

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE LAGHOUAT



DEPARTEMENT : PHYSIQUE

MEMOIRE DE MAGISTER

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE

OPTION : INTERACTION CHAMP-MATIÈRE

THEME DU PROJET :

Identification des formes des fissures débouchant en surface dans un matériau conducteur en CND par courants de Foucault

Présenté par :

Mr. CHETTOUH Ben salah

Dirigé par :

Dr. ZAOUI Abd elhalim

Dr. HELIFA Bachir

DEVANT LES MEMBRES DU JURY

Mr. LEFKAIER Ibn Khaldoun	Professeur	Université de Laghouat	Président
Mr. BENTRIA Bachir	Professeur	Université de Laghouat	Examineur
Mr. BENS Aid Samir	Professeur	Université de Bouira	Examineur
Mr. ZAOUI Abdelhalim	Professeur	E.M.P	Directeur de mémoire
Mr. HELIFA Bachir	MCA	Université de Laghouat	Co- Directeur
Mr. LAHRECH ahmed chaouki	Doctorant	Université de batna 2	Invité

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2017-2018

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du **Laboratoire Physique des Matériaux (LPM)** de l'université Amar Tlidji de Laghouat.

Tout d'abord je remercie le bon dieu de m'avoir donné le courage et santé pour mettre à terme ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon promoteur le Colonel **Abdelhalim ZAOUI**, chef du laboratoire de systèmes électromagnétiques, pour l'aide, le suivi et l'intérêt qu'il n'a cessé de m'apporter jusqu'à l'achèvement de ce travail.

Et le doctorant **ahmed chaouki LAHRECH** qui je lui exprime ma profonde gratitude pour l'attention portée pour l'élaboration de ce mémoire, ses aides précieuses, conseils, son soutien permanent et pour tous ses efforts.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma profonde gratitude envers mon co-directeur de mémoire, Monsieur **Bachir HELIFA**, Maître de conférences 'A' à l'Université de Laghouat.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements aux membres du jury :

Je remercie Monsieur **Ibn Khaldoun LEFKAIER**, Professeur à l'Université de Laghouat et chef de l'équipe « Sciences des surfaces et Interfaces » au Laboratoire des Sciences Fondamentales de Laghouat, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

Monsieur **Samir BENSaid**, Professeur à l'Université de Bouira, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'examiner et d'évaluer mon travail.

Monsieur **Bachir BENTRIA**, Professeur à l'Université de Laghouat, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'examiner et d'évaluer mon travail.

Egalement Je ne saurais terminer mes remerciements sans une pensée pour ma famille. Je m'adresse tout particulièrement à ma chère mère qui a toujours cru en moi et qui m'a apporté son aide et son réconfort pendant toutes ces années de mémoire, mes frères et mes sœurs pour leur exprimer ma profonde reconnaissance pour leur soutien.

Remerciements

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	iii
Table des figures	vii
Liste des tableaux	xi
Notations et symboles	xiii
Abreviation	xv
Liste des algorithmes	xvi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 Contrôle non destructif par courants de Foucault	3
1.1 Introduction	3
1.2 Champ d'application actuel	4
1.2.1 Le contrôle en cours de fabrication	5
1.2.2 Le contrôle en recette	5
1.2.3 Le contrôle en service	5
1.3 Différentes méthodes de CND	5
1.4 CND par courant de Foucault	7
1.4.1 Objectifs des CND-CF	7
1.4.2 Principe	8
1.4.3 Profondeur de pénétration du courant du Foucault	8
1.4.4 Schéma synoptique du dispositif	10

1.4.5	Modes d'excitation	11
1.4.6	Défauts	13
1.4.6.1	Défaut de construction	13
1.4.6.2	Défaut de service	13
1.4.7	les capteurs (ou la sonde)	14
1.4.7.1	Les types de sondes	14
1.4.7.2	Différentes géométries de sondes CF	16
1.4.7.3	Impédance du capteur	19
1.4.8	Avantages du CND par courants de Foucault	24
1.4.9	Limites du CND par courants de Foucault	25
1.5	Stratégie de caractérisation des fissures	25
2	Modélisation des phénomènes électromagnétiques	27
2.1	Introduction	27
2.2	Modélisation du dispositif du CND par CF	27
2.3	Mise en équations	28
2.3.1	Équations de Maxwell	28
2.3.2	Lois de comportement des milieux	30
2.3.3	Équation de continuité	31
2.3.4	Relations de passages	31
2.3.5	Conditions aux limites	32
2.3.6	Hypothèses simplificatrices	33
2.3.7	Champs et potentiels	34
2.4	Formulations magnétodynamiques	35
2.4.1	Formulations de type électrique	35
2.4.1.1	Formulation en champ électrique \mathbf{E}	36
2.4.1.2	Formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique $\mathbf{AV} - \mathbf{A}$	36
2.4.2	Formulations de type magnétique	37
2.4.2.1	Formulation en champ magnétique \mathbf{H}	38
2.4.2.2	Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique $\mathbf{T} - \phi$	38
3	Simulation de dispositif de CND-CF par ANSYS Maxwell	39
3.1	Introduction	39

3.2	ANSYS Maxwell	39
3.2.1	Description de Logiciel	39
3.2.2	Méthode de résolution utilisé	40
3.2.3	Formulation utilisée	40
3.2.4	Diagramme de résolution	41
3.3	Test de validité du modèle	41
3.3.0.1	Benchmark TEAM Workshop N°15-1	41
3.3.1	Validation	42
3.3.1.1	Création du modèle de simulation	42
3.3.1.2	Simulation et traitement des résultats	48
3.3.2	Effet de la forme de la fissure sur le signal CF	49
3.4	Conclusion	49
4	Dispositif expérimental du CND par CF	53
4.1	Introduction	53
4.2	Dispositif expérimental et matériaux utilisés	53
4.2.1	Appareillage de mesure (Lock-in amplifier)	53
4.2.1.1	Démodulation à double phases:	55
4.2.1.2	Mixage de signaux dans le domaine temporel	56
4.2.2	Capteur (bobine)	57
4.2.3	Matériaux utilisés	58
4.2.4	Étalons	58
4.2.5	Système de déplacement du Capteur	59
4.3	Mesures expérimentales	59
4.3.1	Stratégie	59
4.3.2	Méthode de calcul de l'impédance à l'aide de l'amplificateur Lock-in	61
4.3.3	Représentations des signaux	62
4.4	Validation expérimental	64
4.5	Conclusion	65
5	Identification de la fissure à partir de technique d'inversion	67
5.1	Introduction	67
5.2	Problème Inverse	67
5.2.1	Inversion itérative	68
5.2.2	Inversion directe	69

TABLE DES MATIÈRES

5.3	Résolution de problème inverse avec des réseaux de neurones	70
5.3.1	Neurone biologique	70
5.3.2	Neurone artificiel	71
5.3.3	Fonctions d'activation	72
5.3.3.1	Fonction seuil asymétrique (hard limite)	73
5.3.3.2	Fonction Sigmoidale	73
5.3.3.3	Fonction saturation	73
5.3.3.4	Fonction gaussienne centrée	74
5.3.4	Réseaux de neurones	74
5.3.4.1	Composition d'un réseau de neurones	74
5.3.4.2	Architecture des réseaux de neurones	75
5.3.5	Apprentissage des réseaux de neurones	76
5.3.5.1	Apprentissage supervisé	76
5.3.5.2	Apprentissage non supervisé	77
5.4	Stratégie de traitement du problème inverse	78
5.4.1	Création de bases de données	78
5.4.2	Inversion par RN MLP	78
5.4.3	Validation des résultats	81
5.5	Conclusion	83
	Conclusion générale	85
	Annexes	87
	A Présentation l'application	89
	A.0.1 l'identification de la forme de la fissure se fait en deux étapes: . . .	89
	Bibliography	95

Table des figures

1.2.1	Champ d'application du CND	7
1.4.1	Principe du CND par courants de Foucault.	9
1.4.2	Répartition des courants de Foucault pour une pièce	10
1.4.3	Schéma synoptique de la chaîne de contrôle	11
1.4.4	Définition d'un dispositif de mesure	15
1.4.5	Type de capteur selon sa fonction	16
1.4.6	Type de capteur suivant le mode de contrôle	17
1.4.7	Bobine encerclant	17
1.4.8	Bobine interne glissante	18
1.4.9	Bobine simple	18
1.4.10	Bobine plate	19
1.4.11	Capteur interne tournant	19
1.4.12	Principe de la variation d'impédance d'une bobine suite à la génération des courants de Foucault	21
1.4.13	Plan d'impédance	22
1.4.14	Géométrie de la pièce à contrôler.	24
1.5.1	Stratégie de caractérisation de fissures	26
2.2.1	Système capteur-fissure	28
2.2.2	Problème magnétodynamique type	29
3.2.1	Diagramme de résolution	41
3.3.1	TEAM Workshop Pb N°15-1	42
3.3.2	Détail du TEAM Workshop Pb N°15-1	43
3.3.3	Création du modèle géométrique.	44
3.3.4	Ajout des propriétés physiques.	45

TABLE DES FIGURES

3.3.5	Conditions aux limites	46
3.3.6	Maillage.	46
3.3.7	Excitation du capteur.	47
3.3.8	Solution setup	47
3.3.9	Variation de l'inductance en fonction du déplacement du capteur.	48
3.3.10	Variation de la résistance en fonction du déplacement du capteur.	49
3.3.11	Variation de l'inductance en fonction du déplacement du capteur.	50
3.3.12	Variation de la résistance en fonction du déplacement du capteur.	50
3.3.13	Différentes formes de fissures.	51
4.2.1	Montage expérimental.	54
4.2.2	Lock-in amplifier	55
4.2.3	Shéma du principe de Lock in Amplifier.	57
4.2.4	Forme des fissures	58
4.2.5	Système de déplacement du Capteur.	60
4.3.1	Interface graphique sous MATLAB.	60
4.3.2	Banc d'essai expérimental.	61
4.3.3	Montage expérimental.	62
4.3.4	Schéma électrique.	62
4.3.5	Variations de l'inductance en fonction du déplacement du capteur pour trois formes de défauts.	63
4.3.6	Variations de la résistance en fonction du déplacement du capteur pour trois formes de défauts.	63
4.4.1	64
5.2.1	Schéma d'étude général d'un problème inverse	68
5.2.2	Schéma du processus itératif d'inversion.	69
5.2.3	Schéma du processus d'inversion directe utilisant l'inverse du modèle direct.	70
5.2.4	Schéma du processus d'inversion directe basé sur un modèle d'inverse.	70
5.3.1	Représentation schématique d'un neurone biologique.	71
5.3.2	Représentation d'un neurone artificiel	72
5.3.3	Architecture d'un réseau de neurones	75
5.3.4	Exemples de RN	75
5.3.5	Structure d'un RN MLP	76
5.3.6	Schéma du principe d'apprentissage d'un RN.	77

5.4.1	Inversion par RN	78
5.4.2	Courbes d'entrées et sorties du RN1 pour l'identification de la formes des défauts.	79
5.4.3	Courbes d'entrées et sorties du RN2 pour l'identification de la longueur des défauts.	79
5.4.4	Schéma de RN1 pour l'identification des formes des défauts.	80
5.4.5	80
5.4.6	Schéma de RN 2 pour l'identification de la longueur des défauts.	81
5.4.7	82
5.4.8	Résultats de l'inversion sur la base de test pour l'identification des formes des défauts.	82
5.4.9	Résultats de l'inversion sur la base de test pour l'identification de la longueur des défauts.	83
A.1	L'interface principale d'application	90
A.2	Guide d'application	91
A.3	Le tracé de la signature $X = f(R)$	92
A.4	Identification de la forme de la fissure	92

Liste des tableaux

1.1	Les procédés de contrôle non destructif	6
3.1	Statistiques d'exécution et stockage informatique	40
3.2	Paramètres du problème benchmark Team Workshop Pb N°15-1	43
4.1	Données de la bobine	57

Notations et symboles

H :	Champ magnétique (A/m).
B :	Induction magnétique (T).
E :	Champ électrique (V/m).
D :	Induction électrique (C/m^2).
A :	Potentiel magnétique vecteur (Wb/m).
Z :	Impédance (Ω).
X :	Réactance (Ω).
R :	Résistance (Ω).
Z_0 :	Impédance du capteur à vide (Ω).
X_0 :	Réactance du capteur à vide (Ω).
R_0 :	Résistance du capteur à vide (Ω).
X_n :	Réactance normalisée (Ω).
R_n :	Résistance normalisée (Ω).
Z_n :	Impédance normalisée (Ω).
ΔZ :	Variation de l'impédance (Ω).
ΔX :	Variation de la réactance (Ω).
ΔR :	Variation de la résistance (Ω).
δ :	Épaisseur de peau (m).
t :	Variable temporaire (s).
x :	Axe des abscisses en coordonnées cartésiennes (m).
y :	Axe des coordonnées en coordonnées cartésiennes (m).
z :	Axe vertical en coordonnées cylindriques (m).

f :	Fréquence (Hz).
I :	Courant électrique (A).
J :	Densité de courant (A/m^2) .
L :	Inductance propre (H).
ε_0 :	Permittivité électrique absolue du vide ($\frac{10^{-9}}{36\pi}$) (F/m) .
ε_r :	Permittivité électrique relative
μ_0 :	Perméabilité magnétique absolue du vide ($4\pi \times 10^{-7}$) (H/m).
μ_r :	Perméabilité magnétique relative .
ρ :	Densité volumique de charge électrique (C/m^3) .
ρ_r :	Résistivité électrique ($\Omega.m$) .
σ :	Conductivité électrique (S/m) .
ν :	Réductivité magnétique .
Φ :	Flux magnétique (Wb) .
Ω :	Milieu
grad X :	Gradient d'un scalaire X .
div X :	Divergence d'un vecteur X .
rot X :	Rotationnel d'un vecteur X .

Abreviation

<i>CND</i> :	Contrôle Non Destructif
<i>CF</i> :	Courants de Foucault
<i>CND – CF</i> :	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
<i>CCF</i> :	Capteur par Courants de Foucault.
<i>MEF</i> :	Méthode des Eléments Finis.
<i>2D</i> :	Bidimensionnel.
<i>3D</i> :	Tridimensionnel.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'évolution de l'outil de production et l'augmentation des cadences se traduisent par une nécessité de contrôler la qualité des produits réalisés. De ce fait, de nombreux moyens de contrôle sont apparus, parmi ceux-ci, le contrôle non destructif (CND) qui consiste à évaluer l'état interne et externe d'une structure ou d'un matériau sans porter atteinte à son intégrité.

Le CND prend une place de plus en plus importante dans tous les secteurs industriels de pointe. Les enjeux économiques associés au CND sont toujours très importants. Dans certains secteurs, comme le nucléaire ou les transports, en particulier aéronautiques et maritimes, ils se doublent d'un enjeu majeur lié à la sécurité du public.

Les techniques utilisées en CND sont diverses (ultrasons, courants de Foucault, rayons X, radiographie, ressuage, inspections visuelles...). Elles dépendent à la fois de la nature du matériau, de la précision requise et de la géométrie à contrôler. Ces techniques peuvent être classées en deux familles : les techniques de volume et les techniques de surface ou, plus exactement, les techniques de contrôle des couches superficielles.

C'est en surface ou proche de la surface des pièces que sont amorcées la majorité des ruptures ou dégradations constatées en service : usure, fatigue (flexion, torsion), corrosion, brûlure. C'est pour cette raison que les techniques de surface sont très largement appliquées. Parmi elles, le Contrôle par Courants de Foucault (CF) y prend une place privilégiée.

Le CND par CF est utilisé pour détecter et quantifier divers défauts superficiels dans les matériaux conducteurs, tels que les fissures et les hétérogénéités chimiques ou microstructurales. Le besoin grandissant de fiabilité et de rapidité pour les opérations d'inspection requiert le développement de nouvelles structures, outils et stratégies pour atteindre ces objectifs.

L'objectif de notre travail s'inscrit dans un cadre général de l'identification des formes des fissures par courants de Foucault. Le principe fondamental de celui-ci est l'utilisation

conjointe des outils de simulation numérique, modélisation et de l'expérimentation.

L'exploitation du CND par CF en des temps rapides devient une nécessité capitale, et c'est la raison pour laquelle il devient indispensable de disposer d'un outil rapide pour l'inversion des signaux courants de Foucault.

Nous proposons une alternative d'inversions de données par réseaux de neurones pour la résolution du problème inverse et ainsi l'identification complète de la formes de la fissure débouchant.

Nous validons les modèles développés par confrontation à des données obtenues à partir d'une campagne expérimentale réalisée au laboratoire. Cette validation utilise des bobines connues et des pièces étalons comportant des fissures avec différentes formes de fissures bien identifiées. Le but visé est la détermination de la morphologie de la fissure débouchant.

Le travail de cette mémoires est présenté sous forme de 5 chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art sur les différentes techniques de contrôle non destructif. En particulier, nous détaillons la technique de CND par CF.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons les différentes méthodes de modélisation en CND par courants de Foucault. Les interactions qui ont lieu dans le contrôle par courants de Foucault sont régies par les lois de l'électromagnétisme.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique par la méthode des éléments finis à l'aide d'un logiciel de simulation 3D dans la quelle nous montrons le test de validité du modèle et l'effet de la forme de la fissure sur le signal courant de Foucault.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats obtenus lors des essais pratiques faits à l'aide de prototype réalisé, ainsi que l'instrumentation utilisée pour l'acquisition des signaux courants de Foucault.

Le cinquième chapitre est consacré à l'identification des formes des fissures à partir de technique d'inversion. Une inversion de données réalisée par réseau de neurones nous permet ainsi de identifier complètement une forme d'une fissure débouchante.

Ainsi, les chapitres de cette mémoires sont intitulés comme suit :

Chapitre 1 : Contrôle non destructif par courants de Foucault

Chapitre 2 : Modélisation des phénomènes électromagnétiques

Chapitre 3 : Simulation de dispositif de CND-CF par ANSYS Maxwell

Chapitre 4 : Dispositif expérimental de CND-CF

Chapitre 5 : Identification de la fissure à partir de technique d'inversion

Chapter 1

Contrôle non destructif par courants de Foucault

1.1 Introduction

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production (les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défauts), soit au cours de leur utilisation.

Les domaines d'application sont nombreux :

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

et en règle générale dans tous les secteurs produisant:

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

Dans ce chapitre nous allons passer en revue les différentes techniques de CND et nous citons leur principaux avantages et inconvénients. Nous exposerons en détail la technique utilisant les courants de Foucault.

Le Contrôle Non Destructif (CND) a pour objectif de vérifier l'intégrité d'une pièce ou

d'un matériau sans l'endommager en détectant d'éventuels défauts présents dans celui-ci. Dans différents secteurs industriels (aéronautique, nucléaire, automobile, métallurgie...), le CND est primordial afin de garantir la sûreté de fonctionnement des systèmes critiques. Une grande variété de méthodes existe et permettent de détecter des anomalies internes ou de surface, de déterminer la composition ou la structure des matériaux.

Le CND peut être utilisé en production, lors de la mise en service ou lors d'opérations de maintenance. Le CND constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Aussi l'histoire du CND commence-t-elle avec celle de la physique moderne à la fin du XIX siècle : découverte des rayons X , des courants de Foucault, de la piézo-électricité, etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une importante accélération du progrès et du développement des CND s'est manifestée ensuite vers les années 1960-1970 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que les centrales électriques nucléaires ou encore l'aéronautique

1.2 Champ d'application actuel

Le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, mettent en œuvre ou utilisent les matériaux, les produits et les structures de toutes natures. 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 des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire). 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'applications.

1.2.1 Le contrôle en cours de fabrication

Le contrôle en cours de fabrication procède de la philosophie de l'instrumentation industrielle en tant qu'outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant alors un appareillage installé à demeure en ligne de fabrication présentant une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et une bonne fiabilité. Les défauts recherchés sont ici généralement bien identifiés, le fonctionnement est automatique aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux.

1.2.2 Le contrôle en recette

Le contrôle s'effectue sur un lot de pièces, une installation, un ouvrage au moment de la livraison pour veiller sur le respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant. A ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi, bien souvent, d'en définir la nature et les dimensions.[1]

1.2.3 Le contrôle en service

Le contrôle peut s'opérer sur des pièces ou structures pendant la maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement du matériel. Une grande fiabilité est exigée à cause de l'importance des risques encourus par l'ignorance d'existence d'un grave défaut. Pour ce type de contrôle, il est primordial d'estimer le mieux possible la nature et les dimensions des défauts pour pouvoir en apprécier la nocivité. Il faut disposer d'un grand nombre d'examen non destructifs, de façon à pouvoir suivre l'évolution du dommage au cours du temps.

1.3 Différentes méthodes de CND

Nous avons regroupé les différentes techniques du CND, leurs principes, leurs avantages et inconvénients dans le tableau 1.1: [1]

Table 1.1 – Les procédés de contrôle non destructif

Types de procédés	Méthodes de contrôle	Principes physiques	Types de défauts détectés	Domaines d'application	Points forts	Points faibles
Optiques	Examen visuel direct ou assisté	Vision Perturbation d'une réflexion	Défauts débouchant, fissures, criques, trous	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Souplesse	Productivité, fiabilité
	Contrôle laser			Contrôles automatiques de bandes et tôles	Productivité	Taux élevé de fausses alarmes
	Contrôle TV	Formation d'une image	Défauts d'aspect, taches	Contrôle automatique en fabrication des produits divers	Productivité	Défauts fins
	Interférométrie holographique	Détection de Microdéformations provoquées	Délaminations, décollements	Contrôle en atelier de parois non métalliques	Contrôle des composites	Interprétation, productivité
	Thermographie infrarouge	Cartographie de perturbations thermiques	Délaminations hétérogénéités diverses	Contrôle sur site	Cartographie	Caractérisation des défauts
Ressuage	Ressuage	Effet de capillarité	Défauts fins débouchant	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Simplicité Faible coût	Productivité, peu quantitatif
Flux de fuite magnétique	Magnétoscopie	Accumulation de poudre	Défauts fins Débouchant et sous-cutanés	Produits ferromagnétiques (aciers)	Sensibilité	Réservé aux aciers Peu quantitatifs
	Détection de flux de fuite	Distorsion d'un flux magnétique	Défauts fins débouchant Sensibilité Automatisation Fragilité des sondes		Sensibilité Automatisation	Fragilité des sondes
Electromagnétiques	Courants de Foucault	Perturbations d'un courant	Défauts fins débouchant	Contrôle en ligne et sur chantier de tout produit métallique	Sensibilité Automatisation	Matériaux non conducteurs Interprétation
	Potentiel électrique	Perturbations d'un courant	Mesure de profondeur de défauts	Tout produit conducteur	Simplicité Faible coût	Contrôle manuel Lent
	Hyperfréquences	Transmission ou réflexion radar	Hétérogénéités diverses	Matériaux peu conducteurs	Contrôle sans contact	Interprétation du signal
Rayonnements ionisants	Radiographie X	Atténuation d'un flux	Défauts internes	Contrôle en atelier et sur site de tout matériau	Cartographie Souplesse de réglage	Protection Détection des fissures
	Radiographie γ			Contrôle en ligne	Fortes épaisseurs	Profondeur des défauts Radioscopie en temps
	Radioscopie en temps réel				Productivité	Résolution limitée
	Tomographie X			Contrôle de structures non métalliques	Imagerie en coupe	Coût Productivité
	Neutronographie	Corps hydrogénés	Complète la radiographie	Équipement Condition d'emploi		
Vibrations mécaniques	Diffusion Compton	Rétrodiffusion	Délaminations	Contrôle des composites		
	Ultrasons	Perturbation d'une onde, Échographie	Défauts internes Défauts débouchant	Contrôle manuel ou automatique de la majorité des matériaux	Grande sensibilité Nombreuses méthodes d'auscultation	Conditions d'essai Interprétation des échos. Couplage
	Émission acoustique	Émission provoquée par sollicitation mécanique	Criques Fissures	Parois de gros récipients Structures diverses	Contrôle global avec localisation des défauts	Interprétation Bruits parasites
Tests d'étanchéité	Essais dynamiques	Perturbations d'un amortissement Mesure de vitesse	Criques Fissures	Contrôle de pièces moulées	Productivité	Qualitatif
	Essais hydrostatiques	Détection de bulles	Défauts débouchant dans joints où parois, zone perméable	Tubes et enceintes en tout matériau	Grande étendue de flux de fuite selon la méthode	Contingences diverses selon la méthode
	Tests avec gaz traceurs (halogènes, hélium)	Détection chimique				
Détection sonore	Bruit acoustique					

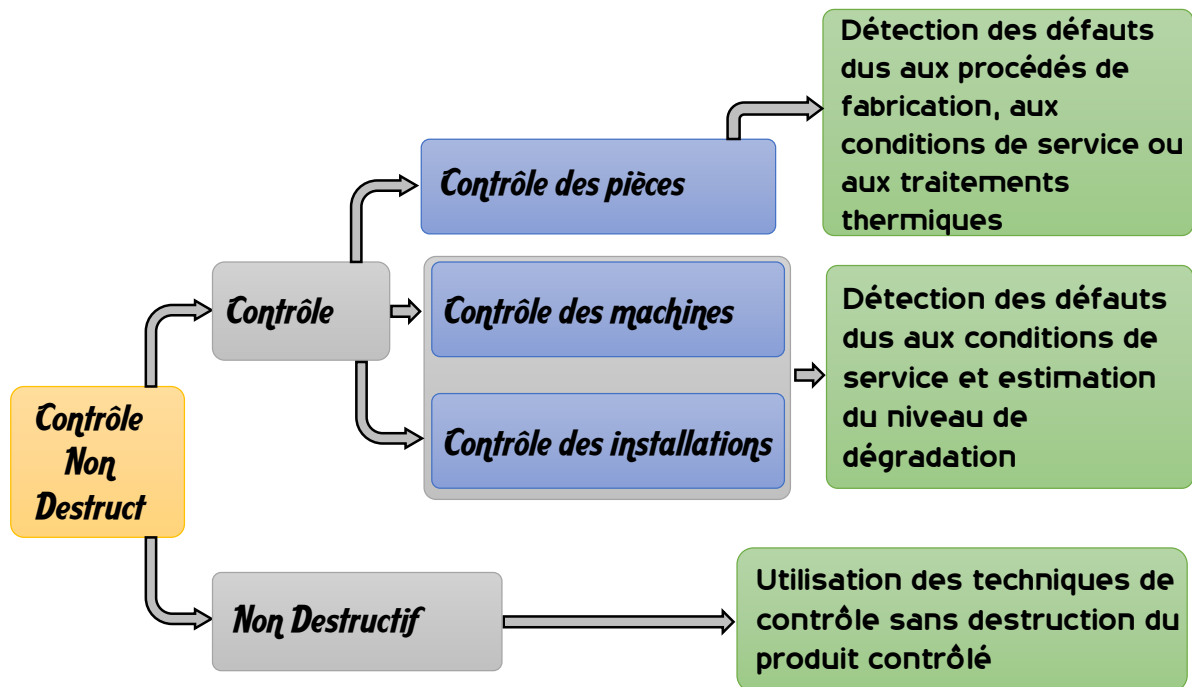


Figure 1.2.1 – Champ d’application du CND

1.4 CND par courant de Foucault

1.4.1 Objectifs des CND-CF

Un capteur à courants de Foucault peut accomplir diverses tâches. Du fait que l’impédance du système Capteur/Pièce est fonction des différentes caractéristiques électromagnétiques et géométriques. Cette technique est parfois utilisée pour la caractérisation géométrique et électromagnétique, d’autre fois pour le contrôle de l’état de santé en cherchant et caractérisant les défauts[2].

❶ *Caractérisation géométrique*

- Mesure de l’entrefer.
- Mesure de l’épaisseur.

❷ *Caractérisation électromagnétique*

- Mesure de la conductivité.
- Mesure de la perméabilité.

❸ *Contrôle de l’état de la santé*

- Détection du défaut.

- Position du défaut.
- Taille du défaut.
- Forme du défaut.
- Propriété physique.

1.4.2 Principe

La méthode du courant de Foucault est basée sur le principe de la génération de courants électriques circulaires (courants de Foucault) dans un matériau conducteur. Ceci est obtenu grâce à l'utilisation d'une bobine connectée à un générateur de courant alternatif entraînant un champ magnétique alternatif (champ primaire). Le flux actuel induit par ce champ primaire dans le matériau conducteur produira lui-même un champ magnétique (champ secondaire) en opposition au champ primaire selon la loi de Lenz. Cette réaction peut être mesurée comme un changement de l'impédance de l'agencement de la bobine / échantillon (modification de l'amplitude et de la phase de la tension liée au courant du générateur entraînant la bobine).

Une bobine dans l'air n'est pas influencée par les courants de Foucault, mais le déplacement de la bobine vers un échantillon conducteur électrique aboutit à un signal qui peut être utilisé pour la mesure de distance, par exemple Mesure de l'épaisseur de revêtement non conductrice sur un matériau conducteur électrique.

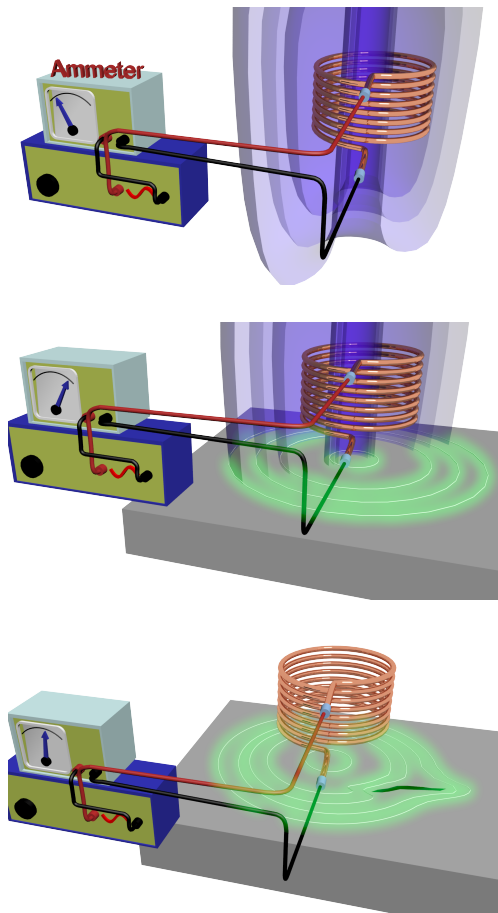
Les courants de Foucault vont toujours de la manière la plus simple, et si des fissures existent dans le matériau, le courant ira autour de la fissure. Cette modification du flux de courant de Foucault peut également être détectée en surveillant l'impédance de la bobine et est principalement utilisée pour la détection des fissures Figure 1.4.1.

1.4.3 Profondeur de pénétration du courant de Foucault

On appelle profondeur de pénétration standard la profondeur δ pour laquelle l'amplitude du courant est égale à l'amplitude en surface divisée par e , soit 37% de J_0 [3]

$$J_0 e^{-\sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}}\delta} = \frac{J_0}{e}$$

$$\sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}}\delta = 1$$



Le courant alternatif qui circule dans la bobine à une fréquence choisie génère un champ magnétique autour de la bobine.

Lorsque la bobine est placée près d'un matériau conducteur d'électricité, les courants de Foucault sont induits dans le matériau.

Si un défaut dans le matériau conducteur modifie la circulation des courants de Foucault, le couplage magnétique avec la sonde change et un signal de défaut peut être lu en mesurant la variation d'impédance de la bobine.

Figure 1.4.1 – Principe du CND par courants de Foucault.

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

En fonction de la fréquence f , on a :

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

Cette profondeur de pénétration standard est très utilisée, dans la pratique, pour caractériser la distribution en profondeur des courants de Foucault, quelles que soient la forme du matériau et sa disposition par rapport aux courants inducteurs.

Si l'on ne tient pas compte de la phase, on écrit alors d'une manière simplifiée :

$$J = J_0 e^{-\sqrt{\mu\sigma\pi f} \cdot z}$$

On peut constater que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur Figure 1.4.2.

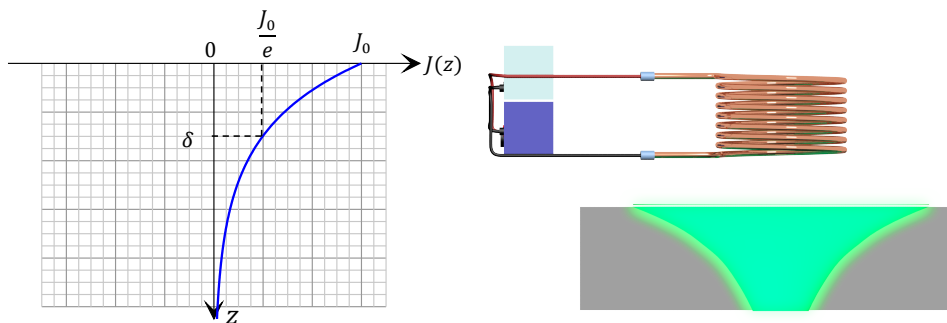


Figure 1.4.2 – Répartition des courants de Foucault pour une pièce

La réponse d'une cible à une excitation est recueillie par un élément sensible à une grandeur électromagnétique. Dans la majorité des cas il s'agit de mesurer une impédance ou une différence de potentiel (d.d.p) représentative de la variation d'un flux. Cette mesure s'effectue souvent par l'intermédiaire d'une bobine.[4]

1.4.4 Schéma synoptique du dispositif

La chaîne de contrôle non destructif par courant de Foucault comprend essentiellement un générateur alimentant le capteur, le capteur lui-même, le produit à contrôler dont

éventuellement la présence de défauts et enfin le système d'observation qui visualise une grandeur dérivée des courants de Foucault. Les paragraphes suivants décrivent chaque élément de cette installation [5].

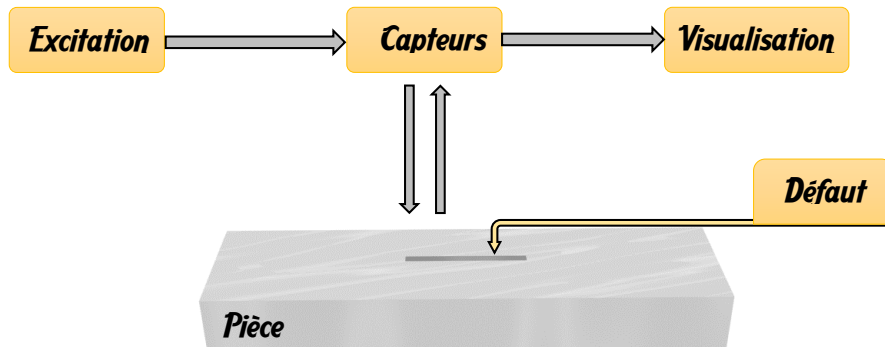


Figure 1.4.3 – Schéma synoptique de la chaîne de contrôle

1.4.5 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 : [4]

- Excitation mono-fréquence.
- Excitation multi-fréquences.
- Excitation pulsée.

● Contrôle 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. Elle devra cependant se situer dans une gamme raisonnable. En effet, 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. Celles-ci provoquent des résonances et tendent à court-circuiter le circuit inductif. Cette méthode simple et parfois 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.

■ Contrôle multi-fréquences

Le contrôle par courants de Foucault multi-fréquences est très utilisé pour l'inversion des données fournies par la sonde en vue de déterminer des paramètres du matériau en regard [6]. 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.

Dans un problème d'inversion quand il s'agit d'identifier n paramètres de la cible, il est nécessaire de disposer d'au moins n observations de la sonde. Partant du principe que le comportement de la sonde varie en fonction de la fréquence d'excitation, en particulier, selon que l'on se situe en basse, moyenne ou haute fréquence, les paramètres influents de la cible agissent de manière différente. La méthode multi-fréquences consiste à choisir judicieusement les fréquences d'excitation de la sonde de manière à recueillir des informations riches et complémentaires sur le matériau à contrôler. L'idéal serait que chaque paramètre ait une influence sur le signal de mesure à une fréquence et une seule. Ceci est évidemment difficile, voire impossible à réaliser en pratique. Quant au nombre de fréquences d'alimentation nécessaire, il est directement lié au nombre et à la nature des paramètres à identifier.

■ Contrôle par courants de Foucault pulsés

Cette méthode a été mise en place dans les années 50 pour une application d'évaluation d'épaisseur de revêtement métallique [7], puis elle a été appliquée à la détection de défauts profonds [8, 9]. Dans un problème de contrôle où il s'agit de discriminer plusieurs paramètres, une alternative à l'alimentation sinusoïdale multi-fréquences consiste à émettre un champ magnétique large bande en excitant la sonde avec un signal impulsionnel ou quasi-impulsionnel. La forme des signaux d'alimentation peut être rectangulaire, triangulaire ou semi-sinusoïdale, 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. Sur le principe, une telle méthode est plus riche en informations qu'un contrôle par courants de Foucault sinusoïdal mono ou multi-fréquences. Cependant, l'excitation pulsée nécessite une instrumentation particulière : générateur d'impulsions à fort courant de bande passante élevée, système d'acquisition performant (les signaux à mesurer étant

rapides et souvent de faibles amplitude).

1.4.6 Défauts

En science des matériaux, un défaut est une déviation par rapport à une structure idéalisée. 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. Il existe deux types de défaut :[1]

1.4.6.1 Défaut de construction

- *défaut cristallin* : perturbation dans l'agencement périodique et régulière des atomes dans un cristal.
- *Fissure* : séparation locale abrupte dans la matière en surface ou dans le volume pouvant mener à la rupture.
- *Pore* : volume vide.
- *Inclusion* : corps étranger.
- *Précipité* : particule d'une phase différente à la matrice s'étant formée suite à une sursaturation.
- *Rayure/entaille/rugosité* : défauts par rapport à une surface lisse.

1.4.6.2 Défaut de service

- *Erosion.*
- *Fissuration, fatigue.*
- *Autre...*

Les défauts sont généralement classés selon le nombre de dimensions concernées de l'espace : défaut ponctuel (sans dimension), défaut linéaire (dimension 1), défaut surfacique (dimension 2) et enfin défaut volumique (dimension 3).

La présence d'anomalies ou de défauts dans une pièce provoque la variation de la conductivité électrique du matériau et la distribution des lignes de champ dans la pièce ; ce qui engendre une variation dans les courants induit s. Ainsi, des variations dans les mesures aux bornes du capteur sont détectées.

1.4.7 les capteurs (ou la sonde)

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable. Il est un élément de base des systèmes d'acquisition de données. Nous pouvons aussi affirmer qu'il est plus qu'un instrument de mesure, car il se comporte comme une interface entre un processus physique et une information manipulable (donnée accessible à l'utilisateur).

Dans les dispositifs du CND-CF, la topologie des courants de Foucault créés au sein d'une pièce est riche d'informations. Cependant, ces courants ne sont pas directement accessibles à la mesure. C'est par l'intermédiaire d'un capteur inductif constitué d'un inducteur ou un ensemble de bobines, que les informations nécessaires au contrôle sont obtenues. En effet, la variation d'impédance ou la différence de potentiel aux bornes d'une bobine représente la quantité de flux magnétique créé et la puissance dissipées due à la présence des courants de Foucault dans la pièce à contrôler. La forme du capteur, sa position relative au matériau (lift-off) [1]

1.4.7.1 Les types de sondes

Pour le CND par courants de Foucault comme pour d'autres techniques, plusieurs types de sondes et de mesures sont utilisables : la conception de la sonde doit déterminer ceux à employer.

■ 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 ». En pratique, certaines technologies entraînent qu'un élément ne peut être qu'émetteur, ou seulement récepteur, ou encore assurer les deux fonctions. Le dispositif de mesure intègre la sonde ainsi que son électronique associée, comme le montre la Figure 1.4.4, et produit les signaux de mesure.[10]

■ 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

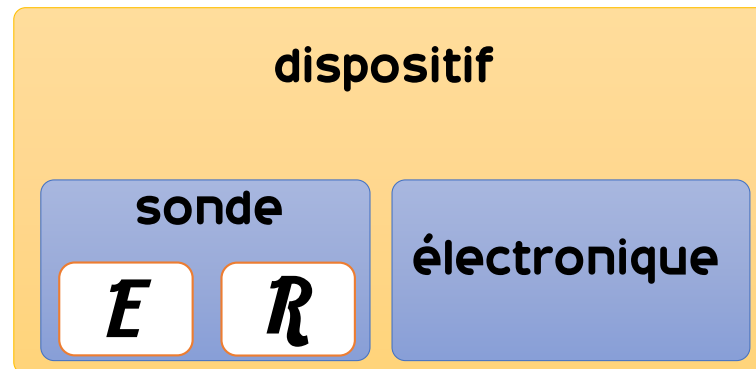


Figure 1.4.4 – Définition d'un dispositif de mesure

fonctions au sein d'une même sonde :

✓ les sondes à fonction double

Ce sont des sondes dans lesquelles le même élément réalise les deux fonctions. Dans le cas du CND par courants de Foucault, la sonde élémentaire composée d'une seule bobine est le plus commun exemple de ce qui peut être une sonde à fonction double. La grandeur mesurée est alors l'impédance de la bobine.

✓ les sonde à fonctions séparées

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

Les sondes à fonctions séparées sont habituellement plus efficaces que les sondes à fonction double. Elle permettent d'augmenter indépendamment d'une part l'intensité du signal émis en modifiant par exemple la géométrie de l'émetteur, d'autre part la sensibilité au signal reçu et la résolution spatiale en modifiant par exemple la géométrie du récepteur. Enfin, elles sont en général moins sensibles aux perturbations externes[11].

■ **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 :

✓ les 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.

✓ les mesures différentielles

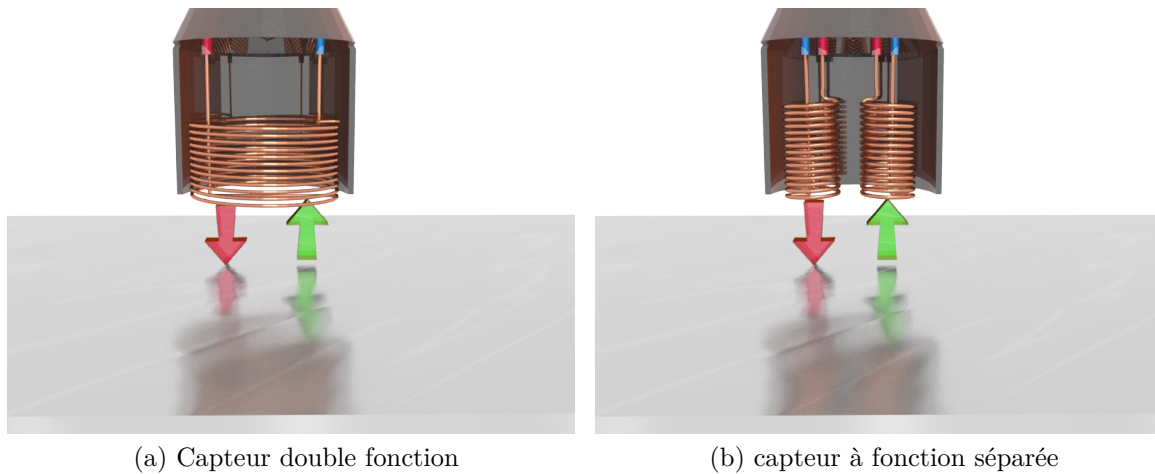


Figure 1.4.5 – Type de capteur selon sa fonction

Les sondes différentielles sont composées de plusieurs éléments, les signaux mesurés étant retranchés deux à deux. Cela permet de ne mesurer par exemple qu'une variation locale de l'état de la pièce entre deux points. Dans le cas des sondes CF, lorsque les deux éléments sensibles concernés sont assez proches l'un de l'autre, la soustraction permet aussi de minimiser en grande partie l'influence du décollement de la sonde et de tous les problèmes de mesures qui concernent une étendue à inspecter relativement grande, comme une variation de perméabilité du matériau.

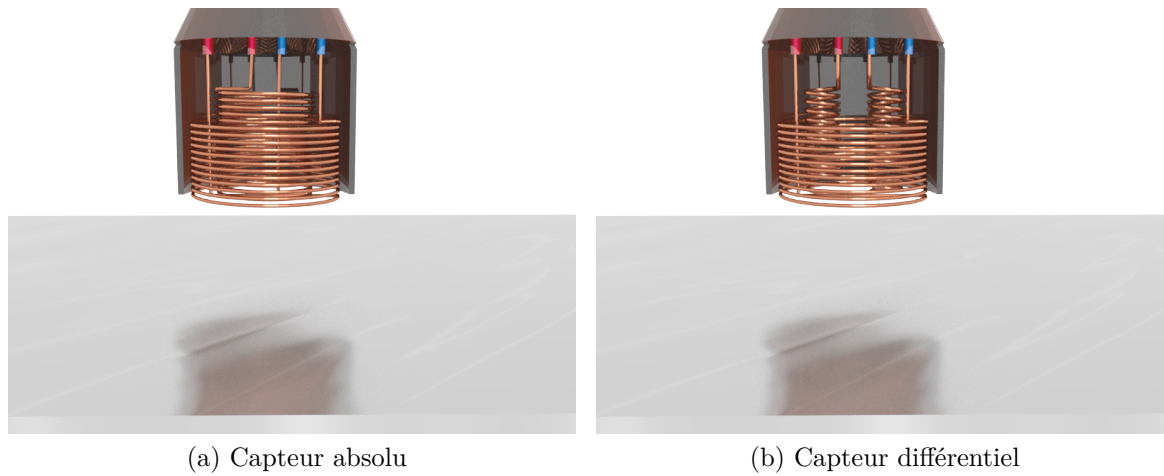
Parmi les appareils pour le CND par courants de Foucault commercialisés et utilisés actuellement, les sondes absolues sont souvent utilisées pour détecter des variations graduelles comme les dégradations dues à la corrosion ou l'usure de contact. Au contraire, les sondes différentielles sont avant tout préférées pour la détection des défauts abruptes et soudains, comme les bords ou les fissures. Il est éventuellement possible de disposer des deux types de mesures sur une seule sonde[10].

1.4.7.2 Différentes géométries de sondes CF

Il existe plusieurs configurations possibles pour la disposition du bobinage d'excitation relativement à la cible; chacune est dédiée au contrôle de cible de forme donnée. Sans dresser un panorama exhaustif de toutes les différentes méthodes d'auscultation, Nous mentionnerons le plus important[12].

■ La bobine encerclant

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Il



(a) Capteur absolu

(b) Capteur différentiel

Figure 1.4.6 – Type de capteur suivant le mode de contrôle

est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes,... Figure 1.4.7.

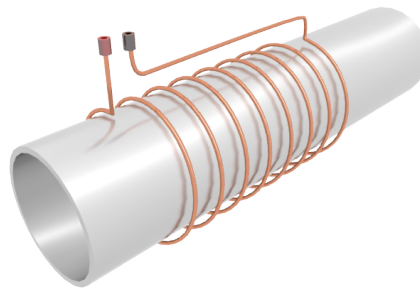


Figure 1.4.7 – Bobine encerclant

● Sonde interne

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau Figure 1.4.8.

● Sonde ponctuelle

Elle est utilisée pour l'inspection des objets à des endroits précis. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce. En effet, ce palpeur permet de faire un contrôle local des pièces même celles dont la géométrie est complexe Figure 1.4.9.

● Bobine plate

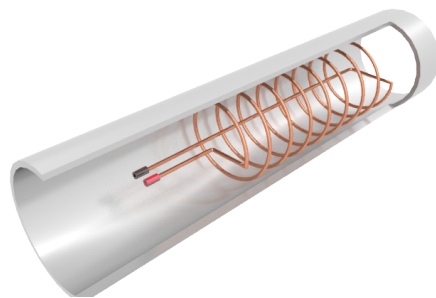


Figure 1.4.8 – Bobine interne glissante

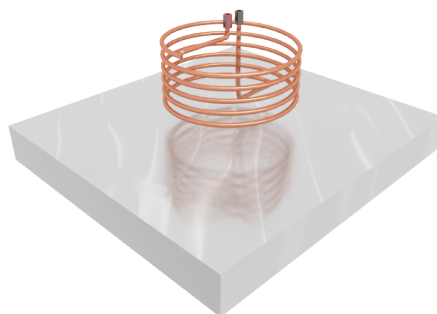


Figure 1.4.9 – Bobine simple

De la même que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large Figure (1.4.10)[13].

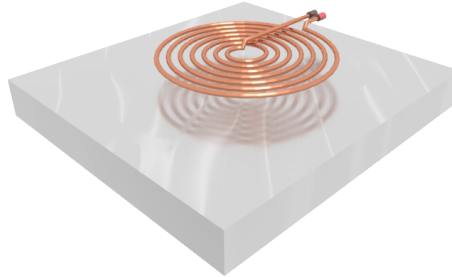


Figure 1.4.10 – Bobine plate

● **Sonde interne tournante**

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube Figure 1.4.11.

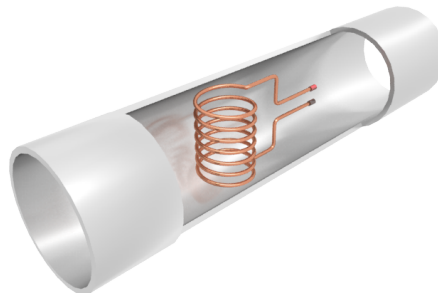


Figure 1.4.11 – Capteur interne tournant

1.4.7.3 Impédance du capteur

L'impédance électrique mesure l'opposition d'un circuit électrique au passage d'un courant alternatif sinusoïdal .Elle peut être représentée comme la somme d'une partie réelle (partie résistive, la résistance) plus une partie imaginaire (partie réactive, la réactance). Dans notre dispositif, l'impédance de la source qui est une bobine, est modifiée par la variation du champ magnétique traversant ses spires. C'est la réaction de courant de Foucault au sein de l'objet métallique qui induit cette variation

■ Variation d'impédance

La présence d'un défaut va provoquer une modification locale de la répartition des courants de Foucault ce qui entraîne une variation en amplitude et phase du flux magnétique secondaire qui à son tour va affecter la tension électrique apparaissant aux bornes du capteur

Ce dernier étant alimenté en courant constant, une variation de tension peut être assimilée à une variation d'impédance électrique de l'ensemble capteur-matériau. Une inspection par courant de Foucault consiste à mesurer ce changement d'impédance que l'on calcule par l'intermédiaire des pertes Joule et de l'énergie magnétique, ou par les flux traversant le capteur [14].

L'organigramme de la Figure 1.4.12 schématise la variation de l'impédance à partir de la variation du champ magnétique traversant le capteur et les pertes Joule dans la pièce conductrice

■ Impédance normalisée et plan d'impédance

L'inspection des matériaux consiste à mesurer les variations d'impédance de la bobine. En général, on utilise une méthode comparative, dont l'objet est de mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine en présence de la pièce à inspecter et l'impédance Z_0 de la bobine dans l'air. En absence du matériau à contrôler, l'impédance complexe Z_0 du capteur est [15] :

$$\bar{Z}_0 = R_0 + jX_0 \quad (1.4.1)$$

R_0 et X_0 sont respectivement la résistance et la réactance à vide de la bobine du capteur.

En présence du matériau à contrôler, le champ réactif provoque une modification de l'impédance du capteur. L'impédance complexe en charge \bar{Z} est :

$$\bar{Z} = R + jX \quad (1.4.2)$$

R est la composante résistive qui englobe les pertes internes du bobinage d'excitation et les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans le matériau. X est la composante inductive qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le capteur.

Pour éliminer les composantes de l'impédance à vide R_0 et X_0 (pertes à vide, l'inductance propre du capteur) et garder uniquement la géométrie du capteur, sa position relative au matériau (*lift-off*) et les caractéristiques géométriques et physiques du matériau, on

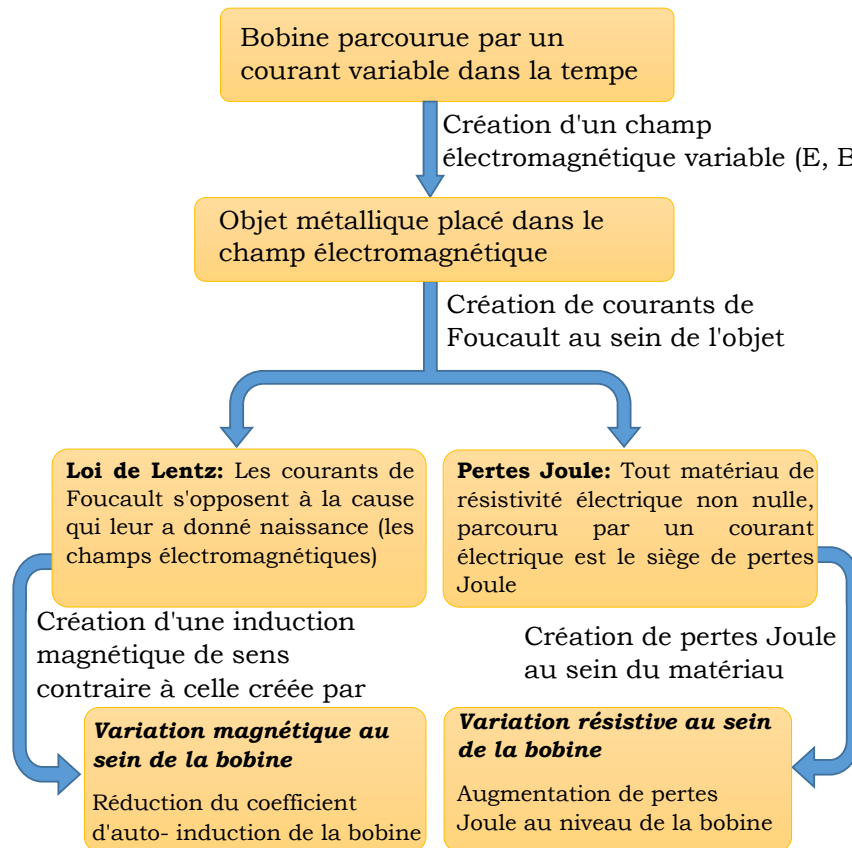


Figure 1.4.12 – Principe de la variation d'impédance d'une bobine suite à la génération des courants de Foucault

procède à la normalisation de l'impédance complexe du capteur en présence du matériau. Cette normalisation est donnée par :

$$\overline{Z}_n = \frac{\overline{Z} - R_0}{X_0} = R_n + jX_n \quad (1.4.3)$$

$$R_n = \frac{R - R_0}{X_0} \quad (1.4.4)$$

$$X_n = \frac{X}{X_0} \quad (1.4.5)$$

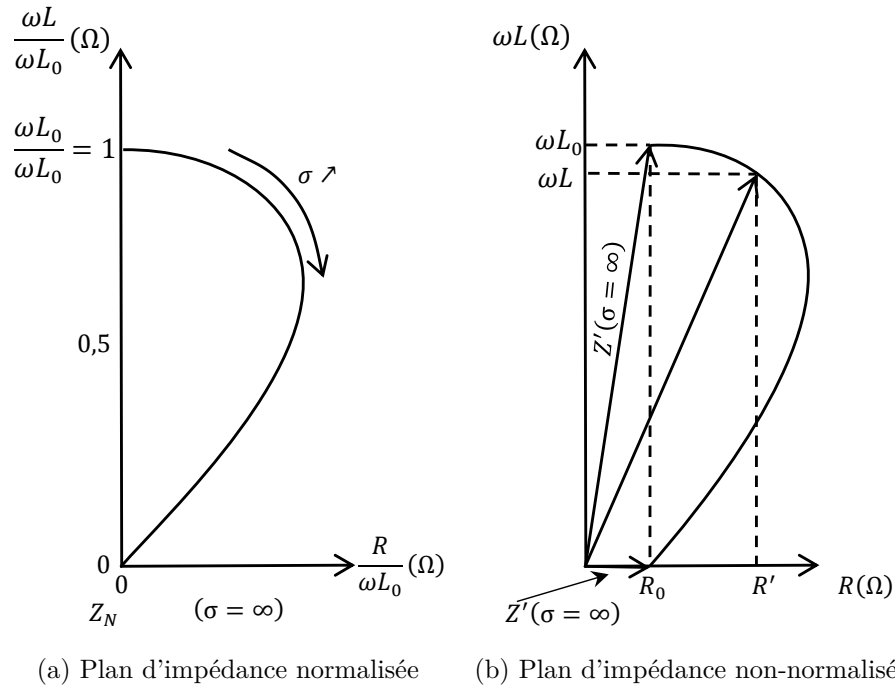


Figure 1.4.13 – Plan d'impédance

Impédance généralisée

L'impédance du capteur peut être calculée par la loi de Faraday et le théorème de Stokes.

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{E_{fem}}{I} \quad (1.4.6)$$

E_{fem} est la force électromotrice.

$$Z = \frac{\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}}{\int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}} = \frac{-\partial_t \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}}{\int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}} = \frac{-\partial_t \iint (\mathbf{rot} \cdot \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{s}}{\int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}} = \frac{-\partial_t \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}}{\int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}} \quad (1.4.7)$$

A , I et Ω sont le potentiel vecteur magnétique, le courant d'alimentation et le domaine d'étude respectivement. Si l'induction magnétique est fonction sinusoïdale, donc :

$$Z = -\frac{j\omega \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}}{\int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}} \quad (1.4.8)$$

Il est possible de déterminer les parties imaginaire et réelle de l'impédance Z du capteur par un calcul de l'énergie emmagasinée dans tout l'espace et des pertes Joule dans la région conductrice

Détermination de la partie imaginaire (réactance X) :

$$E_{em} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \cdot d\Omega \quad (1.4.9)$$

$$E_{em} = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1.4.10)$$

$$X = L\omega \quad (1.4.11)$$

Où em et L sont l'énergie magnétique emmagasinée et l'inductance du capteur. On combine les équations (1.4.9), (1.4.10) et (1.4.11) et $B = \mu H$, on obtient :

$$X = \frac{1}{I^2} \omega \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} (\mathbf{B})^2 d\Omega \quad (1.4.12)$$

Détermination de la partie réelle (résistance R) :

$$E_{joule/pièce} = R_{pièce} I_{ind}^2 \quad (1.4.13)$$

$$E_{joule/bobine} = R_{bobine} I^2 \quad (1.4.14)$$

$$R_{pièce} = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S} \quad (Ex : de la pièce : Figure (1.14)) \quad (1.4.15)$$

$$I_{ind} = J_{ind} \cdot S \quad (1.4.16)$$

I_{ind} , J_{ind} sont respectivement les courants et la densité des courants de Foucault.

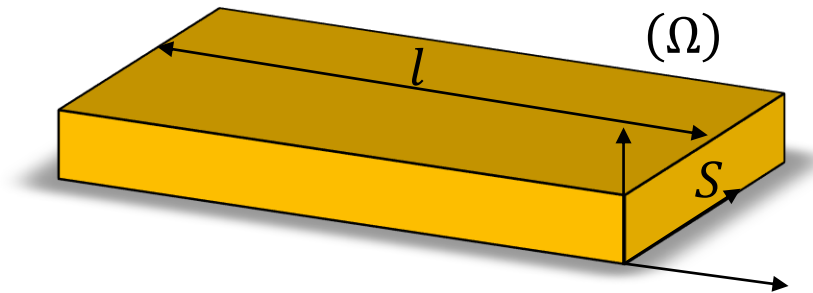


Figure 1.4.14 – Géométrie de la pièce à contrôler.

Par la combinaison des équations (1.4.13), (1.4.14), (1.4.15) et (1.4.16), on trouve :

$$R = \frac{1}{I^2} \int_{\Omega} \frac{1}{\sigma} J_{ind}^2 d\Omega \quad (1.4.17)$$

1.4.8 Avantages du CND par courants de Foucault

Le CND par CF [4]:

- Permet la détection des défauts débouchants ou faiblement enfouis (quelques millimètres) dans tout matériau conducteur.
- Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplants. Ceci en facilite par conséquent l'utilisation. De même, aucune nuisance ou pollution n'est engendrée ni pour l'utilisateur ni pour l'environnement, contrairement, par exemple au ressuage, largement utilisé, qui nécessite l'application de produits chimiques nocifs.
- Transportabilité : le CND par CF ne nécessite pas de dispositif encombrant, et peut donc être effectué à des endroits difficilement accessibles moyennant un équipement portable. De même les contrôles à température élevées sont possibles.

1.4.9 Limites du CND par courants de Foucault

- Il ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs .
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur.
- L'interprétation des signaux est souvent complexe.

1.5 Stratégie de caractérisation des fissures

Simulation du CND par CF et évaluation de la morphologie de la fissure Figure1.5.1 [16]:

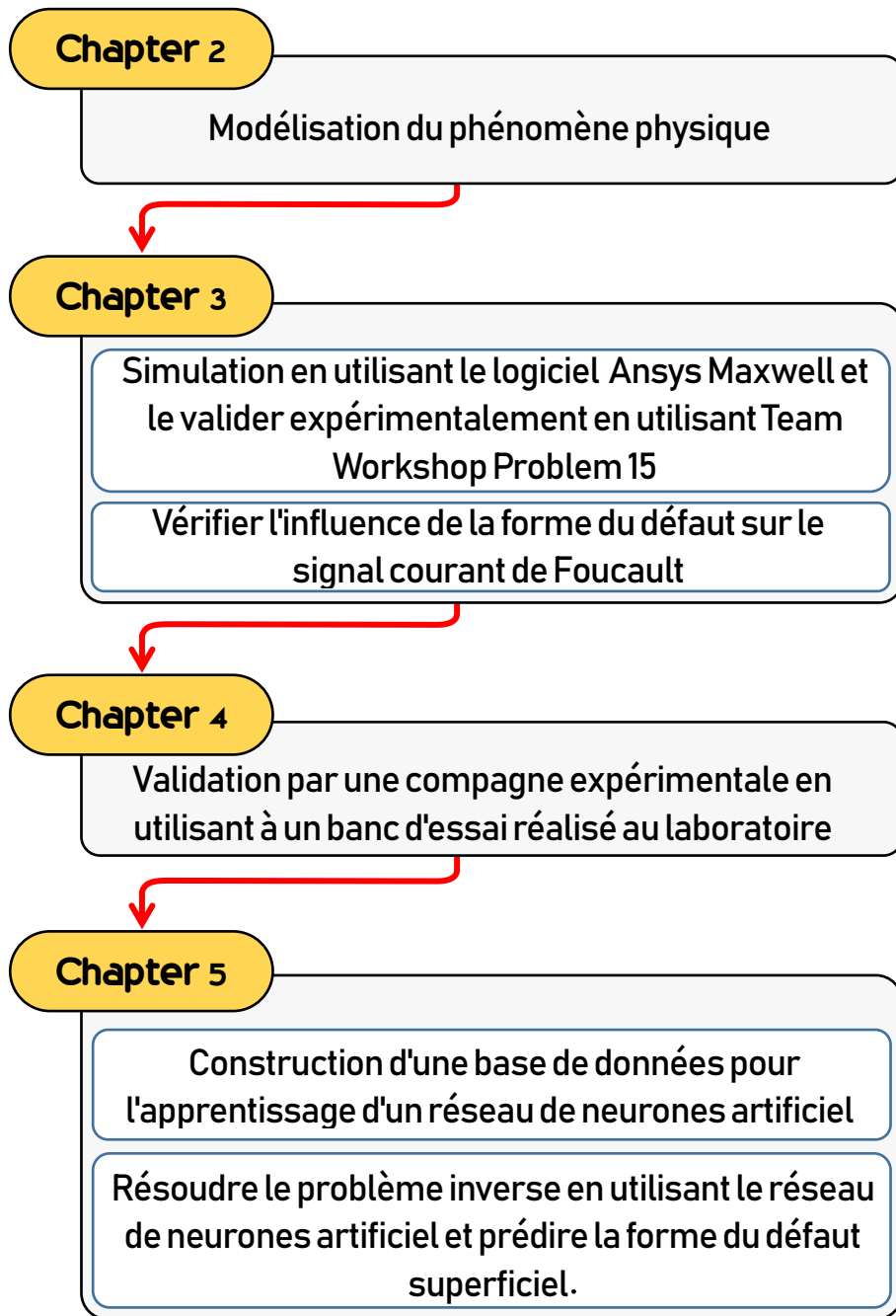


Figure 1.5.1 – Stratégie de caractérisation de fissures

Chapter 2

Modélisation des phénomènes électromagnétiques

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons les différentes bases théoriques. Et dans le prochain chapitre nous verrons l'outil numérique de simulation. Nous considérons, tout d'abord, la modélisation électromagnétique à partir des équations de Maxwell. Puis nous rappelons les principales formulations magnétodynamiques 3D existantes ainsi que leurs limites de validité et les plus avantageuses dans le cadre du CND. Enfin, nous évoquons de façon plus détaillée les formulations basées sur le potentiel vecteur magnétique et le potentiel vecteur électrique.

2.2 Modélisation du dispositif du CND par CF

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le système représenté sur la figure 2.2.1. Un matériau, constituant la pièce critique et contenant la fissure, est soumis à l'action d'un champ électromagnétique produit par une bobine représentant un capteur CF où une densité de courant variable dans le temps est imposée.

L'objectif est d'évaluer les courants de Foucault dans la pièce défectueuse ainsi que la variation d'impédance de la bobine.

Les dispositifs de CND que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la

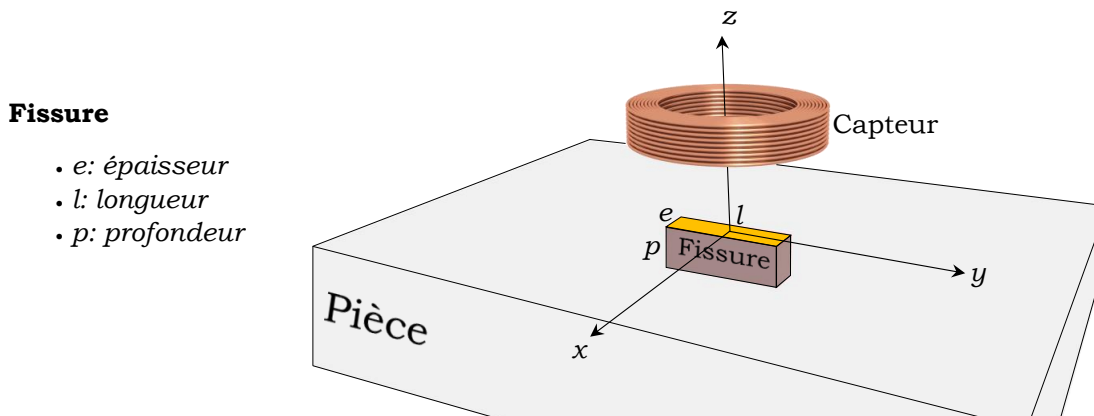


Figure 2.2.1 – Système capteur-fissure

magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire. Il s'agit des dispositifs constitués d'inducteurs filaires, de régions conductrices, non conductrices magnétiques ou amagnétiques et de sources de courant.

La modélisation de ces dispositifs peut être ramenée, dans le cas général, à un problème magnétodynamique type comme indiqué sur la figure 2.2.2.

L'ensemble de ce système forme le domaine de calcul Ω de frontière Γ .

2.3 Mise en équations

2.3.1 Équations de Maxwell

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

Théorème de Gauss

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (2.3.1)$$

Loi de Faraday

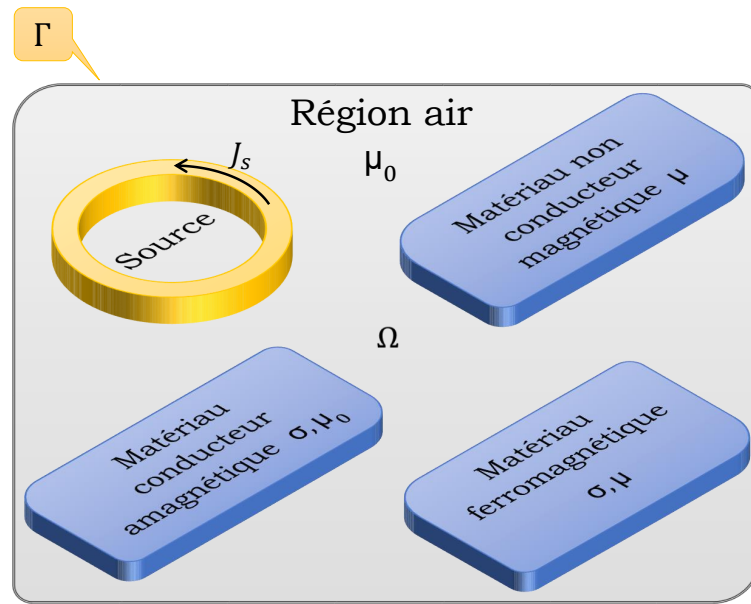


Figure 2.2.2 – Problème magnétodynamique type

$$\mathit{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3.2)$$

Loi de conservation du flux

$$\mathit{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.3.3)$$

Théorème d'Ampère-Maxwell

$$\mathit{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.3.4)$$

avec :

\mathbf{E} : Champ électrique [V/m]

\mathbf{H} : Champ magnétique [A/m]

\mathbf{B} : Induction magnétique [T]

\mathbf{D} : Induction électrique [C/m²]

\mathbf{J} : Densité de courant [A/m²]

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

L'équation (2.3.4) est une généralisation du théorème d'Ampère. Elle permet d'établir la relation entre le champ électromagnétique et les courants électriques. Elle traduit la création d'un champ magnétique par les courants électriques de conduction et de déplacement.

L'équation (2.3.2) correspond à la loi d'induction de Faraday, qui établit le lien entre un champ électrique et un flux magnétique. Cette loi traduit le phénomène inductif qui se produit dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur en mouvement soumis à un champ magnétique constant.

Ces deux équations (2.3.4) et (2.3.2) définissent la relation entre les champs et leurs sources.

Les équations (2.3.1) et 2.3.3) traduisent respectivement la conservation de la charge électrique et du champ magnétique.

2.3.2 Lois de comportement des milieux

Les grandeurs et les liaisons des cinq champs vectoriels précédents dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu où ils règnent. Ainsi, pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, on rajoute aux équations précédentes les lois de comportement de ce milieu :

◀ Relations du milieu ▶

$$\mathbf{B} = \mu(\mathbf{H}).\mathbf{H} \quad (2.3.5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon(\mathbf{E}).\mathbf{E} \quad (2.3.6)$$

Dans le cas linéaire nous avons :

$$\mu = \mu_0 \mu_r = C^{te} \quad (2.3.7)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = C^{te} \quad (2.3.8)$$

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

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

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré.

ε : Permittivité électrique [F/m].

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

ε_r : Permittivité relative du milieu considéré.

◀ Loi d'Ohm ▶

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

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.3.9)$$

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

2.3.3 Équation de continuité

L'équation de continuité appelée aussi équation de la conservation de la charge électrique est donnée par :

$$\operatorname{div} \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.3.10)$$

2.3.4 Relations de passages

A l'interface entre deux milieux différents respectivement (1) et (2), les champs de vecteurs doivent vérifier certaines conditions dites relations de passages. Elles s'énoncent comme suit [17],[18]:

◀ Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique ▶

$$(\mathbf{D}_{n1} - \mathbf{D}_{n2}) \cdot \mathbf{n} = \sigma_s \quad (2.3.11)$$

\mathbf{D}_{n1} : La composante normale de l'induction électrique dans le milieu 1.

\mathbf{D}_{n2} : La composante normale de l'induction électrique dans le milieu 2.

σ_s : Densité de charge électrique portée par la surface de séparation.

\mathbf{n} : Vecteur unité suivant la normale de l'interface.

◀ Conservation de la composante tangentielle du champ électrique ▶

$$(\mathbf{E}_{t1} - \mathbf{E}_{t2}) \times \mathbf{n} = 0 \quad (2.3.12)$$

\mathbf{E}_{t1} : La composante tangentielle du champ électrique dans le milieu 1.

E_{t2} : La composante tangentielle du champ électrique dans le milieu 2.

◀ **Conservation de la composante normale de l'induction magnétique** ▶

$$(\mathbf{B}_{n1} - \mathbf{B}_{n2}) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (2.3.13)$$

B_{n1} : La composante normale de l'induction magnétique dans le milieu 1.

B_{n2} : La composante normale de l'induction magnétique dans le milieu 2.

◀ **Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique** ▶

$$(\mathbf{H}_{t1} - \mathbf{H}_{t2}) \times \mathbf{n} = \mathbf{J}_{sur} \quad (2.3.14)$$

H_{t1} : La composante tangentielle du champ magnétique dans le milieu 1.

H_{t2} : La composante tangentielle du champ magnétique dans le milieu 2.

J_{sur} : Densité de courant porté par la surface de séparation.

2.3.5 Conditions aux limites

◀ **Condition type Dirichlet** ▶

Cette condition nous informe sur la valeur exacte de l'inconnue sur la frontière du domaine d'étude.

Elle est sous forme :

$$A = A_0 \quad (2.3.15)$$

A : La fonction inconnue.

A_0 : Constante

◀ **Condition type Neumann** ▶

Elle est appliquée sur la frontière lorsque la valeur de la grandeur calculée n'est pas connue à la frontière du domaine d'étude.

$$\frac{\partial A}{\partial n} = A_0 \quad (2.3.16)$$

◀ **Condition mixte** ▶

C'est la combinaison des deux types précédents, elle s'exprime de la manière suivante :

$$\alpha A + \beta \frac{\partial A}{\partial n} = \gamma \quad (2.3.17)$$

Où : α, β et γ sont des constantes.

◀ Condition de périodicité et d'anti-périodicité ▶

Cette périodicité du champ peut être utilisée pour définir un autre type de conditions aux limites pour réduire la taille du modèle numérique. On parle alors de condition de périodicité. La condition de l'anti-périodicité est appliquée lorsque nous avons les mêmes contraintes en module mais de polarité inverse.

Elle s'exprime comme suit :

$$A|_{\Gamma} = K.A|_{\Gamma+d\Gamma} \quad (2.3.18)$$

A : Fonction inconnue.

$d\Gamma$: Période spatiale suivant le contour Γ .

$$\text{Si } \begin{cases} K = 1 & \text{condition périodique} \\ K = -1 & \text{condition anti-périodique} \end{cases}$$

2.3.6 Hypothèses simplificatrices

La plupart des travaux accomplis jusqu'à présent dans le domaine de calcul des champs et des courants de Foucault pour les systèmes électromagnétiques, sont fondés sur les hypothèses suivantes :

- Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{0}$ (Approximation des Régimes Quasi Stationnaires **ARQS**).
- Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité $\sigma \mathbf{E}$ peut être décomposée en une partie imposée \mathbf{J}_s (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit, pour laquelle on gardera la notation $\sigma \mathbf{E}$ qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault :

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \sigma \mathbf{E} \quad (2.3.19)$$

- La densité volumique de charge est considérée comme nulle.
- Généralement, le courant n'existe qu'en volume ($\mathbf{J}_{sur} = 0$), c'est-à-dire que la conductivité est finie et que la fréquence d'excitation n'excède pas quelques MHz

(basses fréquences). Par conséquent, la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique aux interfaces où la perméabilité subit une discontinuité est assurée.

$$(\mathbf{H}_{t1} - \mathbf{H}_{t2}) \times \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (2.3.20)$$

— L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle (0 r B) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanent.

Avec ces hypothèses, les équations à résoudre sont :

$$\mathit{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.3.21)$$

$$\mathit{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3.22)$$

$$\mathit{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}_s + \sigma \mathbf{E} \quad (2.3.23)$$

Avec les relations constitutives qui deviennent :

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \sigma \mathbf{E} \quad (2.3.24)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.3.25)$$

2.3.7 Champs et potentiels

Les champs de vecteurs \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{H} et \mathbf{J} peuvent eux-mêmes s'écrire en fonction de potentiels vecteurs ou scalaires :

$$\mathbf{H} = \mathbf{T} - \mathit{grad} \phi \quad (2.3.26)$$

$$\mathbf{B} = \mathit{rot} \mathbf{A} \quad (2.3.27)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathit{grad} v \quad (2.3.28)$$

$$\mathbf{J} = \mathit{rot} \mathbf{T} \quad (2.3.29)$$

Avec :

\mathbf{T} : Potentiel vecteur électrique [A/m]

\mathbf{A} : Potentiel vecteur magnétique [Wb/m]

v : Potentiel scalaire électrique [V]

ϕ : Potentiel scalaire magnétique [A]

Ainsi, pour un problème donné, plusieurs combinaisons sont envisageables (il existe a priori un grand nombre de formulations possibles). De telles combinaisons aboutissent à des formulations électromagnétiques.

2.4 Formulations magnétodynamiques

La mise en œuvre d'un outil éléments finis 3D nécessite le choix d'une formulation basée sur une grandeur caractéristique et en association avec les relations constitutives, les relations de passage, les conditions aux limites et les conditions de jauge [19]. On entend par formulation le choix des variables inconnues et leur mise en équation. On préfère souvent exprimer les champs électrique et magnétique en fonction de potentiels. En effet, *Z.* [20] a montré que le système obtenu en prenant comme inconnues les champs (\mathbf{E}, \mathbf{H}) converge moins bien que si on travaille avec des potentiels.

Différentes formulations électromagnétiques ont été élaborées dans la littérature pour résoudre ces équations.

En exprimant les champs de vecteurs \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{H} et \mathbf{J} en fonction de nouvelles variables, telles que les potentiels vecteurs magnétique \mathbf{A} et électrique \mathbf{T} ou des potentiels scalaires électrique v et magnétiques ϕ et réduits ϕ_r (équations 2.3.26 à 2.3.29), d'autres formulations sont obtenues exprimant sous d'autres formes les équations de Maxwell, et dont la résolution conduit aux diverses grandeurs locales ou globales du problème.

Les formulations électromagnétiques sont classées en deux grandes familles :

- Les formulations utilisant des variables de type champ : \mathbf{E} ou \mathbf{H}
- Les formulations utilisant des variables de type potentiel : $\mathbf{A} - V$, \mathbf{A}^* ou $\mathbf{T} - \phi$

2.4.1 Formulations de type électrique

Les principales formations de type électrique sont les formations en champ \mathbf{E} , en potentiels $\mathbf{A}v - \mathbf{A}$.

2.4.1.1 Formulation en champ électrique \mathbf{E}

Cette formulation est obtenue en dérivant par rapport au temps l'équation d'Ampère-Maxwell 2.3.4 et en faisant l'hypothèse que la perméabilité est invariante par rapport au temps (cas des matériaux linéaires), la formulation s'écrit :

$$\mathbf{rot} \left(\frac{1}{\mu} \mathbf{rot} \mathbf{E} \right) + \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mathbf{0} \quad (2.4.1)$$

Elle nécessite l'utilisation des éléments d'arêtes pour prendre en compte les conditions aux limites (de façon naturelle) et les discontinuités sur les composantes normales aux interfaces des champs de vecteur.

2.4.1.2 Formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique

$$AV - \mathbf{A}$$

Ce modèle de formulation utilise le potentiel vecteur magnétique \mathbf{A} dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique uniquement dans les régions conductrices[21, 6, 22, 23] .

En reprenant l'équation 2.3.21, on peut montrer que l'induction magnétique \mathbf{B} peut être considérée comme le rotationnel d'un potentiel vecteur magnétique \mathbf{A} tel que:

$$\mathbf{B} = \mathbf{rot} \mathbf{A} \quad (2.4.2)$$

De même en remplaçant 2.4.2 dans 2.3.22 on obtient :

$$\mathbf{rot} \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = \mathbf{0} \quad (2.4.3)$$

A partir de la relation précédente, nous pouvons définir un potentiel scalaire électrique v par la relation :

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\mathbf{grad} v \iff \mathbf{E} = -\mathbf{grad} v - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2.4.4)$$

La combinaison des équations 2.3.24 et 2.4.3 nous donne :

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \sigma \mathbf{E} = \mathbf{j}_s - \sigma \left(\mathbf{grad} v + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) \quad (2.4.5)$$

L'équation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire

électrique s'écrit :

$$\mathbf{rot} \frac{1}{\mu} \mathbf{rot} \mathbf{A} + \sigma \left(\mathbf{grad} v + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = \mathbf{j}_s \quad (2.4.6)$$

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

$$\mathit{div} \mathbf{J} = \mathit{div} \left(-\sigma \left(\mathbf{grad} v + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) \right) = 0 \quad (2.4.7)$$

Le potentiel vecteur n'étant défini qu'à un gradient près ($\mathbf{A} = \mathbf{A}_0 + \mathbf{grad} v$), l'unicité du potentiel doit être assurée par l'utilisation d'une jauge. En $\mathbf{A} - V$ la jauge de Coulomb semble être la plus efficace [6] :

$$\mathit{div} \mathbf{A} = 0 \quad (2.4.8)$$

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

$$- \mathbf{grad} \left(\frac{1}{\mu} \mathit{div} \mathbf{A} \right) \quad (2.4.9)$$

En posant la transformation :

$$v = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.4.10)$$

nous obtenons le système d'équations électromagnétique symétrique à résoudre, dit formulation $\mathbf{A} - V$:

$$\mathbf{rot} \left(\frac{1}{\mu} \mathbf{rot} \mathbf{A} \right) - \mathbf{grad} \left(\frac{1}{\mu} \mathit{div} \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{A} + \mathbf{grad} V) = \mathbf{J}_s \quad (2.4.11)$$

$$\mathit{div} \left(\sigma \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{A} + \mathbf{grad} V) \right) = 0 \quad (2.4.12)$$

2.4.2 Formulations de type magnétique

La relation vérifiée par le champ magnétique \mathbf{H} est obtenue en combinant les équations de Maxwell. Elle donne lieu à plusieurs formulations de type magnétique dont les deux principales sont : la formulation en \mathbf{H} et la formulation en $\mathbf{T} - \phi$.

2.4.2.1 Formulation en champ magnétique \mathbf{H}

En combinant les relations (2.3.23) et (2.3.24), nous obtenons l'équation à résoudre :

$$\mathbf{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \mathbf{rot} \mathbf{H} \right) + \frac{\partial \mu \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (2.4.13)$$

Cette équation associée à des conditions aux limites adéquates admet une solution unique. Cependant il faut assurer la continuité de la composante normale de l'induction magnétique, soit en terme de \mathbf{H} :

$$(\mu_1 \mathbf{H}_1 - \mu_2 \mathbf{H}_2) \cdot \mathbf{n} = 0$$

Cette relation implique la discontinuité de la composante normale de \mathbf{H} dans le cas de discontinuité de μ . Ceci rend la formulation beaucoup moins intéressante dans le cas des éléments finis nodaux. En revanche, elle est bien adaptée aux éléments d'arêtes puisque la continuité de la composante tangentielle de \mathbf{H} est vérifiée [4].7

2.4.2.2 Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique $\mathbf{T} - \phi$

En éléments finis nodaux, cette formulation est la duale de la formulation $\mathbf{A} - V$. En effet, lors qu'il n'y a pas d'accumulation de charge, l'équation de continuité s'écrit $\mathbf{div} \mathbf{J} = 0$ et permet de définir le potentiel \mathbf{T} , tel que $\mathbf{J} = \mathbf{rot} \mathbf{T}$. Comme pour la formulation $\mathbf{A} - V$, l'unicité de la solution nécessite l'introduction d'une jauge (*Jauge de Coulomb par exemple*); ce qui donne l'expression ci-dessous :

$$\mathbf{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \mathbf{rot} \mathbf{T} \right) - \mathbf{grad} \left(\frac{1}{\sigma} \mathbf{div} \mathbf{T} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \mu (\mathbf{T} + \mathbf{grad} \phi) = \mathbf{0} \quad (2.4.14)$$

$$\mathbf{div} \mu (\mathbf{T} - \mathbf{grad} \phi) = 0 \quad (2.4.15)$$

Chapter 3

Simulation de dispositif de CND-CF par ANSYS Maxwell

3.1 Introduction

Les outils numériques de simulation d'aujourd'hui sont devenus très performants grâce, d'une part aux avancées technologiques des machines (vitesse d'exécution, mémoire allouée), et d'autre part, aux développements de modèles numériques de plus en plus adaptés aux problèmes rencontrés. Cet outil est généralement intégré à une plate-forme de simulation, telle que ANSYS Maxwell. Ce logiciel, qui est en évolution permanente, constitue une plateforme pour toute modélisation de CND visant à caractériser des défauts.

Dans ce chapitre, tout d'abord, nous présentons le logiciel de simulation 3D ANSYS Maxwell. Ensuite, nous pourrions valider le modèle Benchmark TEAM Workshop N°15-1. Et après nous présentons la simulation numérique dans la quelle nous montrons l'effet de la forme de la fissure sur le signal à courant de Foucault. Enfin nous présentons les signatures des différentes formes des fissures.

3.2 ANSYS Maxwell

3.2.1 Description de Logiciel

ANSYS Maxwell est le premier logiciel de simulation du champ électromagnétique à basse fréquence destiné aux ingénieurs chargés de concevoir et d'analyser les dispositifs

électromagnétiques et électromécaniques **2-D** et **3-D**, y compris les moteurs, les actionneurs, les transformateurs, les capteurs et les bobines [Licence de logiciel, lorsque le laboratoire des systèmes électromagnétiques dirigés par mon promoteur le Colonel **Abdelhalim ZAOUI**].

3.2.2 Méthode de résolution utilisé

Logiciel ANSYS Maxwell utilise la méthode précise des éléments finis pour résoudre les équation aux dérivé partielle afin de calculer le champ électromagnétique et champ électrique statique, en régime fréquentiel et en régime temporelle.

3.2.3 Formulation utilisée

Il existe diverses formulations de champ électromagnétique variationnelles utilisant FEA pour résoudre numériquement les équations de Maxwell. Lors du choix de la bonne formulation à mettre en œuvre dans FEA, une manipulation mathématique spéciale est nécessaire afin d'éviter les solutions non physiques et de fournir une stabilité numérique et une efficacité informatique.

Ceci est réalisé en utilisant la formulation $\mathbf{T} - \phi$ et ceci peut être montré en partie en observant le tableau (Tableau 1).montre le stockage informatique et le ou les temps CPU calculés par ANSYS dans l'obtention de la solution à la fois pour la formulation de forme $\mathbf{T} - \phi$ et la formulation $\mathbf{AV} - V$, dans Conduite de cube dans un champ magnétique homogène[24]

	Taille du fichier de solution (MB)	Traitement du temps CPU	Solution de temps CPU	Résultats du temps CPU	Temps total du CPU
Formulation $\mathbf{T} - \phi$	39.6	18.9	12.2	39.4	83.9
Formulation $\mathbf{AV} - V$	134.8	21.9	22.1	51.9	113.7

Table 3.1 – Statistiques d'exécution et stockage informatique

3.2.4 Diagramme de résolution

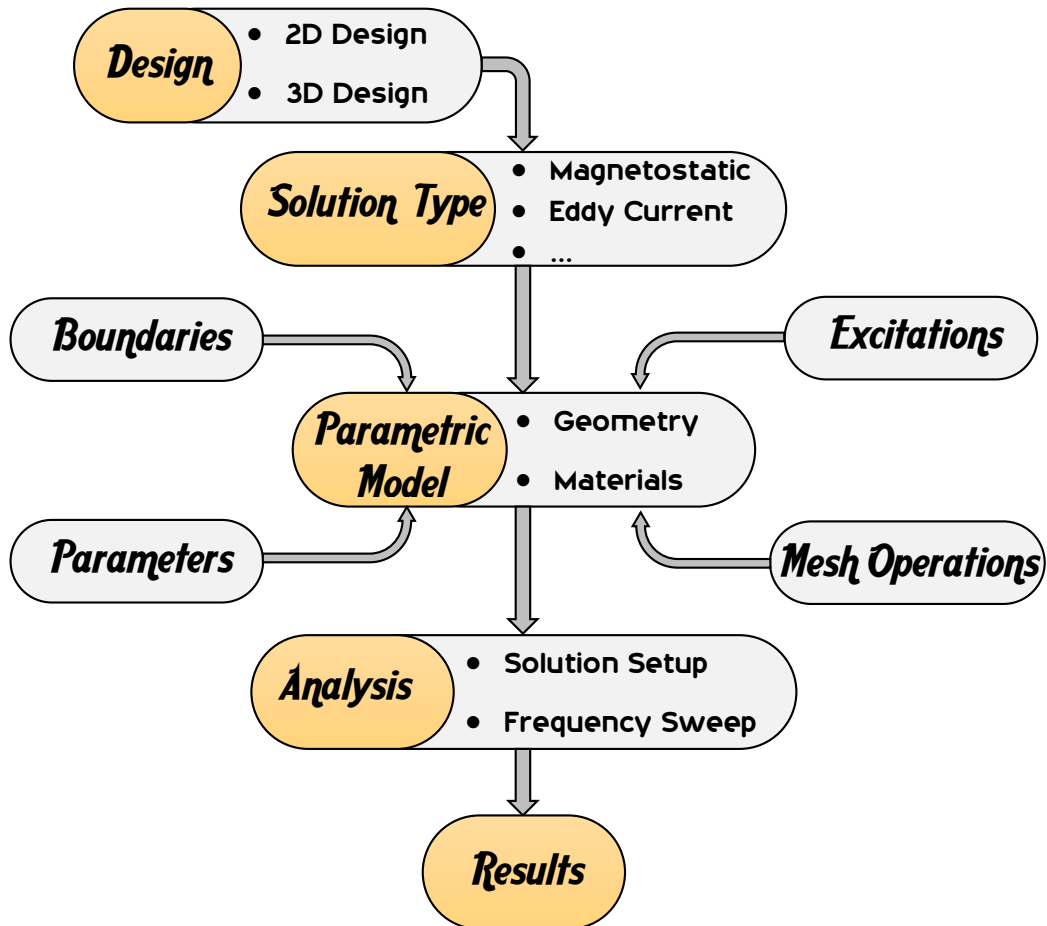


Figure 3.2.1 – Diagramme de résolution

3.3 Test de validité du modèle

3.3.0.1 Benchmark TEAM Workshop N°15-1

Il s'agit d'une bobine à air qui se déplace au dessus d'une plaque métallique comportant une fissure débouchante orientée selon l'axe Ox (figures 3.3.1 et 3.3.2). La fréquence et la distance bobine-pièce (*lift-off*) sont toutes les deux imposées.

Le résultat expérimental de ce benchmark donne les variations de la résistance ΔR et de l'inductance ΔL , donc de l'impédance $\Delta Z = Z_f - Z_0$, de la bobine mesurée en fonction de la position de celle-ci. Z_f est l'impédance de la bobine en présence de la fissure et Z_0 est l'impédance de la bobine sans fissure. Les différents paramètres sont listés dans le tableau 3.2.

L'avantage de ce Benchmark [25, 4] est qu'il fournit des signaux d'amplitudes importantes, du fait des grandes dimensions du défaut et de la bobine. L'épaisseur de la plaque est très grande par rapport à la profondeur du défaut. Ce dernier est une entaille longue par rapport aux défauts rencontrés dans la plupart des applications industrielles. Son ouverture est de $0.28mm$, le rapport ouverture sur longueur est de 2%, alors que le rapport profondeur sur la longueur est de 40%. L'ouverture est donc très petite par rapport aux autres dimensions.

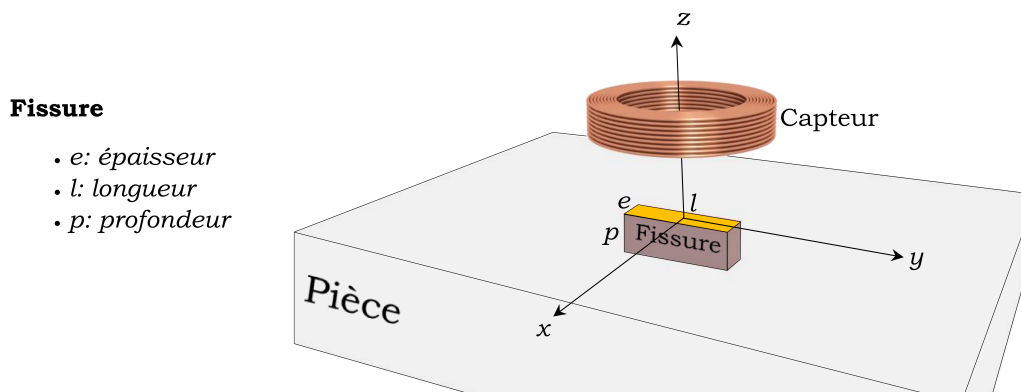


Figure 3.3.1 – TEAM Workshop Pb N°15-1

3.3.1 Validation

3.3.1.1 Création du modèle de simulation

Pour la création d'un nouveau modèle de simulation, nous avons fait un clic sur une nouvelle simulation, on choisit le type design (**3D Design**) et type de solution (**Courants de Foucault**). Nous présentons les étapes suivantes:

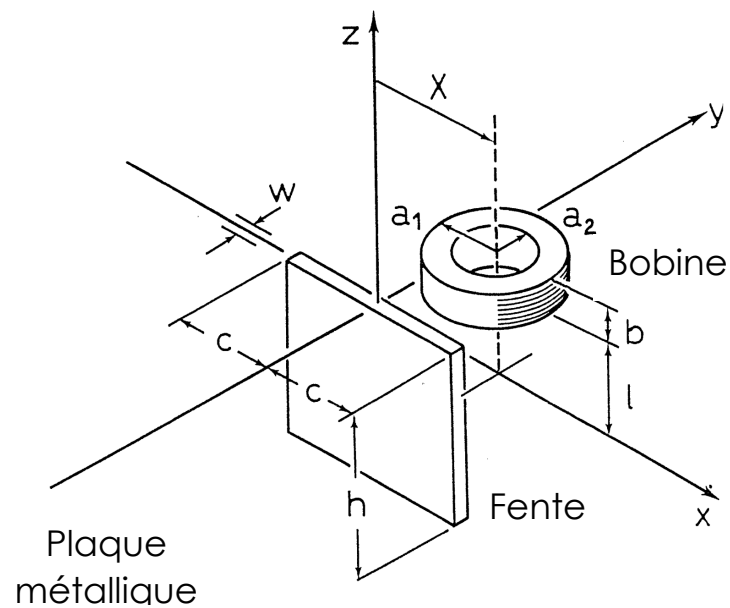



Figure 3.3.2 – Détail du TEAM Workshop Pb N°15-1

Bobine	
Rayon externe (a_1)	$12,40 \pm 0,05 \text{ mm}$
Rayon interne (a_2)	$6,15 \pm 0,05 \text{ mm}$
Hauteur (b)	$6,15 \pm 0,1 \text{ mm}$
Nombre de spires (N)	3790
Lift-off (l)	$0,88 \text{ mm}$
Spécimen	
Conductivité (σ)	$(30,6 \pm 0,20) \cdot 10^6 \text{ S/m}$
Épaisseur	$12,22 \pm 0,02 \text{ mm}$
Défaut	
Longueur ($2c$)	$12,6 \pm 0,02 \text{ mm}$
Profondeur (h)	$5,00 \pm 0,05 \text{ mm}$
Largeur (w)	$0,28 \pm 0,01 \text{ mm}$
Autres	
Fréquence	900 Hz
Épaisseur de peau (δ) à 900 Hz	3,04 mm

Table 3.2 – Paramètres du problème benchmark Team Workshop Pb N°15-1

❶ Création du modèle géométrique

Tout d'abord, nous insérons une plaque à l'aide d'un bouton (cube) dans la position $(-50,-75,0)$ et lui attribuons les dimensions suivantes $(100,150,-12.22)$ (Figure 3.3.3a) . En suite, nous insérons une bobine à l'aide de deux cylindres de même axe dont les dimensions sont respectivement $(R_1 = 12.4, H = 6.15)$ $(R_2 = 6.15, H = 6.15)$ (le tout dans la position $(0,dep,0.88)$ et avec l'opération de soustraction  comme le montre la Figure 3.3.3b. Aussi, Nous insérons le défaut artificiel à l'aide d'un cube dans la position $(-0.14,-6.3,0)$ dont les dimensions $(0.28,12.6,-3)$ pour créer le défaut dans la plaque, on procède à la l'opération de soustraction (Figure 3.3.3c). En outre, nous insérons une sphère d'air regroupant la plaque, la bobine et le défaut dans la position $(0,dep,3.5)$ et lui attribuons les dimensions $R_1 = 12.4$ pour supprimer l'intersection entre ces objets, on procédé à la l'opération de soustraction (Figure 3.3.3d).

Remarque:

✓**dep**: est un vecteur de décalage variant de -22mm à $+22\text{mm}$ avec un pas: 0.5mm .

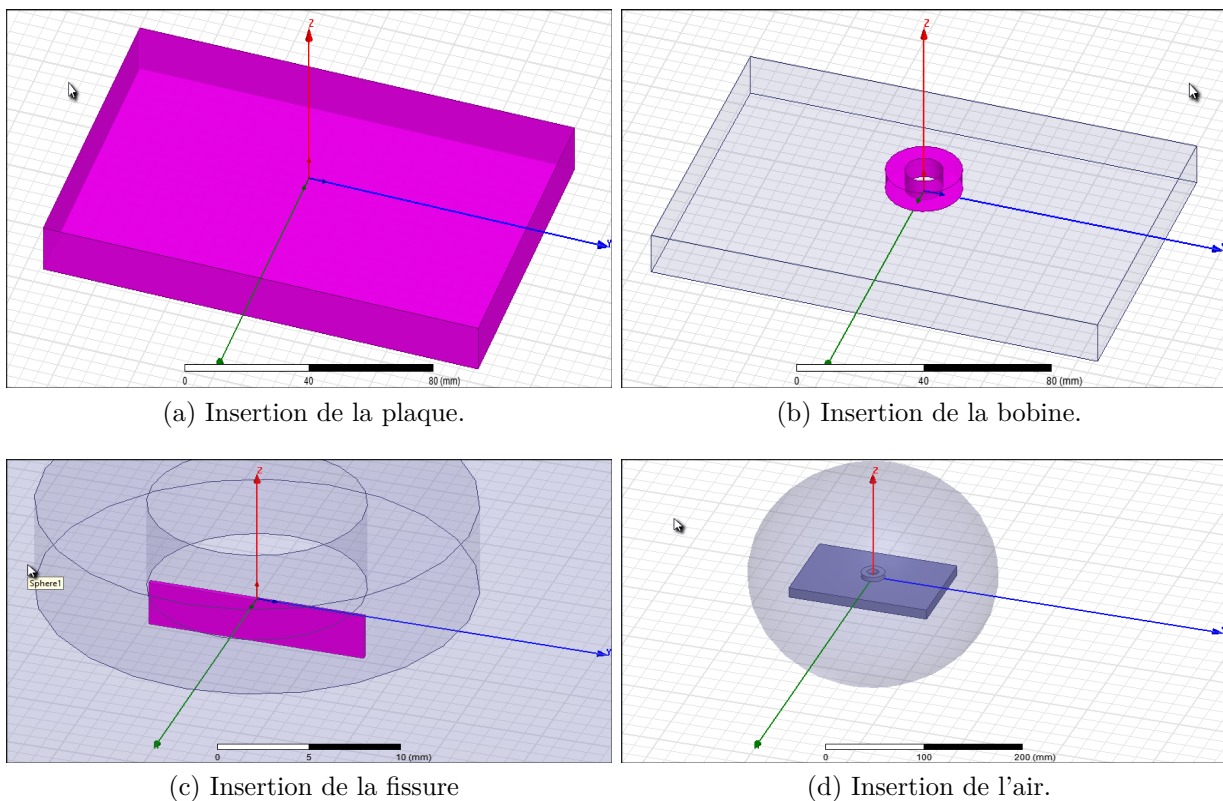


Figure 3.3.3 – Création du modèle géométrique.

● Ajout des propriétés du matériel composant la plaque

Nous introduisons dans chaque élément ses propriétés physiques, en sélectionnant l'élément que nous souhaitons lui donner les propriétés physiques puis on appuie sur le bouton

 Assign Material... voir la figure 3.3.4

nous introduisons dans la sphère et le défaut la même propriété physique que l'air et pour la bobine nous introduisons la même propriété physique que le cuivre.

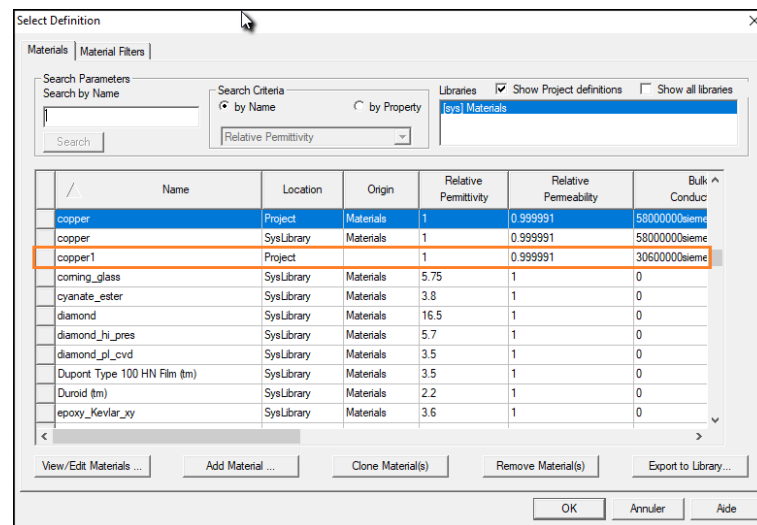


Figure 3.3.4 – Ajout des propriétés physiques.

● Conditions aux limites

Dans la Figure montre les condition aux limite du système.

3.3.5

● Maillage

les figures 3.3.6 représente l'introduction du maillage dans chaque élément.

● Excitations

la figure 3.3.7 illustre l'introduction du courant d'excitation dans le capteur.

● Solution Setup

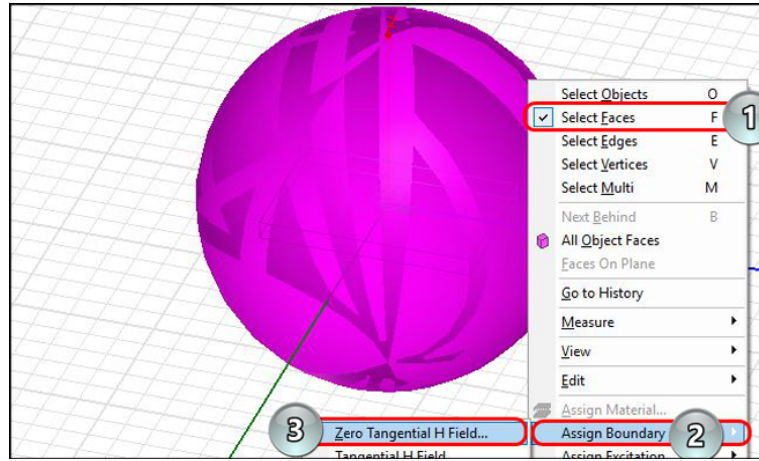
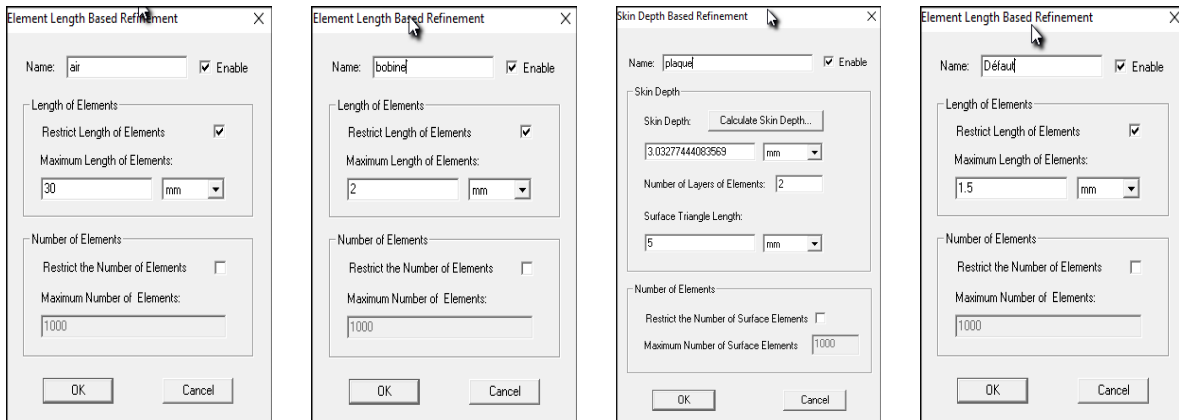


Figure 3.3.5 – Conditions aux limites



- (a) Introduction du maillage dans l'air. (b) Introduction du maillage dans la bobine. (c) Introduction du maillage dans la plaque. (d) Introduction du maillage dans le défaut.

Figure 3.3.6 – Maillage.

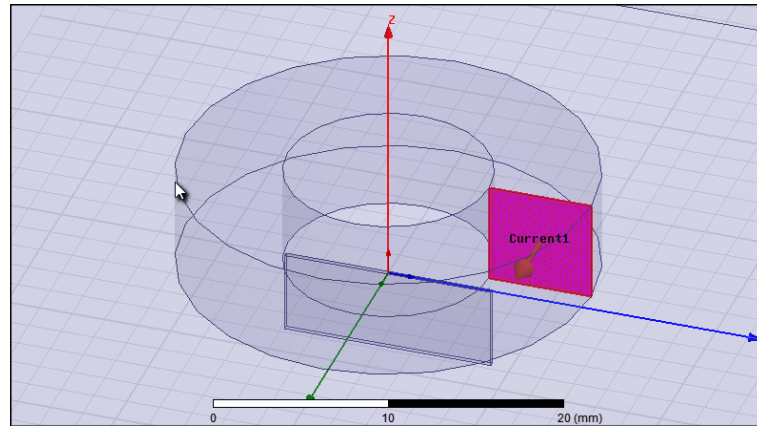


Figure 3.3.7 – Excitation du capteur.

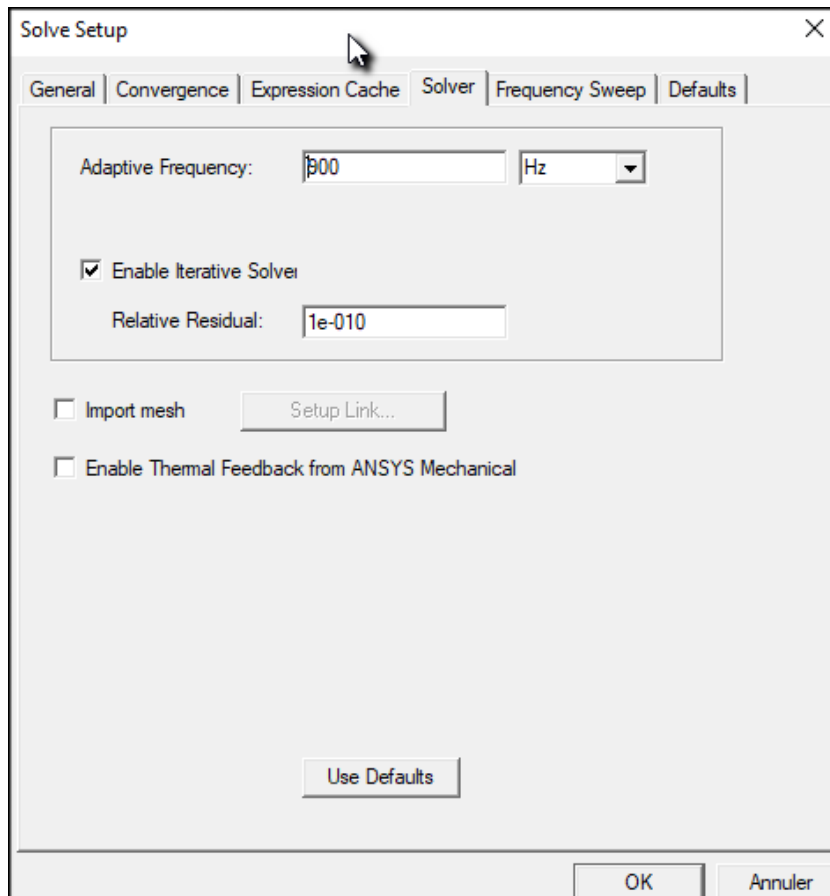




Figure 3.3.8 – Solution setup

3.3.1.2 Simulation et traitement des résultats

Après l'introduction de la géométrie du système et leurs propriétés physiques on appuie sur le bouton  pour valider la simulation puis on appuie sur le bouton  pour commencer la simulation. Les deux Figures suivantes (3.3.9 ,3.3.10) représentent la validation des résultats de la simulation obtenus qui sont: la variation de l'impédance en fonction du déplacement du capteur.

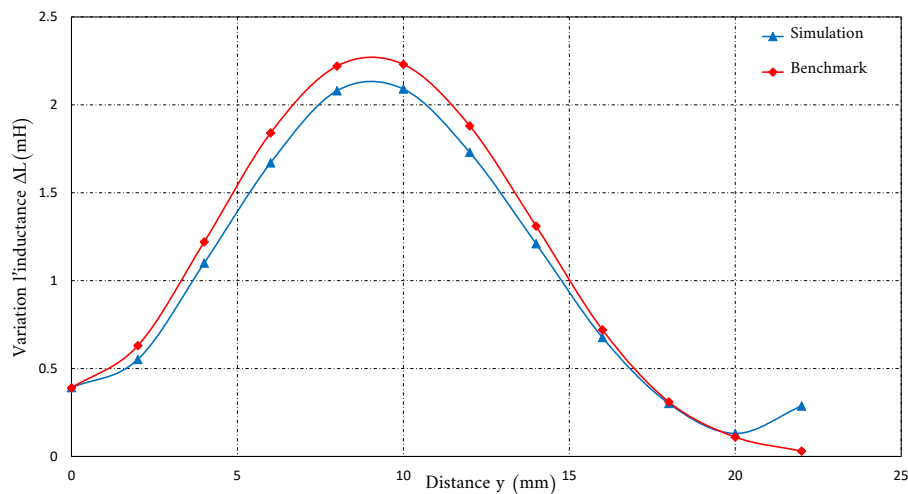


Figure 3.3.9 – Variation de l'inductance en fonction du déplacement du capteur.

Tenant compte des incertitudes de mesure, les résultats de nos calculs éléments finis sont en très bonne concordance avec les données expérimentales du Benchmark. Un décalage des résultats est noté au bord de la pièce. A notre avis, ceci est dû à l'effet de bord qui n'a pas été pris en considération durant l'expérience du Benchmark.

Remarque:

Nous utilisons pour les simulations station de travail du **Laboratoire Physique des Matériaux (LPM)** de l'université Amar Tlidji de Laghouat.

Spécifications techniques

 12 Cores	 64GB Memory	 1TB Internal Storage
--	---	--

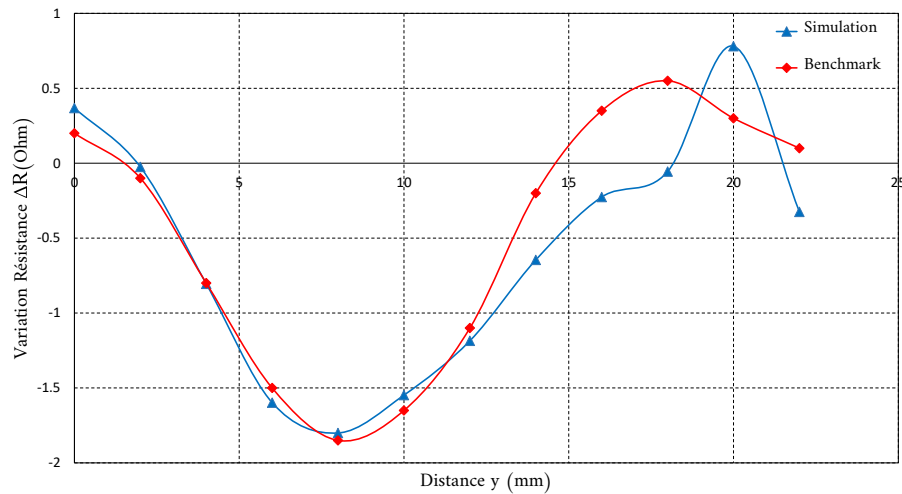


Figure 3.3.10 – Variation de la résistance en fonction du déplacement du capteur.

3.3.2 Effet de la forme de la fissure sur le signal CF

Dans cette partie et après la validation de notre système. On va étudier l'effet des différentes formes de la fissure sur le signal à courant de Foucault. Tout en jouant sur la variation de la hauteur en gardant la même longueur et la même largeur de la fissure en essayant de calculer la variation de l'impédance en fonction du déplacement du capteur à chaque forme de défaut.

Les figures suivantes représentent les résultats de la simulation obtenus. Nous avons remarqué qu'il y a un changement remarquable au niveau de la variation de l'impédance quand la forme des fissures change.

3.4 Conclusion

Tout d'abord, nous avons présenté le logiciel de simulation 3D ANSYS Maxwell. Ensuite, nous avons pu montrer le test de validité du modèle Benchmark TEAM Workshop N°15-1. Et après nous avons présenté la simulation numérique dans laquelle nous avons exposé l'effet de la forme de la fissure sur le signal à courant de Foucault. Enfin nous avons présenté les signatures des différentes formes des fissures. Alors nous avons conclu

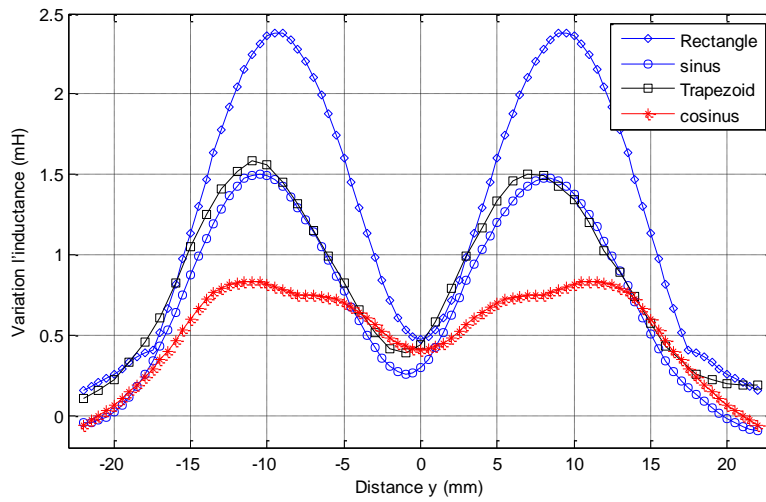


Figure 3.3.11 – Variation de l'inductance en fonction du déplacement du capteur.

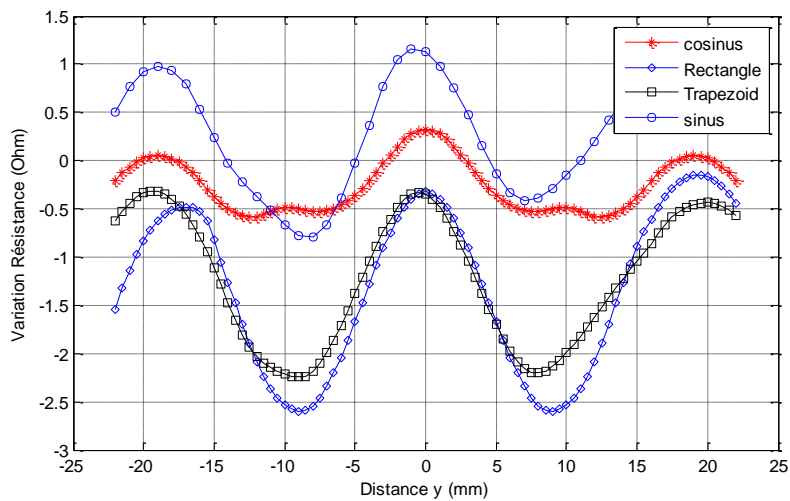


Figure 3.3.12 – Variation de la résistance en fonction du déplacement du capteur.

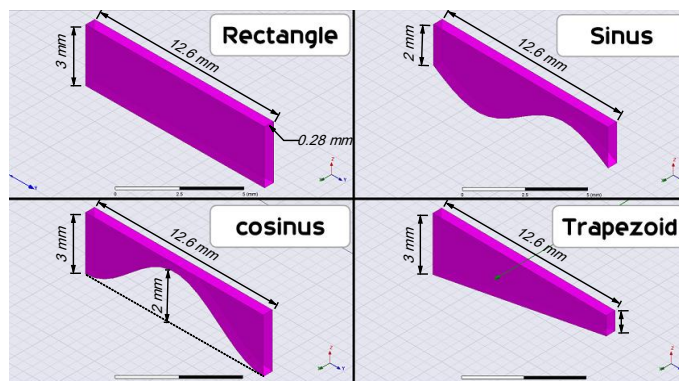


Figure 3.3.13 – Différentes formes de fissures.

qui il y a un changement remarquable au niveau de la variation de l'impédance quand la forme des fissures change.

Chapter 4

Dispositif expérimental du CND par CF

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus lors des essais pratiques faits à l'aide de prototype réalisé au niveau de laboratoire de physique des matériaux. Nous montrons la réalisation du prototype. En suite, nous présentons les signatures des différentes formes des fissures.

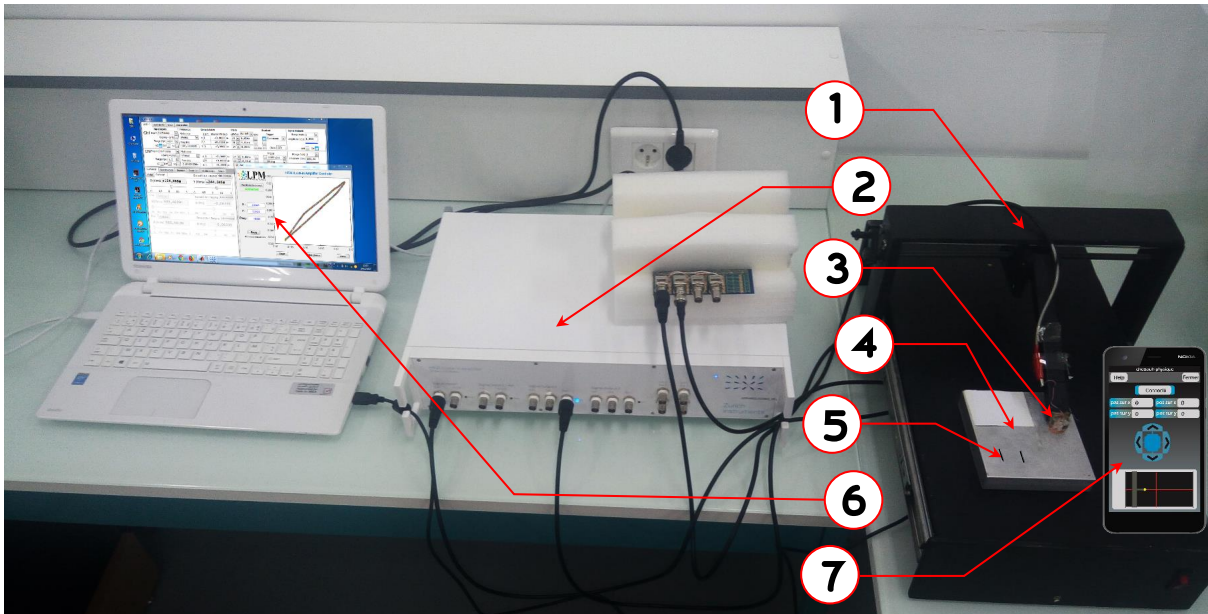
4.2 Dispositif expérimental et matériaux utilisés

L'ensemble du matériel utilisé dans cette expérimentation est pris en photographie dans la figure suivante. Il est composé de:

- un amplificateur à détection synchrone (lock in amplifier) qui mesure la variation de la tension au borne de l'impédance du capteur.
- un système de déplacement qui effectue les mouvements du capteur .
- un capteur à courant de Foucault.
- un échantillon de test, présenté à la section suivante.

4.2.1 Appareillage de mesure (Lock-in amplifier)

La détection synchrone est utilisée pour traiter le signal. Très souvent, le signal est de très faible amplitude et de haute fréquence et est noyé dans un bruit de mesure qui est,



- | | |
|--|------------------------------|
| 1 Système de déplacement de Capteur | 4 Échantillon de test |
| 2 HF2LI Lock-in Amplifier | 5 Fissure débouchant |
| 3 Capteur (bobine) | 6 Interface |
| 7 Application Android | |

Figure 4.2.1 – Montage expérimental.

lui, de très basse fréquence. La détection va servir à déterminer l'amplitude du signal bien qu'il soit minime. L'amplitude de ce signal peut être de l'ordre des *nanoVolts* et être détectée grâce à cette méthode. Pour pouvoir récupérer ce signal, il est isolé de toutes les autres fréquences et phases indésirées. Ainsi le bruit ne peut pas affecter la mesure. Pour pouvoir être isolé, il faut avoir une fréquence de référence. Pour réaliser cette mesure on utilise un amplificateur à détection synchrone ou « Lock-in amplifier » (figure 4.2.2) qui, afin d'extraire l'amplitude recherchée.



Figure 4.2.2 – Lock-in amplifier

4.2.1.1 Démodulation à double phases:

Dans une expérience typique, le dispositif sous test (DST) est stimulé par un signal sinusoïdal, comme le montre la figure 4.2.2. La réponse du dispositif $v_s(t)$ ainsi que le signal de référence $v_r(t)$ sont utilisés par l'amplificateur à détection synchrone pour déterminer l'amplitude V et la phase Θ . Ceci est réalisé en utilisant un circuit de démodulation à double phase, comme illustré sur la figure 4.2.3. Le signal d'entrée est divisé et multiplié séparément avec le signal de référence et une copie déphasée de 90° de celui-ci. Les sorties des mixeurs passent par des filtres passe-bas configurables, ce qui donne les deux sorties v_X et v_Y , appelées composantes en phase et en quadrature. L'amplitude V et la phase Θ sont facilement dérivées de v_X et v_Y par une transformation des coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires en utilisant la relation:

$$V = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (4.2.1)$$

$$\Theta = \text{atan2}(v_Y, v_X) \quad (4.2.2)$$

4.2.1.2 Mixage de signaux dans le domaine temporel

Les nombres complexes fournissent un formalisme mathématique élégant pour calculer le processus de démodulation. Nous utilisons la loi trigonométrique élémentaire pour réécrire le signal d'entrée $V_s(t)$ comme la somme de deux vecteurs dans le plan complexe :

$$v_s(t) = \frac{V}{\sqrt{2}}e^{+j(\omega_s t + \Theta)} + \frac{V}{\sqrt{2}}e^{-j(\omega_s t + \Theta)} \quad (4.2.3)$$

Le mixeur à double phases est exprimé mathématiquement comme une multiplication du signal d'entrée avec le signal de référence complexe

$$v_r(t) = \sqrt{2}e^{-j\omega_r t} = \sqrt{2}\cos(\omega_r t) - j\sqrt{2}\sin(\omega_r t) \quad (4.2.4)$$

Le signal complexe après mixage est donné par

$$v(t) = v_X(t) + jv_Y(t) = v_s(t) \cdot v_r(t) = V \left[e^{+j((\omega_s - \omega_r)t + \Theta)} + e^{-j((\omega_s + \omega_r)t + \Theta)} \right] \quad (4.2.5)$$

Le signal complexe après mixage est donné par Le filtrage subséquent est mathématiquement exprimé comme un moyennage des vecteurs mobiles dans le temps. Le filtrage supprime le terme de rotation rapide à $|\omega_s + \omega_r|$ en définissant $\langle \exp[-j(\omega_s + \omega_r)t + j\Theta] \rangle = 0$.

Le signal moyen après la démodulation dans le cas où les fréquences sont égales $\omega_s = \omega_r$, il devient

$$v(t) = V \cdot e^{j\Theta} \quad (4.2.6)$$

$$v_X = \text{Re}(V) = \langle v_s(t) \cos(\omega_s t) \rangle = V \cos\Theta, \quad (4.2.7)$$

$$v_Y = \text{Im}(V) = -\langle v_s(t) \sin(\omega_s t) \rangle = V \sin\Theta. \quad (4.2.8)$$

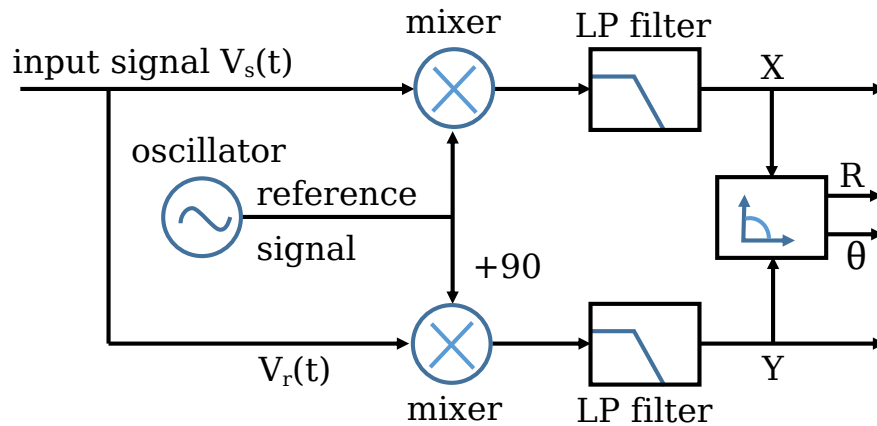


Figure 4.2.3 – Schéma du principe de Lock in Amplifier.

4.2.2 Capteur (bobine)

Le capteur utilisé est constitué d'une seule bobine (type pancake) à double fonction, c'est-à-dire que la fonction d'excitation et de réception sont assurées par le même enroulement. Ce capteur a été fourni par SCIENSORIA SARL et qui est tout à fait adapté à des modélisations du fait que l'on dispose de toutes les données nécessaires comme le montre le tableau 4.1 .


<i>Désignation</i>	<i>Caractéristiques</i>		<i>Observations</i>
	Diamètre extérieur	9 mm	<ul style="list-style-type: none"> ● Bobine plate de forme très régulière ● L'impédance mesurée est en très bonne adéquation avec le modèle théorique de Dodd et Deeds [Sciensoria]
	Diamètre intérieur	02 mm	
	Hauteur	01.5mm	
	Nombre de spires	800	
	Epaisseur d'une couche	0.07 mm	
	Conductivité du fil	Celle du Cuivre	
	Fréquence de résonance	$f_c = 717$ kHz	
	Diamètre du fil	0.06 mm	

Table 4.1 – Données de la bobine

4.2.3 Matériaux utilisés

Afin de pouvoir comparer différentes mesures effectuées, il est nécessaire d'utiliser un jeu des différentes formes des fissures. Une pièce échantillon en Aluminium, ayant une conductivité électrique $\sigma = 38,5MS \cdot m^{-1}$.

4.2.4 Étalons

Sur cette pièce échantillon, des fissures avec différentes formes ont été usinées avec des moyens personnels. Ces défauts, représentés sur la figure 4.2.4, sont débouchant et représentatifs des défauts recherchés sur les pièces aéronautiques. Ils ont des dimensions précisément définies :

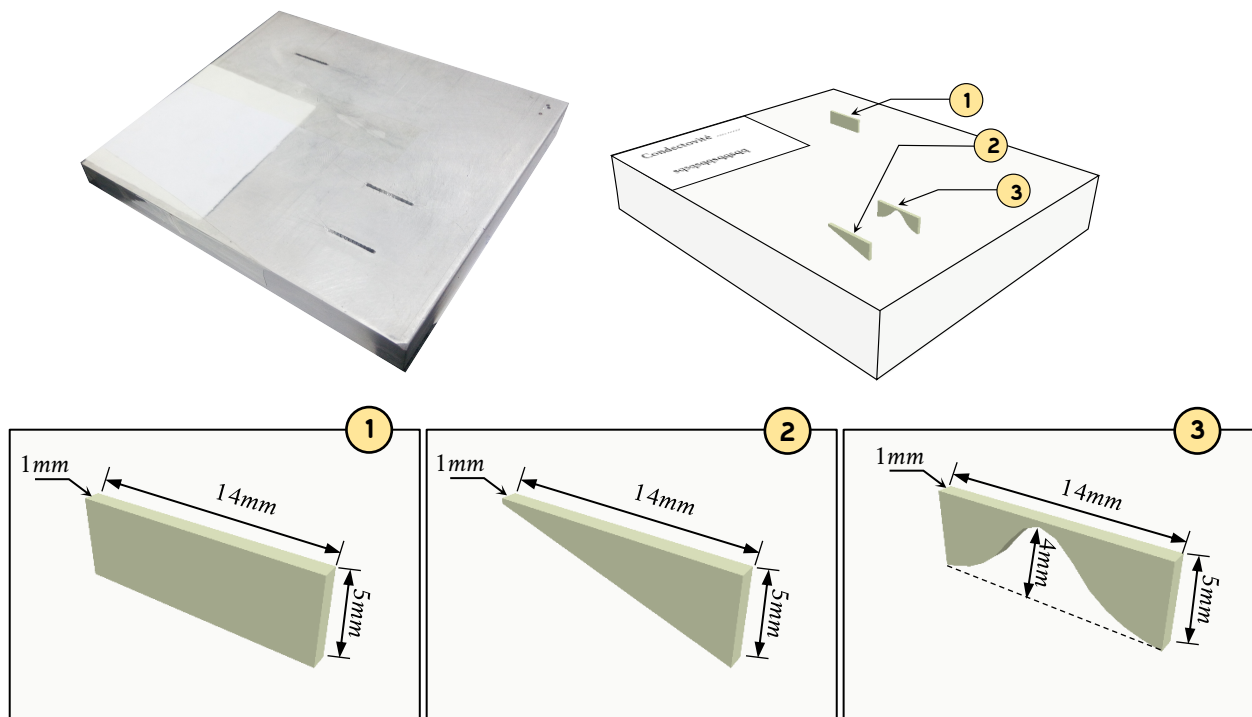


Figure 4.2.4 – Forme des fissures

4.2.5 Système de déplacement du Capteur

Notre système de déplacement du capteur (figure 4.2.5) est constitué de 3 grandes parties:

1. Partie Commande: c'est une application Android conçue par nous-même dans le but de transmettre des signaux pour effectuer des mouvements (déplacement du capteur).

2. Partie Électronique: formée de:

- un module Bluetooth sa fonction est de recevoir des signaux du téléphone et de les transmettre à l'Arduino;

- la carte Arduino (open source) sa fonction est de transmettre les signaux pour faire commander les moteurs pas à pas;

- deux moteurs pas à pas leur but est de tourner les deux vis trapézoïdaux pour avoir le mouvement sur le deux axes x et y .

3 Partie Mécanique: est un concept fait de bois (isolant ne perturbe pas les mesures) et contient :

- un support du capteur;
- deux vis trapézoïdaux.

4.3 Mesures expérimentales

4.3.1 Stratégie

On réalise le montage comme le montre la Figure 4.2.1. Nous avons fait les mesures de la variation d'impédance au bornes du capteur avec un pas de déplacement de 0.5mm et en même temps nous visualisons la signature $X = f(R)$ du défaut à l'aide d'une interface graphique sous MATLAB (Figure 4.3.1). On reprend les mêmes opérations pour les deux autres formes de défauts (Figure 4.3.2).

Nous exposons les différentes courbes obtenues dans la partie suivante :

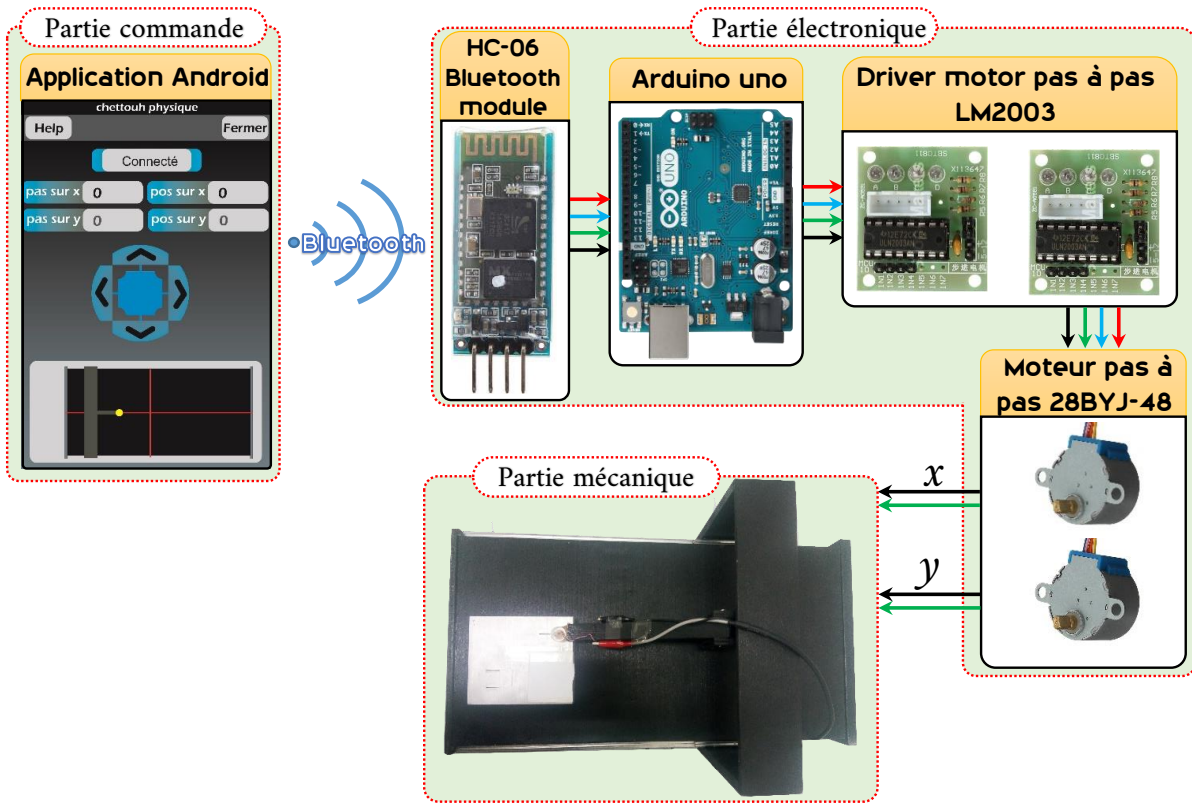


Figure 4.2.5 – Système de déplacement du Capteur.

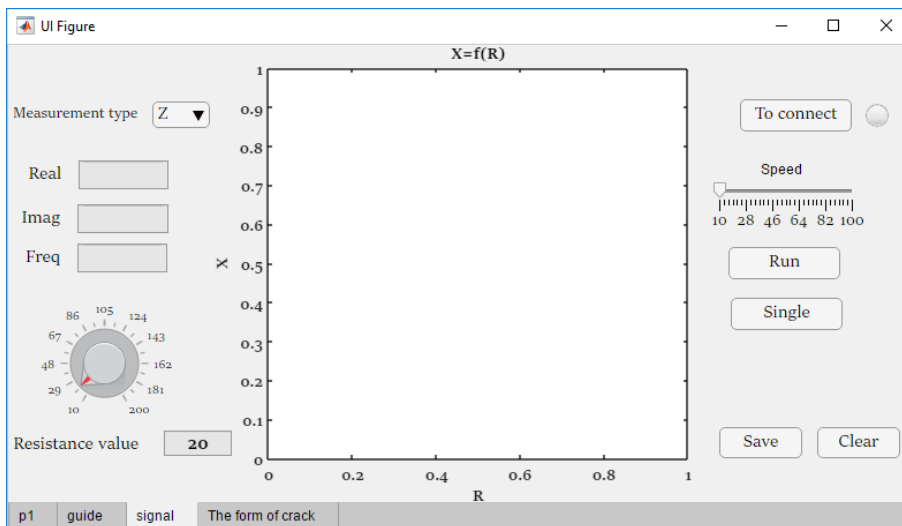


Figure 4.3.1 – Interface graphique sous MATLAB.



Figure 4.3.2 – Banc d'essai expérimental.

4.3.2 Méthode de calcul de l'impédance à l'aide de l'amplificateur Lock-in

L'amplificateur à détection synchrone ne mesure pas l'impédance du capteur mais la tension aux bornes de celui-ci. C'est pour cela, nous avons utilisé une méthode indirecte pour la mesure de l'impédance du capteur comme c'est montré dans la figure 4.3.3 et aussi par l'utilisation des formules suivantes :

$$Z = \frac{v_B}{I}$$

$$v_R = R.I \implies I = \frac{v_R}{R} \quad (4.3.1)$$

$$Z = \frac{v_B}{v_R} . R \quad (4.3.2)$$

$$v_G = v_{In1}$$

$$v_R = v_{In2}$$

$$v_B = v_G - v_R = v_{In1} - v_{In2}$$

$$Z = \frac{v_{In1} - v_{In2}}{v_{In1}} . R \quad (4.3.3)$$

Les figures suivantes montre le montage expérimental et le schéma électrique explicatif pour mesurer l'impédance Z du capteur

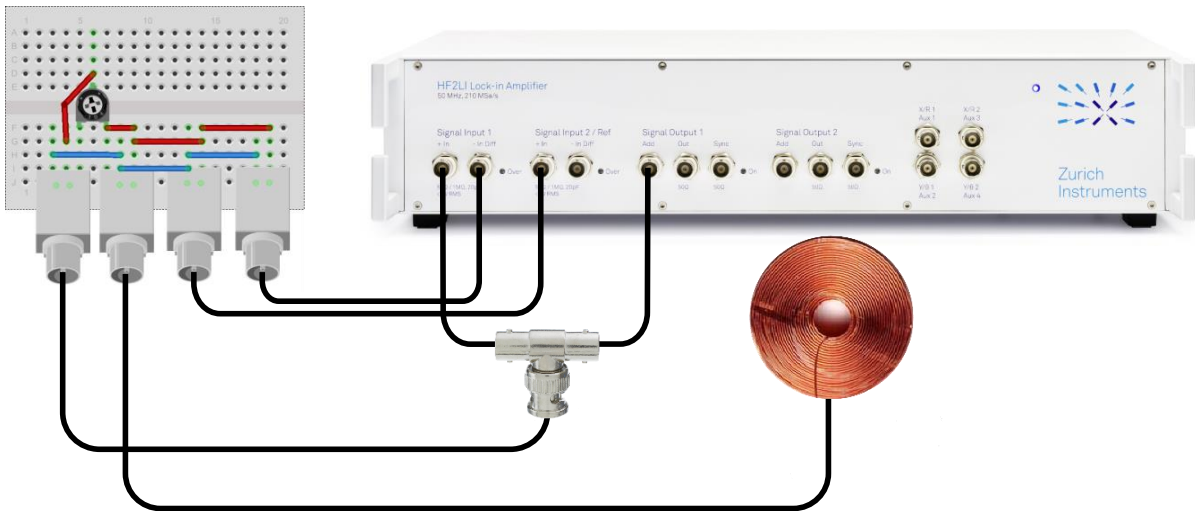


Figure 4.3.3 – Montage expérimental.

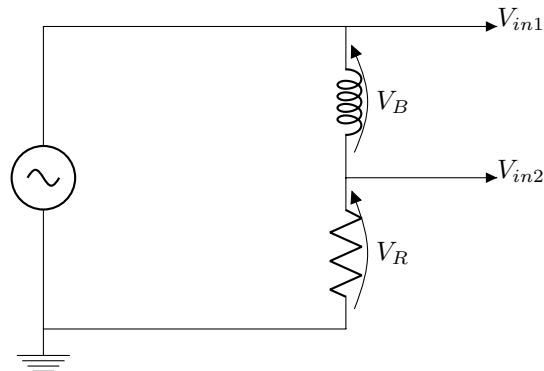


Figure 4.3.4 – Schéma électrique.

4.3.3 Représentations des signaux

Les figures suivantes représentent les signatures des différentes formes des fissures. Nous remarquons qu'il y a une meilleure distinction entre ces différentes formes de défauts.

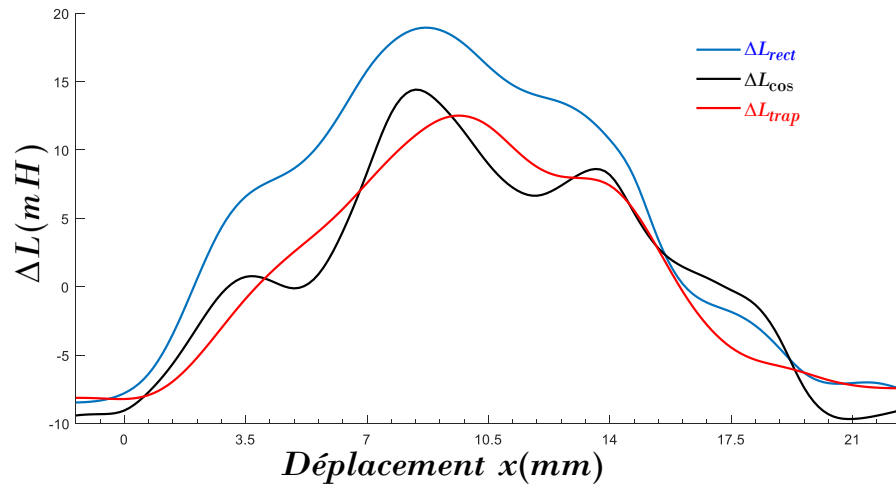


Figure 4.3.5 – Variations de l'inductance en fonction du déplacement du capteur pour trois formes de défauts.

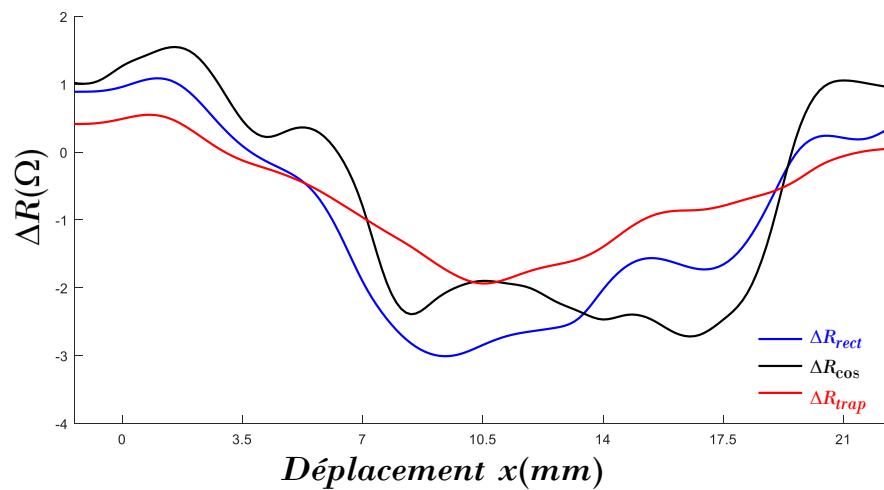


Figure 4.3.6 – Variations de la résistance en fonction du déplacement du capteur pour trois formes de défauts.

4.4 Validation expérimental

Pour la validation, nous avons utilisé le signal du défaut d'une fissure rectangulaire dans la simulation numérique dans le but de créer une base de données pour l'apprentissage des réseaux de neurones et les autres signaux sont utilisés pour le traitement du problèmes inverse.

Après avoir crée le modèle numérique et lui avoir attribué l'excitation du capteur, les caractéristique physique et les conditions aux limites, nous avons abstenu les courbes suivantes.

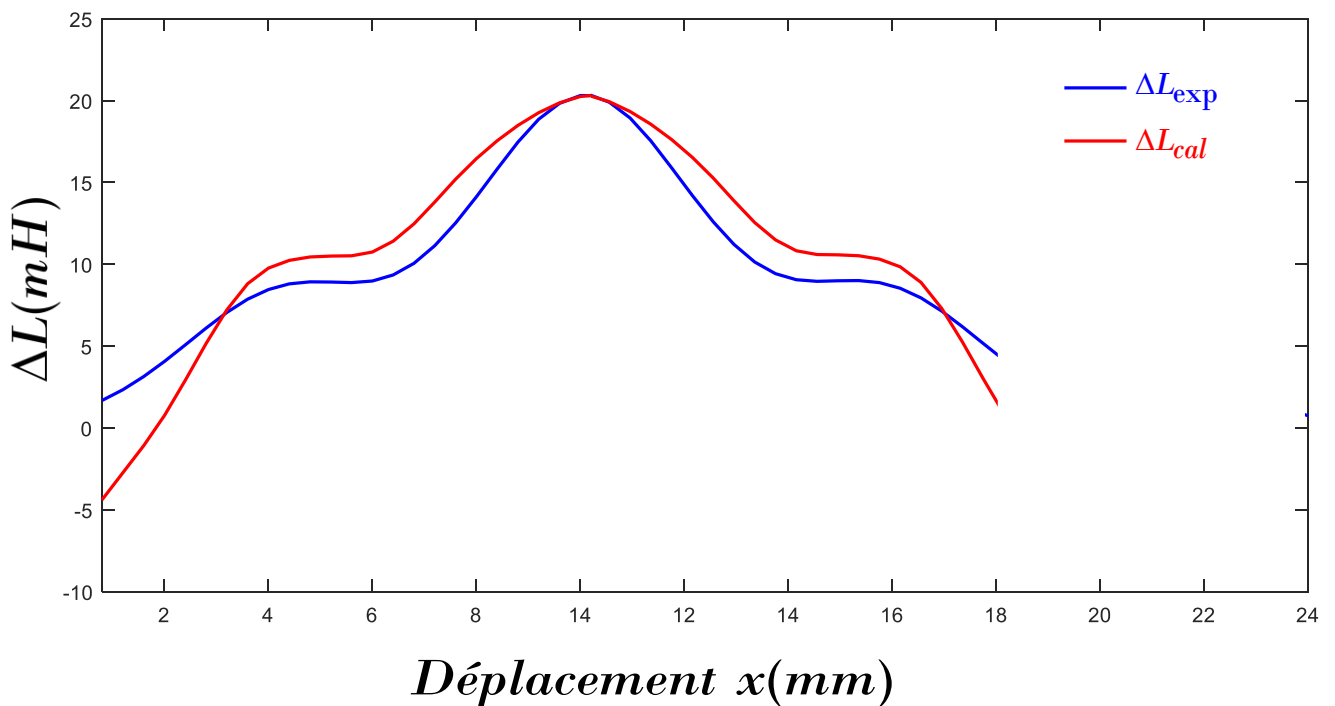


Figure 4.4.1

Tenant compte des incertitudes de mesure, les résultats de nos calculs éléments finis sont en très bonne concordance avec les données expérimentales . Un décalage des résultats est noté au bord de la pièce. A notre avis, ceci est dû à l'effet de bord qui n'a pas été pris en considération durant l'expérience .

4.5 Conclusion

Nous avons abordé l'aspect pratique de ce projet qui consiste en la réalisation du prototype avec la carte Arduino pour rendre le système autonome. Nous avons aussi présenté l'ensemble des signatures des différentes formes des fissures obtenus lors des essais pratiques. Nous avons conclu que il y a une meilleure distinction entre ces différentes formes des défauts.

Chapter 5

Identification de la fissure à partir de technique d'inversion

5.1 Introduction

Dans le chapitre 3 nous avons abordé le problème direct qui consistait à construire un modèle mathématique reliant les caractéristiques géométriques de la fissure aux signaux CF. L'objectif de ce modèle était la construction d'une base de données en vue de leur inversion.

Ce chapitre est consacré, à l'étude du traitement du problème inverse. Cette partie concerne la présentation des réseaux de neurones que nous avons mis en œuvre pour résoudre les problèmes inverses rencontrés dans le CND CF.

5.2 Problème Inverse

Le problème inverse a pour objectif de reconstruire un ou plusieurs paramètres de la cible, qui sont inconnus à partir de la réponse du capteur. Pour remonter aux grandeurs d'intérêt à partir des grandeurs observées (différentes acquisitions issues du capteur CF), il faut naturellement connaître la relation de dépendance les liant. Cette logique implique l'existence de deux grandes étapes dans la résolution de tout problème inverse[16]:

- La construction et le développement d'un modèle direct reliant les caractéristiques physiques et géométriques de la pièce testée aux signaux CF, représentatif de la réalité physique et adapté à des fins d'inversion.

- L'inversion des grandeurs observées en s'appuyant sur la résolution de ce modèle direct.

La figure 5.2.1 représente de manière générale le schéma d'étude de tout problème inverse.

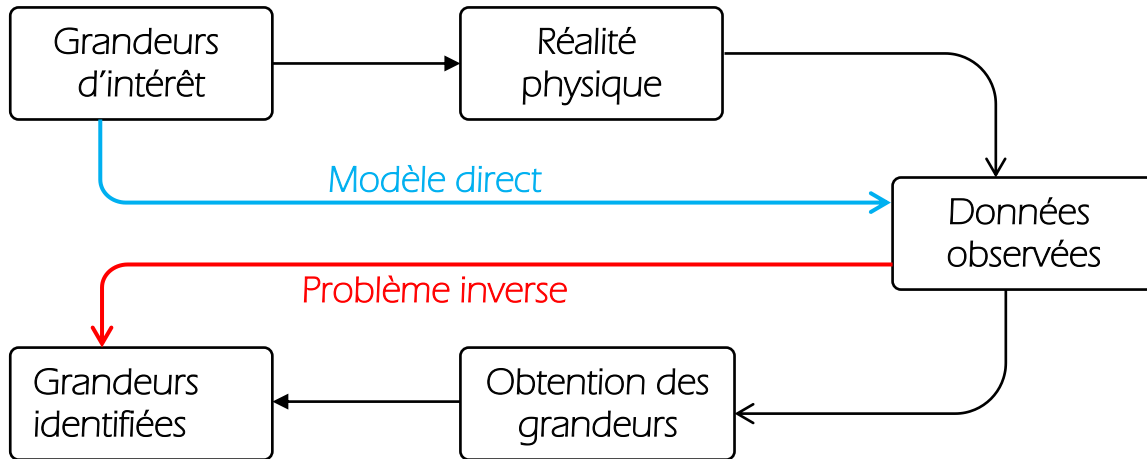


Figure 5.2.1 – Schéma d'étude général d'un problème inverse

Deux types d'inversions existent : si le modèle utilisé est exécuté plusieurs fois, il s'agit d'une inversion itérative ; dans le cas contraire, l'inversion est directe.

5.2.1 Inversion itérative

Cette technique d'inversion nécessite l'utilisation du modèle direct. Si la solution du modèle direct ne peut pas être inversée de façon mathématique, ce qui est souvent le cas, elle est insérée dans une boucle itérative. La sortie de la mesure est comparée à celle donnée par le modèle direct (Figure 5.2.2). Un algorithme de minimisation d'erreur permet alors de minimiser l'écart (exemple : erreur quadratique moyenne (EQM)) entre le modèle direct et la mesure. Le processus est itératif, et se poursuit jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait. Le critère d'arrêt généralement utilisé est lié ou bien au nombre d'itérations maximal ou bien au critère d'erreur qui doit alors être inférieure à un seuil prédéfini.

À condition d'avoir un modèle peu coûteux en calcul et avec le progrès de la capacité de calcul des ordinateurs, l'inversion itérative peut être rapide et efficace. Cependant, si le modèle analytique n'est pas disponible, la même procédure peut-être exécutée en utilisant un modèle numérique comme modèle direct. L'inconvénient de ce type d'inversion à partir

d'un modèle numérique est son temps d'exécution. En effet, un modèle numérique peut être coûteux en calcul, et le temps mis pour un calcul dépend fortement de la complexité de la géométrie. Par conséquent, le temps de résolution du problème direct peut-être très élevé. Sachant que la résolution du problème inverse requiert la minimisation de la fonction d'erreur entre les données mesurées et celles calculées par le modèle, le modèle direct est sollicité plusieurs fois avant d'atteindre la précision demandée. De plus, certaines études nécessitent de répéter plusieurs fois la résolution du problème direct pour chaque itération pour différentes configurations. Par conséquent, la minimisation de la fonction d'erreur doit être répétée pour chaque configuration. Ceci a pour conséquence d'avoir un temps d'inversion qui devient prohibitif [26] .

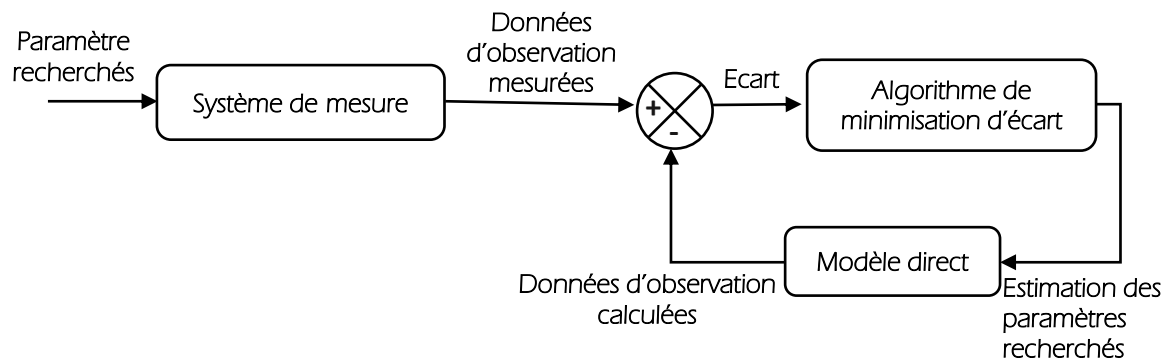


Figure 5.2.2 – Schéma du processus itératif d'inversion.

5.2.2 Inversion directe

Dans de rares cas, pour des problèmes dont la solution analytique est très simple, on peut explicitement inverser le modèle direct afin d'évaluer les paramètres recherchés. L'absence d'itération dans ce cas permet d'avoir une inversion plus rapide que celle précédemment citée. L'inversion se présente sous la forme symbolique suivante (Figure 5.2.3) :

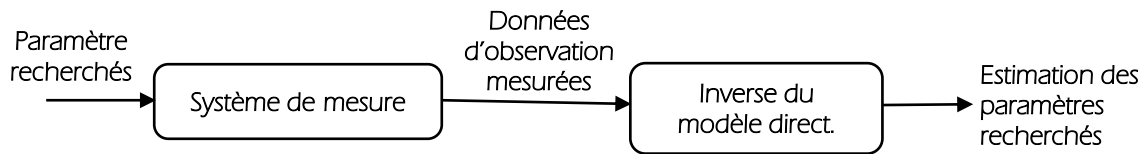


Figure 5.2.3 – Schéma du processus d'inversion directe utilisant l'inverse du modèle direct.

Cependant, pour la plupart des problèmes électromagnétiques, la solution analytique peut être très difficile à obtenir, par conséquent il n'est pas possible de faire de l'inversion directe. Dans ce cas, on peut cependant utiliser un modèle inverse paramétrique dont on règle les paramètres internes à l'aide d'une base de données obtenue par simulation ou par des moyens expérimentaux. Cette base contient des exemples connus de couples paramètres recherchés/ données d'observation. La procédure est similaire à la précédente mais avec l'inverse du modèle direct remplacé par le modèle inverse paramétrique (Figure 5.2.4).

Une fois ce modèle inverse établi, l'inversion pour des données issues de la mesure peut être très rapide car ce type d'inversion ne fait pas appel à des itérations successives [26].

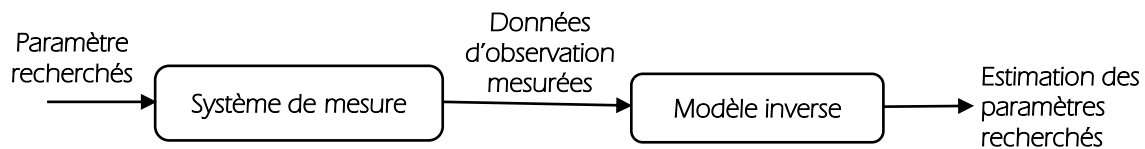


Figure 5.2.4 – Schéma du processus d'inversion directe basé sur un modèle d'inverse.

5.3 Résolution de problème inverse avec des réseaux de neurones

5.3.1 Neurone biologique

Un neurone est une cellule nerveuse qui est un élément de base du système nerveux central, il se compose essentiellement de :

❶ **Corps cellulaire (soma):** il est centré par un noyau, toutes les informations recueillies par les synapses sont acheminées vers le corps cellulaire.

❷ **Synapse:** une synapse est une jonction entre deux neurones ; et généralement entre l'axone d'un neurone et une dendrite d'un autre neurone.

❸ **Dendrites:** ce sont de fines extensions tubulaires qui se ramifient autour du neurone et forment une sorte de vaste arborescence. Elles captent les signaux envoyés au neurone.

❹ **L'axone:** qui est la partie qui s'occupe de la transmission de l'information issue du corps cellulaire ; conduisant des signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée d'un autre neurone. [27]

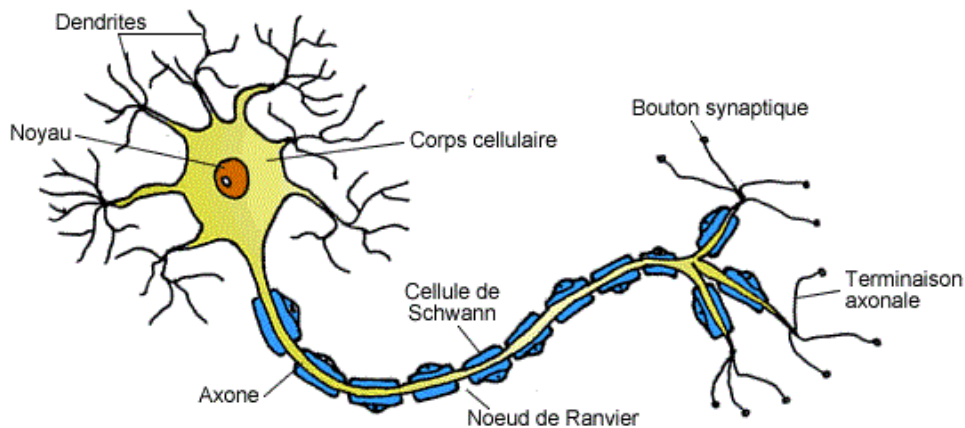


Figure 5.3.1 – Représentation schématique d'un neurone biologique.

5.3.2 Neurone artificiel

Un réseau de neurone (RN) est un réseau artificiel basé sur un modèle simplifié du neurone biologique. Les RN dont il est question dans ce travail sont issus d'une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain. Les premiers travaux datent de 1943 et sont l'œuvre de McCulloch et Pitts [28]. Ils inventèrent le premier neurone formel. Ils supposèrent que l'impulsion nerveuse est le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée naît grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurones interconnectés. La figure (V.4) montre la structure d'un neurone formel [26]. Chaque neurone formel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amonts. À chacune de ces entrées est associé un poids représentatif de la force de

la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. A chaque connexion est associé un poids.

Le comportement mathématique d'un neurone formel est défini comme suit : Le neurone formel réalise tout d'abord la somme pondérée des entrées (x_1, \dots, x_n) par les poids (w_1, \dots, w_n) des connexions auxquels on ajoute un biais (b_0) . Ensuite, cette valeur est soumise à une fonction d'activation f_a dont le résultat constitue la sortie Y du neurone (Figure 5.3.2).

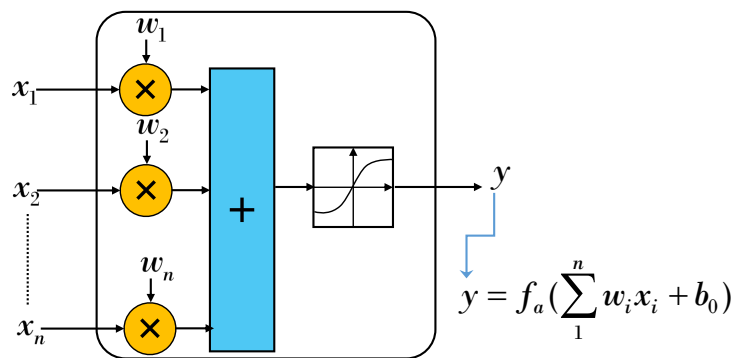


Figure 5.3.2 – Représentation d'un neurone artificiel

D'après la description ci-dessus, la sortie du neurone est donnée par :

$$y = f_a\left(\sum_1^n w_i x_i + b_0\right) \quad (5.3.1)$$

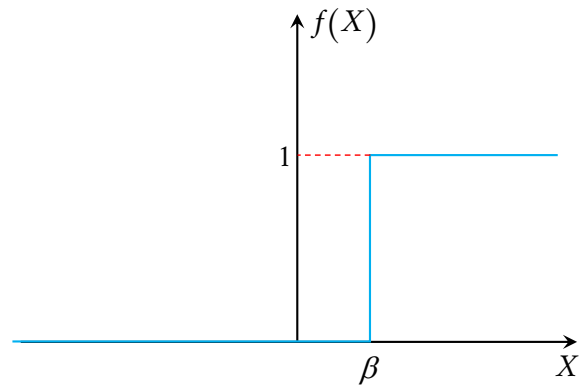
Le comportement d'un neurone est totalement décrit par la valeur de ses connexions (poids et biais) et par sa fonction d'activation. Le choix de la fonction d'activation est d'une grande importance. Il dépend de l'application à étudier. On verra plus loin qu'il est recommandé d'utiliser pour une fonction « sigmoïde » (une fonction symétrique en forme de « s »), telle que la fonction tangente hyperbolique [26].

5.3.3 Fonctions d'activation

La fonction d'activation définit le potentiel de sortie d'un neurone en termes de niveaux d'activité de ses entrées. Il existe plusieurs fonctions d'activations, les plus utilisées sont :

5.3.3.1 Fonction seuil asymétrique (hard limite)

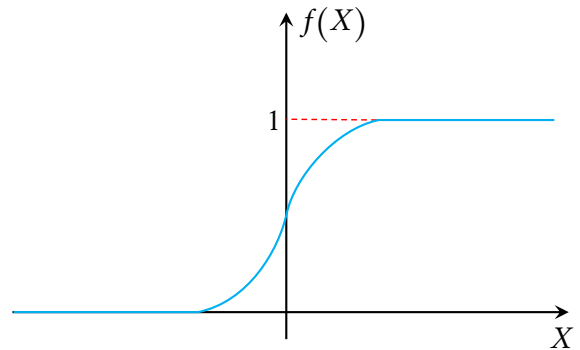
$$\blacksquare f(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } X > \beta \\ 0 & \text{si } X \leq \beta \end{cases}$$



5.3.3.2 Fonction Sigmoide

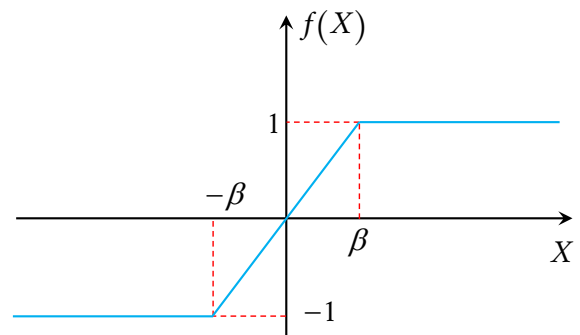
$$\blacksquare f(X) = \frac{1}{1+e^{-bX}}$$

b : Gain de la fonction d'activation



5.3.3.3 Fonction saturation

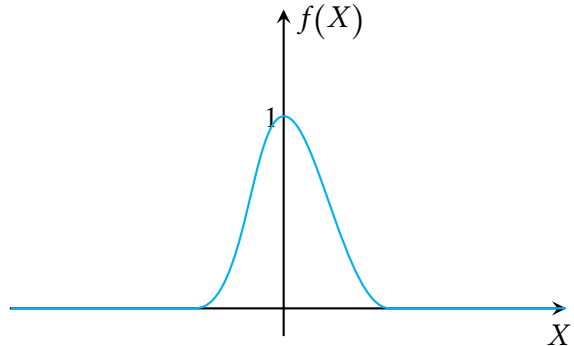
$$\blacksquare f(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } X > \beta \\ X & \text{si } -\beta < X < \beta \\ -1 & \text{si } X < -\beta \end{cases}$$



5.3.3.4 Fonction gaussienne centrée

■ $f(X) = \exp(-\frac{1}{2} \frac{X^2}{\sigma^2})$

σ : L'écart type de la gaussienne.



5.3.4 Réseaux de neurones

Tel que nous venons de le voir précédemment, un neurone réalise une fonction non linéaire de ses entrées. Cependant, un seul neurone n'est pas suffisant dans la plupart des applications et il faudra généralement associer plusieurs neurones entre eux. L'association en réseau de plusieurs neurones permet la composition des fonctions non linéaires réalisées par chacun des neurones, ce qui est particulièrement souhaitable pour des systèmes modélisés dont le comportement n'est pas simple.

Cette combinaison de cellules neurones est appelée réseau de neurones artificiels, dont la structure, la géométrie et les méthodes d'apprentissages seront étudiées dans les rubriques suivantes.

5.3.4.1 Composition d'un réseau de neurones

Un RNA est constitué généralement de trois couches :[29]

■ **Une couche d'entrée** : Elle est constituée de l'ensemble des neurones du réseau qui reçoivent les données du problème. Sa taille est donc déterminée directement par le nombre de variables d'entrée.

■ **Une couche de sortie** : Elle est constituée de l'ensemble des neurones de sortie du réseau. C'est cette couche là qui fournit les résultats du problème.

■ **Une ou plusieurs couches cachées** : Ce sont les couches qui se trouvent entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles définissent l'activité interne du réseau. En général, les fonctions d'activations sont non linéaires sur ces couches.



Figure 5.3.3 – Architecture d'un réseau de neurones

5.3.4.2 Architecture des réseaux de neurones

Il existe principalement deux catégories de RN : les réseaux de neurones non bouclés (aussi appelé feed forward) et les réseaux de neurones bouclés (aussi appelé récurrent). Le feed forward est représenté par un ensemble de neurones connectés entre eux dont l'information circule de l'entrée vers la sortie sans retour vers l'arrière (Figure 5.3.4a). La sortie de ce type de réseaux ne dépend pas du temps. Le sens des flèches de la Figure 5.3.4 indique le sens de parcours de l'information. Dans les RN récurrents, l'information peut aussi circuler d'un neurone vers celui qui précède (Figure 5.3.4b). Ainsi la sortie d'un neurone peut aussi dépendre d'elle-même. Le choix de l'un ou de l'autre des deux types de RN dépend de l'application traitée [26].

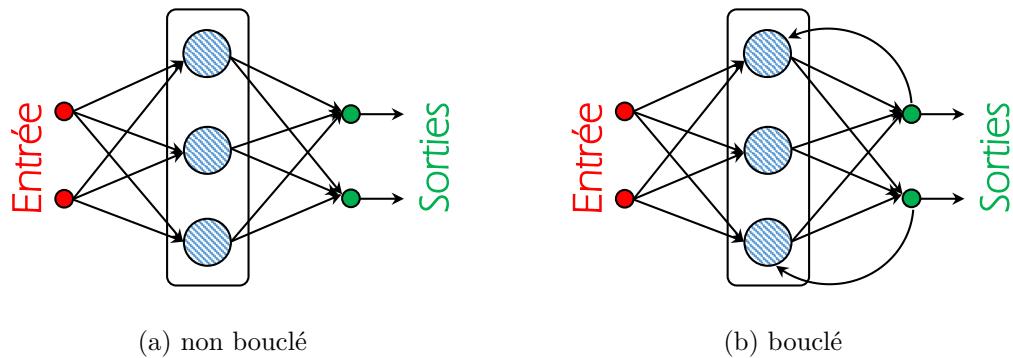


Figure 5.3.4 – Exemples de RN

Dans ce travail de mémoire, nous nous sommes intéressés aux RN non bouclés. Les RN bouclés sont généralement utilisés pour effectuer des tâches de modélisation de systèmes dynamiques qui dépendent du temps.

Il existe plusieurs types de réseaux non bouclés, mais dans la pratique, ceux qui sont les plus utilisés sont ceux du type MLP (Multi Layer Perceptron).

Les RN MLP sont des réseaux dont les neurones sont organisés en plusieurs couches successives (Figure 5.3.5). Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche.

Chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones des couches précédente et suivante. On appelle entrée l'ensemble des paramètres d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées. Pour une même couche, les neurones ont la même fonction d'activation. La sortie du RN est obtenue directement après l'application du signal d'entrée, au temps de propagation de l'information près [28].

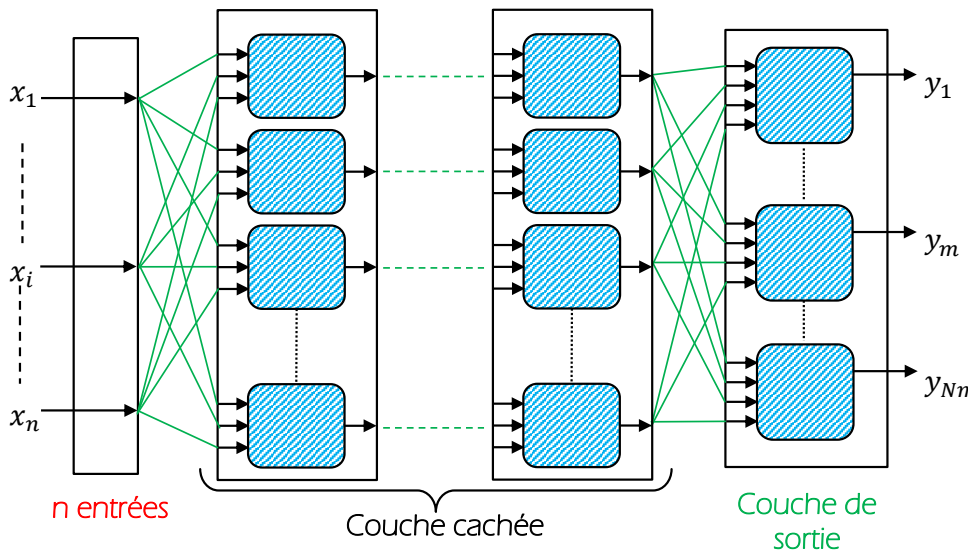


Figure 5.3.5 – Structure d'un RN MLP

5.3.5 Apprentissage des réseaux de neurones

On distingue deux types d'apprentissages : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

5.3.5.1 Apprentissage supervisé

Ce type d'apprentissage consiste à présenter au RN un ensemble d'entrées et de sorties qui est obtenu soit à partir d'un modèle direct soit à partir de mesures. Les exemples, en nombre fini, pour lesquels l'entrée et la sortie désirée sont connues, sont contenus dans

une base qu'on appelle base d'apprentissage. La tâche du RN est de minimiser un critère d'erreur sur cette base d'apprentissage. En ce sens du terme, on dit que l'apprentissage est « supervisé », c'est-à-dire qu'on fournit au réseau des exemples de ce qu'il doit faire.

Le réglage des poids se fait de manière itérative. Les exemples de la base d'apprentissage sont présentés une première fois au RN. Ensuite la sortie du RN est comparée avec celle contenue dans la base pour tous ces exemples. Le critère d'erreur entre ces deux sorties est par la suite minimisé de façon itérative par un algorithme de minimisation ajustant les paramètres internes du RN. Ce principe d'apprentissage est illustré (Figure 5.3.6) [26].

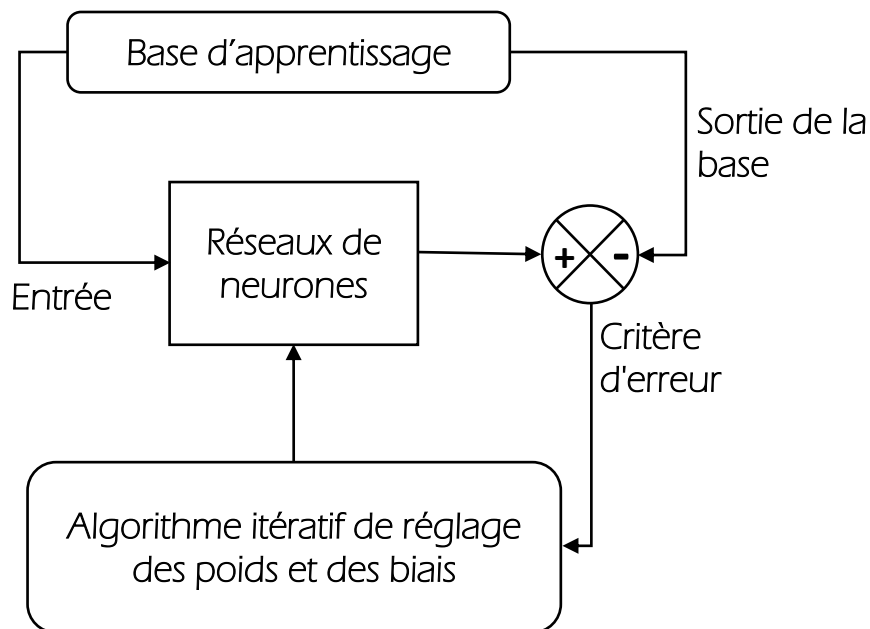


Figure 5.3.6 – Schéma du principe d'apprentissage d'un RN.

5.3.5.2 Apprentissage non supervisé

Cette méthode se distingue de l'apprentissage supervisé par le fait qu'il n'y a pas de sortie a priori connue pour l'apprentissage. Dans l'apprentissage non-supervisé, il y a en entrée un ensemble de données collectées qui est traité par le RN comme des variables aléatoires et le réseau construit un modèle de densité pour les regrouper selon des critères de ressemblance qui sont inconnus a priori. Cet apprentissage est surtout utilisé dans un

but de visualisation ou d'analyse de données. Ce type d'apprentissage n'est pas utilisé dans ce travail de mémoire, puisque ce qu'on désire réaliser est de l'approximation de fonction et non pas de l'analyse ou de l'organisation de données inexploitablees telles quelles [26].

5.4 Stratégie de traitement du problème inverse

Le problème inverse est résolu par l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA). Dans ce travail. Le paramètre recherché étant la forme de la fissure, celui-ci est obtenu en sortie des RNA. Les autres paramètres, la partie réelle et la partie imaginaire des variations des impédances normalisées $Re(\Delta Z)$, $Im(\Delta Z)$ constituent l'entrée (voir la Figure 5.4.1).

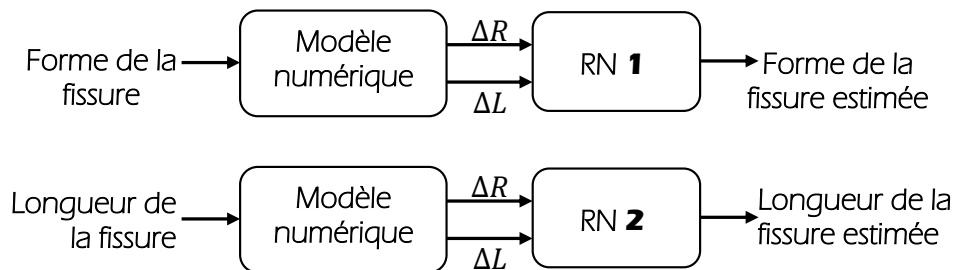


Figure 5.4.1 – Inversion par RN

5.4.1 Création de bases de données

Après avoir validé le modèle numérique, nous avons créé deux bases d'apprentissages : la première consiste à identifier les formes des défauts (voir la Figure 5.4.2) et la deuxième a la possibilité d'identifier la longueur des défauts (voir la Figure 5.4.3).

5.4.2 Inversion par RN MLP

Afin de développer une structure optimale du réseau neuronal, nous avons effectué plusieurs apprentissages en variant les paramètres du réseau tels que la fonction d'activation,

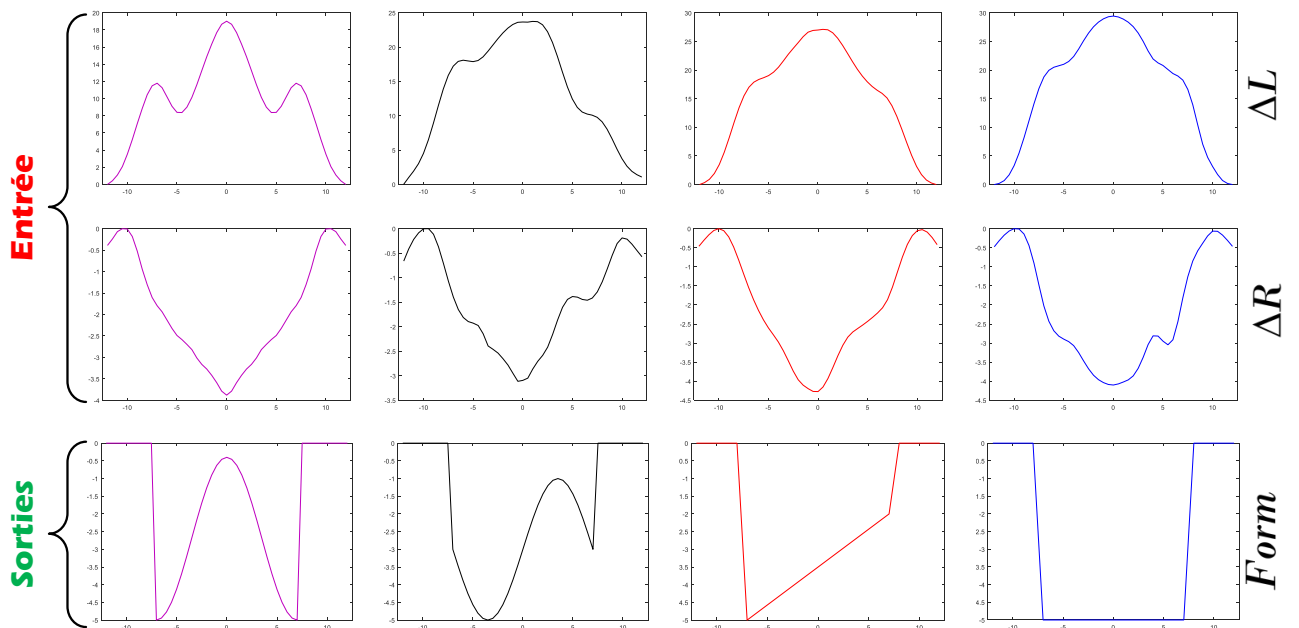


Figure 5.4.2 – Courbes d’entrées et sorties du RN1 pour l’identification de la formes des défauts.

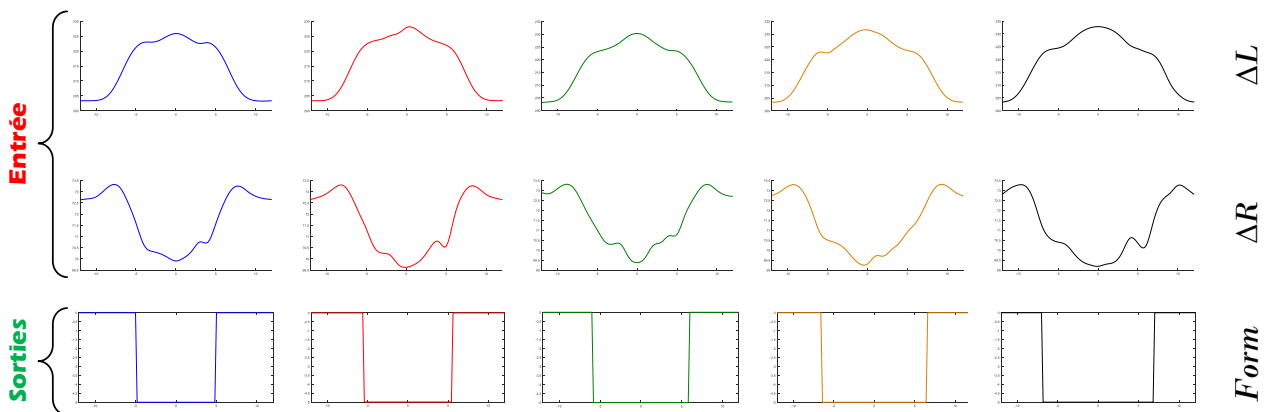


Figure 5.4.3 – Courbes d’entrées et sorties du RN2 pour l’identification de la longueur des défauts.

le nombre de couches cachées, le nombre de neurones dans chaque couche, l'algorithme d'apprentissage, ainsi que le pas d'apprentissage. Finalement nos choix sont orientés de la sorte :

❖ **Réseaux de neurones (RN 1) pour l'identification des formes des défauts.**

Les RNA utilisés sont de type MLP (Multi Layer Perceptron) contenant seulement 2 couche cachée ayant [10-30] neurones à fonction d'activation type tangente sigmoïde et une couche de sortie contenant un seul neurone à fonction d'activation linéaire. L'apprentissage est effectué au moyen de l'algorithme de Levenberg- Marquardt (Figure 5.4.4) .

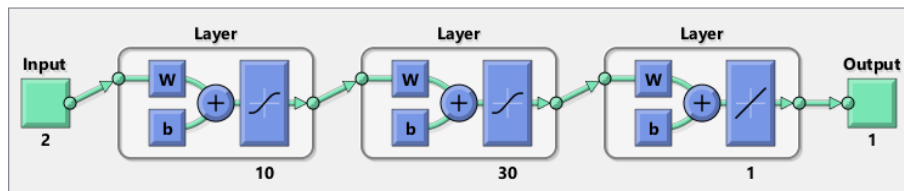
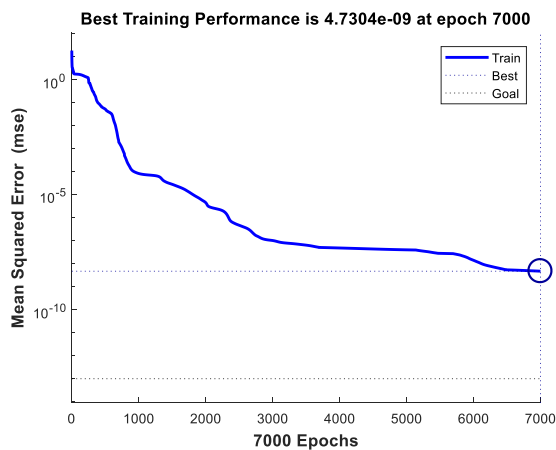
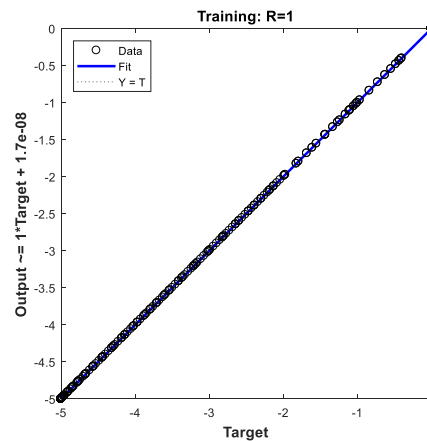


Figure 5.4.4 – Schéma de RN1 pour l'identification des formes des défauts.



(a) l'évolution de l'erreur quadratique moyenne



(b) La corrélation entre la sortie désirée et la sortie du réseau

Figure 5.4.5

Les Figures (5.4.5a) et (5.4.5b) représentent respectivement l'évolution de la fonction coût qui dans notre cas est définie par l'erreur quadratique moyenne (EQM), nous remarquons qu'elle décroît suivant le nombre d'itérations (epochs) jusqu'à ce qu'elle arrive au minimum que nous avons imposé. Pendant que la deuxième figure représente la régression linéaire entre la sortie désirée et la sortie du réseau, nous remarquons qu'il y a une très bonne corrélation entre ces valeurs.

● Réseaux de neurones (RN 2) pour l'identification de la longueur des défauts.

Pour l'évaluation des différentes longueurs du défaut, nous allons adopter le même réseau de neurones (avec un changement du nombre de neurones dans les couches cachées [10-20]) (Figure 5.4.6) , et la même stratégie d'apprentissage utilisés précédemment, sauf qu'ici la sortie du réseau sera la valeur de Longueurs. En conséquence la base d'apprentissage va changer et sera différente pour chaque longueur.

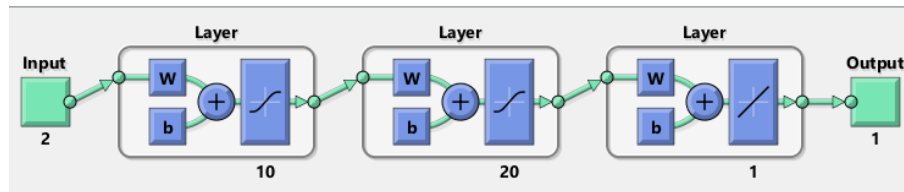


Figure 5.4.6 – Schéma de RN 2 pour l'identification de la longueur des défauts.

5.4.3 Validation des résultats

Le résultat de l'inversion est représenté en Figures (5.4.8,5.4.9). Ce résultat montre clairement que l'inversion par RN est très bien réalisée pour l'estimation de la forme des fissures.

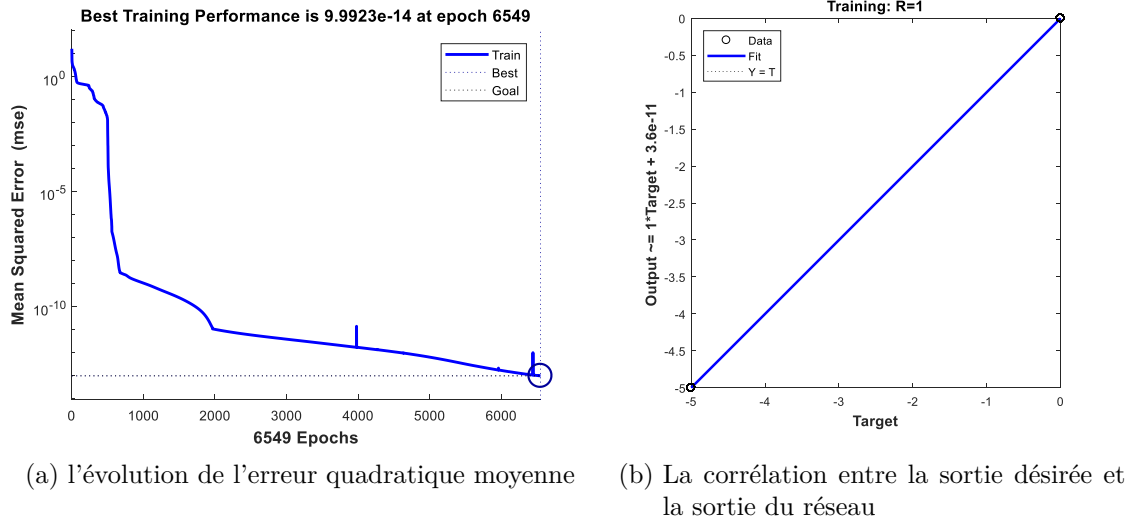


Figure 5.4.7

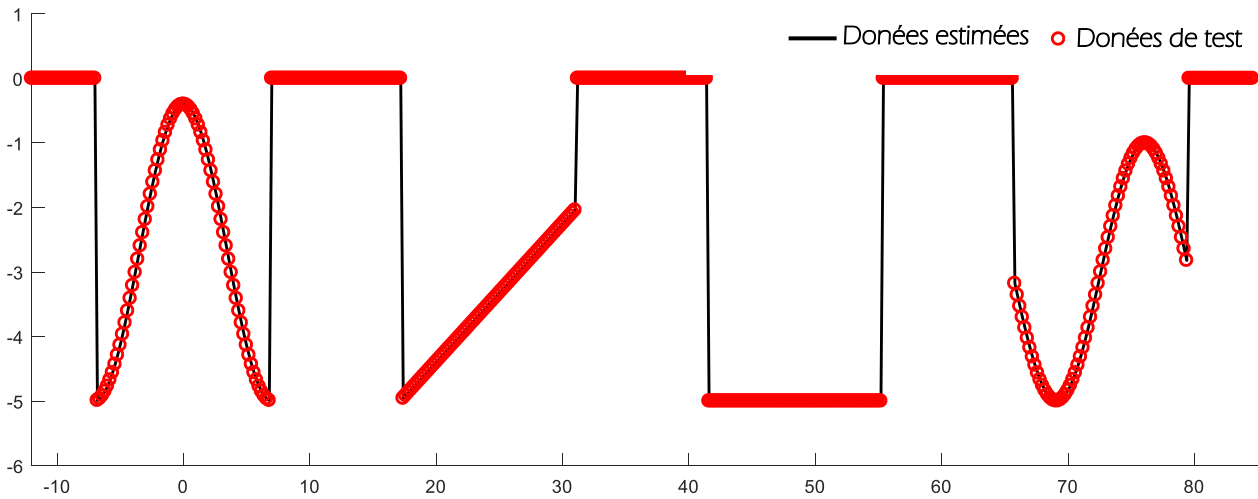


Figure 5.4.8 – Résultats de l'inversion sur la base de test pour l'identification des formes des défauts.

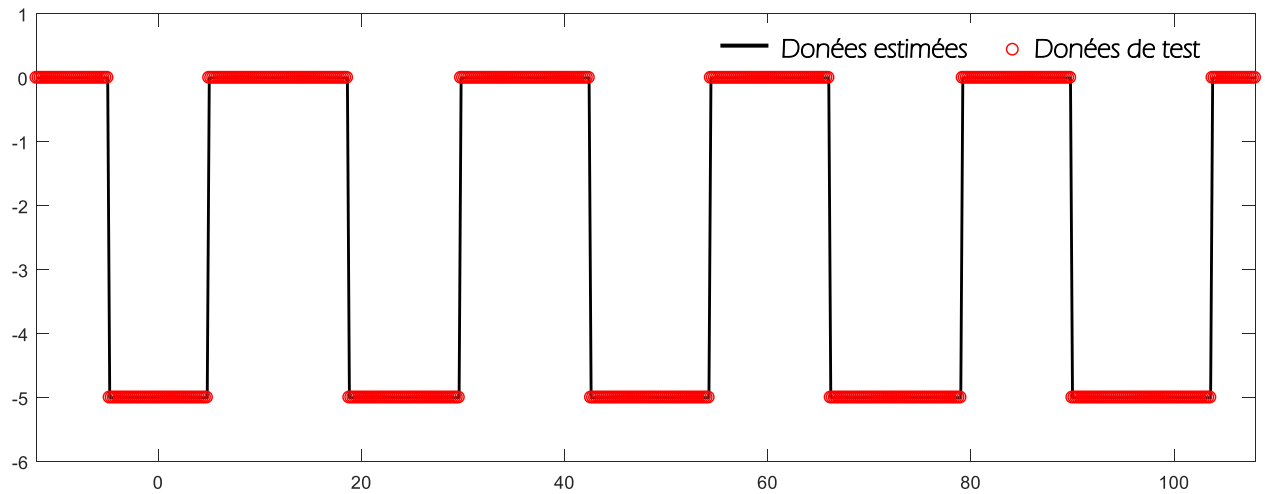


Figure 5.4.9 – Résultats de l'inversion sur la base de test pour l'identification de la longueur des défauts.

5.5 Conclusion

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté le traitement du problème inverse. Nous avons pu utiliser un modèle inverse paramétrique dont on a réglé les paramètres internes à l'aide d'une base de données que nous avons obtenue par simulation 3D. Les RN constituent un outil idéal pour l'inversion puisqu'ils sont plus avantageux que les modèles polynomiaux quand le nombre de paramètres à estimer devient important.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire rentre dans le cadre du contrôle non destructif par courants de Foucault. Dans ce travail, une stratégie pour l'identification non destructive des formes des fissures débouchantes par courants de Foucault présentes dans les pièces "critiques" de matériaux conducteurs a été élaborée.

Au tout début, lors de notre recherche bibliographique, nous avons constaté qu'il y a plusieurs techniques de contrôle non destructif par courants de Foucault, aucune d'entre elles n'est exemptée de limite, c'est pour cette raison que les chercheurs ne cessent de poursuivre leurs envies d'apporter des améliorations en terme de précision, coût et rapidité.

Dans le deuxième chapitre, Nous avons, présenté tout d'abord la modélisation électromagnétique en contrôle non destructif par courants de Foucault à partir des équations de Maxwell et exposé la méthode de résolution numérique des équations du champ électromagnétique basée sur la méthode des éléments finis.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique par la méthode des éléments finis à l'aide d'un logiciel de simulation 3D dans laquelle nous avons montré le test de validité du modèle et l'effet de la forme de la fissure sur le signal issu du capteur à courants de Foucault.

Dans le quatrième chapitre, nous avons abordé l'aspect pratique de ce projet qui consiste en la réalisation du prototype avec la carte Arduino pour rendre le système autonome. Nous avons aussi présenté l'ensemble des signatures des différentes formes des fissures obtenues lors des essais pratiques. Nous avons conclu que il y a une meilleure distinction entre ces différentes formes des défauts. Aussi nous avons pu valider le modèle numérique simulé sous l'environnement Maxwell3D, par les essais pratiques.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté le traitement du problème inverse. Nous avons pu utiliser un modèle inverse paramétrique dont on a réglé les paramètres internes à l'aide d'une base de données que nous avons obtenue par simulation 3D. Les RN con-

stituent un outil idéal pour l'inversion puisqu'ils sont plus avantageux que les modèles polynomiaux quand le nombre de paramètres à estimer devient important.

Enfin nous avons présenté une validation expérimentale du prototype qui permet l'identification et la localisation des défauts dans un matériau conducteur en CND par courants de Foucault. En termes de perspectives, nous proposons d'apporter les améliorations suivantes :

- Amélioration des performances des réseaux de neurones en enrichissant sa base de données, afin d'identifier plusieurs formes des défauts avec le minimum d'erreurs.
- Prise en compte les capacités de parasite dans les simulations numériques pour interpréter les phénomènes observés durant l'expérimentation.

Annexes

Appendix A

Présentation l'application

Notre application est développée dans l'environnement Matlab en utilisant l'**app designer**, qui est un résumé de tout notre travail effectué, puisqu'elle contient un ensemble d'onglets dans le premier onglet **P1** (Figure A.1) contient la page de garde de l'application et le second onglet **Guide** montre comment connecter le capteur avec l'amplificateur à détection synchrone (Lock-in amplifier)(Figure A.2a) à l'aide d'un circuit auxiliaire (Chapitre 4 Figure 4.3.3) et comment utiliser l'application (Figure A.2b). Dans le troisième onglet **Signal** (Figure A.3), montre le tracé des signatures $X = f(R)$ en temps réel en fonction du déplacement du capteur et l'enregistrement des courbes etc

Dans le quatrième onglet **The form of crack** (Figure A.4) est basé sur le dernier chapitre où la signature $X = f(R)$ résultant d'une fissure débouchant est précédemment enregistrée dans l'onglet **Signal** peut être insérée en appuyant sur le bouton **Anaysis of the results** et en utilisant les réseaux de neurones artificiels pour identifier la forme de la fissure.

A.0.1 l'identification de la forme de la fissure se fait en deux étapes:

Étape 1: *le tracé de la signature $X = f(R)$ suivez les étapes ci-dessous :*

1. Connecter le dispositif (Lock-in amplifier) à l'ordinateur avec un câble USB.
2. Passer à l'onglet **Signal**.

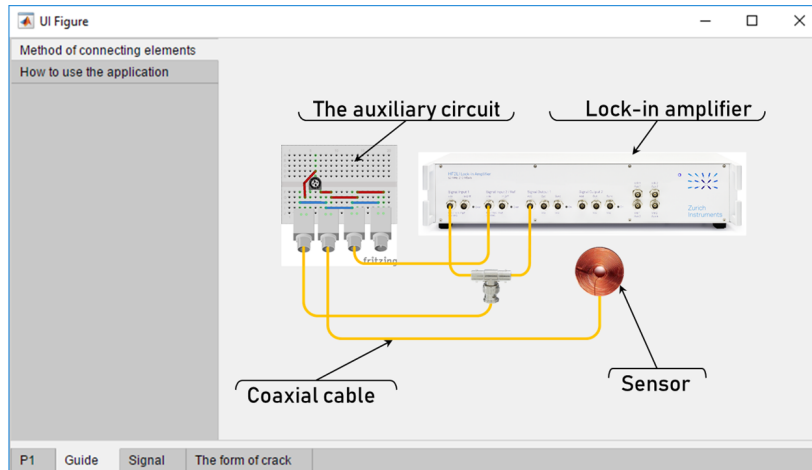


Figure A.1 – L'interface principale d'application

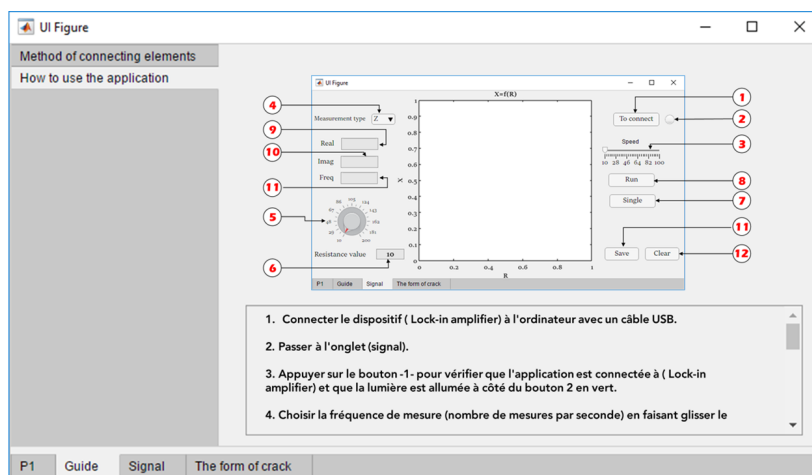
3. Appuyer sur le bouton **1** pour vérifier que l'application est connectée à (Lock-in amplifier) et que la lumière est allumée à côté du bouton **2** en vert.
4. Choisir la fréquence de mesure (nombre de mesures par seconde) en faisant glisser le curseur **3**.
5. Choisir ensuite le type de mesure (l'impédance du capteur ou la tension entre ses bornes) de Drop Down **4**.
6. Entrer la valeur de la résistance sélectionnée dans le circuit ci-dessus mentionné dans le quatrième chapitre, soit faire la rotation du bouton Knob **5** ou l'introduction de la valeur exacte saisie en modifiant le champ (Edit Field)**6**.
7. Soit mesurer la valeur de la grandeur souhaitée (Z ou v_B) en appuyant sur le bouton **7** Le résultat est montré en **9** et **10**.
8. Ou tracer $X = f(R)$ en temps réel de la mesure en appuyant sur le bouton **8**.
9. Enfin, sauvegarder le résultat de la mesure en appuyant sur le bouton **11** puis appuyer sur le bouton **12**.

Étape 2: Identification de la forme de la fissure.

- 1- Passer à l'onglet **The form of crack** (Figure A.4). Anaysis of the results
- 2 - Appuyer sur le bouton **Anaysis of the results** et importer les résultats précédemment enregistrés dans l'onglet **Signal**.
- 3 – L'affichage de la forme de la fissure attendue sur l'axe 2d.



(a)



(b)

- a- Une explication de la méthode de connexion des éléments électriques dans le but d'utiliser l'amplificateur à détection synchrone (Lock-in amplifieur) pour calculer l'impédance du capteur.
- b- Une explication de la façon dont l'application est utilisée.

Figure A.2 – Guide d'application

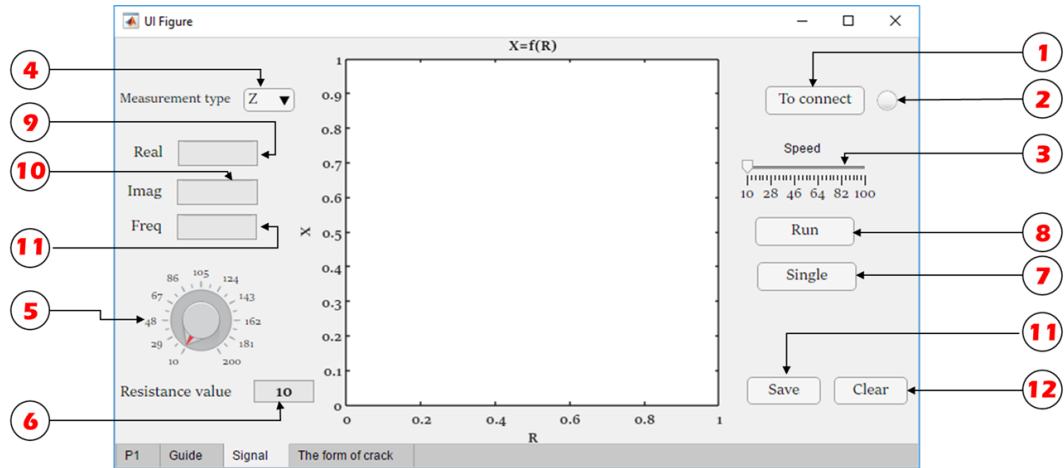


Figure A.3 – Le tracé de la signature $X = f(R)$

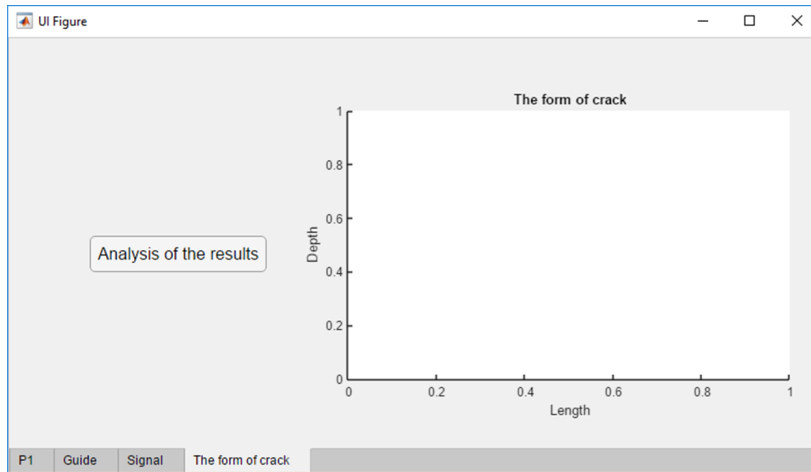


Figure A.4 – Identification de la forme de la fissure

Bibliography

- [1] S. Zerguini, “Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de foucault,” 2009.
- [2] M. DU CONTROLE, U. D. T. D’ACIER, and P. D. D. DE TYPE, “osa.”
- [3] G. Peix, “principes physiques du contrôle par courants de foucault,” 1988.
- [4] Y. Choua, “Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de foucault,” Ph.D. dissertation, Université Paris Sud-Paris XI, 2009.
- [5] M. Mr HAMEL, “Etude et réalisation d’un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques,” Ph.D. dissertation, Université Mouloud Maamari de Tizi Ouzou.
- [6] M.-Q. Lê and D. Placko, “Nouvelle structure de capteur à courants de foucault et algorithme associé pour la mesure des propriétés électrique et magnétique d’un métal,” *Journal de Physique III*, vol. 5, no. 6, pp. 807–824, 1995.
- [7] D. L. Waidelich, *Measurement of Coating Thicknesses by Use of Pulsed Eddy Currents*. University of Missouri, 1957.
- [8] F. Thollon, “Conception et optimisation de capteurs à courants de foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques,” Ph.D. dissertation, Ecole centrale de Lyon, 1995.
- [9] J.-C. Bour, E. Zubiri, P. Vasseur, and A. Billat, “Étude de la répartition des courants de foucault pulsés dans une configuration de contrôle non destructif,” *Journal de Physique III*, vol. 6, no. 1, pp. 7–22, 1996.

- [10] C. Ravat, “Conception de multicapteurs à courants de foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif,” Ph.D. dissertation, Université Paris Sud-Paris XI, 2008.
- [11] Y. Le Bihan, “Conception et caractérisation d’un dispositif à courants de foucault pour l’évaluation non destructive de l’épaisseur de paroi d’aubes de turbine creuses,” Ph.D. dissertation, 2000.
- [12] W. SLIMANE, “Conception d’un système multi-capteurs à courants de foucault pour le contrôle non destructif (cnd),” Ph.D. dissertation, Université de Batna 2, 2008.
- [13] T. M. M. et GHEDAMSI Elhachmi, “Modélisation semi-analytique d’un système de CND-CF pour la caractérisation d’un défaut dans la structure d’un matériau conducteur ,” Master’s thesis, 2013.
- [14] M. C. Salma, “Modélisation électromagnétique de systèmes multicapteurs pièces à défauts complexe pour le contrôle non destructif par courant de foucault.” Ph.D. dissertation, Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou.
- [15] P. J. Shull, *Nondestructive evaluation: Theory, techniques, and applications*. CRC press, 2016.
- [16] B. Helifa, “Contribution à la simulation du cnd par courants de foucault en vue de la caractérisation des fissures débouchantes,” Ph.D. dissertation, Nantes, 2012.
- [17] E. Amzallag and N. Picolli, *Electromagnétisme*, paris ed., é. Ediscience, Ed., 1996, vol. 3.
- [18] B. Thidé, *Electromagnetic field theory*. Upsilon Books, 2017.
- [19] D. Chapelle and K.-J. Bathe, “The inf-sup test,” *Computers & structures*, vol. 47, no. 4-5, pp. 537–545, 1993.
- [20] Z. Ren, “Contribution à la modélisation des systèmes électromagnétiques tridimensionnels. étude des formulations duales. modélisation des systèmes électromécaniques-mécanique couplés,” *Université Paris-Sud*, 1997.
- [21] O. Biro and K. Preis, “On the use of the magnetic vector potential in the finite-element analysis of three-dimensional eddy currents,” *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 25, no. 4, pp. 3145–3159, 1989.

- [22] F. Azzouz, “Contribution a la modelisation de toles ferromagnetiques par impedance de surface et elements finis application au calcul des puissances du chauffage par induction,” Ph.D. dissertation, Nantes, 2000.
- [23] M. Rachek, M. Feliachi, and M. Zaouia, “Three dimensional finite element modelling for sensor movement simulation by geometrical band and nodal interpolation techniques in eddy current non destructive testing.” *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, vol. 4, no. 6, pp. 535–542, 2005.
- [24] P. Testoni and P. Sonato, “Implementation in the ansys finite element code of the electric vector potential t- Ω , Ω formulation.”
- [25] D. Harrison, L. Jones, and S. Burke, “Benchmark problems for defect size and shape determination in eddy-current nondestructive evaluation,” *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 15, no. 1, pp. 21–34, 1996.
- [26] H. Acikgoz, “Technique d’inversion associant la modélisation numérique et les réseaux de neurones pour la caractérisation micro-ondes de matériaux,” Ph.D. dissertation, Paris 6, 2008.
- [27] M. Bentoumi, “Outils pour la détection et la classification application au diagnostic de défauts de surface de rail,” Ph.D. dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2004.
- [28] L. Baghli, “Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques,” Ph.D. dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy I, 1999.
- [29] O. Nacima, “Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive.” Ph.D. dissertation, Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou.

Identification des formes des fissures débouchant en surface dans un matériau conducteur en CND par courants de Foucault

Résumé

L'objectif de ce travail est la détermination de la position et de la forme des défauts dans les matériaux conducteurs par une méthode non destructive en utilisant les courants de Foucault. Pour cela, nous avons tout d'abord procédé à une modélisation du phénomène physique puis à une simulation en utilisant le logiciel Ansys Maxwell pour étudier l'influence de la forme du défaut sur le signal courant de Foucault. Ce modèle a été ensuite validé par une campagne expérimentale en utilisant à un banc d'essai réalisé au laboratoire. Ce modèle nous a permis de construire une base de données pour l'apprentissage d'un réseau de neurones afin de résoudre le problème inverse et déterminer la forme du défaut.

Mots clés : Contrôle non destructif, courants de Foucault, modèle inverse, réseau de neurones artificiels.

Identification of the forms of cracks emerging at the surface in a conductive material in NDT by eddy currents

Abstract

The objective of this work is the determination of the position and shape of crack in conductive materials by a non-destructive method using eddy currents. For this, we first proceeded to a modeling of the physical phenomenon then to a simulation by using Ansys Maxwell software to study the influence of the shape of the defect on the signal eddy current. An experimental companion using a bench test made in the laboratory then validated this model. This model allowed us to build a database for learning a neural network in order to solve the opposite problem and determine the shape of the defect.

Keywords: Non-destructive testing, Eddy currents, inverse model, artificial neural network.

الكشف عن شكل الشقوق المفتوحة على السطح في المواد الناقلة كهربائياً بطريقة لا إتلافية لا إتلافية باستعمال التيارات الدوامة

الخلاصة

المهدف من هذا العمل هو تعيين شكل العيوب وموضعها في المواد الناقلة كهربائياً بطريقة لا إتلافية باستعمال التيارات الدوامة، لذلك قمنا بدايةً بمذجة الظاهرة الفيزيائية وبعد ذلك قمنا بمحاكات للنظام باستعمال برنامج Ansys maxwell والتحقق من تأثير شكل العيب على إشارة التيارات الدوامة ثم التحقق تجريبي باستعمال تركيب تجريبي مناسب لنشأ قاعدة بيانات لتعليم شبكة عصبية صناعية لحل المشكلة العكسية وتحديد شكل العيب

الكلمات المفتاحية: الاختبارات الاثلافية، التيارات الدوامة، النموذج العكسي، الشبكات العصبية الصناعية