAB est constitué de trois processeurs et structuré comme suit :

- ❖ Préprocesseur : Ce processeur est constitué de deux parties : partie base de données, partie de maillage. Dans ce processeur, on trouve les différentes données concernant la description de la géométrie du dispositif (capteur, pièce), la discrétisation, les différentes propriétés physiques, le calcul des coefficients des équations algébriques et les conditions aux limites. Ces deux parties sont décrites comme suit :
 - Partie base de donnée : Cette partie est consacrée à la description de la géométrie du dispositif et englobe :
 - ✓ Le nombre de régions du domaine d'étude.
 - ✓ Les dimensions et la géométrie de chaque région.
 - ✓ Le nombre de nœuds, triangles et éléments.

- Partie de maillage : Cette partie est dédiée à l'introduction des propriétés physiques et électromagnétiques (conductivité électrique, perméabilité magnétique) de chaque région selon le phénomène à étudier (thermique, magnétostatique, électrocinétique), en l'occurrence la fréquence d'excitation, la densité de courant source.
- ❖ Processeur : Ce processeur est caractérisé par les équations algébriques discrétisées des inconnues, par les méthodes de résolution tel que la méthode de Gauss, Gauss Seidel qui provient de la formulation éléments finis, les résultats du calcul permettent d'évaluer les composantes du vecteur potentiel magnétique, densité des courants induits, champ magnétique, etc. Après avoir calculé le potentiel vecteur magnétique A . On déduira ensuite l'impédance du capteur.
- ❖ Poste processeur : Ce processeur est destiné à l'affichage et la visualisation de toutes les grandeurs électromagnétiques à savoir le potentiel vecteur magnétique les lignes de champ magnétique, la densité des courants induits et l'impédance du capteur sous forme des courbes ou des surfaces en 2D.

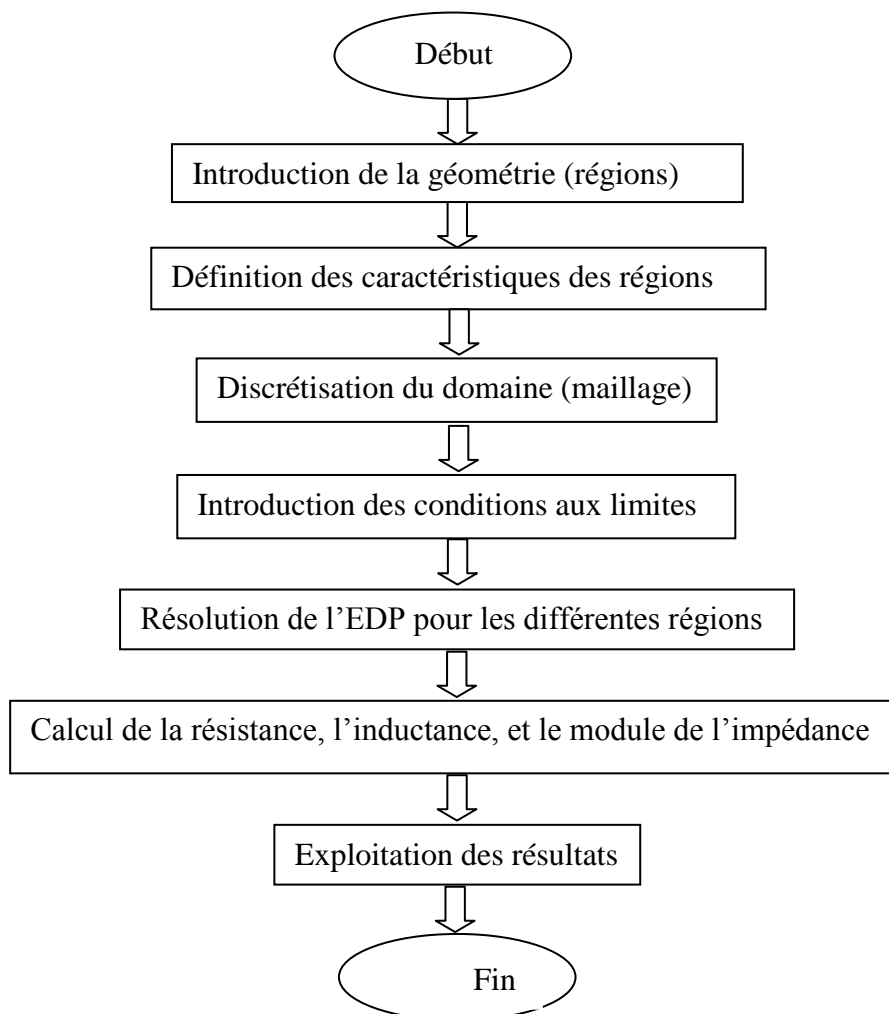


Figure IV.1 : Organigramme de calcul par éléments finis.

IV.3. Applications proposées

Pour valider le programme développé, nous avons choisi les applications suivantes :

- ❖ La première application concerne un capteur absolu et plaque amagnétique ;
- ❖ La deuxième application représente un capteur absolu et plaque magnétique;
- ❖ La troisième application représente un capteur absolu en E et plaque amagnétique;
- ❖ La quatrième application montre un capteur absolu en E et plaque magnétique;

IV.4. Présentation et définition du modèle d'étude

IV.4.1. Simulation d'un (capteur absolu – plaque amagnétique (Aluminium))

Pour la première application, nous avons choisi de tester un plaque amagnétique caractérisé par une perméabilité égale à l'unité, une conductivité élevée $37.7 \cdot 10^6 \text{ Sm}^{-1}$, excité par un courant sinusoïdal de densité de courant $J = 2.6 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ et une fréquence de 50 kHz.

Le dispositif que nous avons étudié est montré en (figure IV.2). Qui se compose d'un inducteur (capteur), la charge (pièce conductrice) et l'air.

Théoriquement, le champ magnétique s'étend jusqu'à l'infini ($A = 0$), mais en vue d'une modélisation magnétique, il est nécessaire de ramener les limites théoriques à une distance finie qui peut être aussi grande que l'exigence de la précision

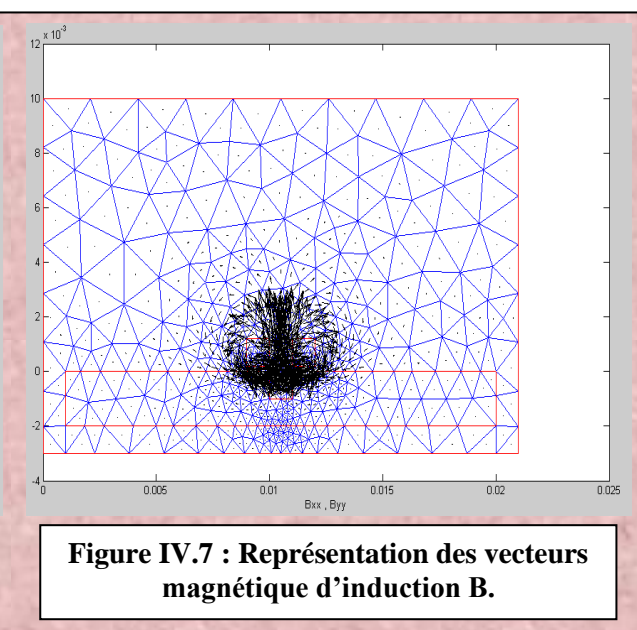
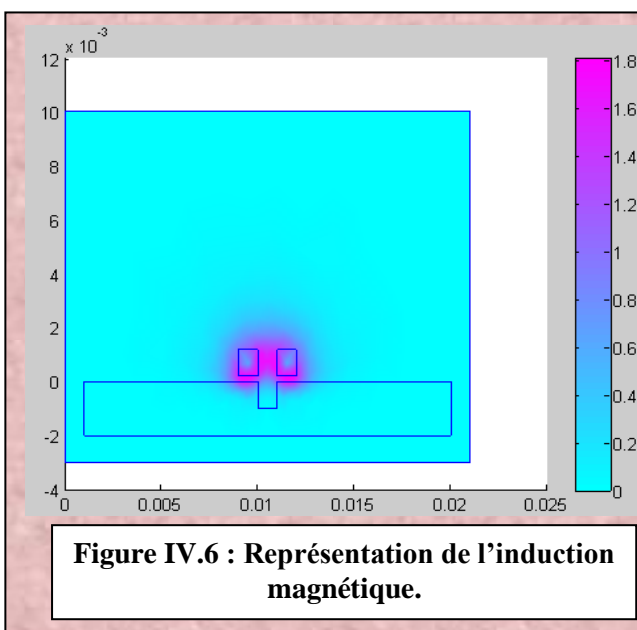
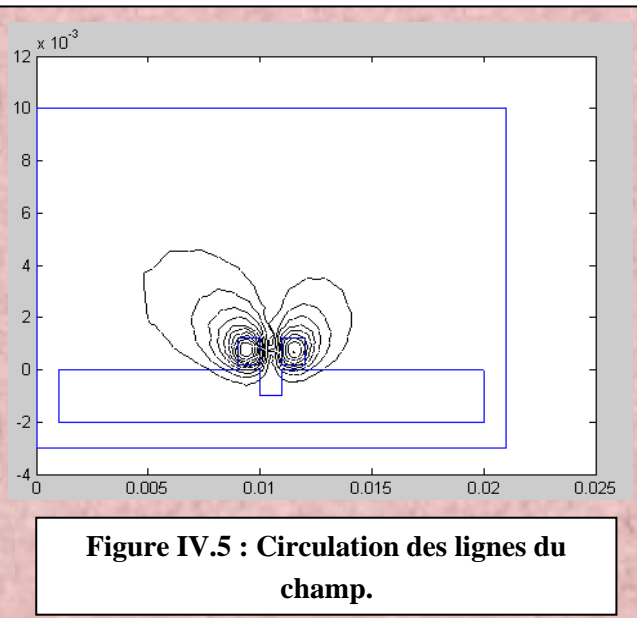
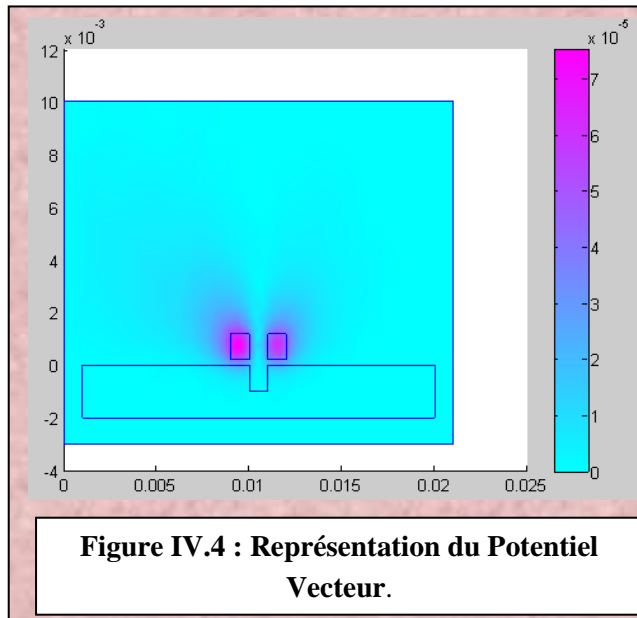
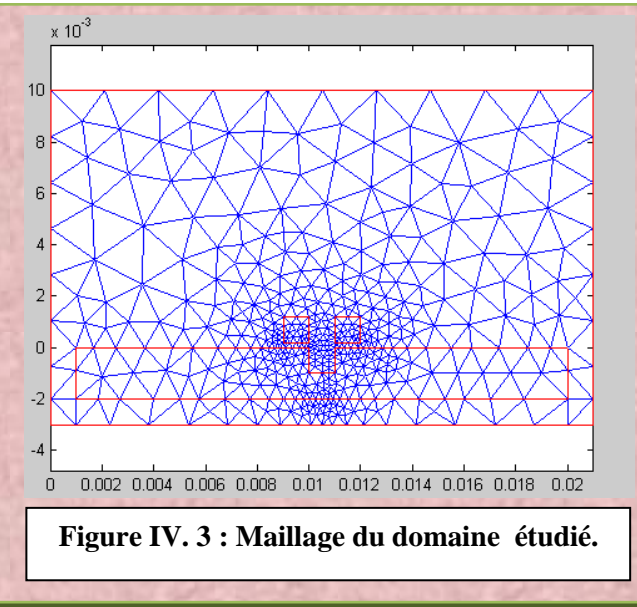
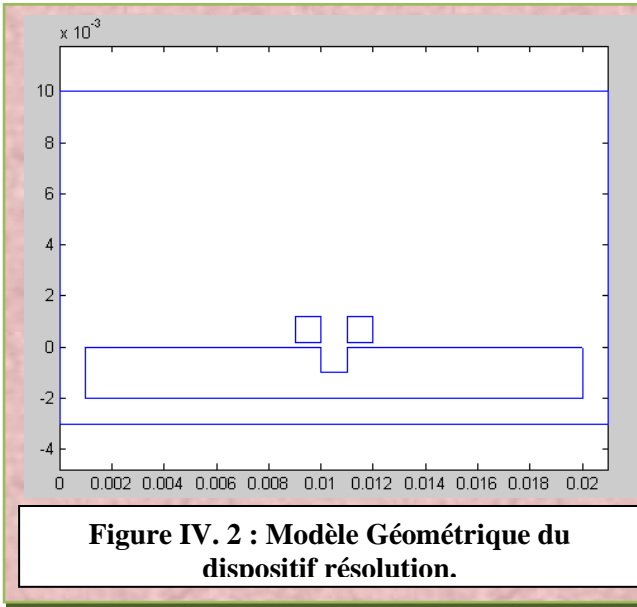
Les conditions aux limites associées à l'équation électromagnétique (III.41) sont du type de Dirichlet ($A=0$). La figure (IV.3) montre la distribution des nœuds dans le domaine d'étude. Nous avons affiné ce maillage pour avoir la meilleure précision possible.

f : fréquence d'excitation.

lf : lift off (distance entre cible et capteur).

lg : largeur de défaut.

Les résultats de simulation obtenus dans le cas d'un capteur avec plaque amagnétique sont illustrés par l'ensemble de figures suivant :



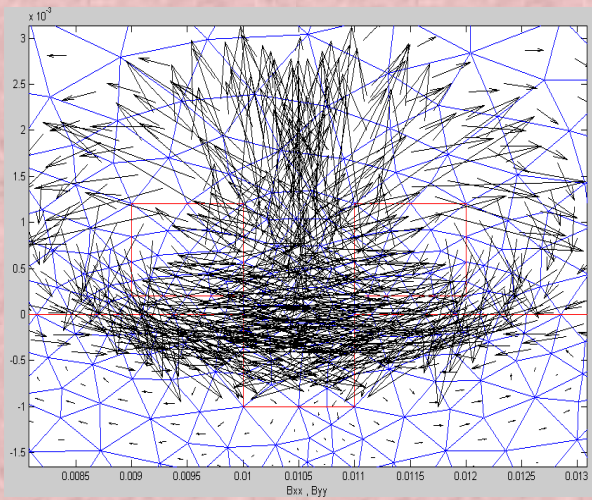


Figure IV.8 : Zoom des vecteurs d'induction.

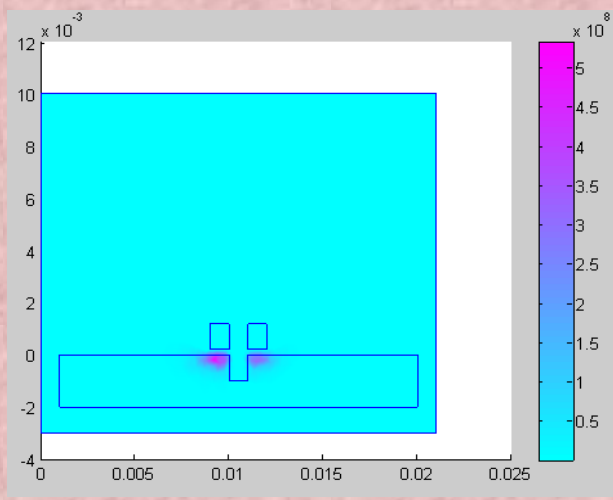
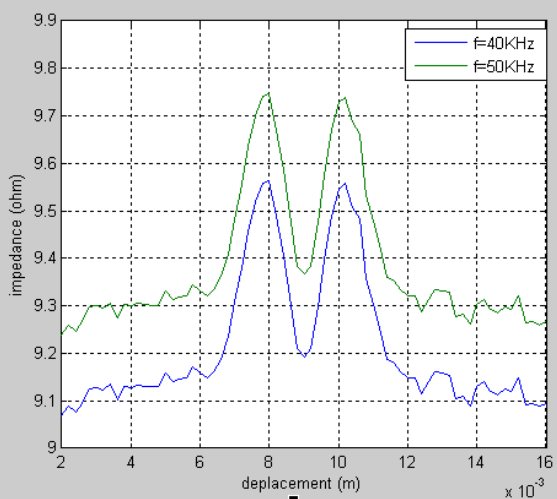
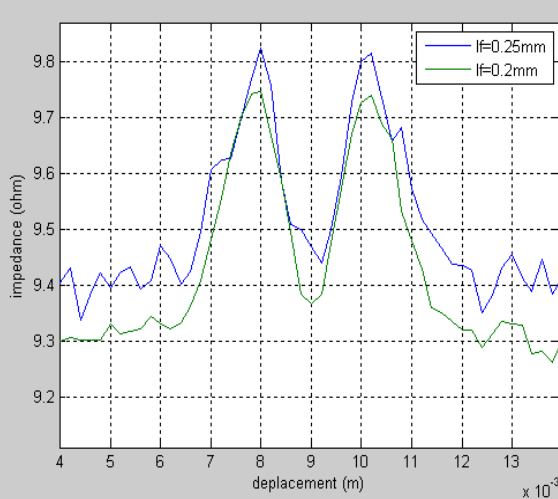


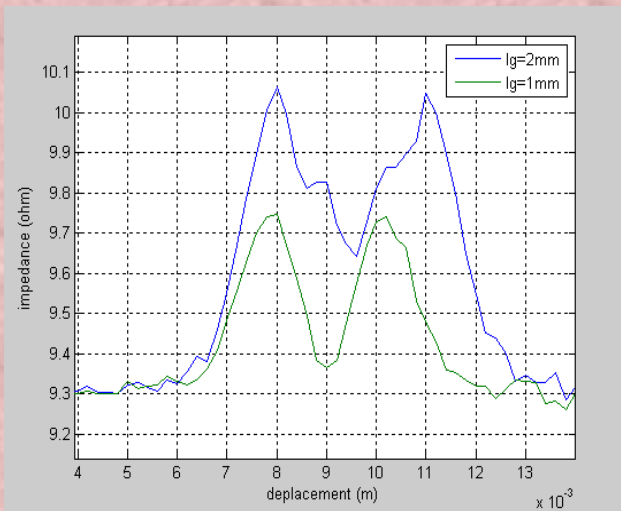
Figure IV.9 : Distribution de la densité des courants induits.



a . Variation de la fréquence



b . Variation du lift off



c . Variation de la largeur du défaut

Figure IV.10 : Allure de l'impédance.

IV.4.1.1. Interprétation des résultats de simulation

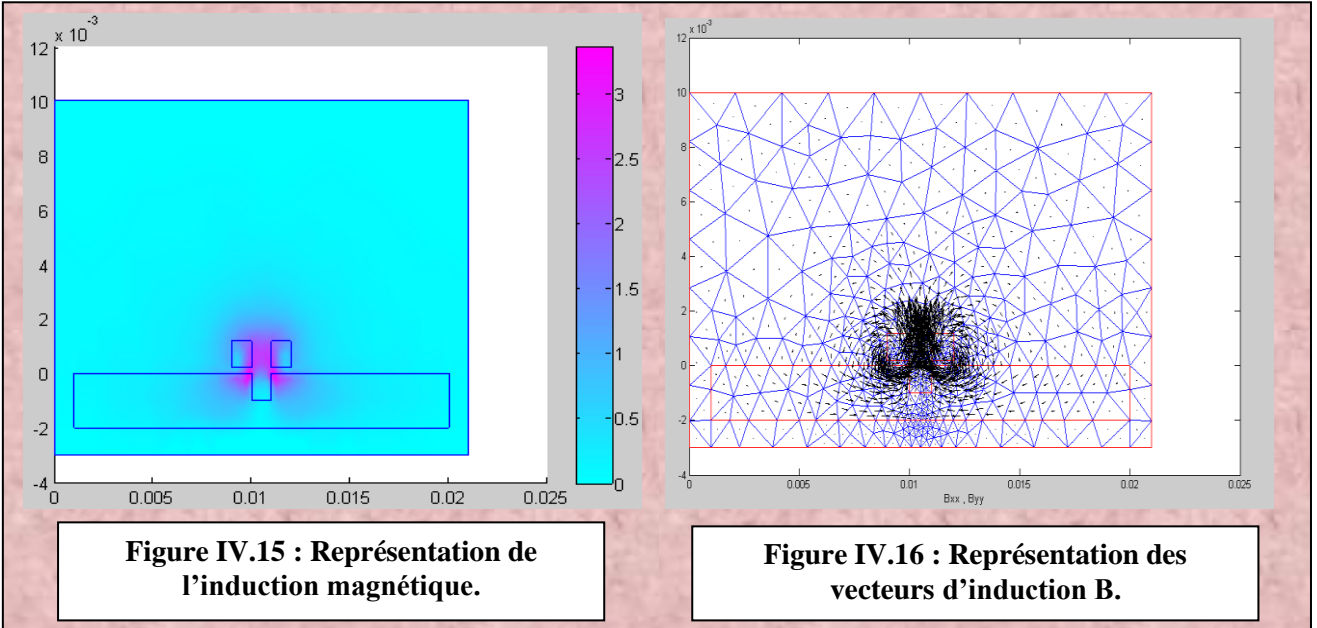
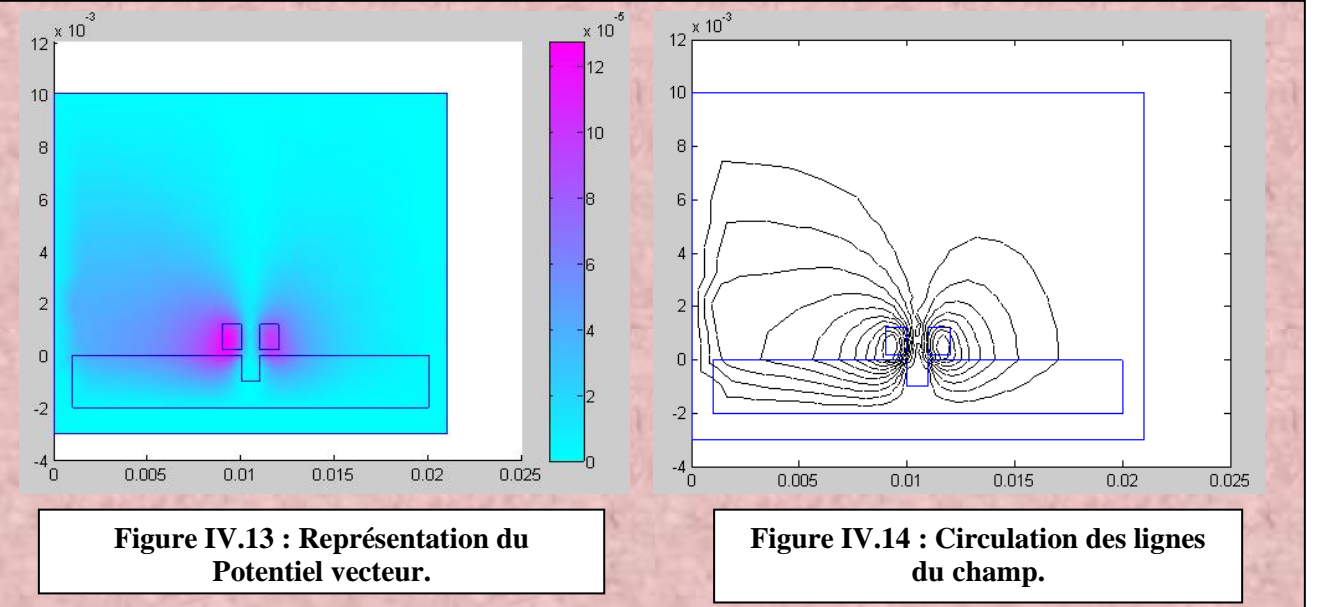
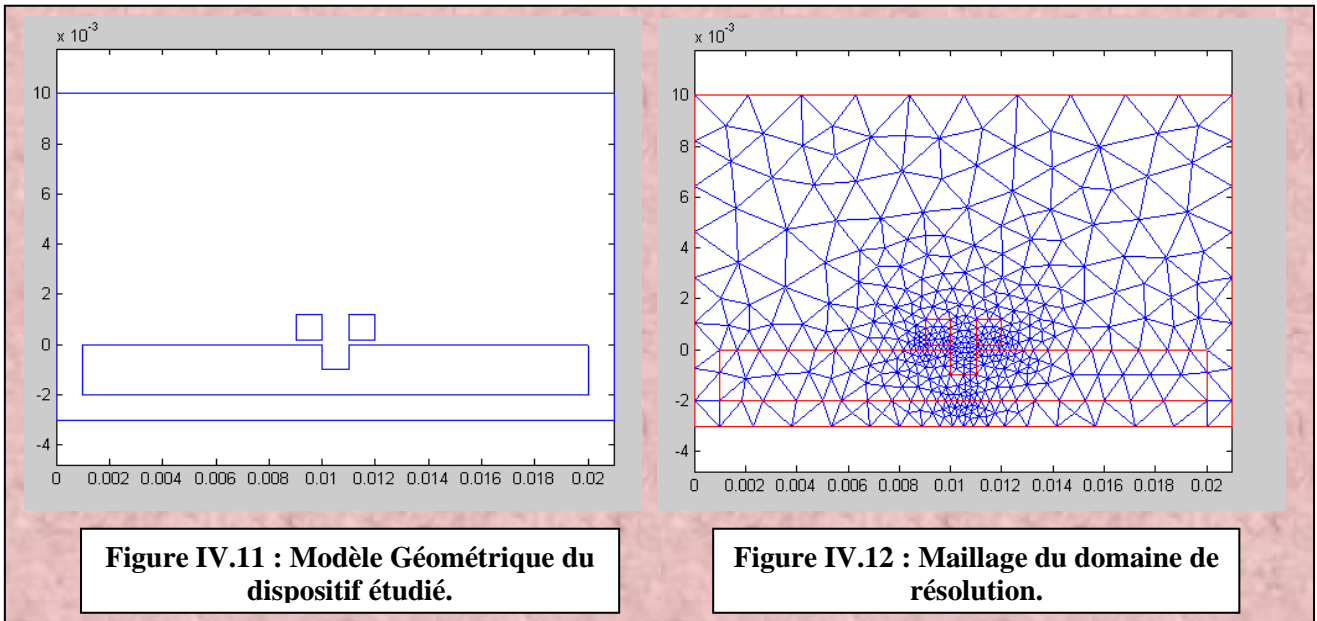
Les résultats de simulation obtenus dans le cas d'un plaque amagnétique avec défaut externe sont présentés comme suit :

- Les figures (IV.6) et (IV.7) et (IV.4) et (IV.5) montrent la distribution des vecteurs d'induction magnétique et du champ magnétique. Elle montre une forte concentration de ce dernier au niveau de l'inducteur et embrassent les surfaces internes du défaut, car ce dernier est caractérisé par une perméabilité faible.
- La figure (IV.9) montre nettement que :
 - ✓ Les densités de courant élevées apparaissent à proximité de la surface de la plaque (effet de peau). Les densités importantes sont à la verticale de la sonde, c'est-à-dire aux endroits les plus proches de la bobine.
 - ✓ Les densités de courant dans la plaque et dans la bobine sont de signe opposé, ce qui rappelle la loi de Lenz : le courant induit s'oppose par ses effets à la cause qui lui donne naissance.
- La figure (IV.10) montre l'allure de l'impédance calculée par la méthode directe. La présence de défaut perturbe la trajectoire des lignes du champ ce qui est traduit par la variation de l'impédance du capteur. Les résultats de calcul de l'impédance par la méthode directe concordent bien.

IV.4.2. Simulation d'un (capteur absolu – plaque magnétique)

La deuxième application, nous avons choisi de tester un plaque magnétique (alliage Fer-Nickel) caractérisé par une perméabilité élevée ($\mu=150000$), une conductivité faible ($\sigma=5.5$), excité par un courant sinusoïdal de densité de courant $J = 2.6 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ et une fréquence de 50 kHz.

Les résultats de simulation obtenus dans le cas d'un capteur avec plaque magnétique d'alliage Fer-Nickel sont illustrés par l'ensemble de figures ci-dessous:



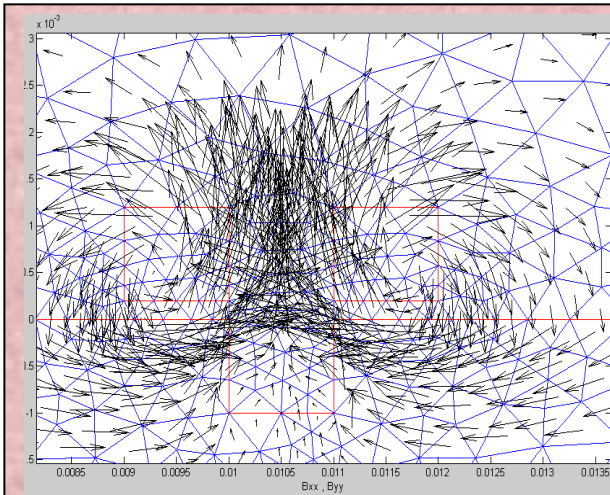


Figure IV.17 : Zoom des vecteurs d'induction.

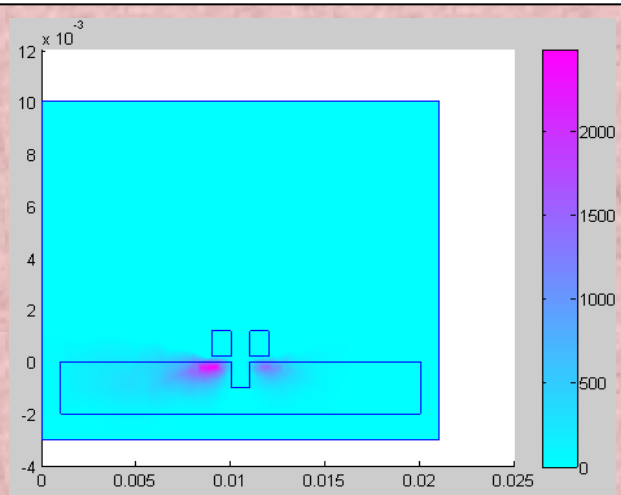
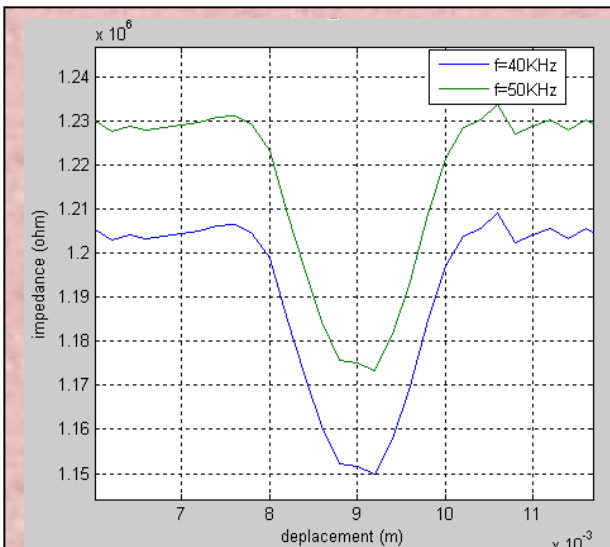
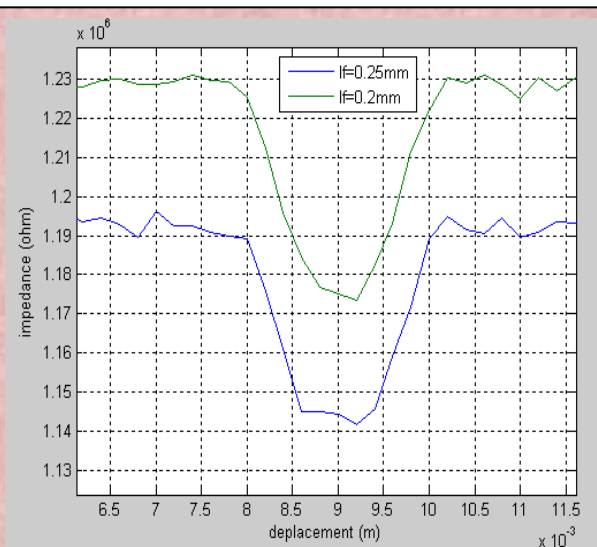


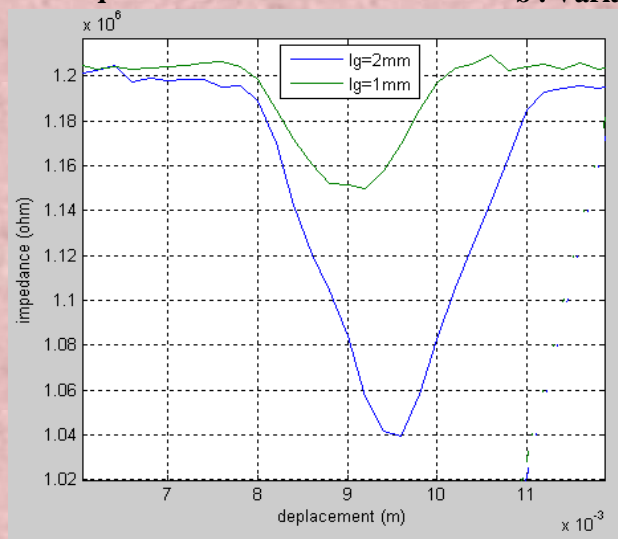
Figure IV.18 : Distribution de la densité des courants induits.



a . Variation de la fréquence



b . Variation du lift off



c . Variation de la largeur du défaut

Figure IV.19 : Allure de l'impédance.

IV.4.2.1. Interprétation des résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus dans le cas d'un plaque magnétique avec défaut externe sont présentés comme suit :

- Les figures (IV.15) et (IV.16) et (IV.13) et (IV.14) montrent la distribution des vecteurs d'induction magnétique et du champ magnétique. Les vecteurs d'induction magnétique et lignes du champ, est nettement supérieur par rapport au cas du plaque amagnétique, cela est illustré par une forte pénétration des lignes du champ et les vecteurs induction magnétique dans la cible, car ce dernier est caractérisé par une perméabilité élevée.
 - ✓ La circulation des lignes du champ et les vecteurs induction magnétique, qui sont canalisés dans la cible sans traverser le défaut caractérisé par une faible perméabilité par rapport à la cible.
- La figure (IV.18) montre nettement que :
 - ✓ Les densités du courant induit dépendent toujours de la loi de Lenz, elles sont fortement concentriques à l'axe vertical du capteur, ce qui est vrai, mais avec de faibles valeurs, à cause de la nature du matériau sous test (conductivité faible).
- La figure (IV.19) représente l'allure de l'impédance d'un capteur absolu avec plaque magnétique et un défaut externe. On remarque que la valeur de l'impédance est plus grande par rapport au cas précédent (plaque amagnétique).

IV.4.3. Simulation d'un capteur absolu en « E » et plaque amagnétique (Aluminium)

Considérons le cas d'un capteur absolu en E et un plaque amagnétique caractérisé par une perméabilité égale à l'unité, une conductivité élevée $37.7 \cdot 10^6 \text{ Sm}^{-1}$, excité par un courant sinusoïdal de densité de courant $J = 2.6 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ et une fréquence de 50 kHz.

La simulation du déplacement du capteur donné les résultats suivants:

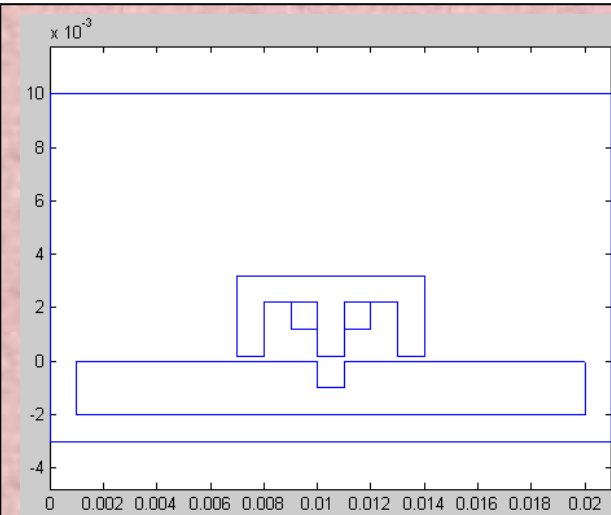


Figure IV.20 : Modèle Géométrique du dispositif étudié.

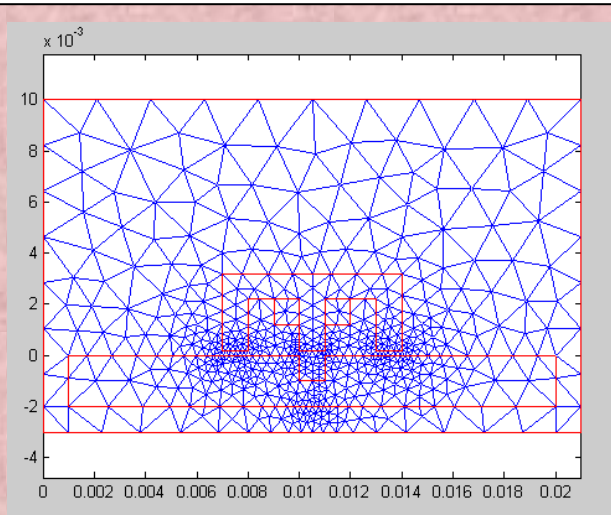


Figure IV.21 : Maillage du domaine de résolution.

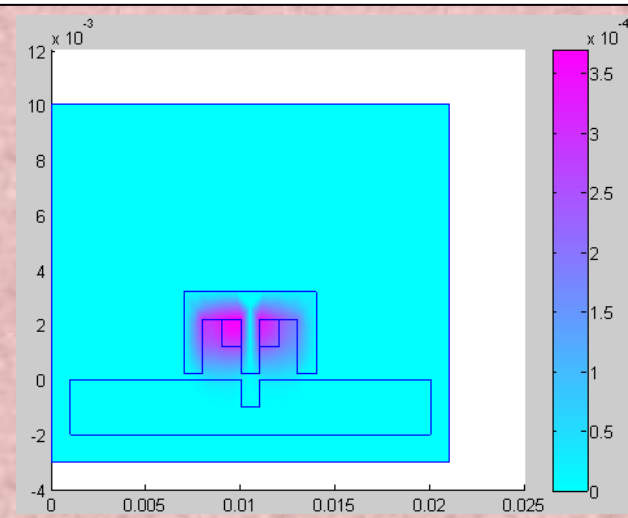


Figure IV.22 : Représentation du Potentiel Vecteur.

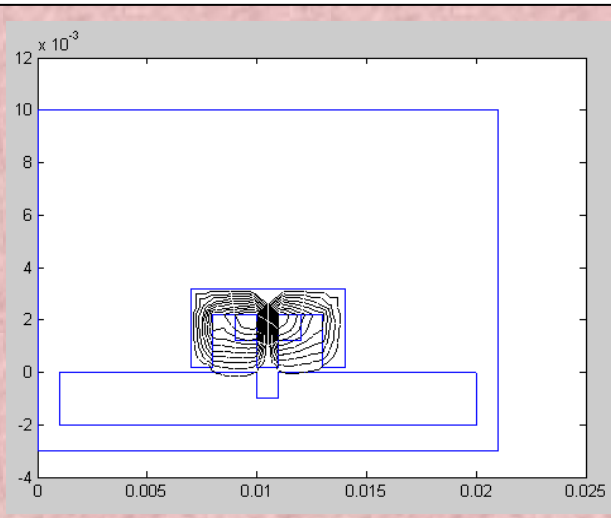


Figure IV.23 : Circulation des lignes du champ.

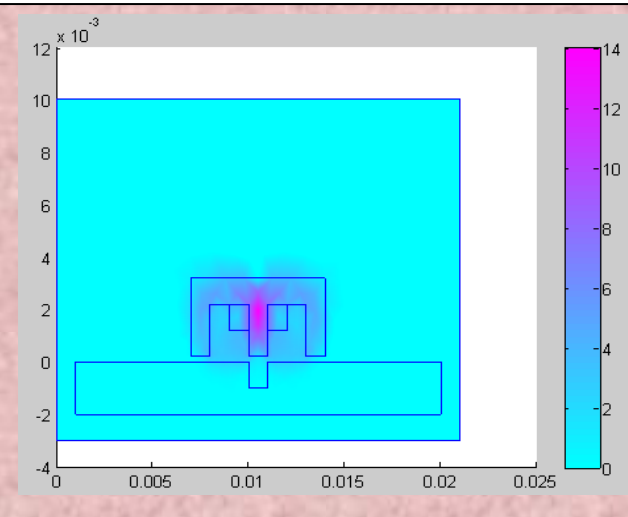


Figure IV.24 : Représentation de l'induction magnétique.

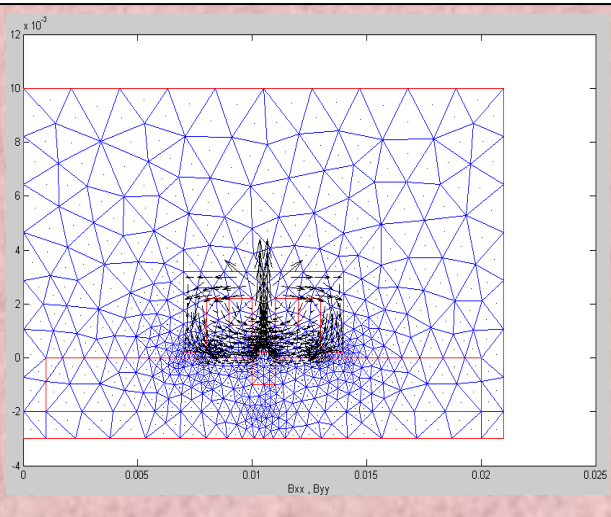


Figure IV.25 : Représentation des vecteurs d'induction B.

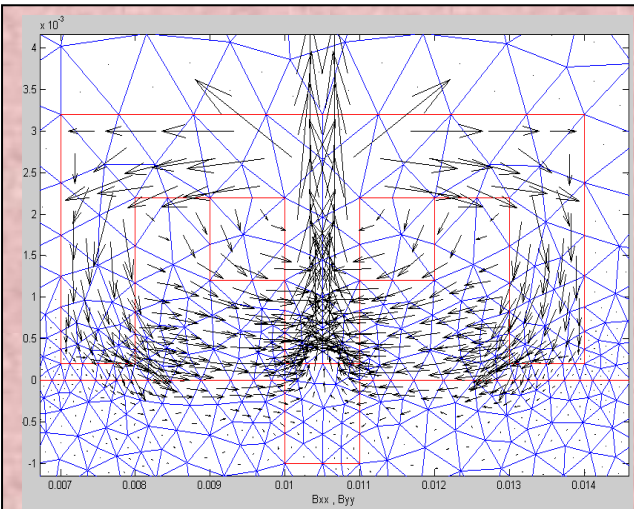


Figure IV.26 : Zoom des vecteurs d'induction.

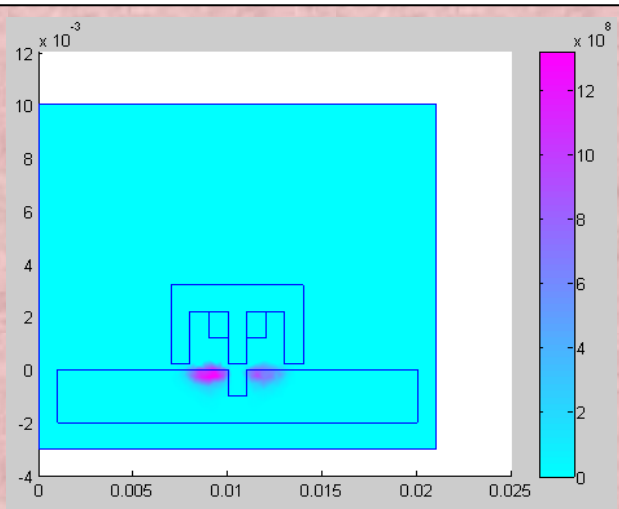
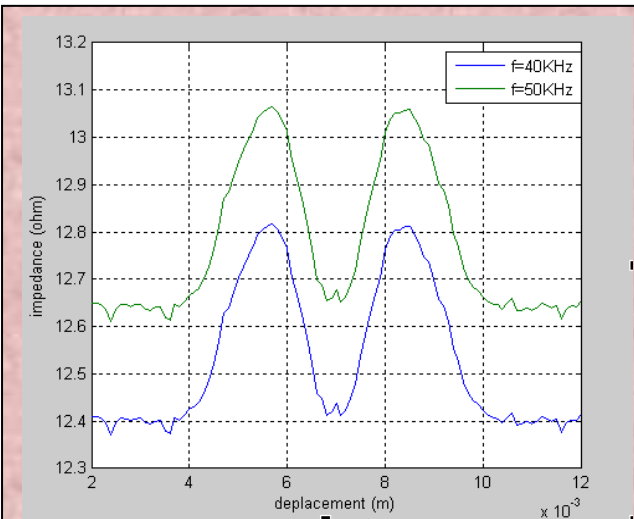
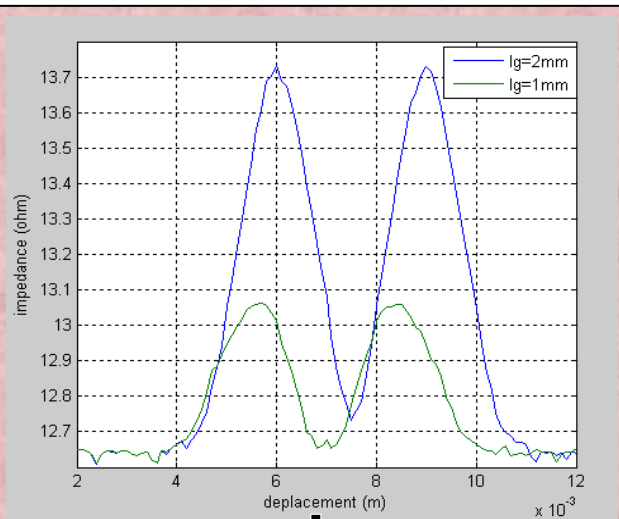


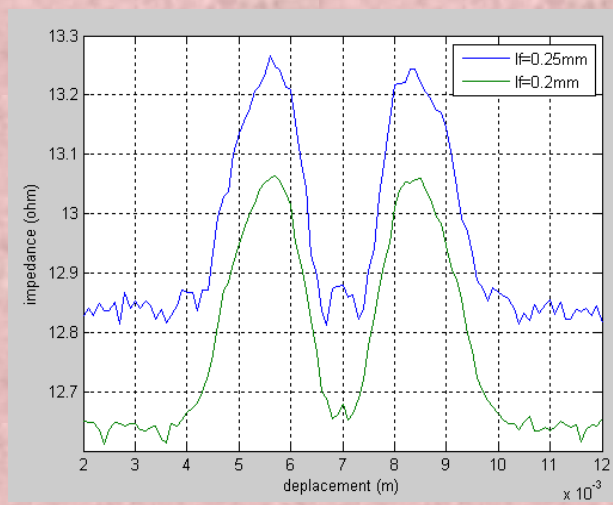
Figure IV.27 : Distribution de la densité des courants induits.



a . Variation de la fréquence



b . Variation du lift off



c . Variation de la largeur du défaut

Figure IV.28 : Allure de l'impédance.

IV.4.3.1. Interprétation des résultats de simulation

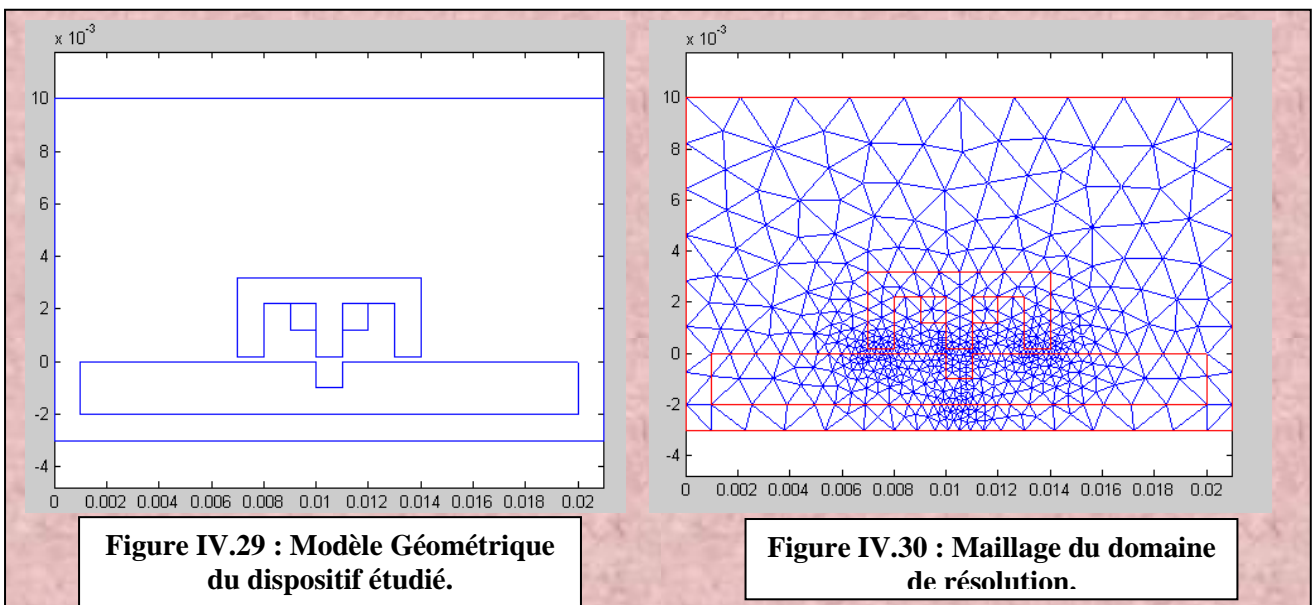
Les résultats de simulation obtenus dans le cas d'un capteur absolu en E et un plaque amagnétique avec défaut externe sont présentés comme suit :

- Les figure (IV.24) et (IV.25) et (IV.22) et (IV.23) correspond à la distribution des vecteurs d'induction magnétique et du champ magnétique. Elle montre une forte concentration de ce dernier au niveau de l'inducteur avec des faibles valeurs, et cela est dû à l'utilisation d'une fréquence élevée.
- La figure (IV.27) montre la distribution des courants induits à la surface. On constate que leurs valeurs sont élevées, car la conductivité de la cible amagnétique est importante ($j = \sigma \cdot 2\pi \cdot f \cdot A$).
- La figure atteint deux valeurs maximales qui correspondent aux extrémités du défaut et une valeur minimale correspondant au centre du défaut. L'impédance dans le cas est supérieure à celle correspondant à la plaque amagnétique. Dans le cas, l'impédance a une valeur faible comme illustré par la figure (IV.28), cela est dû à la valeur importante de l'épaisseur de peau.

IV.4.4. Simulation d'un(capteur absolu en E– plaque magnétique)

Dans ce cas nous étudions une simulation d'un capteur absolu en E et plaque magnétique (alliage Fer-Nickel) avec défaut externe. Le défaut aux mêmes dimensions que les cas précédents, avec la même fréquence d'excitation.

Les résultats de simulation sont illustrés par les figures suivantes :



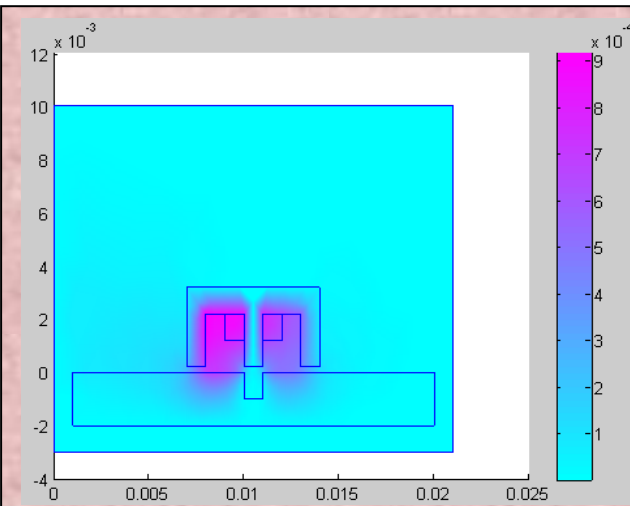


Figure IV.31 : Représentation du Potentiel vecteur.

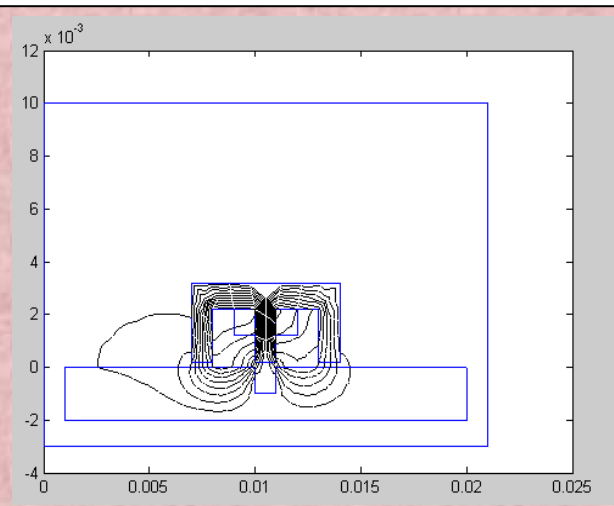


Figure IV.32 : Circulation des lignes du champ.

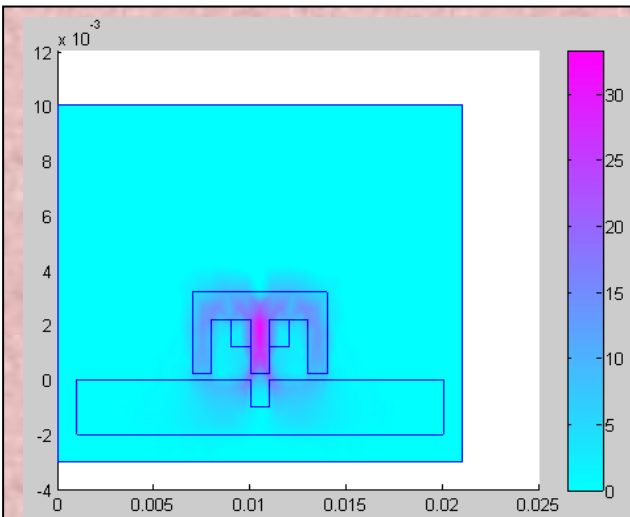


Figure IV.33 Représentation de l'induction Magnétique.

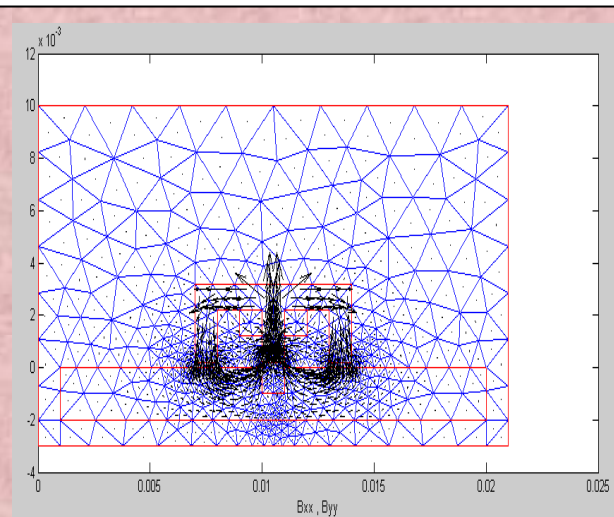


Figure IV.34 : Représentation des vecteurs d'induction B.

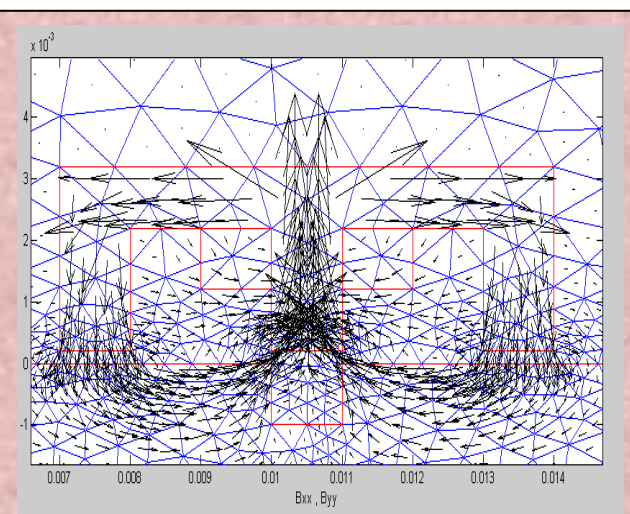


Figure IV.35 : Zoom des vecteurs d'induction.

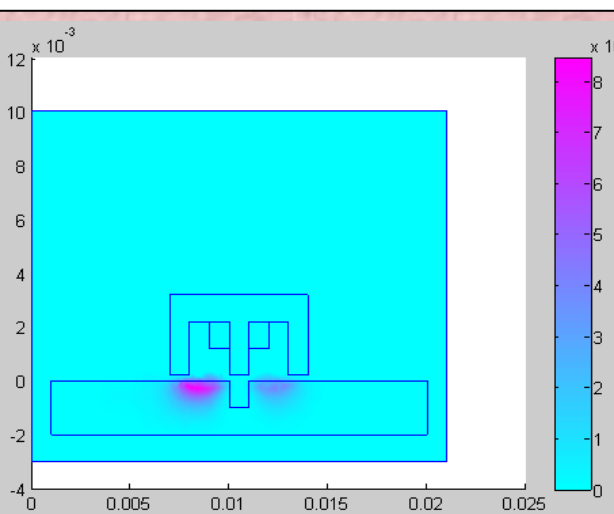
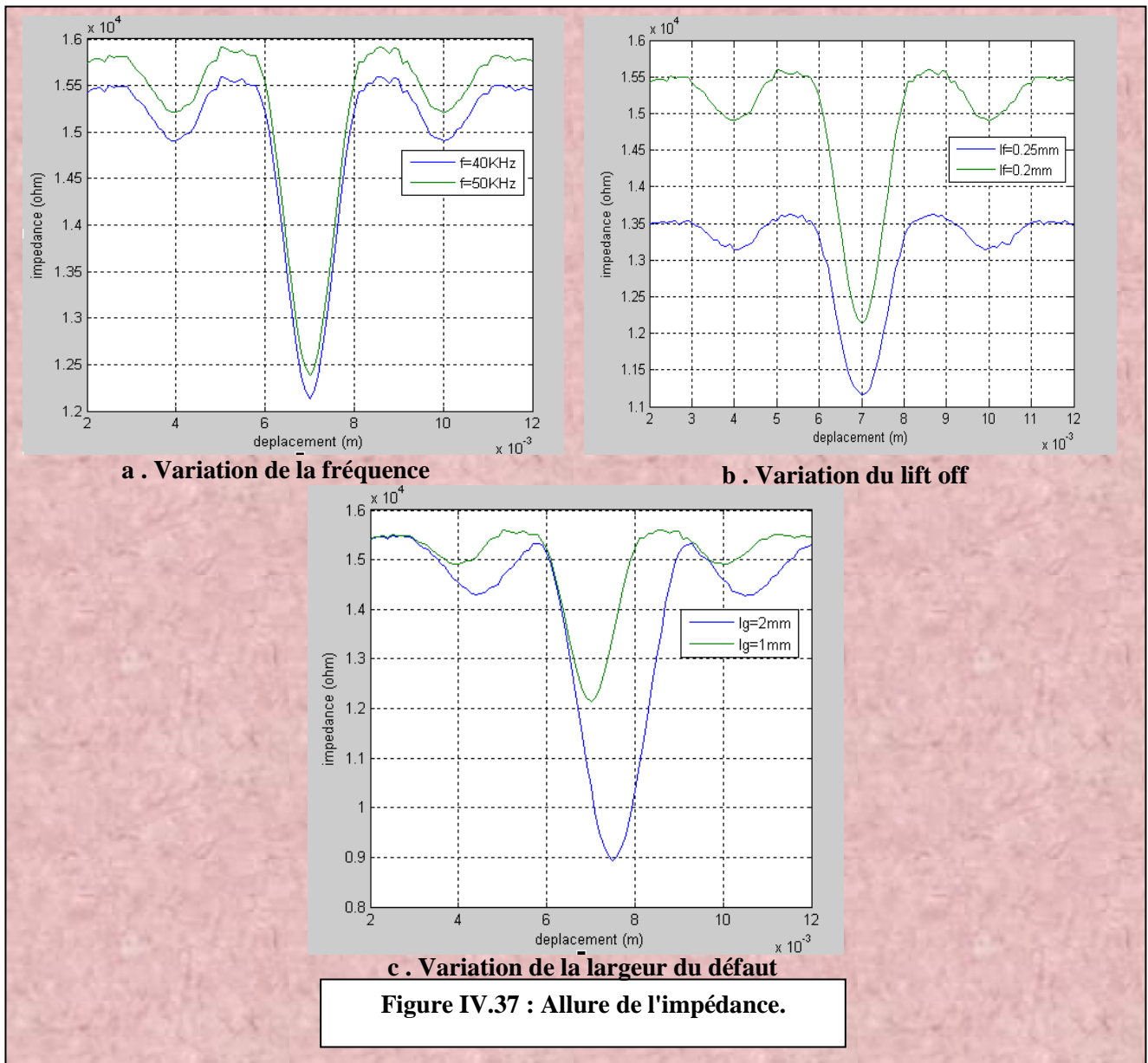


Figure IV.36 : Distribution de la densité des courants induits.



IV.4.4.1. Interprétation des résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus dans le cas d'un capteur absolu en E et un plaque magnétique avec défaut externe sont présentés comme suit :

- Les figure (IV.33) et (IV.34) et (IV.31) et (IV.32) correspond à la distribution des vecteurs d'induction magnétique et du champ magnétique. On y constate une forte pénétration à cause de la forte perméabilité caractérisant le matériau, une déviation des lignes du champ est remarquée au niveau du défaut ce qui est logique car ce dernier est caractérisé par une perméabilité faible.
- Les courants induits qui sont illustrés par la figure (IV.36) pénètrent dans la plaque, mais n'atteignent pas le défaut du fait de l'effet de peau (fréquence élevée).

- Les figure (IV.19-29-37) représente la variation du module de l'impédance en fonction du déplacement selon la nature de la pièce, figure(IV.19) aluminium, figure (IV.29): pour alliage fer-Nickel et figure IV.37) pour un capteur en « E » pour une pièce en alliage fer-Nickel et tout en variant un paramètre supplémentaire : fréquence, lift-off ou largeur de défaut, on a le même constat :
- **a. en fonction de la fréquence** ; en remarque que plus la fréquence est élevée plus la valeur de l'impédance du couple bobine-pièce est importante car la réactance (partie imaginaire de Z) est proportionnelle à la fréquence
- **b. en fonction du lift-off** (distance capteur-pièce) : on constate que l'impédance est proportionnelle à l'augmentation du lift-off, cela est logique car plus la distance capteur-cible est importante plus en tend vers l'impédance de la bobine seule
- **c. en fonction de la largeur du défaut** : pratiquement l'impédance à la même valeur mais ce qui diffère c'est le début et la fin du défaut cela correspond à la largeur du défaut.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques applications du contrôle non destructif par une modélisation utilisant MEF résultats des différents cas par simulation. Cette étude comprend cinq cas de simulation de l'ensemble capteur/cible et on peut conclure que :

- ✓ Le calcul de l'impédance en un seul point ne permet pas de s'assurer de la présence ou de l'absence d'un défaut ce qui conduit au calcul de l'impédance sur le long de la plaque par déplacement du capteur.
- ✓ La détection d'un défaut externe nécessite l'excitation du capteur par des fréquences élevées.
- ✓ Les résultats obtenus montrent la grande sensibilité de capteurs absolue à la détection des défauts surfaciques.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Le contrôle non destructif (CND) est l'ensemble des techniques et procédés utilisables pour évaluer l'état d'une structure sans l'endommager pour une utilisation ultérieure. Les technologies et techniques employées sont diverses et variées. Certaines méthodes ont pour but de détecter les défauts, comme le ressuage et la magnétoscopie, et d'autres estimer les caractéristiques des défauts détectés dans la structure, comme la radiographie et les ultrasons.

Le contrôle par courants de Foucault fait partie des techniques d'investigation les plus connues et les plus utilisées, pour des pièces métalliques, que ce soit au moment de la fabrication de pièces afin de s'assurer de la qualité, ou durant la vie d'une pièce pour des questions de maintenance ou de sûreté pour l'imagerie du corps humain ou l'examen de structures.

L'application de ces méthodes à l'étude du CND, nous offre beaucoup d'avantages comparés à d'autres méthodes.

Nous avons limité la simulation à capteur absolu. La pièce à contrôler est une plaque (magnétique, amagnétique) de longueur grande par rapport à son épaisseur. Le défaut est détectable par la variation de l'impédance du capteur.

Les différentes applications par la méthode directe sont énumérées comme suit :

- ❖ La première application concerne un capteur absolu et plaque amagnétique ;
- ❖ La deuxième application représente un capteur absolu et plaque magnétique;
- ❖ La troisième application représente un capteur absolu en E et plaque amagnétique;
- ❖ La quatrième application montre un capteur absolu en E et plaque magnétique;

Le travail présenté dans ce mémoire ouvre un certain nombre de perspectives :

- Etude du même phénomène mais cette fois sur un prototype expérimental pour confrontation avec la simulation numérique .

Annexes

Annexe A : Formulation de A par MEF en 2D

Les formulations d'éléments finis pour les phénomènes 2D axisymétriques des courants Foucault actuelles a été développé par Lord et Palanisamy. Depuis ce modèle est utilisé dans cette thèse, la formulation est donnée ici par souci d'exhaustivité. L'équation qui régit les phénomènes de courants de Foucault est l'équation de diffusion dérivée dans le chapitre III et est donnée par :

$$\Delta A_\theta - j \omega \mu \sigma A_\theta = -\mu J_s \quad \text{A.1}$$

Pour l'équation des géométries axisymétriques (A.1) se réduit à la forme 2D

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} \right) = j \omega \mu \sigma A - J_s \quad \text{A.2}$$

L'énergie correspondante fonctionnelle obtenue à partir des principes variationnels est :

$$F = \iint \left(\frac{1}{2\mu} \left[\left| \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{A}{r} \right|^2 + \left| \frac{\partial A}{\partial z} \right|^2 \right] + \frac{j \omega \sigma}{2} |A|^2 - J_s * A \right) r dr dz \quad \text{A.3}$$

où les énergies correspondant au champ magnétique, les courants de Foucault et le courant de source sont représentés par les premiers termes à l'intérieur des deuxième et troisième respectivement l'intégrale.

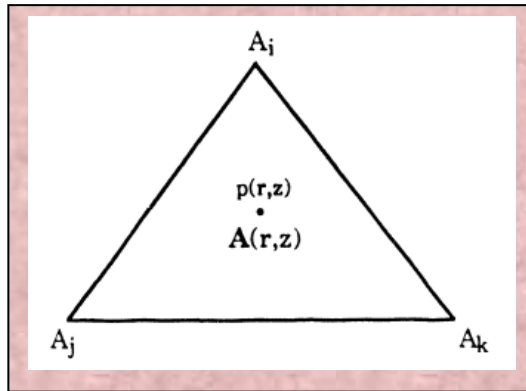


Figure A.1 : Un élément triangulaire du maillage éléments finis, [23].

La figure (A.1) présente deux dimensions l'élément triangulaire où A_i , A_j , A_k et sont les valeurs nodales sur le terrain de points. Une fonction d'interpolation linéaire pour champ de vecteurs magnétique en un point quelconque (r, z) est donné par :

$$A(r, z) = \alpha_1 + \alpha_2 r + \alpha_3 z \quad \text{A.4}$$

En substituant les valeurs des points nodaux dans (A.4) donne:

$$\begin{aligned} A_i &= \alpha_1 + \alpha_2 r_i + \alpha_3 z_i \\ A_j &= \alpha_1 + \alpha_2 r_j + \alpha_3 z_j \\ A_k &= \alpha_1 + \alpha_2 r_k + \alpha_3 z_k \end{aligned} \quad \text{A.5}$$

Où (r_i, z_i) , (r_j, z_j) et (r_k, z_k) sont les coordonnées des nœuds i , j et k , respectivement. Mettre équations (IV.5) dans une forme matricielle nous obtenons l'équation (A.6) :

$$\begin{bmatrix} A_i \\ A_j \\ A_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1r_i z_i \\ 1r_j z_j \\ 1r_k z_k \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \quad \text{A.6}$$

Pour chaque élément e , on peut écrire :

$$[\alpha]_e = [G]_e [A]_e \quad \text{A.7}$$

où

$$[\alpha]_e = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \quad \text{A.8}$$

$$[A]_e = \begin{bmatrix} A_i \\ A_j \\ A_k \end{bmatrix} \quad \text{A.9}$$

$$[G]_e = \begin{bmatrix} 1r_i z_i \\ 1r_j z_j \\ 1r_k z_k \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} (r_j z_k - r_k z_j)(r_k z_i - r_i z_k)(r_i z_j - r_j z_i) \\ (z_j - z_k)(z_k - z_i)(z_i - z_j) \\ (r_k - r_j)(r_i - r_k)(r_j - r_i) \end{bmatrix} \quad \text{A.10}$$

Où Δ est la surface de l'élément triangulaire proposée par :

$$\begin{bmatrix} 1r_i z_i \\ 1r_j z_j \\ 1r_k z_k \end{bmatrix} = 2\Delta \quad \text{A.11}$$

En substituant l'équation (A.7) dans l'équation (A4) pour chaque élément e avec i , j , k et que les nœuds que nous recevons :

$$A(r, z) = [1rz] [G]_e [A]_e \quad \text{A.12}$$

La substitution des équations (A.9) et (A.10) et en simplifiant, nous pouvons réécrire l'équation (A.12) que, [23] :

$$A(r, z) = N_i A_i + N_j A_j + N_k A_k \quad \text{A.13}$$

Où

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{2a} [r_j z_k - r_k z_j] + (z_j - z_k) * r + (r_k - r_j) * z \\ N_j &= \frac{1}{2a} [r_k z_i - r_i z_k] + (z_k - z_i) * r + (r_i - r_k) * z \\ N_k &= \frac{1}{2a} [r_i z_j - r_j z_i] + (z_i - z_j) * r + (r_j - r_i) * z \end{aligned} \quad \text{A.14}$$

Annexe B : Modèle Dodd et Deeds

L'un des premiers modèles axisymétriques est celui développé par Dodd et Deeds en 1968. La composante azimutale du potentiel vecteur magnétique est déterminée dans le cas de l'approximation des régimes quasi stationnaires. Les deux géométries traitées, une plane et une cylindrique, sont représentées sur la figure (B.1).

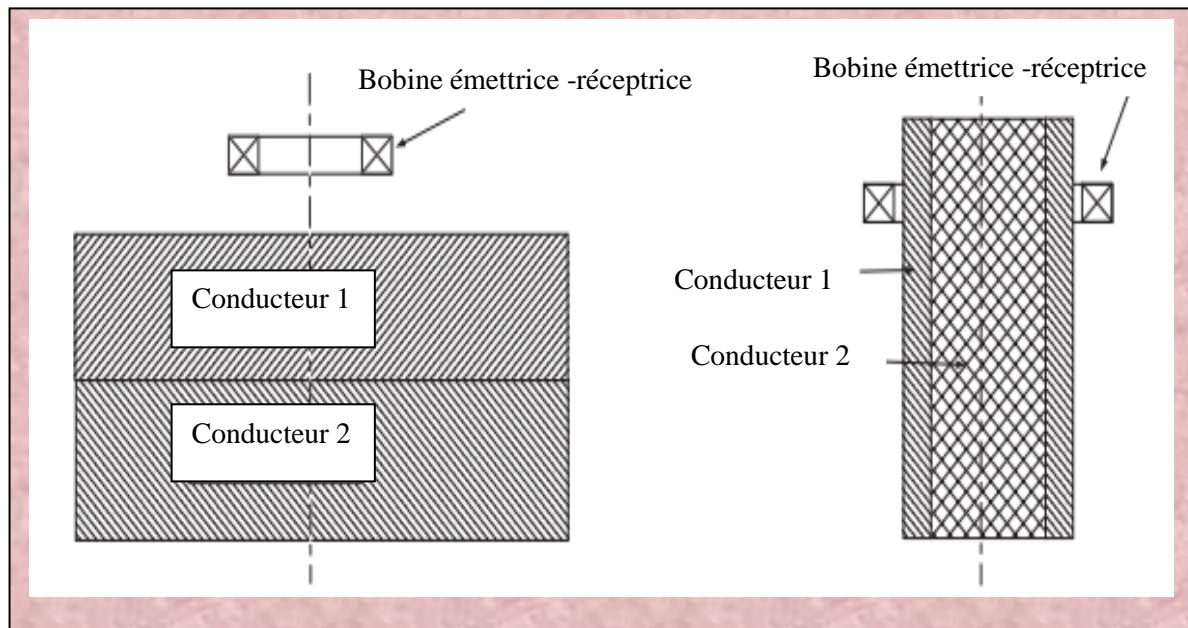


Figure B.1 : Géométries axisymétriques avec bobine à air, [11].

A partir de la formulation analytique du potentiel vecteur magnétique, il est possible de déterminer les autres grandeurs intéressantes du système : impédance de la bobine, courants induits, puissance injectée dans la charge, champ électromagnétique, ...

Dans notre étude, une bobine à air est placée au-dessus d'un plan conducteur homogène et isotrope, de grandes dimensions devant le rayon de la bobine. L'axe de la bobine est perpendiculaire au plan, ce qui implique la présence d'une configuration axisymétrique. Les paramètres géométriques et le schéma de principe sont représentés sur la figure (B.2).

Ce problème est traité de manière analytique en évaluant la distribution du potentiel vecteur magnétique au niveau de la bobine. Son impédance est alors déterminée en fonction des paramètres géométriques du système (bobine, plaque et air), et des paramètres physiques de la plaque.

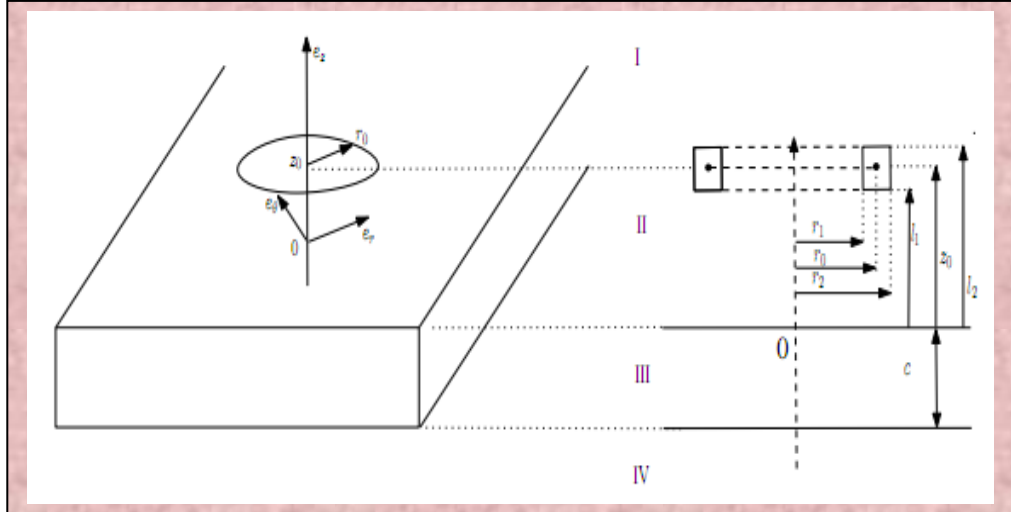


Figure B.2 : Schéma de principe de la spire au dessus d'une plaque, [11].

L'équation de diffusion du potentiel vecteur magnétique (B.1) est exprimée dans le cas d'une spire circulaire élémentaire parcourue par un courant sinusoïdal d'amplitude constante I et de pulsation fixe ω . En coordonnées cylindriques, la composante azimutale du potentiel vecteur magnétique ne dépend que des coordonnées r et z , soit $A(r,z)=A\theta(r,z)e\theta$. L'équation (B.1) se met donc sous la forme scalaire suivante :

$$\Delta A_{\theta} - j \omega \mu \sigma A_{\theta} = -\mu J_s \quad \text{B.1}$$

Aussi, l'équation (B.1) développée s'écrit :

$$\frac{\partial^2 A_{\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{\theta}}{\partial r} + \frac{\partial^2 A_{\theta}}{\partial z^2} - \frac{A_{\theta}}{r^2} - j \omega \mu \sigma A_{\theta} + \mu I \delta(r - r_0) \delta(z - z_0) = 0 \quad \text{B.2}$$

Le dernier terme correspond à la spire élémentaire de courant qui est nul en dehors des coordonnées $r = r_0$, $z = z_0$, $\theta \in [0, 2\pi]$. Aussi, ce terme n'intervient qu'au moment de traiter les conditions de passage. Nous devons donc déterminer la solution particulière de l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 A_{\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{\theta}}{\partial r} + \frac{\partial^2 A_{\theta}}{\partial z^2} - \frac{A_{\theta}}{r^2} - j \omega \mu \sigma A_{\theta} = 0 \quad \text{B.3}$$

On résout cette équation en appliquant le principe de séparation des variables r et z . On pose : $A\theta(r,z) = R(r)Z(z)$ et on effectue le remplacement dans l'équation précédente, puis on divise tout par $R(r)Z(z)$. Comme les variables en r et en z sont indépendantes, nous avons :

$$-\frac{1}{R(r)}\frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} - \frac{1}{rR(r)}\frac{\partial R(r)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} = \frac{1}{Z(z)}\frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} - j\omega\mu\sigma = \alpha^2 = cste \quad \text{B.4}$$

Où α^2 est la constante de séparation des variables avec $\alpha \in [0, +\infty [$ dans notre cas.

On résout les équations différentielles en r et en z séparément. On rassemble ensuite les deux solutions particulières en r et en z an d'obtenir la solution particulière de l'équation (B.3). Chaque solution particulière dépend de la constante de séparation α . Afin d'obtenir la solution générale, il convient de sommer l'ensemble des solutions particulières. Si la constante est non discrète, mais continûment variable, il est possible d'intégrer les solutions particulières sur l'ensemble de son domaine de variation. Ainsi, dans la région i , le potentiel vecteur magnétique a pour expression :

$$A_{\theta}^{(i)}(r, z) = \int_0^{\infty} [A_i(\alpha)e^{-\alpha_i z} + B_i(\alpha)e^{-\alpha_i z}] [C_i J_1(\alpha r) + D_i Y_1(\alpha r)] \partial \alpha \quad \text{B.5}$$

Avec $\alpha_i = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\mu_i\sigma_i}$, μ_i et σ_i sont la perméabilité magnétique et la conductivité électrique dans la région i . J_1 et Y_1 représentent respectivement les fonctions de Bessel de premier ordre et de première et seconde espèce. A_i , B_i , C_i , D_i sont des coefficients à déterminer grâce aux conditions aux limites et aux conditions de passage.

Une fois les coefficients déterminés, on remplace dans l'équation (B.5) les inconnues par leur expression. On obtient alors l'expression du potentiel vecteur magnétique produit par une spire élémentaire dans chaque région. Il suffit ensuite d'intégrer ces expressions sur la section de la spire pour obtenir le potentiel vecteur magnétique généré par la bobine dans tout l'espace.

Enfin, la formulation analytique de l'impédance d'une spire circulaire de section rectangulaire, placée au-dessus d'une plaque conductrice, peut être déterminée, [11] .

$$Z = \frac{j\omega\pi\mu n^2}{(l_2 - l_1)^2 (r_2 - r_1)^2} \int_0^{\infty} \frac{1}{\alpha^5} I_1^2(r_2, r_1) K(\alpha) \partial \alpha \quad \text{B.6}$$

La fonction $K(\alpha)$ dépend des paramètres physiques (μ_i , σ_i) et géométriques du problème,

$$\text{et } I_1(r_2, r_1) = \int_{\alpha r_2}^{\alpha r_1} r J_1(r\alpha) \partial \alpha. \quad \text{B.7}$$

Annexe C : Densité Courants de Foucault

Calculons la densité de courant J

$$\overrightarrow{\text{rot}H} = \vec{J} \quad \text{C.1}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}B} = \mu\vec{J} \quad \text{C.2}$$

B n'a pas composante selon (0.Y). De plus, le réel B est uniquement fonction de Z et de t. On a donc :

$$\overrightarrow{\text{rot}B} = -\left(\frac{\partial B}{\partial z}\right)\vec{x} \quad \text{C.3}$$

Ainsi le courant est dirigé parallèlement à l'axe (0, X).

Soit J tel que : J=JX. On projection

$$-\left(\frac{\partial B}{\partial z}\right) = \mu J \quad \text{C.4}$$

$$J = \frac{1}{\mu}(1+j)\frac{k}{\sqrt{2}}B_0 e^{-\frac{k}{\sqrt{2}}z} e^{j(\omega t - \frac{k}{\sqrt{2}}z)} \quad \text{C.5}$$

Mais

$$\frac{1+j}{\sqrt{2}} = e^{j\frac{\pi}{4}} \quad \text{C.6}$$

Soit :

$$J = \frac{kB_0}{\mu} e^{-\frac{k}{\sqrt{2}}z} e^{j(\omega t - \frac{k}{\sqrt{2}}z + \frac{\pi}{4})} \quad \text{C.7}$$

En désignant par J₀ l'amplitude du courant à la surface, il vient :

$$J = J_0 e^{-\frac{k}{\sqrt{2}}z} e^{j(\omega t - \frac{k}{\sqrt{2}}z + \frac{\pi}{4})} \quad \text{C.8}$$

Annexe D : Formulation générale pour une plaque isotrope

Considérons une plaque conductrice isotrope d'épaisseur e et de dimensions infinies suivant Ox et Oy . Ses deux faces sont respectivement soumises à deux champs uniformes sinusoïdaux tangentiels, H_1 et H_2 (Figure D.1).

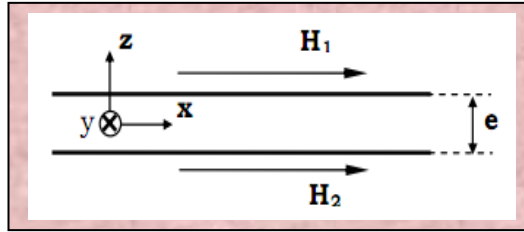


Figure D.1 : Représentation du problème, [26].

La formulation éléments coques généralisés proposée par Guérin, se compose d'une solution numérique obtenue dans tout le domaine et d'une solution analytique qui tient compte de la variation des grandeurs suivant l'épaisseur. Cette dernière est exprimée en fonction de la solution sur les surfaces de la région mince.

1- Solution analytique

La formulation en H dans la plaque s'écrit :

$$\text{rot}(\text{rot}H) = -j\omega\sigma\mu H \quad \text{D.1}$$

Où ω est la pulsation du champ magnétique et σ la conductivité électrique de la plaque.

La composante du champ électromagnétique est nulle suivant l'épaisseur de la plaque (Oz). D'où l'équation à résoudre :

$$\frac{\partial^2 H_s(z)}{\partial z^2} - j\omega\sigma\mu H_s(z) = 0 \quad \text{D.2}$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$H_s(z) = \frac{1}{\sinh(e\gamma)} \left[H_{1s} * \sinh\left(\frac{e}{2}\gamma + \gamma z\right) + H_{2s} * \sinh\left(\frac{e}{2}\gamma - \gamma z\right) \right] \quad \text{D.3}$$

Avec : H_{s1} et H_{s2} sont les valeurs des champs sur les surfaces extérieures de la plaque,

$$\gamma = \frac{1+j}{\delta}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

D.4

2- Solution numérique

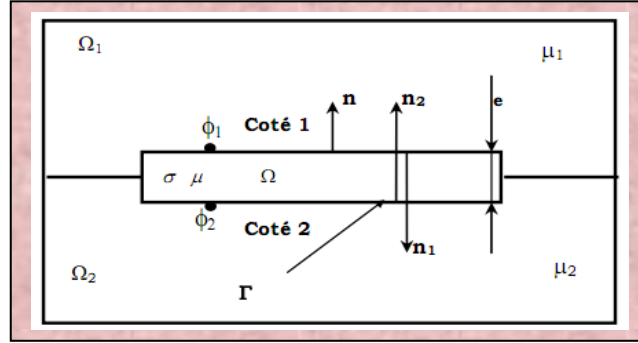


Figure D.2 : Notation du problème éléments coques, [26].

Les champs magnétiques sur les surfaces limitrophes de la région mince sont donnés par les relations suivantes :

$$H_1 = H_j - \text{grad } \Phi_1$$

$$H_2 = H_j - \text{grad } \Phi_2$$

D.5

La solution numérique est obtenue, en partant de la forme intégrale de la formulation en potentiel scalaire magnétique réduit (III-35) couplée au besoin (présence de régions de perméabilité différentes) avec la formulation en potentiel scalaire totale (III-37).

La forme intégrale de la formulation en potentiel scalaire magnétique réduit, est obtenue après application de la méthode de Galerkin tel que:

$$\int_{\Omega_x} w B \cdot \partial \Omega_x = 0$$

D.6

Avec Ω_x est le domaine exprimé en potentiel scalaire magnétique réduit, et w est une fonction de pondération.

La forme intégrale de la formulation en potentiel scalaire réduit dans la région Ω_1 s'écrit:

$$\int_{\Omega_1} \mu_1 \text{grad} w \text{grad } \Phi_1 \partial \Omega_1 + \int_{\Gamma} w B n_1 \partial \Gamma = \int_{\Omega_1} \mu_1 \text{grad} w H_j \partial \Omega_1$$

D.7

Pour obtenir la formulation intégrale en potentiel scalaire total il suffit d'annuler le terme B ($H_j=0$).

Le terme A permet de coupler la formulation en Φr et un autre type de formulation (exemple, potentiel scalaire total) de la région voisine et permet aussi de prendre en compte la région mince conductrice. Le champ source H_j du terme B peut être calculé soit dans tout le volume ou juste sur la surface frontière de l'élément coque. En appliquant le théorème de Green sur B, l'équation (D-7) devient :

$$\int_{\Omega_1} \mu_1 \cdot \text{grad} w \cdot \text{grad} \Phi_1 \partial \Omega_1 + \int_{\Gamma} w \cdot B \cdot n_1 \partial \Gamma = \int_{\Gamma} \mu_1 w \cdot H_j \cdot n_1 \partial \Gamma \quad \text{D.8}$$

Sachant que la relation Maxwell-Faraday (III-5) permet d'écrire :

$$B = -\frac{1}{j\omega} \text{rot} E \quad \text{D.9}$$

Le terme A peut alors s'écrire après application de la transformation $[\text{rot}(a \cdot U) = a \cdot \text{rot} U + (\text{grad} a) \times U]$, et du théorème de Stokes :

$$\int_{\Gamma} w \cdot B \cdot n_1 \partial \Gamma = -\frac{1}{j\omega} \int_{\Gamma} (E_1 * n_1) \cdot \text{grad} w \partial \Gamma \quad \text{D.10}$$

En remplaçant (D-10) dans (D-8), la formulation intégrale en potentiel scalaire réduit dans la région Ω_1 peut alors s'écrire :

$$\int_{\Omega_1} \mu_1 \cdot \text{grad} w \cdot \text{grad} \Phi_1 \partial \Omega_1 - \frac{1}{j\omega} \int_{\Gamma} (E_1 * n_1) \cdot \text{grad} w \partial \Gamma = \int_{\Gamma} \mu_1 w H_j \cdot n_1 \partial \Gamma \quad \text{D.11}$$

La densité de courant est donnée par :

$$\text{rot} H(z) = J(z) = -n_1 * \frac{\partial H(z)}{\partial z}$$

Après dérivation du champ magnétique de l'équation (D-4) par rapport à z et application de la forme locale de la loi d'Ohm (III-12), nous obtenons l'expression du champ électrique dans la région mince :

$$H(z) = \frac{-\gamma}{\sigma \sinh(e\gamma)} n_1 * \left[H_1 \cdot \cosh\left(\frac{e}{2}\gamma + \gamma z\right) - H_2 \cdot \cosh\left(\frac{e}{2}\gamma - \gamma z\right) \right] \quad \text{D.12}$$

Pour obtenir la relation entre les champs électriques et magnétiques tangentiels (relation d'impédance de surface), il suffit de remplacer z par sa valeur sur les surfaces limitrophes de la région mince ($e/2$ et $-e/2$). Sur le coté 1 de la région mince (Ω), la relation impédance de surface s'écrit donc ;

$$E_1 = -\frac{\gamma}{\sigma} n_1^* \left[H_1 \cdot \frac{1}{\tanh(e\gamma)} - H_2 \cdot \frac{1}{\sinh(e\gamma)} \right] \quad \text{D.13}$$

En remplaçant H_1 et H_2 par leurs expressions données par l'équation (D-5) dans (D-12), nous obtenons la formulation élément coque généralisée sur le coté 1 de la région mince :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_1} \mu_1 \cdot \text{grad}_w \cdot \text{grad} \phi_1 \partial\Omega + \frac{1}{j\omega} \int \text{grad}_s w \cdot \alpha \cdot \text{grad}_s \Phi_1 \partial\Gamma - \frac{1}{j\omega} \int \text{grad}_s w \cdot \beta \cdot \text{grad}_s \Phi_2 \partial\Gamma = \\ \int_{\Gamma} \mu_1 w \cdot H_j \cdot n_1 \partial\Gamma + \frac{1}{j\omega} \int \text{grad}_s w \cdot (\alpha - \beta) \cdot H_j \partial\Gamma \end{aligned} \quad \text{D.14}$$

Avec

$$\alpha = \frac{\mu}{\gamma \tanh(e\gamma)}$$

$$\beta = \frac{\mu}{\gamma \sinh(e\gamma)}$$

La formulation élément coque généralisée du côté 2 (région Ω_2) est donnée par la relation (D-14) après permutation entre les indices 1 et 2. En annulant les termes due au champ source H_j dans l'équation (D-14) et sa duale, nous obtenons la formulation en potentiel scalaire magnétique total dans le domaine d'étude, [26].

Références Bibliographiques

Bibliographie

- [1] Cyril Ravat, « Conception de multi capteur à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif ». Thèse de doctorat, d'université de Paris-sud11, 2008.
- [2] F. Thollon, « Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques ». Thèse de doctorat, a école centrale de Lyon, 1995.
- [3] Chaou Yahya, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault ». Thèse de doctorat, d'université de Paris-sud11, 2009.
- [4] Vincent Thomas, « Système multi-capteurs et traitement des signaux associé pour l'imagerie par courants de Foucault de pièces aéronautiques ». Thèse de doctorat, d'université de Cachan, 2010.
- [5] Abderrezzak Latreche, « Etude du contrôle non destructif par la méthode de Galerkin sans maillage ». Mémoire de magistère, d'université de Batna, 2009.
- [6] Abdelhalim Zaoui, « Contribution à la modélisation du CND par matrice de capture a courant Foucault ». Thèse de doctorat, a l'école militaire polytechnique Alger Algérie, 2008.
- [7] J. Dumont-Fillon, « Contrôle non destructif(CND) ». Techniques de l'Ingénieur, R1400.
- [8] Nabil Bnehadda, « Modélisation des capteurs inductifs à courants de Foucault ». Mémoire de magistère, université de Batna, 2006.
- [9]http://fr.wikipedia.org/w/indx.php?title=control_non_destructif&action=edit§ion=2.
- [10] Yahi Izzeddine et ALL, « contrôle non destructif par ultrasons ». Diplôme d'ingénieur état, d'université de M'sila, 2011.
- [11] Vincent Doirat, « 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 ». Thèse de doctorat, d'université de Nantes, 2007.

[12] Latifa Oukhellou, « Paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif .Application à la reconnaissance des défauts de rails par courants de Foucault ». Thèse de doctorat, d'université de Paris-sud Centre d'Orsay, 1997.

[13] J-C. Bour et All, « Etude de la répartition des courants de Foucault pulsés une configuration de contrôle non destructif ». Les éditions de Physique 1996, N°1, PP 8-8.

[14] Philippe Belrame, « Modélisation de la perturbation électromagnétique au voisinage d'une fissure mince dans un matériau conducteur. Application au contrôle non destructif par courants de Foucault. ». Thèse de doctorat, a école centrale de Lyon, 2002.

[15] Léa Maurice, « Développement d'un modèle d'interaction d'un champ électromagnétique avec en défaut plan dans un matériau conducteur .Application à la simulation d'un procédé de CND par CF ». Thèse de doctorat, a école centrale de Lyon, 2006.

[16] Tekoing Lim, « Formulation intégrale surfacique des équations de Maxwell pour la simulation de contrôles non destructifs par courants de Foucault. Étude préliminaire à la mise en œuvre de la méthode multi pôle rapide. ». Thèse de doctorat, de l'École Polytechnique paris Tech, 2011.

[17] Yvonnick Le Mench, « Contribution à la modélisation numérique tridimensionnelle des systèmes électrotechniques ». Thèse de doctorat, de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 1999.

[18]Jean-Pierre Cioni, « Résolution numérique les équations de Maxwell instationnaires par une méthode de volumes finis. ». Thèse de doctorat, de l'Université de Nice Sophia-Antipolis, 2004.

[19] Adrien Trillon, « Reconstruction de défauts à partir de données issues de capteurs à courants de Foucault avec modèle direct différentiel ». Thèse de Doctorat, de l'École Centrale de Nantes, 2010.

[20] Youcef Ouazir, « Contribution à la modélisation électromagnétique des machines à induction ». Thèse de doctorat, a l'école militaire polytechnique Alger Algérie, 2006.

- [21] Anthony Lefevre, « Contribution a la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires ». Thèse de Doctorat, de l'Université de Nantes, 2006.
- [22] Tarek Bouchala, « Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. – Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite – ». Mémoire de magistère, université de Batna, 2008.
- [23] Rajesh, S. N, «Probability of Detection Models for Eddy Current NDE Methods ». Ames Laboratory, U.S. DOE Iowa State University, 1993.
- [24] Ala-Eddine LAKHDARI, « Etude et modélisation de Capteurs en CND par courants de Foucault : Application a la détection des fissures. », Mémoire de Magistère, université Mohamed Khider de Biskra, Mai 2011.
- [25] International Atomic Energy Agency, « eddy Current Testing at Level 2: Manual for the syllabi Contained in aea-TeCDoC-628.rev. 2 "Training guidelines for non Destructive Testing Techniques" ». Printed by the IAEA in Austria February, 2011.
- [26] Samir BENSAID, « Contribution a la caractérisation et a la modélisation électromagnétique et thermique des martiaux composites anisotropes ». Thèse de Doctorat, de l'Université de Nantes, 2006.
- [27] Ould oulha Samy Hassani, « intégration de l'hystérésis magnétique dans calcul éléments finis en vue de l'estimation des pertes dans les tôles des machines électrique ». Thèse de Doctorat, de l'Université de Tizi-Ouzou, 2010.
- [28] Abdelhak Abdou, « Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Etude et réalisation d'un capteur inductif ». Mémoire de magistère, université de Batna, 2006.
- [29] Mohamed BENTOUMI, « Outils pour la détection et la classification. Application au diagnostic de défauts de surface de rail. ». Thèse de Doctorat, de l'université Henri Poincaré Nancy 1, 2004.

Résumé du rapport bibliographique du projet de MDM

Les contrôles non destructifs mettent en œuvre des techniques d'évaluation permettant d'apprécier sans destruction l'état de santé des pièces et ainsi de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées. Ainsi, le CND vise des aspects d'assurance qualité, d'aptitude au bon fonctionnement et de sécurité. Ces contrôles nécessitent une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, l'absence de contrôle peut conduire à des conséquences catastrophiques dans certains secteurs industriels, notamment dans le secteur automobile, pétrolier, naval, aéronautique et nucléaire.

L'objectif visé par ce travail, en premier lieu, est de présenter les principales méthodes de CND et en particulier celle des courants de Foucault, ensuite donner les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par courants de Foucault (basé sur la variation d'impédance capteur-pièce), les conditions aux limites et les paramètres qui peuvent influer sur cette détection, et en fin donner un aperçu sur les techniques numériques utilisées

Mots clés : contrôle non destructif (CND), courants de Foucault, équations de Maxwell, capteur.

Abstract of bibliographic report of the MM project

Non-destructive testing (NDT) aims to assess the integrity of a piece without damaging it. This stage of the industrial process is designed to ensure the safe use of controlled items. It also plays an important economic role, in the sense that it allows an optimized management of maintenance. In both capacities, nondestructive testing is very important for industry and particularly used for example in the automotive, petroleum, shipbuilding, aerospace and nuclear.

The first objective of this work is presented the main NDT methods and particularly that of eddy currents (based on variation in impedance sensor part), then make a quick description of most sensors used in this context, and finally give the Maxwell equations govern the phenomenon of eddy current detection, boundary conditions and parameters that can influence on this detection.

Index Terms: Non-destructive testing (NDT), eddy currents, Maxwell equations, and sensors

ملخص تقرير المراجع لمشروع مذكرة الماستر

المراقبة غير المدمرة اختصاراً يهدف لتقييم سلامة قطعة دون الإضرار بها. تم تصميم هذه المرحلة من العملية الصناعية لضمان الاستخدام الآمن للسلع الخاضعة للمراقبة. كما أنها تلعب دوراً اقتصادياً مهماً، بمعنى أنه تسمح بالتسيير الجيد للصيانة. يعتبر الاختبار غير تدميري مهماً جداً للصناعة ويستخدم في عدة مجالات نذكر منها على سبيل المثال في الفضاء السيارات البترول، وبناء السفن، والنووية.

الهدف من هذا العمل، أولاً، يتم تقديم مختلف التقنيات المستعملة في المراقبة غير المدمرة مع سرد مبدأ، مجالات الاستعمال، المزايا و النقص لكل تقنية و خاصة بالنسبة للمراقبة بتيارات فوكو (التي تعتمد على تغير الممانعة لكل من الملتقط و القطعة المراد مراقبتها)، ثم يليه وصفاً سريعاً لأكثر اللواقط المستعملة هذا السياق، وفي النهاية يتم إعطاء معادلات ماكسويل التي حكم على ظاهرة كشف، شروط الحدود والمعلمات التي يمكن أن تؤثر على هذا الكشف.

فهرس المصطلحات: المراقبة غير المدمرة، تيارات فوكو، معادلات ماكسويل، ملتقطات

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME

DE MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

SPÉCIALITE : INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANQUES

Proposé et Dirigé par : -Mr. ABDOU Abdelhak

Présenté par : -MENASRI Mohammed

THEME

**Détection de défauts surfaciques
par Contrôle Non Destructif « CND »
par Courants de Foucault
en mode absolu"**

Résumé :

Les contrôles non destructifs mettent en œuvre des techniques d'évaluation permettant d'apprécier sans destruction l'état de santé des pièces et ainsi de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées. Ainsi, le CND vise des aspects d'assurance qualité, d'aptitude au bon fonctionnement et de sécurité. Ces contrôles nécessitent une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, l'absence de contrôle peut conduire à des conséquences catastrophiques dans certains secteurs industriels, notamment dans le secteur automobile, pétrolier, naval, aéronautique et nucléaire.

L'objectif visé par ce travail, en premier lieu, est de présenter les principales méthodes de CND et en particulier celle des courants de Foucault, ensuite donner les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par courants de Foucault (basé sur la variation d'impédance capteur-pièce), les conditions aux limites et les paramètres qui peuvent influer sur cette détection, et en fin donner un aperçu sur les techniques numériques utilisées.

Mots clés : contrôle non destructif (CND), courants de Foucault, équations de Maxwell, capteur.

N° d'ordre : 042