

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :
Chaiba Sid Ahmed

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences
Spécialité : Electrotechnique

Option : Commande des actionneurs électriques

Intitulé de la thèse :

***Détection de défauts profonds dans des Structures
Multicouche utilisée dans les actionneurs électriques***

Présentée devant le jury composé de :

SAYAH Houari	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Président
AYAD Abdelghani	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Rapporteur
YANN Le Bihan	Professeur (I.U.T. Paris Sud, France)	Co-Rapporteur
MILOUA Farid	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Examineur
BENSAID Samir	Professeur (U.A.M.O. Bouira)	Examineur

Soutenue le : 08 / 01 / 2020

AVANT-PROPOS

Cette thèse a été préparée au sein du laboratoire (*ICEPS*) du Centre de Recherche de l'Université de Sidi Bel Abbès.

A ce titre, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Ayad Abdelghani, Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbès, membre du laboratoire d'*ICEPS*, pour m'avoir fait l'honneur d'être encadreur de cette thèse pour ses conseils et ses encouragements pendant toutes les étapes de l'élaboration de ce travail.

Cette thèse a été achevée grâce à l'aide précieuse de Monsieur Bensaid Samir, Professeur à l'université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, et à Monsieur Yann Le Bihan professeur à l'université de Paris Sud dont je tiens à leurs exprimer tous mes remerciements, toute ma gratitude et ma reconnaissance. Je tiens à leurs rendre hommage pour leurs orientations, leurs critiques constructives et leurs conseils consistants.

Je remercie monsieur SAYAH Houari Professeur à l'université de Sidi Bel Abbès qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse et d'évaluer ce travail.

Je suis très honoré de la présence des examinateurs :

- M^R. MILOUA Farid Professeur à l'université de Sidi Bel Abbès.
- M^R. BENSAID Samir Professeur à l'université Akli Mohand Oulhadj de Bouira.

Et qu'ils trouvent ici toutes mes considérations et tous mes remerciements pour avoir bien voulu examiner ce travail.

Mes sincères remerciements et considérations vont aussi aux membres du laboratoire IRECOM aux enseignants du département d'électrotechnique et à ceux du département du Génie Mécanique (monsieur Amin Allah Miloud je remercie aussi monsieur Srrier Boualem et monsieur Bachir Buyedjera El Abbas) ainsi que monsieur Feroun Mohamed Kamel pour leurs aides et soutient.

En fin je tiens à remercier ma femme pour son soutient, tous les collègues et amis qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire

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

Chapitre 1 : L'état de L'art

I. 1. Introduction.....	5
I. 2. Méthode de détection de défaut de court-circuit dans les machines électriques.....	8
1. Test de sonnerie complet.....	9
2. Détecteur d'imperfection de noyau électromagnétique.....	11
3. Méthode EL CID de sonde à noyau de fer.....	12
4. Détection de défaut inter laminaire à l'aide d'une sonde d'injection de flux.....	17
5. Détection de défaut entre les couches en mesurant le champ de fuite de la dent.....	22
6. Mesure de défaut de courant de Foucault entre laminaire à l'aide d'une bobine de Rogowski.....	24
7. Méthode de détection capacitive de court-circuit.....	26
8. Contrôle non destructif par courant de Foucault.....	28
I. 3. Conclusion.....	29

Chapitre 2 : Formulation électromagnétique

II. 1. Introduction.....	31
II. 2. Effet de peau.....	35
II. 3. Magnéto Statique.....	38
II. 4. Magnéto Transitoire.....	40
II. 5. Magnéto Harmonique.....	41
II. 6. Potentiel vecteur magnétique	43
II. 7. Potentiel scalaire magnétique.....	44
II. 8. Formulation en impédance de surface.....	45
II. 9. Conclusion	46

Chapitre 3 : Méthode et outils d'optimisation

III. 1. Introduction.....	48
III. 2. Modèle d'étude.....	50
III. 3. Capteur utilisé.....	51
III. 4. Dimensionnement de la bobine à air.....	51
III. 5. Résultats expérimentaux.....	53
III. 6. Choix de la méthode d'optimisation.....	55
III. 7. Mesure d'impédance.....	57
III. 8. Algorithmes d'optimisations.....	57
A. La méthode SPSA.....	58
B. Caractéristiques de SPSA.....	62
C. Algorithme génétique.....	63
D. Caractéristique d'AG.....	65
E. Comparaison.....	66
III. 9. Conclusion.....	70

Chapitre 4 : CND-CF des plaques planes multicouche sans rivet

IV. 1. Introduction.....	72
IV. 2. Type des capteurs de courant de Foucault.....	72
IV. 3. Mode de mesure des courants de Foucault.....	73
IV. 4. Mode d'excitation des courant de Foucault.....	74
IV. 5. Forme de capteurs à courant de Foucault.....	74
IV. 6. Mesure de la conductivité.....	75
IV. 7. Mesure de la perméabilité.....	76
IV. 8. Etude du problème.....	78
IV. 9. Etude du problème multicouche sans rivet et bobine à air.....	78
IV. 10. Modèle mathématique.....	80
IV. 11. Rôle du noyau de ferrite.....	80
IV. 11. 1. Bobine sans ferrite.....	82
IV. 11. 2. Bobine avec ferrite.....	83
IV. 12. Simulation du comportement de défaut profond.....	84
IV. 13. Conclusion.....	85

Chapitre 5 : CND-CF des plaques multicouches avec rivet

V. 1. Introduction.....	88
V. 2. Modèle mathématique.....	89
V. 3. Sonde CF avec noyau de ferrite.....	90
V. 4. Sonde CF sans noyau de ferrite.....	91
V. 5. Problème étudié.....	91
V. 6. Description du problème.....	92
V. 7. Etude avec bobine sans noyau de fer.....	92
V. 8. Etude avec bobine à noyau de ferrite de même longueur.....	93
V. 9. Etude avec bobine à noyau de fer d'une longueur grande.....	94
V. 10. Comparaison des résultats.....	94
V. 11. Conclusion.....	94
V. 12. Conclusion-Perspectives.....	95

Introduction générale

Les techniques du control non-destructive par courants de Foucault (CF) sont très largement exploitées dans divers domaines industriels qui vont de la mesure des propriétés de la matière, la détection de défauts dans les pièces métalliques, la caractérisation des matériaux électriquement conducteurs et le diagnostic des structures [LIB 71] basée sur les propriétés fondamentales des interactions entre un capteur CF et une cible, qui sont exploitées pour l'évaluation non destructive des structures et des matériaux électriquement conducteurs.

Un capteur CF est constitué d'une bobine parcourue par un courant variable dans le temps, le plus souvent sinusoïdal, qui engendre un champ magnétique d'excitation \vec{H}_{ex} variable ; Le champ émis par le capteur s'établit dans une zone de rayonnement qui dépend de sa géométrie. L'approche d'une pièce électriquement conductrice appelée cible provoque l'apparition de courant induit dits courant de Foucault. Au même temps ces courants induits créent un champ magnétique \vec{H}_i (champ induit) qui s'oppose au champ inducteur.

Le fonctionnement des capteurs à courant de Foucault (CF) est décrit par les lois de L'induction électromagnétique, depuis les expériences de 1821 d'Ampère et Faraday.

La capacité à détecter des défauts dans les matériaux métalliques en utilisant la technique de contrôle non destructif (CND) par courant de Foucault, implique une haute résolution spatiale et une grande sensibilité des capteurs à employer. La simplicité de ce contrôle et sa robustesse d'utilisation en font une technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies.

L'objectif principal de cette notre thèse est d'étudier l'influence des défauts dans les milieux magnétiques et de développer la problématique en utilisant la méthode non destructive par courant de Foucault pour détecter ces types de défauts.

Sur la base de cette particularité, nous allons étudier les défauts surfacique ou profond dans les systèmes multicouches que soit avec revit ou sans revit en utilisant différents capteurs (avec ferrite ou sans) et une large gamme de fréquences d'excitation pour voir l'influence de ces paramètres sur la détection de ces défauts.

Cette these est ainsi organisée comme suite :

Le premier chapitre présente l'état de l'art sur le contrôle des actionneurs électriques et l'application du CND pour le diagnostic de ces machines. Une présentation du contrôle basé sur les courants de Foucault est prise en considération dans ce chapitre.

Le second chapitre est consacré à la présentation d'un problème de CND par CF et aux équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électriques et magnétiques dans le domaine continu. Une structure mathématique basée sur les équations de Maxwell est établie. Enfin, la résolution des problèmes de CND CF par la MEF est développée sous le logiciel Flux. Les outils de simulation permettent d'étudier les interactions sonde-pièce et jouent un rôle progressif pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances.

Le troisième chapitre est dédié aux méthodes d'optimisation et d'inversion. L'optimisation est un outil incontournable en control non destructif par courant de Foucault pour l'identification des paramètres, permettant de rechercher des valeurs de variables qui rendent optimale une fonction objective (Impédance) pour minimiser l'écart entre les réponses numériques et expérimentales.

Ce chapitre présente deux méthodes d'optimisation appliquées au control non destructif par courant de Foucault qui sont :

- Algorithmes génétiques
- Algorithme d'approximation des perturbations stochastiques simultanées

En effet, le dimensionnement de l'inducteur va servir à l'optimisation de la distribution du champ magnétique dans la plaque conductrice contenant un défaut.

L'optimisation de capteurs à Courants de Foucault avec les fréquences de travail associées, afin d'augmenter la sensibilité aux défauts recherchés tels que des manques de fusion superficiels ou sub-surfaciques et des porosités locales. Ces optimisations seront menées par simulation en se basant sur la plateforme de simulation FLUX.

Le quatrième chapitre est dédié à l'évaluation du modèle proposé pour le traitement de défauts dans les structures multicouche sans rivet. L'étude d'une structure multicouche est une étape obligatoire pour celle de la structure rivetée. Les résultats obtenus par celui-ci sont confrontés à ceux issus du test expérimental.

Le cinquième chapitre est consacré à la présentation d'une structure multicouche rivetée. Ou nous utilisons un capteur avec différents types de ferrites en longueurs. Les résultats obtenus montrent que plus la longueur de la ferrite est grande plus la sensibilité du capteur augmente.

En fin, en termine avec une conclusion et des perspectives.

Chapitre 1

L'état de l'art

L'intégrité de la lamination du noyau du stator peut être dégradée par des contraintes thermiques et mécaniques. Le test Iris Power El Cid détecte les laminages en court et il est la solution pour déterminer les besoins de maintenance la plus acceptée dans le monde.

I. 1. Introduction

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier l'influence des défauts dans les milieux magnétiques des systèmes électromagnétiques et de développer la problématique en utilisant la méthode non destructive par courant de Foucault pour détecter ces types de défauts.

Les stratifications magnétiques sont magnétisées par un champ magnétique qui varie dans le temps, et ils sont aussi le siège des pertes de puissance par courants de Foucault. Sur la base de cette constitution, nous allons étudier les défauts dans les systèmes multicouches que soit avec revit ou sans revit en utilisant différents capteurs et une large gamme de fréquences de magnétisation pour voir l'influence de ces paramètres sur la détection de ces défauts.

L'étude présentée ici peut être utilisée par les fabricants d'acier et les concepteurs de machines électriques pour étudier l'effet des défauts inter-tôles sur les propriétés magnétiques des noyaux magnétiques et leur évaluation de la qualité, afin de réduire le risque de dommages aux noyaux ou de pannes de machine causées par les défauts inter-couches.

Les stators sont constitués de segments de tôles empilées, avec une ouverture angulaire de 20° (pour le 900 MW), et superposés de façon décalée, illustré sur la figure ; sur plusieurs couches, elles-mêmes séparées par des événements. Ainsi, chaque tôle n'est pas exactement sur une autre tôle, mais sur une partie de deux autres tôles. Ce type d'assemblage permet d'améliorer la tenue mécanique du stator, et aussi de réduire le risque de formation de courants induits à cause d'éventuelles bavures suite à la découpe des tôles. Cependant, différents problèmes peuvent surgir durant l'assemblage ou l'exploitation de la machine, entraînant des courts-circuits entre tôles.

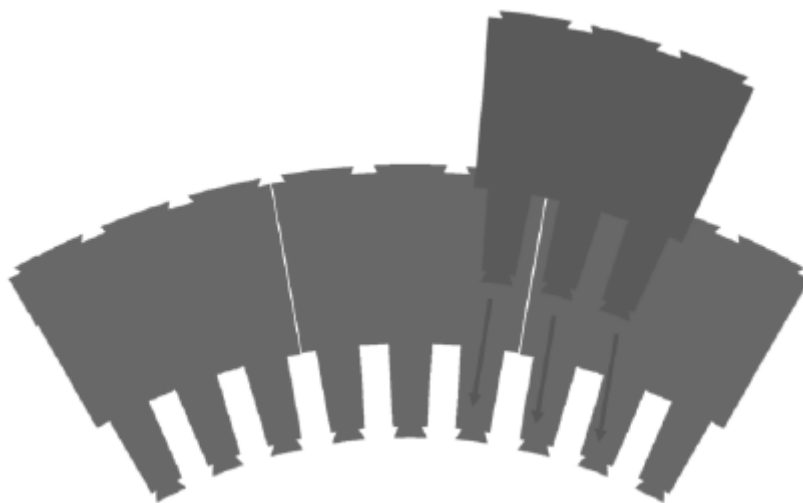


Figure 1 : Assemblage décalé de tôles

L'une des causes les plus communes à l'origine des courts-circuits entre tôles est l'imperfection ou l'insuffisance de l'isolation entre ces dernières [TAV 05 59]. Lors de leur fabrication, celles-ci sont enduites d'un revêtement isolant pour empêcher un éventuel contact électrique entre tôles. Quand les tôles sont assemblées dans le stator, mais également lors du fonctionnement, elles sont soumises à de fortes pressions, qui peuvent avoisiner 15 bars et la couche diélectrique isolante peut se rompre à certains endroits [43].

Une autre cause importante est l'introduction de corps étrangers (par exemple, des particules métalliques), pendant l'assemblage du stator ou lors d'opérations de maintenance [TAV 05 59], [29]. Ces corps étrangers peuvent favoriser le contact électrique entre deux tôles, ainsi que la rupture des couches isolantes entre elles. D'autres causes peuvent entraîner l'apparition de défauts, comme des surtensions, des vibrations (usure des vernis) et des problèmes de réfrigération durant l'exploitation de l'alternateur [TAV 05 59], [29]. De même, pendant les opérations de remplacement de cales d'encoche, des coups de marteau peuvent aussi endommager des tôles et provoquer des courts-circuits entre elles [29].

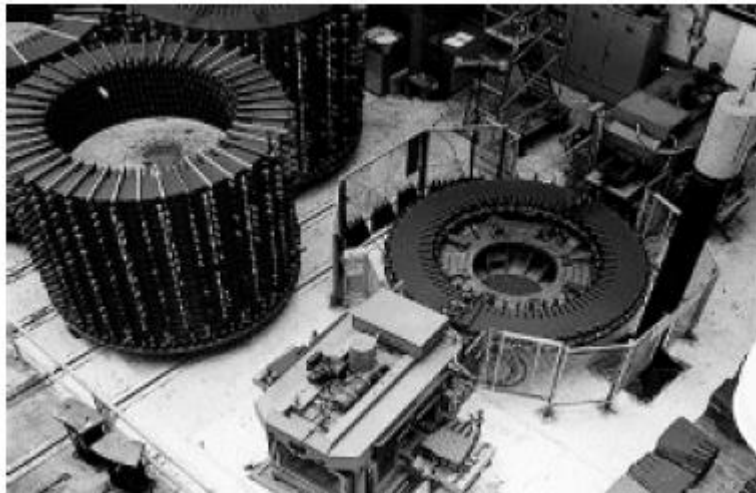


Figure.2 : Assemblage des tôles d'un stator de turboalternateur [51]

Ce type de défaut peut se traduire par un contact électrique entre plusieurs tôles du stator. Dans ce cas, lors du fonctionnement de l'alternateur, en plus des courants induits dans chaque tôle, des courants induits supplémentaires circulent aussi d'une tôle à l'autre.



Figure.3 : Court-circuit entre tôles d'un stator de turboalternateur [62]

Les courts-circuits entre tôles se développent en général selon la forme d'un cylindre, ou plutôt d'un ellipsoïde cylindrique [TAV 05 59].

En ce qui concerne l'accroissement de ces courts-circuits, il existe essentiellement deux mécanismes [59] illustrée sur la figure :

- les courants induits se développent localement dans le défaut.
- Un courant induit circule alors à travers le défaut en rebouclant dans une ou plusieurs barres d'assemblage à l'arrière du paquet de tôles.

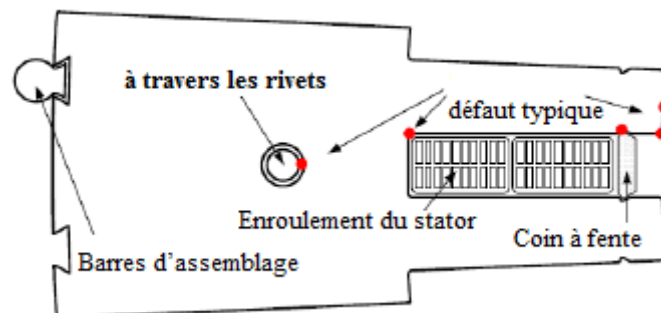


Figure. 4 : Défaut à travers barre d'assemblage [62]

La plupart des courts-circuits se forment sur le côté opposé aux barres dans les tôles du stator [43], c'est-à-dire dans le fond d'encoche, sur le côté et à l'extrémité des dents.

I. 2. Méthodes de détection de défauts de court-circuit dans les machines électriques

L'évaluation de la qualité fondamentale des machines électriques est une préoccupation majeure pour le fabricant de l'équipement d'origine et pour le client. Dans le passé, la détection des points chauds dans les noyaux magnétiques était effectuée qualitativement en coupant le courant, en rampant immédiatement dans l'alésage et en palpant la surface [3.6]. Diverses méthodes ont récemment été développées pour détecter les défauts de court-circuit

inter-laminaires dans les noyaux magnétiques, qui ont été utilisés dans la recherche et les travaux industriels [3.6] - [3.16].

Dans presque toutes ces techniques, les noyaux magnétiques testés sont magnétisés localement [3.6] - [3.7] ou totalement [3.13] - [3.14] et un signal est mesuré résultant du flux injecté. Le signal mesuré peut être interprété pour fournir des informations sur la qualité de l'échantillon à tester et détecter les éventuels défauts inter-laminaires. La différence entre les différentes méthodes est liée au signal mesuré et au capteur qui est mis en œuvre pour mesurer le signal de défaut.

Dans cette partie, les méthodes existantes de détection de défauts inter-laminaires sont passées en revue.

A. Test de sonnerie complet

La méthode traditionnelle d'inspection de la santé des noyaux de stator est le test en anneau complet, également appelé test de boucle thermique ou méthode traditionnelle, cité dans [3.8]. Dans cette méthode, un enroulement externe est enroulé autour de la culasse du noyau de manière toroïdale pour le magnétiser à 80% ou à 100% du flux nominal. La Fig. 3-13 montre un circuit d'excitation spécifique. Le flux magnétique d'excitation généré par l'enroulement externe excite les éventuels défauts intercalaires dans le noyau et induit un courant de défaut inter-laminaire dans la zone endommagée. Une fois le noyau réchauffé, une caméra thermographique, également appelée caméra à imagerie thermique, est utilisée pour détecter les points chauds sur la surface interne du noyau causés par les défauts inter-laminaires. La figure 5 montre un noyau d'hydro-générateur soumis à un test de sonnerie dans lequel l'opérateur utilise une caméra thermique pour détecter les défauts inter-laminaires [3.9].

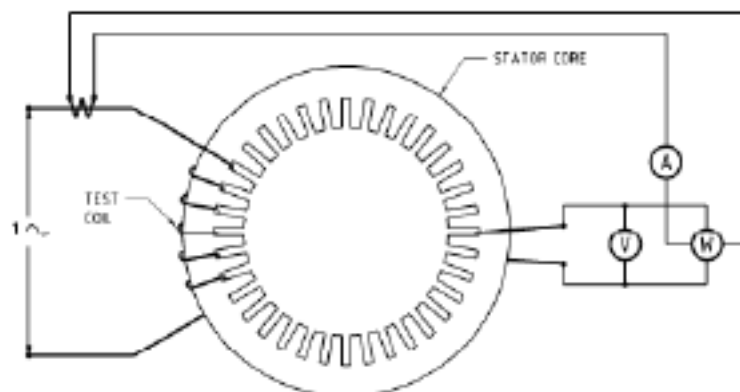


Figure.5 : Système de magnétisation du testeur à anneau complet

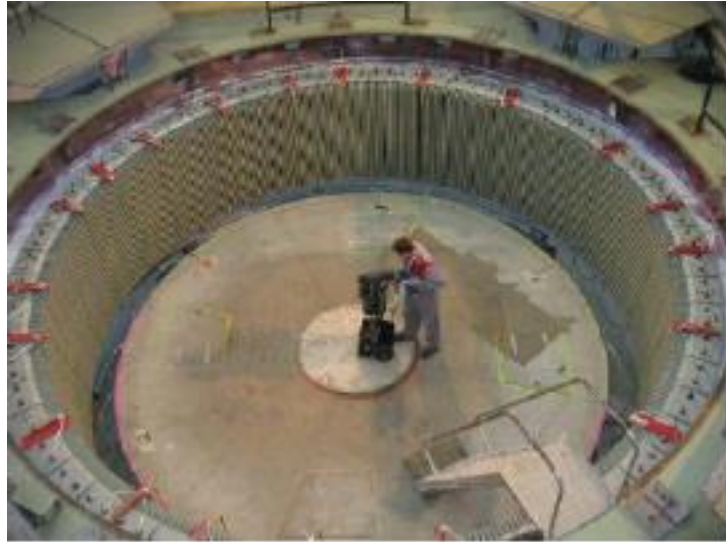


Figure.6 : Test du flux de l'anneau central du générateur hydroélectrique à l'aide d'une caméra infrarouge pour la surveillance de la température interne

Lee & al dans [3.10] a introduit des courts-circuits artificiels sur un noyau de stator triphasé en soudant 4 fentes sur la surface du noyau. La variation de la température a été mesurée à l'aide d'une caméra thermique sur 30 minutes, par intervalles d'une minute; le résultat final est présenté à la figure 6. La température centrale du stator dans la partie saine et la température maximale du point chaud étaient respectivement de $34,0^{\circ}\text{C}$ et $61,2^{\circ}\text{C}$.

Le principal inconvénient de l'essai en anneau est qu'il est nécessaire de disposer d'une source de puissance à facteur de puissance de niveau MVA pour exciter le noyau magnétique au flux nominal.

De plus, cette méthode ne permet de détecter que les points chauds à la surface du noyau ; tous les autres défauts inter-laminaires, en particulier les plus critiques dans le mur de la fente, sur le fond de la fente et au cœur du noyau ne sont pas détectables par ce test. Cette méthode ne permet pas non plus de détecter un défaut inter-laminaire entre quelques tôles menant à une chaleur locale basse. La méthode nécessite également un équipement spécial, par exemple une caméra thermique, pour détecter les défauts inter-laminaires qui peuvent le rendre plus coûteux.

B. Détecteur d'imperfection de noyau électromagnétique (EL CID)

En 1978, le détecteur d'imperfections de cœur Électromagnétique (EL CID) utilisé comme test à faible flux a été développé pour détecter les défauts inter-laminaires, en particulier dans les grands générateurs [3.11]. La configuration d'excitation du test EL CID est identique à celle du test en anneau complet, mais à environ 3-4% du niveau de flux nominal, ce qui conduit à une réduction significative de la puissance requise et risques pour la sécurité,

comme indiqué dans [3.8]. Dans cette méthode d'essai, un flux sonde de détection, y compris une bobine à noyau d'air de plusieurs tours enroulée autour d'un "cheval «chaussure» connue sous le nom de bobine de Chattock ou ver Maxwell, est utilisée pour numériser direction axiale le long de la surface interne du noyau pour détecter une anomalie dans le flux modèles causés par le courant de défaut inter-laminaire [3.8]. Fig 3-16 montre un schéma d'une sonde EL CID placée entre les dents adjacentes d'un noyau de stator.

La tension de sortie de la sonde est traitée pour fournir le signal de courant réel. Le signal traité est un signal Sinus qui est en phase avec le flux principal du cœur et avec le courant d'excitation dans un noyau sain. Les possibles défauts inter-laminaires changent la phase du signal. Les travaux expérimentaux ont été réalisés par Romary et al. [3.14] sur un noyau de stator triphasé en appliquant des courts-circuits entre 5 et 30 laminations. Schémas des stratifications défectueuses et composants typiques du détecté courant par le détecteur EL CID pour différents nombres de court-circuit les stratifications sont représentées aux figures 3-17-a et 3-17-b, respectivement. Dans ces figures x représente la position de la sonde par rapport au centre du noyau défectueux.

Comparé au test de l'anneau complet, la méthode EL CID offre de nombreux avantages, par exemple: besoin en puissance réduit, temps d'installation et de test, précision accrue pour la détection en profondeur fautes assises et résultats faciles à comprendre. Cependant, le signal mesuré par le La sonde Chattock à noyau d'air est très petite et, par conséquent, le rapport signal sur bruit est relativement faible. Par conséquent, avec quelques courts-métrages inter-laminaires, l'interprétation de la les données de sortie sont difficiles. En 2001, Posedel [3.17] a proposé une double bobine de Chattock sonde avec une procédure d'étalonnage et d'analyse quantitative pour améliorer interprétation des données EL CID; Cependant, les lacunes fondamentales de EL CID restent encore.

C. Méthode EL CID de sonde à noyau de fer

Ce test (en anglais, *ELectromagnetic Core Imperfection Detector*, « détecteur d'imperfections dans des noyaux magnétiques »), conçu par J. Sutton [44], est basé sur le théorème d'Ampère. Une source de tension, caractérisée par une spire ou bobine placée suivant l'axe du stator et rebouclant à l'extérieur, est utilisée pour créer un flux qui circule dans le stator (Figure 3). En principe, le rotor est sorti au préalable, même si quelques auteurs indiquent que ce n'est pas absolument nécessaire [70], [19]. Ensuite, un capteur de type bobine de Chattock [6] avec un noyau amagnétique est glissé le long des tôles pour détecter le champ magnétique associé au courant induit (Figure 4).

Comme indiqué à la section 3.3.2, le principal inconvénient de la méthode EL CID est la faible rapport signal sur bruit du signal mesuré. Ce problème est plus grave pour les faibles courants de défaut inter-laminaires. Lee et al. en 2005 a proposé une méthode EL CID développée utilisant une sonde à noyau en tôle mince [3.20]. L'idée principale de la méthode développée est remplacer la sonde à noyau à air de la méthode EL CID par une sonde à noyau de fer pour améliorer le rapport signal sur bruit de la mesure et augmenter la sensibilité de la détection de défaut inter-laminaire. Le niveau d'excitation de cette méthode est fixé à 75 mT, qui est similaire à la méthode EL CID de sonde à noyau d'air (3-4% du flux nominal). Figure 3-19 montre un schéma d'un noyau de fer EL CID placé entre les dents adjacentes d'un stator noyau [3.20].

La configuration du système d'excitation dans le testeur EL CID de la sonde à noyau de fer est illustrée à la Figure 7. Les quantités mesurées dans cette méthode sont la tension de sortie de la sonde à noyau de fer en fonction du courant d'excitation de l'enroulement d'excitation, c.-à-d. les valeurs efficaces et la phase relative de ces quantités sont utilisées pour l'analyse et la détection des défauts inter-laminaires. Distribution du flux magnétique et diagramme de phaseur du système dans le cas d'un noyau de stator sain sont représentés schématiquement à la Figure 10-a et 10-b, respectivement.

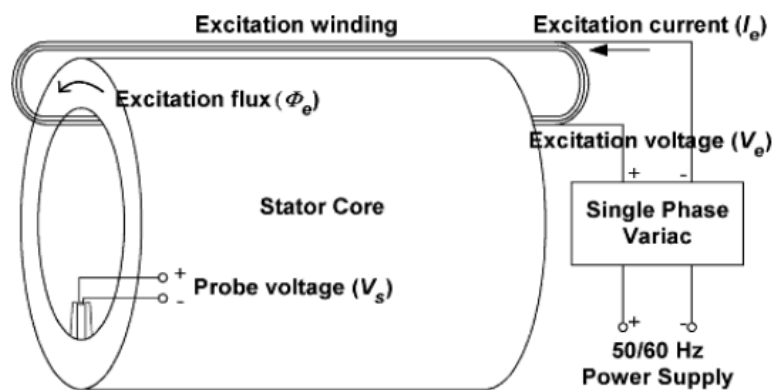


Figure.7 : Principe d'excitation magnétique pour le test El Cid [17]

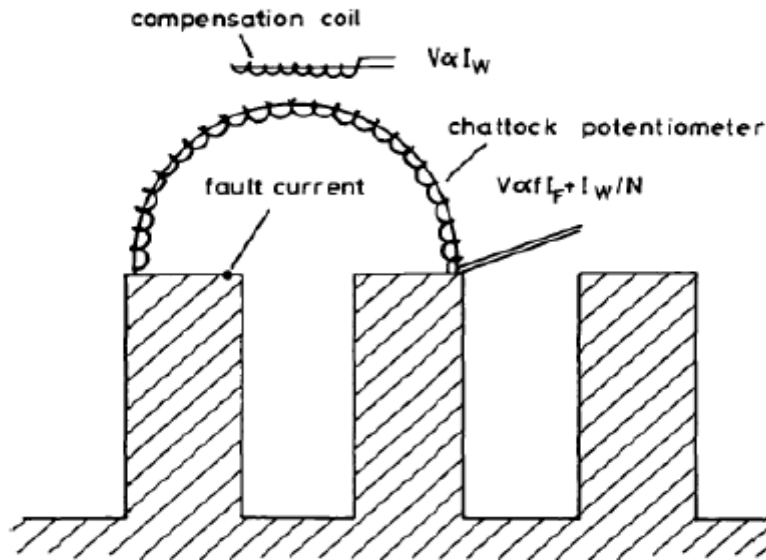


Figure.8 : Détection du courant de défaut par El Cid [17]

De préférence, la spire ou bobine d'excitation doit être placée le long de l'axe central du circuit magnétique, de façon à ne pas perturber le signal mesuré par les capteurs [26], [19].

En présence de courts-circuits, les courants induits circulant à travers les défauts et tôles peuvent alors être détectés à l'aide du capteur.

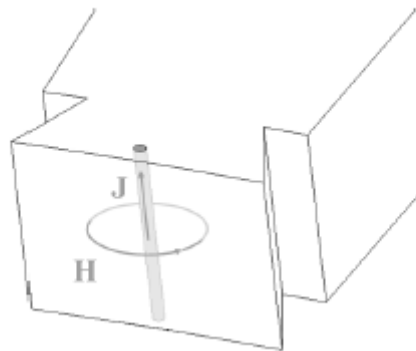


Figure.9 : Densité de courant induit dans le défaut et du champ magnétique correspondant
 Afin d'illustrer le principe physique de la mesure El Cid, un défaut proche du bord des tôles est considéré ainsi que la contribution de la boucle de courant induit perpendiculaire au plan des tôles (voir Figure 1.9). Le champ magnétique créé par ce courant peut être détecté par une bobine placée de façon judicieuse devant la dent. En effet, la variation temporelle du flux magnétique dans la bobine de Chattock crée un champ électrique entre les deux extrémités du capteur (loi de Faraday-Lenz). La tension induite dans le capteur est donnée (si on néglige la circulation du champ magnétique dans le stator), en fonction du nombre de spires N de la

bobine, de sa surface transversale S_b , de sa longueur L_b , du flux qui la traverse Φ et de la variation temporelle du courant de court-circuit I , par :

$$V = - \frac{\partial \phi}{\partial t} = - \frac{N \mu_0 S_b}{L_b} \frac{dI}{dt} \quad (1.1)$$

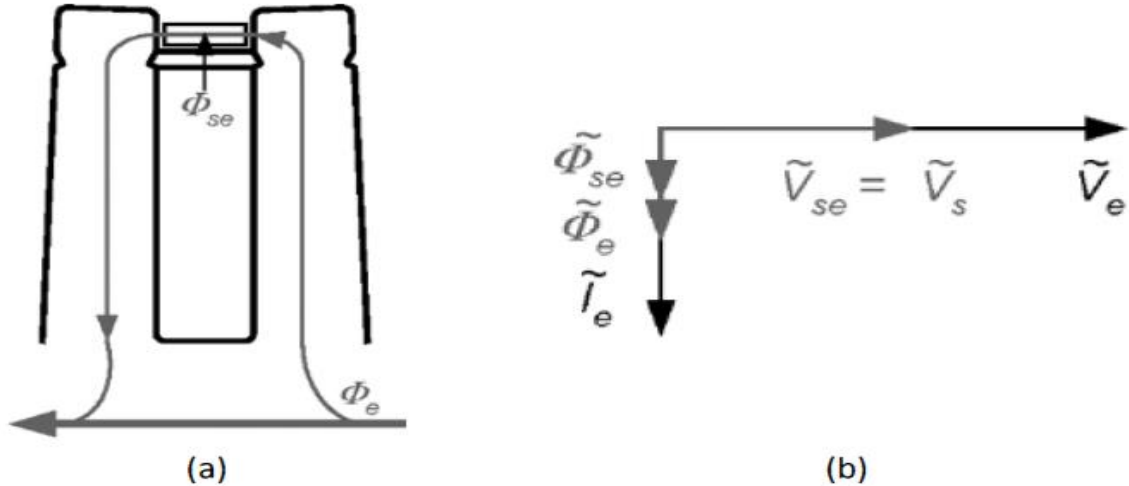


Figure.10 : (a) Répartition du flux et (b) Diagramme de phase d'un cœur sain [3.20]

Dans le diagramme de phaseur de la figure 3-21-b, I_e , V_e et ϕ_e représentent l'excitation courant, tension et flux magnétique, respectivement. V_s , V_{se} sont la sonde mesurée la tension et la tension de sonde due à l'excitation, et ϕ_{se} est le flux d'excitation composante mesurée dans la sonde. Dans un noyau sain, puisque le flux d'excitation, ϕ_e est les seuls composants de flux dans les noyaux V_s et V_{se} sont égaux, comme le montre la figure 3-21-b. Lorsqu'un défaut inter-laminaire apparaît dans le noyau, une tension V_f est induite dans le défaut boucle de courant et génère un courant de défaut I_f . Le courant de défaut induit une perte supplémentaire flux de défaut ϕ_f , qui modifie la distribution du flux total dans le noyau et la sonde lui-même. La distribution du flux total dans un noyau défectueux dépend de la localisation de faute. Deux exemples de distribution de flux et le diagramme de phaseur associé dans un stator les noyaux avec un défaut inter-laminaire sur la fente et sur la dent sont illustrés aux figures 11-a et 11-b, respectivement.

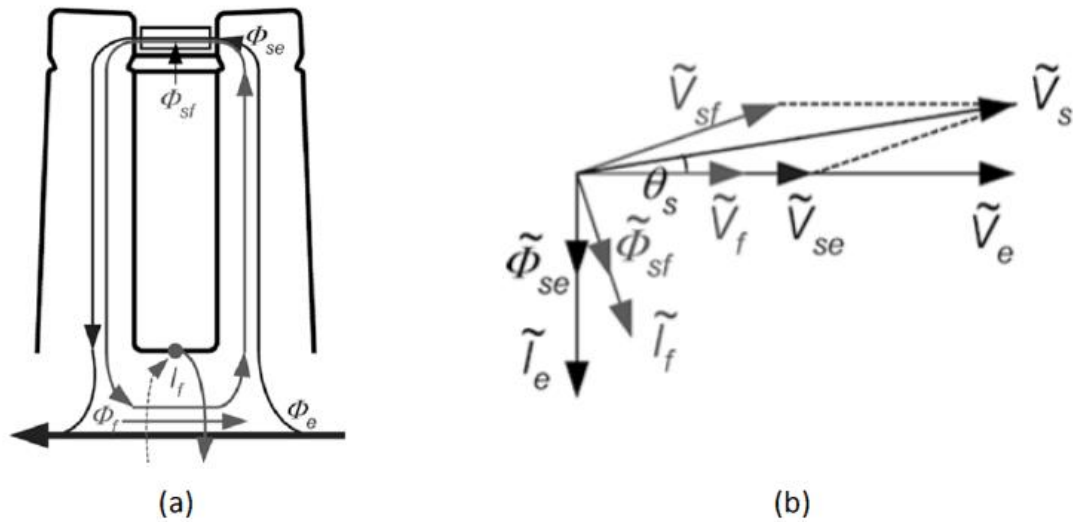


Figure.11 : (a) Répartition du flux et (b) Diagramme de phaseur pour un défaut de fente [3.20]

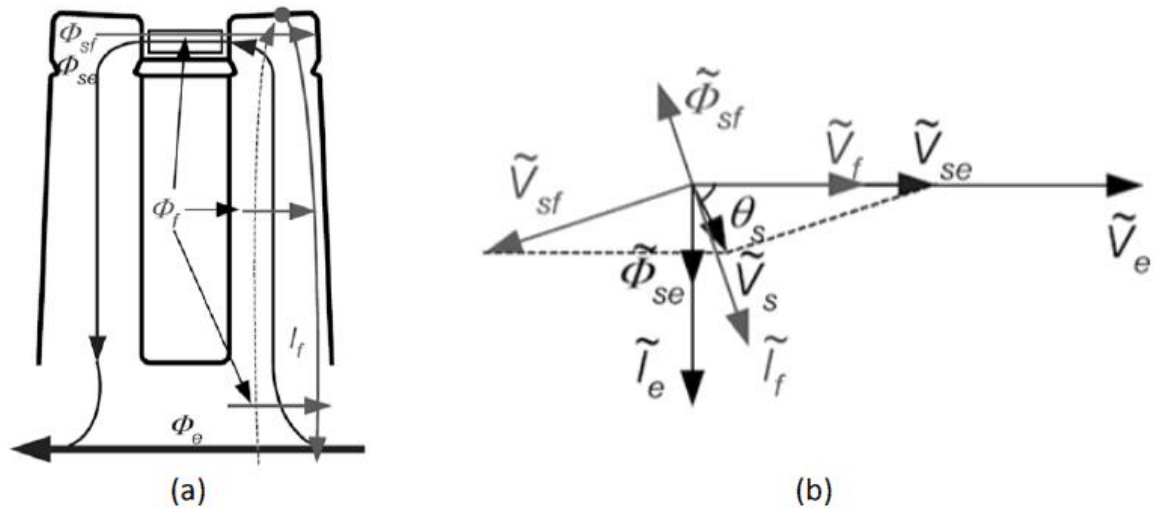


Figure.12 : (a) Distribution du flux et (b) Diagramme de phaseur pour défaut de dent [3.20]

Pour les deux défauts inter-laminaire illustrés aux figures 12-a et 12-b, V_f est en phase avec la tension d'excitation V_e , cependant l'angle de phase entre V_f et I_f dépend de l'impédance de la boucle de courant de défaut. Le composant inductif de la faille l'impédance ($e L_f$) dépend de la dimension physique de la sonde et de la fente qui est un valeur fixe; tandis que la composante résistive R_f dépend de l'emplacement du défaut, la résistance de contact de défaut et la résistance de contact entre les points court-circuités.

Le détecteur de défauts inter-laminaire proposé a été testé sur une machine de 120 MW noyau de stator. Des défauts inter-laminaire d'intensité variable ont été appliqués intentionnellement sur le noyau à différents endroits, comme le montre schématiquement la figure 3-24-a. Par exemple résultat final traité de l'emplacement 47, courant de défaut (I_f) et angle de phase

entre V_s et V_{se} (θ_s) est représenté sur la figure 3-24-b. Les chiffres indiqués sur le graphique représentent les nombre de lamination court-circuitée.

Les résultats illustrés à la Fig. 3-24-b prouvent la précision de la méthode ainsi que ses capacité à distinguer entre les nombres des lamination court-circuitées. Le principal avantage de la sonde à noyau de fer est lié au niveau accru et à la stabilité du flux magnétique mesuré. Mettre en place la sonde à noyau de fer à la place des sondes à noyau d'air existantes augmente la sensibilité du signal, ce qui conduit à une incrémentation du rapport signal sur bruit et permet par conséquent les variations de signal dues quelques défauts inter-laminaires à détecter par le système. Cette technique est maintenant de plus en plus utilisée par les fabricants pour détecter les défauts de court-circuit inter-laminaires dans noyaux de stator.

Remarque : Le principal avantage de la sonde à noyau de fer est lié à l'augmentation du niveau et de la stabilité du flux magnétique mesuré. La mise en œuvre de la sonde à noyau de fer au lieu des sondes à noyau à air existantes augmente la sensibilité du signal, ce qui entraîne une augmentation du rapport signal sur bruit et permet par conséquent aux variations de signal dues à quelques défauts inter-laminaires d'être détectées par le système. Cette technique est maintenant de plus en plus utilisée par les fabricants pour détecter les défauts de court-circuit inter-laminaires dans les noyaux de stator.

D. Détection de défauts inter laminaires à l'aide d'une sonde d'injection de flux (FIP)

Comme mentionné précédemment, en présence d'un défaut inter-laminaire, une boucle de courant de défaut se forme entre les points en court-circuit, ce qui entraîne une augmentation de la perte de puissance locale et de la chaleur locale. De ce point de vue, balayer la surface intérieure du noyau de stator ou, en général, la surface des noyaux feuilletés, afin de mesurer la perte de puissance localisée, pourrait détecter d'éventuels courts-circuits entre les laminations. Kliman et al. En 2004 ont proposé une méthode électromagnétique dans laquelle le noyau magnétique est magnétisé localement au moyen d'une sonde à injection de flux (FIP).

La perte de puissance mesurée de la zone aimantée, également appelée zone d'essai, indique la condition et la qualité de la zone d'essai [3.6] - [3.7]. En l'absence de défauts inter-laminaires dans la zone de test, la perte de puissance mesurée correspond à la perte nominale du matériau. Cependant, en présence d'un défaut inter-laminaire dans la zone de test, une augmentation de la perte de puissance peut être observée [3.6].

La Figure 13, illustre une nouvelle technique de détection de courts-circuits entre tôles [23]. Cette technique basée sur une bobine d'excitation entre deux dents et une bobine de détection, enroulées toutes les deux autour du même noyau.

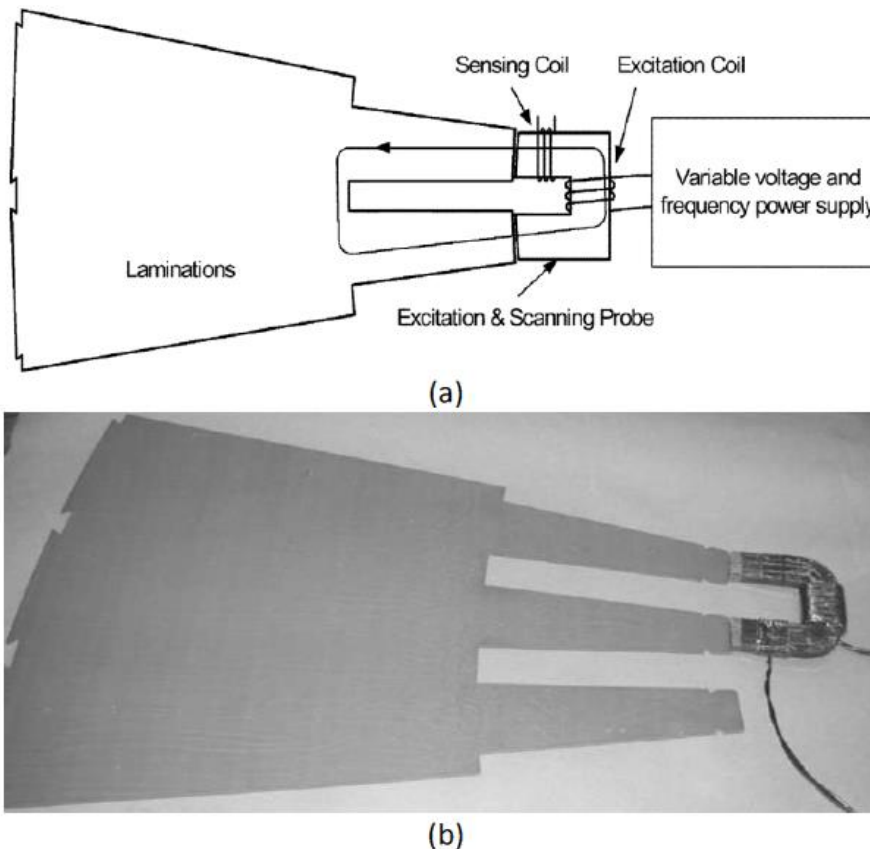


Figure. 13 (a) : Concept de sonde d'injection de flux appliqué à un segment de lamination (b) Application de la sonde d'injection sur un segment de lamination typique [3.6]

Un petit noyau laminé en forme de «U» est placé entre une paire de dents adjacentes, comme indiqué sur la figure. Des enroulements d'excitation et de mesure sont enroulés autour de la sonde magnétique. L'enroulement d'excitation est connecté à une alimentation à tension et fréquence variables pour injecter un flux magnétique dans le noyau testé. Une tension induite résultant du flux injecté dans la zone d'essai est mesurée à l'aide de la mesure d'enroulement. Le courant d'enroulement d'excitation et la tension de sortie de l'enroulement de mesure sont utilisés pour mesurer la perte de puissance de la zone aimantée sous la forme :

$$p = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{N_e}{N_s} V_s(t) i_e(t) dt \quad (1.2)$$

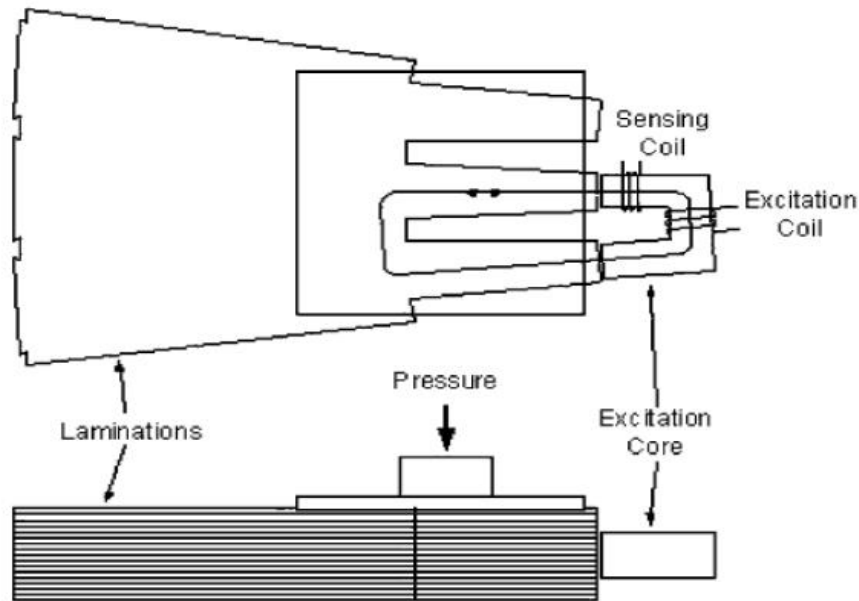
Où :

V_s et i_e représentent la tension d'enroulement de mesure et le courant d'excitation, N_e et N_s le nombre de spires des enroulements d'excitation et de mesure, et T la période. La mesure de la perte de noyau obtenue à partir d'une sonde d'injection de flux est utilisée pour détecter et qualifier les défauts inter-laminaires. Lorsque la sonde est balayée axialement le long du noyau, un graphique de la perte du noyau magnétique indiquera l'emplacement et l'intensité de la faille inter-laminaire.

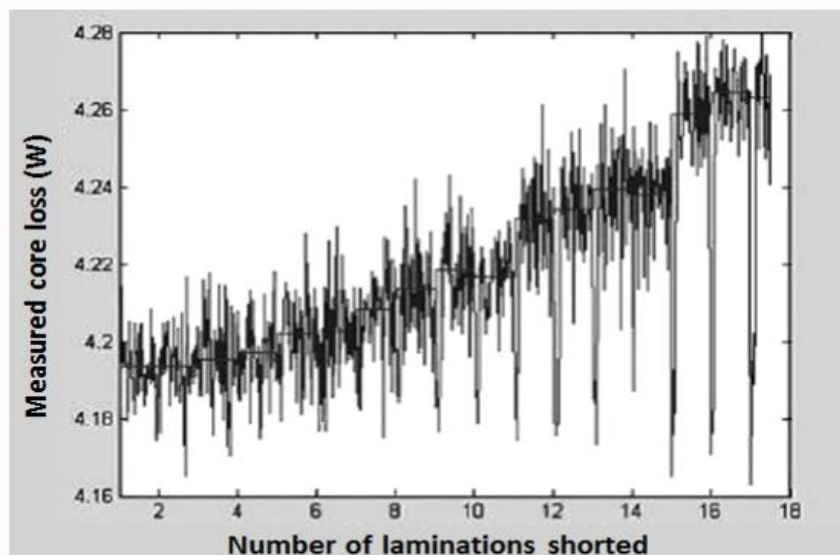
La figure 3-26-a montre un empilement de stratifications de stator dans lequel une sonde d'injection de flux est située entre deux dents adjacentes pour détecter les défauts inter-laminaires. Dans ce système, des courts-circuits artificiels allant jusqu'à 20 feuilles ont été appliqués sur les stratifications. La Fig. 3-26-b montre la perte de noyau magnétique en fonction du nombre de tôles en court-circuit.

La Fig. 3-26-b montre que la perte de puissance totale mesurée par la sonde augmente en augmentant le nombre de courts-circuits, en raison de l'incrément du courant de défaut inter-laminaire dans la zone de test. Cependant, le niveau de bruit dans la perte de puissance mesurée est élevé. Ce problème a été éliminé en utilisant une sonde d'injection de flux différentielle.

L'idée est d'utiliser deux sondes identiques côte à côte pour mesurer la différence entre les pertes du noyau magnétique proches des sections du noyau du stator. Une configuration de base d'une sonde différentielle est illustrée à la figure 3-27-a. Le résultat de la mesure avec la même configuration que celle illustrée à la figure 3-26-a est présenté à la figure 3-27-b.



(a)



(b)

Fig 3-26 (a) Application of flux injection probe to test lamination
(b) Measured core loss as a function of the number of faulted laminations [3.6]

Figure.14 : Application de flux (a) et Perte joule du défaut de lamination (b)

Dans cette méthode, le noyau du stator étant magnétisé localement, une source de faible puissance est nécessaire pour exciter la sonde et le noyau à tester; cela peut être considéré comme le principal avantage de cette méthode. Cette méthode est également très rapide et comparée à d'autres méthodes, c'est-à-dire au procédé EL CID à noyau de fer, l'interprétation des signaux de sortie est très facile. En plus de détecter les défauts inter-laminaires, cette méthode permet de qualifier l'état de compression du noyau. Cependant, les défauts inter-

laminaires impliquant un petit nombre de stratifications peuvent être difficiles à détecter avec ce système.

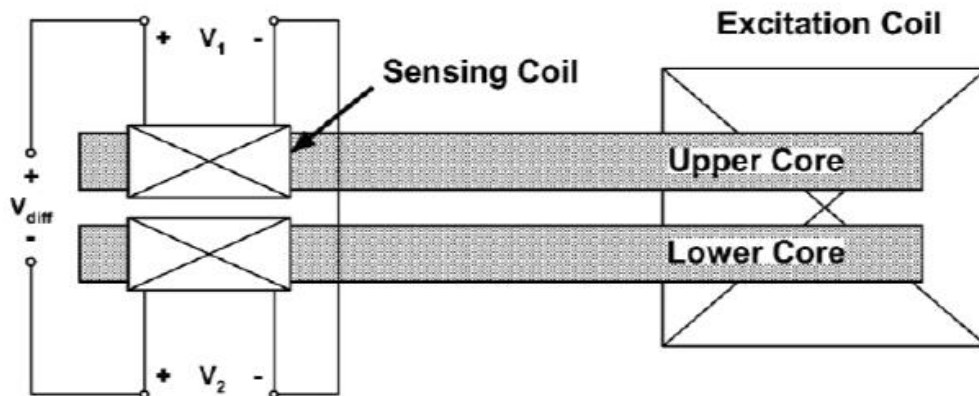


Figure.15 : Concept de sonde d'injection différentielle

E. Détection de défauts entre les couches en mesurant le champ de fuite de la dent

Dans le cas d'un défaut de court-circuit inter-laminaire, la tension induite dans la stratification est court-circuitée entre les stratifications en court-circuit, ce qui peut affecter la fuite de flux autour de la zone endommagée. Par conséquent, dans un noyau de stator en mesurant la fuite de flux de dent, ou dans le noyau du transformateur par la mesure de la fuite de branche ou de culasse, il est possible de détecter d'éventuels défauts inter-laminaires. Le système de magnétisation de cette méthode est similaire à celui utilisé dans la méthode de test EL CID et le noyau magnétique est magnétisé à environ 5% du flux nominal. Une bobine de détection est implémentée pour balayer la surface du noyau magnétique afin de mesurer la fuite de flux magnétique ϕ_{str} , comme illustré à la figure 3-28 [3.17].

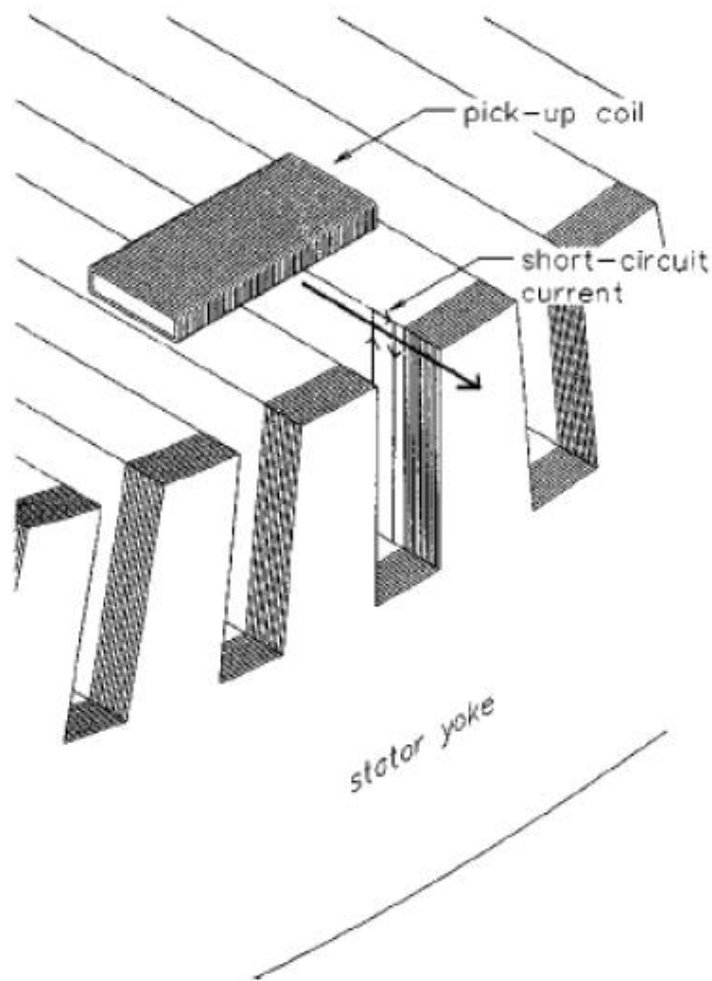


Figure.16 : Bobine de prélèvement pour mesurer les fuites de flux de dent [3.17]

Dans le cas d'un cœur sain, la tension induite dans la bobine de détection est [3.17]:

$$U_M = \int_0^l \frac{\varphi_{str}}{dt} \frac{W}{l} dl \quad (1.3)$$

où

ϕ_{str} est la fuite de flux magnétique, w est le nombre de tours et l est la longueur de la bobine de détection. Comme la fuite de flux varie avec le courant magnétisant I_M , la tension induite peut s'écrire comme suit:

$$U_M = f(I_M) \quad (1.4)$$

En l'absence du défaut inter-laminaire, la tension induite dans la bobine de détection est une fonction linéaire du courant magnétisant ; ou la fonction f dans (3-3) est une fonction linéaire du courant I_M . En présence d'un défaut inter-laminaire, le courant de défaut I_f induira une tension dans la bobine de détection. Contrairement à la méthode EL CID, les défauts inter-laminaires ne peuvent pas être détectés à partir de la tension de sortie de la bobine de détection.

Les inconvénients des méthodes classiques de détection de défauts inter-laminaires sont évités par la mesure de la fuite du flux dentaire. La mesure de la fuite de flux de dent fournit des informations correctes sur les défauts inter-laminaires dans le noyau.

F. Mesure de défaut de courant de Foucault entre laminaires à l'aide d'une bobine de Rogowski

Schulz et al. en 2010, a mis au point une méthode expérimentale permettant de mesurer le courant de défaut inter-laminaire dans une pile de stratifications à l'aide d'une bobine de Rogowski autour des stratifications endommagées (floues) [3.18]. Une bobine de Rogowski consiste en un enroulement enroulé autour d'un noyau non magnétique et placé près d'un conducteur pour mesurer courants alternatifs. Le bobinage forme une inductance mutuelle couplée au conducteur. La tension de sortie de la bobine est liée à la vibration du courant dans le conducteur. Pour une bobine circulaire de section rectangulaire, la relation est [3.18]:

$$U_2 = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \left[\frac{c}{b} \right] \frac{dI_1}{dt} \quad (1.5)$$

Où

μ_0 est la perméabilité au vide, N le nombre de tours, h la hauteur de la bobine, c et b les rayons extérieur et intérieur de la bobine et i_1 le courant dans le conducteur. L'intégration du signal de sortie produit une tension proportionnelle au courant. La figure 3-31-a montre une bobine de Rogowski et la figure 3-31-b son application à la mesure du courant de défaut intercalaire entre deux feuillets [3.18].



Figure.17 : (a) Vue de dessus d'une bobine de Rogowski (b) Application d'une bobine de Rogowski pour mesurer le courant de défaut intercalaire entre deux feuillets [3.18]

Dans cette enquête, des courts-circuits artificiels ont été appliqués entre deux stratifications de transformateur en créant deux points de contact sur les côtés opposés de la feuille. Afin d'insérer la bobine de Rogowski entre les laminations, un petit espace a été ménagé entre les

laminations, comme indiqué sur la figure 17-b. L'entrefer supplémentaire entre les lamelles n'affecte pas le courant de court-circuit; parce que la perméabilité du matériau de stratification est beaucoup plus élevée que celle de l'air ($\mu_r \gg 1$). Un circuit d'amplification et d'intégration à faible bruit a été utilisé pour amplifier la tension de sortie de la bobine de Rogowski.

Le courant de court-circuit et la perte de puissance, en fonction de la largeur du noyau, mesurés par la bobine de Rogowski sont représentés sur les figures 3-32-a et 3-32-b, respectivement. Les résultats montrent que pour les noyaux extrêmement étroits, le courant de court-circuit est une fonction non linéaire de la largeur du noyau; cependant, pour les noyaux plus larges, la fonction peut, avec une bonne précision, être approchée par une fonction linéaire. Le courant de défaut inter-laminaire d'un transformateur à échelle réelle peut être estimé en extrapolant le résultat de la figure 3-32. Par exemple, pour un très grand noyau de transformateur d'une largeur de 60 cm avec une densité de flux maximale de 1,7 T et une fréquence de 50 Hz, le courant de court-circuit de pointe a été estimé à 9,8 A.

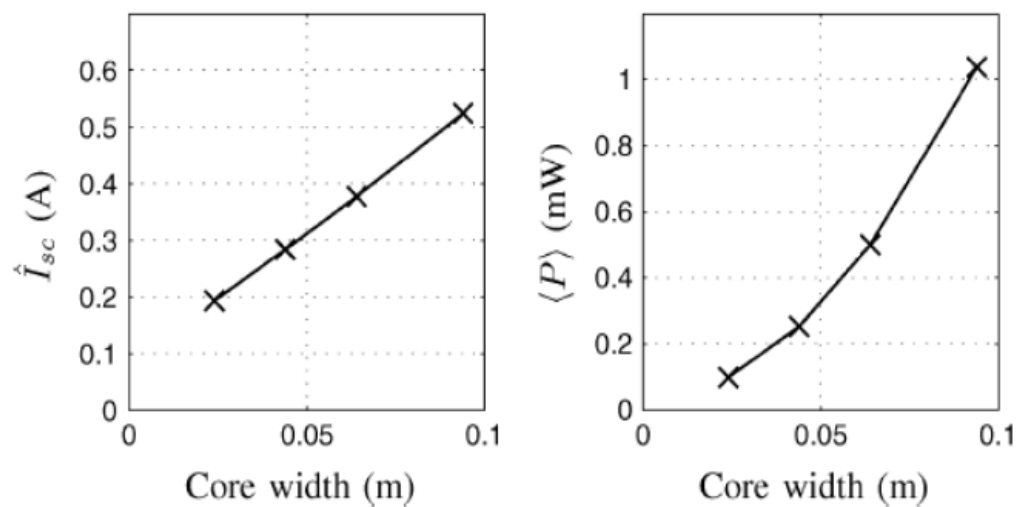


Figure.18 : Intensité de courant de court-circuit inter-laminaire et perte de puissance en fonction de la largeur du noyau [3.18].

Bien que la mesure du courant de défaut inter-laminaire par la bobine de Rogowski fournisse des mesures fiables dans un empilement de laminations, un espacement entre les lamelles est nécessaire pour placer la bobine. Cela pourrait constituer un défi pour les transformateurs à l'échelle réelle, ce qui est le principal inconvénient de cette méthode.

G. Méthode de détection capacitive de court-circuit

Il est bien connu qu'une capacité, de la manière la plus simple, consiste en deux plaques conductrices isolées par une plaque diélectrique. De ce point de vue, dans un empilement de feuilles de laminage en acier électrique, des feuilles adjacentes forment une capacité, comme le montre la figure 3-33.

Schulz et al. en 2008, a mis au point une méthode non magnétique permettant de détecter les défauts inter-laminaires dans les noyaux magnétiques en mesurant l'effet capacitif entre les feuillettes du noyau du transformateur [3.19].

Étant donné que le revêtement isolant utilisé dans la stratification du transformateur, et en général dans les aciers électriques, est très mince, la capacité résultante entre les stratifications adjacentes est suffisamment élevée pour être facilement mesurée. À titre d'exemple, l'effet capacitif pour une stratification de taille Epstein (30 mm × 300 mm) avec une isolation d'environ 3 μm de chaque côté est compris dans la gamme de 5 nF [3.19].

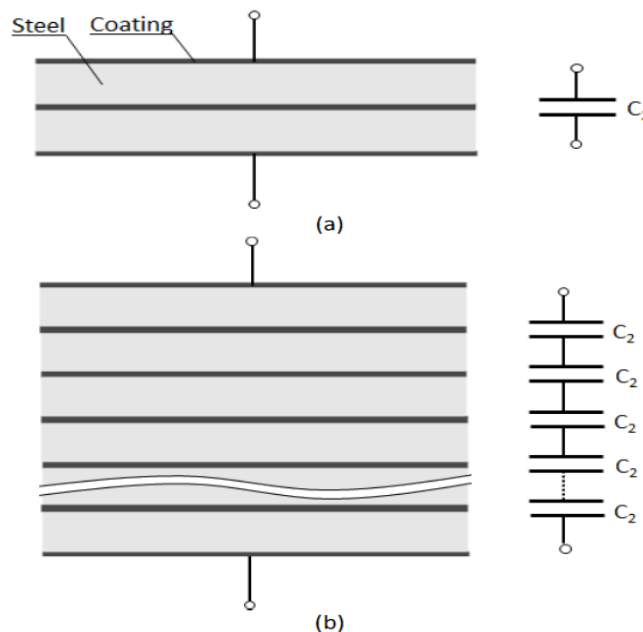


Figure.19 : Effet de capacité (a) entre deux stratifications adjacentes (b) entre deux extrémités d'une pile de stratification

Selon la figure 3-33, un empilement de lamelles forme une série de condensateurs à plaques et la capacité totale est mesurée comme suit: [3.19]:

$$C_N = \frac{C_2}{N-1} \quad (1.6)$$

Où

N est le nombre de stratifications dans l'empilement et C_2 est la capacité équivalente des stratifications adjacentes. On suppose que C_2 est identique entre toutes les paires de feuilles.

Si un défaut inter-laminaire apparaît entre deux stratifications, N est réduit de un et la capacité équivalente augmente. Par conséquent, si la capacité entre les stratifications adjacentes $C2$ et le nombre de stratifications dans la pile N est initialement connue, le nombre de défauts inter-laminaires peut être détecté.

Cette méthode ne permet pas de déterminer si le défaut inter-laminaire apparaît en un, deux ou plusieurs points; il détectera les défauts inoffensifs et nuisibles. Cette méthode ne permet pas non plus de localiser le défaut inter-laminaire dans le noyau. De plus, étant donné que les feuillettes des noyaux de stator sont soudés ensemble ou maintenus ensemble soit par une barre de clé, soit par le logement de la culasse de stator [3.8], cette méthode n'est pas applicable pour détecter le défaut inter laminaire entre feuillettes de stator. Cependant, il s'agit d'une méthode non destructive, simple et facile à mettre en œuvre pour détecter les défauts inter-laminaires dans les stratifications de noyau de transformateur. Et aussi cette méthode ne nécessite pas d'exciter le noyau magnétique en cours de test.

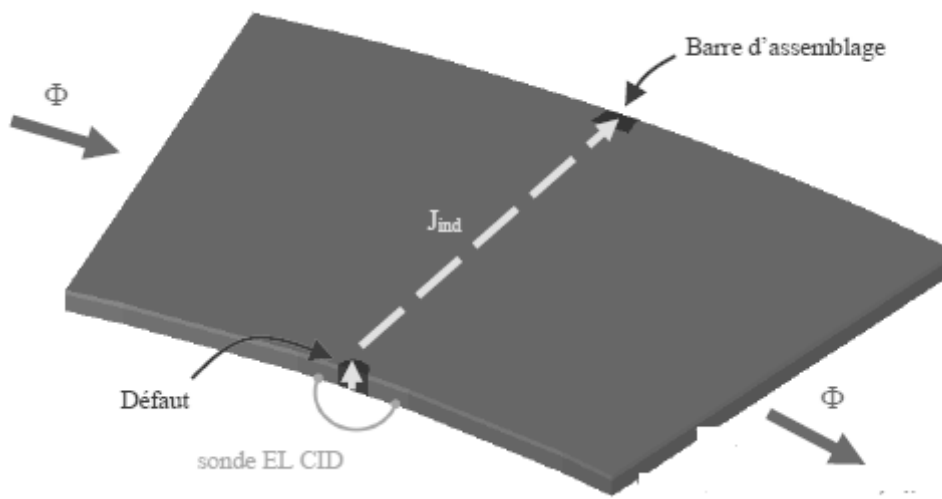


Figure.20 : Couronne de stator modélisé

H. Contrôle non destructif par courant de Foucault

Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons à la problématique de détection des défauts profonds et non profonds dans des plaques planes monocouches et multicouches par la méthode du contrôle non destructif par courants de Foucault (CND CF). L'originalité de notre travail consiste à prendre une partie d'une tôle ou d'une pile de tôles qui constituent la carcasse d'un système d'actionneur électrique.

L'analyse numérique via la méthode des éléments finis du comportement inductif sur ces derniers en mode magnéto-harmonique de systèmes en utilisant des capteurs avec et sans

noyaux en ferrite de divers formes, et de pièces amagnétiques sous forme de plaque plane monocouche et multicouche.

Lors de la mise en œuvre d'un outil de contrôle non destructif par courants de Foucault, les essais expérimentaux pour la détection des défauts profonds sont avérés difficiles pour plusieurs raisons, parmi eux, la non-disponibilité des échantillons. La non-disponibilité du matériel de mesure (impédance mètre).

Pour cela, il était intéressant d'appliquer la simulation numérique sur les modèles envisagés dans notre travail.

I. 3. Conclusion

Dans la plupart des travaux précédents, il a été supposé que les défauts inter-laminaires se produisent entre les stratifications adjacentes du noyau à des points de consigne, ce qui entraîne un volume de court-circuit avec une localisation et des dimensions physiques bien connues. Alors qu'en pratique ils apparaissent à des positions aléatoires qui créent différents motifs de fissures inter-laminaires. De plus, des facteurs importants tels que l'effet de peau, la distribution de densité de flux non uniforme, la perméabilité relative complexe et la relation non linéaire de $B(H)$ sont négligés dans la littérature.

Comme note générale sur ce chapitre, bien que des recherches et des études antérieures sur l'effet des défauts de court-circuit inter-laminaire sur les performances des noyaux magnétiques montrent de bons résultats, mais considèrent la nature et les circonstances des défauts inter-laminaires et concerne également : des fabricants de machines électriques. De plus, des méthodes non destructives sont nécessaires pour détecter les défauts inter-laminaires, en particulier la méthode non destructive par courant de Foucault. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation de cette méthode.

Chapitre 2

Formulation électromagnétique

Potentiel électrique, magnétique et surface d'impédance
formulation existantes pour la résolution des problèmes
électromagnétique par la méthode des éléments finis.

II.1- Introduction

Les techniques d'évaluation non-destructive par courants de Foucault (CF) sont très largement exploitées dans divers domaines industriels qui vont de la mesure des propriétés de la matière, la détection de défauts dans les pièces métalliques, la caractérisation des matériaux électriquement conducteurs et le diagnostic des structures [LIB 71] basée sur les propriétés fondamentales des interactions entre un capteur CF et une cible, qui sont exploitées pour l'évaluation non destructive des structures et des matériaux électriquement conducteurs.

Voir la figure ???, Un capteur CF est constitué d'une bobine parcourue par un courant variable dans le temps, le plus souvent sinusoïdal, qui engendre un champ magnétique d'excitation \vec{H}_{ex} variable ; Le champ émis par le capteur s'établit dans une zone de rayonnement qui dépend de sa géométrie. L'approche d'une pièce électriquement conductrice appelée cible provoque l'apparition de courant induit dits courant de Foucault. Au même temps ces courants induits créent un champ magnétique \vec{H}_i (champ induit) qui s'oppose au champ inducteur illustre sur la figure.

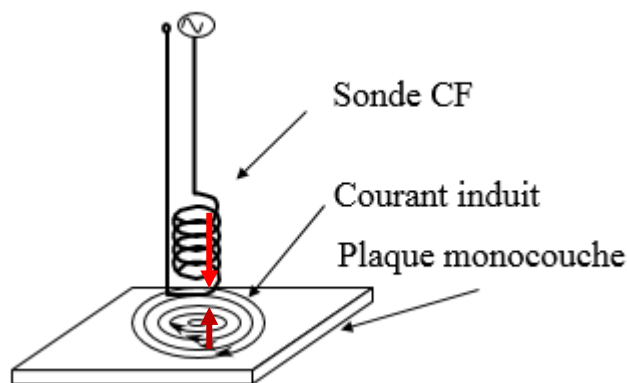


Figure 1 : Technique de CND-CF

Il en résulte un champ total différent du champ d'excitation et en fonction des paramètres suivants :

- f : la fréquence des courants d'excitation (Hz)
- σ : la conductivité électrique de la cible (S/m)
- μ : la perméabilité magnétique de la cible (H/m)

- Caractéristique géométrique de la cible
- La distance entre cible et capteur (lift off)

Lorsqu'une pièce métallique conductrice est plongée dans des champs magnétiques variables, ou lorsqu'elle est en mouvement dans un champ fixe, des courants électriques appelés courants induits ou courants de Foucault [LA 96], sont générés dans cette pièce métallique.

Les courants induits sont inutiles dans les noyaux des transformateurs ; et utiles, dans les dispositifs de chauffage par induction, pour le contrôle non destructif, pour freiner ou amortir les oscillations d'une pièce mobile, dans les barres de rotor d'une machine tournante, dans le circuit secondaire d'un transformateur.

comme décrit ci-dessus sur la figure 1 la bobine de control non destructif génère un champ magnétique autour de lui-même dans la direction dictée par la règle de la main droite. Ce champ magnétique oscille à la même fréquence que le courant qui parcourt la bobine. Lorsque la bobine approche d'un matériau conducteur, un courant opposé à celui de la bobine est induit dans le matériau (loi de Lenz) ; on l'appelle courant de Foucault.

Les défauts dans le matériau conducteur interfèrent avec le bon écoulement des courants de Foucault, ce qui crée un champ magnétique localisé qui déranger l'équilibre du système. Ce déséquilibre peut être mesuré sous la forme de variations des parties réelle et imaginaire de l'impédance de la bobine, indiquant la présence ou non de défauts.

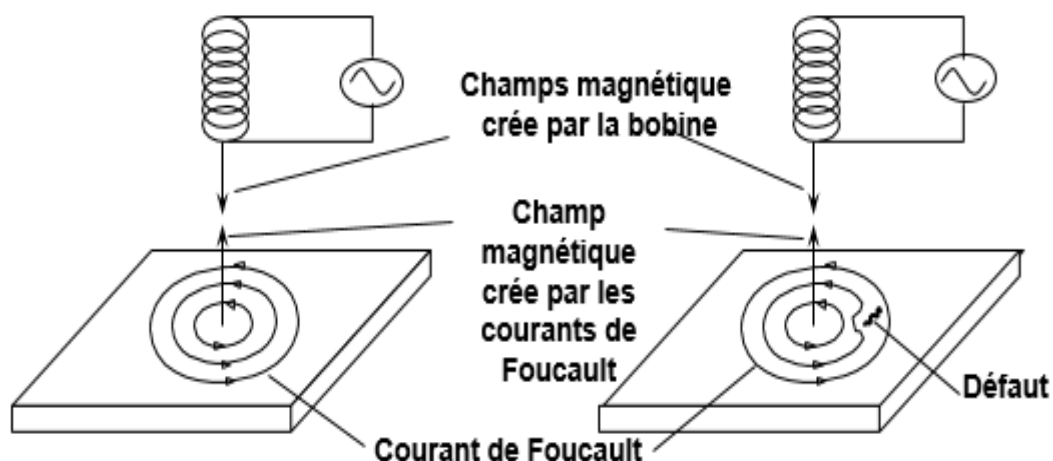


Figure.2 : Détection défaut dans une plaque conductrice

II.2- Etude des courants de Foucault

La résolution d'un problème électromagnétique passe par la résolution d'un ensemble d'équations :

- Equations de Maxwell qui constituent l'ossature de la théorie.
- Equations constitutives de la matière qui expriment les propriétés des matériaux.

Le fonctionnement des capteurs à courants de Foucault est basé sur les lois de l'électromagnétique, et qui sont caractérisé par les équations de Maxwell :

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{B} = 0 \quad \text{Équation de conservation de flux} \quad (2.1)$$

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{E} = 0 \quad \text{Équation de Maxwell-Gauss} \quad (2.2)$$

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

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Équation de Maxwell-Ampère} \quad (2.4)$$

\vec{E} Champ électrique, \vec{H} champ magnétique, \vec{D} induction électrique, \vec{B} induction magnétique, \vec{J} densité surfacique de courant électrique, ρ la densité volumique de la charge électrique.

Par ailleurs, plaçons nous dans un milieu aux propriétés électrique homogène, linéaires et isotrope cette hypothèse est souvent vérifiée pour un milieu magnétique.

Les relations constitutives du milieu s'écrivent :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.6)$$

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

Avec μ perméabilité magnétique, σ conductivité électrique et ε la permittivité du milieu.

II.3- Conditions de passage

Lors du passage d'un milieu 1 vers un milieu 2, les grandeurs électromagnétiques subissent des discontinuités et ne sont donc plus mathématiquement différentiables. Les équations qui les relient s'écrivent alors [31] :

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (2.8)$$

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.9)$$

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad (2.10)$$

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \wedge \vec{n} = \vec{K} \quad (2.11)$$

Avec ρ_s la densité surfacique de charge, \vec{K} la densité surfacique du courant et \vec{n} le vecteur unitaire normal dirigé vers l'extérieur du milieu.

II.4- Effet de peau

L'effet de peau (ou effet Kelvin) exprime le phénomène de pénétration du champ électromagnétique dans un conducteur, phénomènes produits quand un conducteur est parcouru par un courant électrique dépendant du temps.

L'expérience et la théorie montrent alors que la densité de courant n'est pas uniforme. Il y a concentration des lignes de courant vers la surface extérieure du conducteur. Cet aspect est d'autant plus marqué que la fréquence est plus grande ie à fréquence élevée, le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des plaques conductrices.

Les grandeurs électromagnétiques décroissent suivant la profondeur z dans les conducteurs suivant une loi exponentielle du type :

$$U_z = U_s e^{-z/\delta} \quad (2.12)$$

Où:

- U_s est la valeur à la surface du conducteur
- δ est l'épaisseur de peau : $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\sigma\mu\pi f}}$
- δ : épaisseur de peau en [m]
- ω : Pulsation en radian par seconde [rad/s] ($\omega=2.\pi.f$)
- f : Fréquence du courant en hertz [Hz]
- μ : Perméabilité magnétique en henry par mètre [H/m]
- ρ : Résistivité en ohm-mètre [$\Omega.m$] ($\rho=1/\sigma$)
- σ : Conductivité électrique en siemens par mètre [S/m]

Le terme $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ de l'équation (4) représente les courants de déplacement aux fréquences utilisées pour l'évolution non destructive END par courant de Foucault, quelque mégahertz au plus, l'influence des courants de déplacements peut être largement négligée, que le milieu soit conducteur ou non.

Cela revient à négliger le temps de propagation des ondes électromagnétique qui correspond à une approximation en régimes Quasi-statique (ARQS) [IDA 97, GIE 82]..

Equation (3) devient:

$$\overrightarrow{\text{rot}} = \vec{j} \quad (2.13)$$

Dont il découle que

$$\overrightarrow{\text{div}}\vec{j} = 0 \quad (2.14)$$

Dans le cadre de l'ARQS le courant électrique est conservatif. Cette équation indique son tour que :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.15)$$

D'après ce qui a été vu précédemment et en supposant les milieux non diélectrique ($\varepsilon = \varepsilon_0$, la permittivité du vide).

On peut réécrire les équations de Maxwell comme suite.

$$\overrightarrow{\text{div}}(\mu\vec{H}) = 0 \quad (2.16)$$

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

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.18)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = \vec{j} \quad (2.19)$$

En régime harmonique et en termes de grandeur complexe. Ce régime a une pulsation $\omega = 2\pi f$. f étant la fréquence d'excitation, l'équation (14) devient :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (2.20)$$

II.5- Magnéto Statique

L'application magnétostatique permet l'étude des phénomènes créés par un champ magnétique statique. Le champ magnétique est lié à la présence de courants électriques continus (courants stationnaires) et/ou d'aimants.

L'application magnétostatique peut être utilisée pour la modélisation de divers dispositifs :

- Aimants IRM dans le bus de calculer le champ magnétique dans des structures à aimants
- L'électro-aimant et le contacteur afin de calculer leurs forces magnétiques
- Les machines tournantes pour obtenir ces couples magnétiques
- Les transformateurs pour connaître leur inductance

Le domaine type utilisé pour représenter un problème de magnétostatique sera constitué d'un matériau non conducteur magnétique dur (μ_r, B_r) ou doux (μ_r) « Ω_{nc} », d'une source de courant continu (milieu conducteur non magnétique) « Ω_s », le tout entouré par l'air « Ω_{air} ». Ceci est schématisé par la figure 3:

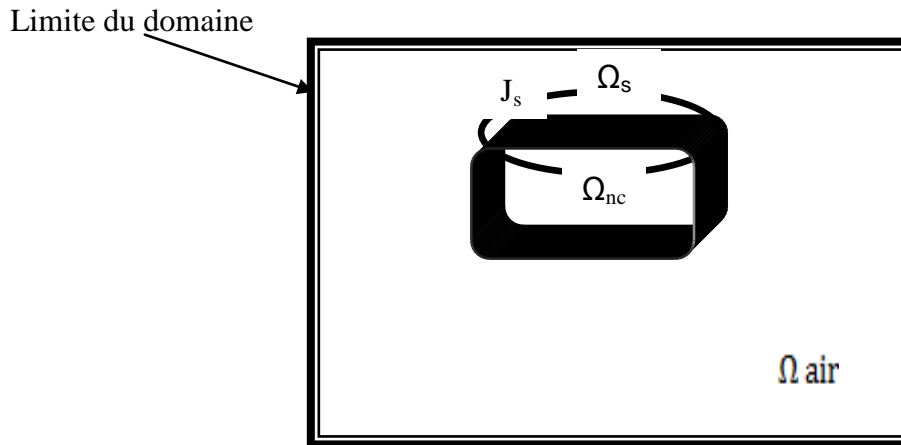


Figure.3 : Représentation d'un problème magnétostatique

Les équations utilisées pour la résolution d'un problème magnétostatique sont :

$$\bullet \quad \overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.21)$$

$$\bullet \quad div \vec{B} = 0 \quad (2.22)$$

$$\bullet \quad \overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (2.23)$$

$$\bullet \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.24)$$

$$\bullet \quad \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.25)$$

Avec

μ_r : Perméabilité relative [H/m], μ_0 : Perméabilité du vide [H/m], \vec{B}_r : Induction rémanente [T]

\vec{B} : Induction magnétique [T] \vec{H} : Champ magnétique [A/m] \vec{J} : Densité de courant en [A/m²]

L'équation résolue par la méthode des éléments finis dans une application Magnéto Statique en potentiel vecteur électrique s'écrit :

$$\overrightarrow{rot} \vec{T} + \overrightarrow{rot} ((1/\mu_0 \mu_r) (\overrightarrow{rot} \vec{A}_j)) + \overrightarrow{rot} ((1/\mu_r) \vec{B}_r) = \overrightarrow{rot} ((1/\mu_0 \mu_r) \overrightarrow{rot} \vec{A}) \quad (2.26)$$

Et la résolution en potentiel scalaire s'écrit :

$$\overrightarrow{div} ((1/\mu_0 \mu_r) (-\overrightarrow{grad} \theta + \vec{T})) + \vec{B}_r) = 0 \quad (2.27)$$

Où :

\vec{A} : Potentiel vecteur magnétique [Wb/m], \vec{T} : Potentiel scalaire électrique source [A/m]

\vec{A}_j : Potentiel vecteur magnétique source [Wb/m], \vec{B}_r : Induction rémanente des aimants [T]

II.6- Magnétique Transitoire

L'application magnétique transitoire permet l'étude des phénomènes créés par un champ magnétique variable dans le temps. Le champ magnétique est lié à la présence de courants électriques variables (et éventuellement d'aimants).

Cette application permet la prise en compte de courants induits dans les régions conductrices (courants de Foucault). Elle permet également la prise en compte, dans ces régions conductrices, des effets de peau et des effets de proximité.

L'application magnétique transitoire peut être utilisée pour la modélisation de machines tournantes, de transformateurs, en régime transitoire.

Le domaine type utilisé pour représenter un problème de magnétique transitoire sera constitué d'un matériau non conducteur magnétique dur (μ_r , B_r) ou doux (μ_r) « Ω_{nc} », d'une source de courant continu (milieu conducteur non magnétique) « Ω_s », le tout entouré par l'air « Ω_{air} », et d'un matériau conducteur magnétique ou non « Ω_n ». Ceci est schématisé par la figure ???:

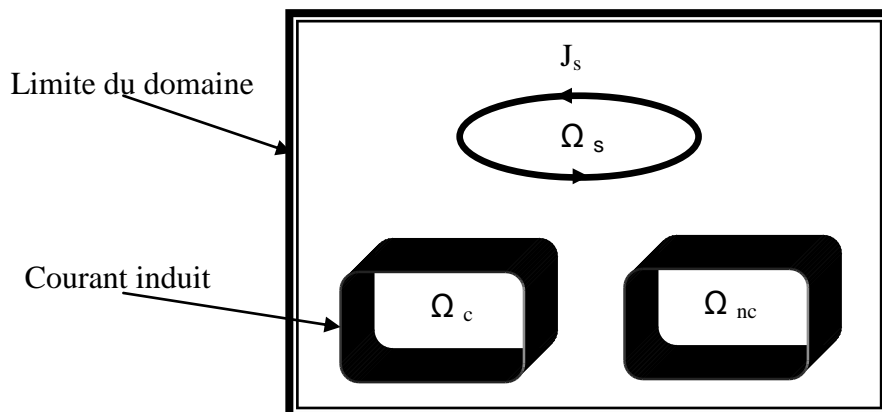


Figure. 4 : Représentation d'un problème magnétique transitoire

Les équations utilisées pour la résolution d'un problème magnétique transitoire sont :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.28)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.29)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad (2.30)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.31)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.32)$$

L'équation résolue par la méthode des éléments finis dans une application Magnétique transitoire en potentiel vecteur magnétique s'écrit :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{T} + \overrightarrow{\text{rot}} ((1/\mu_0 \mu_r) (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}_r)) + \overrightarrow{\text{rot}} ((1/\mu_r) \vec{B}_r) = \overrightarrow{\text{rot}} ((1/\mu_0 \mu_r) \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} + \sigma (\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}} V)) \quad (2.33)$$

II.7- Magnéto Harmonique

L'application magnéto-harmonique permet l'étude des dispositifs en régime harmonique (régime permanent sinusoïdal) à une fréquence donnée. La résolution en complexe des équations de Maxwell suppose que toutes les grandeurs physiques varient de façon sinusoïdale dans le temps à une fréquence donnée. Le champ magnétique est lié à la présence de courants électriques variables, obligatoirement sinusoïdaux.

Cette application permet la prise en compte de courants induits dans les régions conductrices (courants de Foucault). Elle permet également la prise en compte, dans ces régions conductrices, des effets de peau et des effets de proximité.

L'application magnéto-harmonique peut être utilisée pour la modélisation de :

- Chauffage par induction
- Blindage (cuves de transformateurs)
- Compatibilité électromagnétique
- Machines tournantes en régime permanent

Le domaine type utilisé pour représenter un problème de magnéto-harmonique sera constitué d'un matériau non conducteur magnétique doux (μ_r) « Ω_{nc} », d'une source de courant continu (milieu conducteur non magnétique) « Ω_s », le tout entouré par l'air « Ω_{air} », et d'un matériau conducteur magnétique ou non « Ω_n ». Ceci est schématisé par la figure 5:

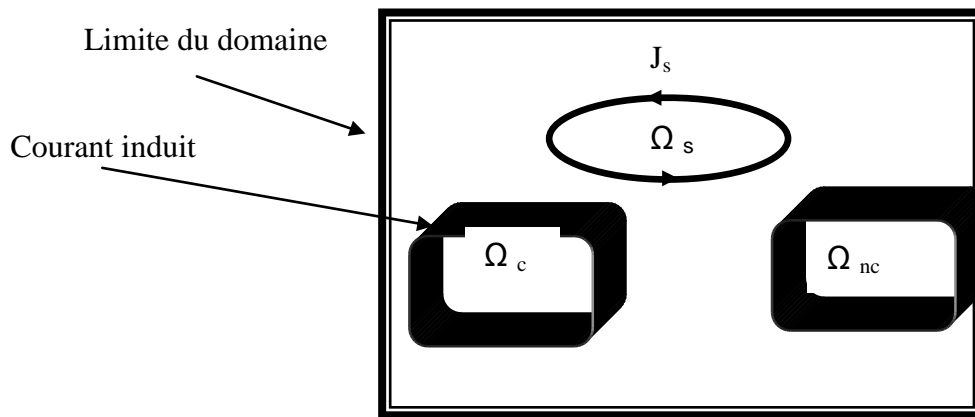


Figure. 5 : Représentation d'un problème magnétodynamique

Les équations utilisées pour la résolution d'un problème magnéto harmonique sont :

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.34)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.35)$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (2.36)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.37)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.38)$$

L'équation résolue par la méthode des éléments finis dans une application Magnétique transitoire en potentiel vecteur magnétique s'écrit :

$$\overrightarrow{rot} \vec{T} + \overrightarrow{rot} ((1/\mu_0 \mu_r) (\overrightarrow{rot} \vec{A}_j)) + \overrightarrow{rot} ((1/\mu_r) \vec{B}_r) = \overrightarrow{rot} ((1/\mu_0 \mu_r) \overrightarrow{rot} \vec{A} + \sigma (\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{grad} V)) \quad (2.39)$$

I. Formulation électromagnétique

La résolution des équations de Maxwell peut être obtenue en considérant les champs comme inconnues. Cependant, on préfère souvent exprimer les champs électrique et magnétique en fonction des potentiels, en effet, il a été montré que le système obtenu en prenant comme inconnues les champs (E, H) converge moins bien que si on travaille avec des potentiels [REN 96]. Les formulations existantes sous flux 3D cédrat, pour la résolution des problèmes de control non destructif par courant de Foucault, par la méthode des éléments finis ; sont basées sur :

- Potentiel vecteur magnétique (\vec{A}, \vec{V})
- Potentiel scalaire magnétique (T, ϕ)
- Impédance de surface (ZI)

Dans de nombreuses situations, les problèmes de control non destructif par courant de Foucault sont souvent simplifiés par l'intermédiaire des potentiels scalaire (T, ϕ) , ou vecteur (\vec{A}, \vec{V}) , pour transformer les équations de Maxwell en régime quasi statique de 1^{er} ordre écrites en fonction des champs (\vec{H}, \vec{E}) et (\vec{B}, \vec{D}) avec l'utilisation des relations constitutives ; en une équation de 2nd ordre écrites en fonction des potentiels scalaire ou vecteur sans utilisation des relation constitutives [XU 04]. Le potentiel vecteur magnétique procure un moyen de calcul robuste et précis, Il maximise cependant le nombre d'inconnues du système algébrique à résoudre et le problème de jauge se pose ; par ailleurs Le potentiel scalaire magnétique réduit considérablement l'effort de calcul par rapport au potentiel vecteur magnétique, car une seule variable par nœud est nécessaire dans les régions dépourvues de courant.

La méthode d'impédance de surface est parmi la plus efficace formulation pour résoudre les problèmes de courants de Foucault à faible profondeur de pénétration (δ) en régime harmonique linéaire [KRÄ 15, YUF 97].

II.8- Potentiel vecteur magnétique (\vec{A}, \vec{V})

La formulation en potentiel vecteur magnétique noté A se déduit de l'équation (12) indique que l'induction magnétique dérive d'un potentiel vecteur magnétique \vec{A} défini par :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (2.39)$$

En remplaçant dans (3) et en sortant l'opérateur de dérivée temporelle on obtient l'égalité :

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = \overrightarrow{rot} \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (2.40)$$

Comme les deux champs ont le même rotationnel, ils sont égaux à un gradient près. On définit alors le potentiel électrique V tel que :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{grad} V \quad (2.41)$$

La combinaison des équations (6) et (9) donnent :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} \quad (2.42)$$

En remplaçant \vec{B} et \vec{E} à l'aide des relations (16) et (17) on obtient la première équation de la formulation AV :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{grad} V \right) = 0 \quad (2.43)$$

La deuxième équation de la formulation AV découle directement de (2) :

$$\overrightarrow{div} \left(\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{grad} V \right) \right) = 0 \quad (2.44)$$

Cette formulation permet de retrouver avec justesse les champs électromagnétiques [CHA 82] et ne pose aucun problème de connexité ; seulement cette formulation nécessite une inconnue vectorielle dans tout l'espace \vec{A} ce qui la rend coûteuse en place mémoire et temps de calcul.

2. Potentiel scalaire magnétique (T, ϕ)

La formulation en potentiel vecteur électrique \vec{T} et scalaire magnétique se déduit de manière analogue. En considérant l'équation (2) et (6), on définit \vec{T} par la relation :

$$\vec{J} = \overrightarrow{rot} \vec{T} \quad (2.45)$$

A partir de l'équation (9) on déduit le potentiel scalaire magnétique ϕ :

$$\vec{B} = \mu (\vec{T} - \overrightarrow{grad} \phi) \quad (2.46)$$

Les équations de la formulation T- ϕ sont :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \overrightarrow{rot} \vec{T} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial t} (\vec{T} - \overrightarrow{grad} \phi) = 0 \quad (2.47)$$

$$\overrightarrow{div} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x} (T - \overrightarrow{grad} \phi) \right) = 0 \quad (2.48)$$

Cette formulation en potentiel scalaire magnétique est plus économe en ressource de calcul ce qui la rend bien adaptée à la résolution de problème 3D [CAR 77]. Elle présente l'avantage de pouvoir déduire le champ magnétique des sources de courant dans les régions non conductrices. Le champ est ainsi calculé simplement à l'aide de la loi de Biot et Savart.

Notons cependant que cette formulation s'applique sur la base de condition plus restrictive que la formulation (A-V), son principal inconvénient étant qu'elle n'est pas compatible avec les régions conductrices comportant des trous (non simplement connexes) car le théorème d'Ampère n'est alors plus respecté. Il est alors nécessaire de créer des coupures électriques [PHU 06].

II.9- Formulation en impédance de surface (ZI)

La condition d'impédance de surface est aux limites particulière, permettant de prendre en compte des régions volumiques conductrices uniquement par leurs frontières, dans le cas où l'effet de peau est très prononcé, ie lorsque la profondeur de pénétration du champ (δ) devient très petite par rapport aux dimensions caractéristiques des conducteurs : $\delta \ll L, r$ (où L'est la longueur ou la largeur, et r un des rayons de courbure du conducteur).

La condition d'impédance de surface impose une relation entre le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{H} à la surface du conducteur.

On fait l'hypothèse d'un champ \vec{E} nul partout dans le conducteur sauf en surface où une densité de courant de surface \vec{J}_s existe.

Le domaine type utilisé pour représenter la formulation d'impédance de surface sera constitué d'un matériau conducteur magnétique ou non « Ω_c », d'une source de courant continu (milieu conducteur non magnétique) « Ω_s » de densité de courant J_s , le tout entouré par l'air « Ω_{air} » limité par la frontière « Σ », ceci est schématisé par la figure 6 :

II.10- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équations de base d'un modèle dédié au CND par courants de Foucault. Les différentes étapes nécessaires ont été rappelées. La discrétisation des équations de Maxwell et le problème des courants de Foucault ont été discutés. Les formulations qui permettent le calcul des champs dans le cas des problèmes magnéto statique, magnéto transitoire et magnéto harmonique ont été détaillées.

La méthode des éléments finis sur la base de la formulation T- ϕ est introduite. Avec cette méthode, le nombre des variables inconnues est réduit par rapport aux autres formulations, sauf Le plus important est que le maillage du conducteur est conservé, même lors de déplacement de la bobine surplombe la plaque.

Nous avons ensuite donné une méthode de formulation à base de l'impédance de surface qui permet de calculer les champs dans le cas de faible profondeur de pénétration. Il est nécessaire, en général, pour résoudre ces équations d'utiliser des méthodes numériques car la solution analytique n'est pas accessible.

Chapitre 3

Méthode et outils d'optimisation

L'introduction d'une méthode d'optimisation stochastique utilisant un algorithme génétique (AG) et Algorithme d'approximation des perturbations stochastiques simultanées (SPSA) permet d'alléger considérablement le travail de conception.

III.1- Introduction

L'optimisation est un outil incontournable en control non destructif par courant de Foucault pour l'identification des lois de comportement électromagnétique (Maxwell-Faraday), permettant de rechercher des valeurs de variables qui rendent optimale une fonction objective (Impédance) pour minimiser l'écart entre les réponses numériques et expérimentales.

Ces dernières années les méthodes d'optimisation ont montré leur efficacité de résoudre les problèmes de control non destructif par courant de Foucault [PER 14, SU 16]. Dans la littérature, beaucoup d'études de caractérisation électromagnétique utilisent des méthodes d'optimisation à base d'algorithme génétique [YE 06, LI 04], et la méthode des perturbations stochastiques par approximation simultanées [FEN 98, AHM 166].

Les premiers travaux pour l'adaptation d'un tel modèle au problème d'optimisation en control non destructif par courant de Foucault à base d'algorithme génétique remontent aux années 1960 avec John Holland [HOL 60] et la méthode des perturbations stochastiques par approximation simultanées est une extension de l'algorithme d'approximation stochastique par différence finie (FDSA) remontent aux années 1952 avec Kiefer-Wolfowitz [KIE 52]

L'optimisation est une procédure permettant de modifier les paramètres ajustables qui peuvent être utilisés pour modifier le comportement de la bobine de control non destructif par courant de Foucault, de la valeur initiale à une valeur qui améliore la fonction objective (impédance Z). Plusieurs algorithmes classiques basés sur le gradient ont été développés et appliqués à divers domaines. Cependant, pour des problèmes comportant de nombreuses variables et des mesures incertaines, ces méthodes ne sont pas aussi efficaces. Motivés par ces raisons, de nombreux chercheurs ont étudié les algorithmes stochastiques sans gradient au cours des dernières décennies.

L'optimisation stochastique est devenue l'une des approches de modélisation importantes dans l'analyse des interactions électromagnétique bobine/plaque. Pour le diagnostic de la plaque en aluminium, donc il est nécessaire d'utiliser un algorithme mathématique qui recherche de manière itérative la solution optimale et / ou moins-optimale car une fonction objectif analytique n'est pas disponible. Par conséquent, il existe un besoin d'algorithmes d'approximation stochastique efficaces pouvant trouver des solutions optimales et / ou moins-optimales à ces problèmes.

Le fonctionnement des capteurs à courant de Foucault (CF) est décrit par les lois de L'induction électromagnétique, depuis les expériences de 1821 d'Ampère et Faraday.

La capacité à détecter des défauts dans les matériaux métalliques en utilisant la technique de contrôle non destructif (CND) par courant de Foucault, implique une haute résolution spatiale et une grande sensibilité des capteurs à employer.

Ce chapitre présente deux méthodes d'optimisation appliquées au contrôle non destructif par courant de Foucault qui sont :

- Algorithmes génétiques
- Algorithme d'approximation des perturbations stochastiques simultanées

En effet, le dimensionnement de l'inducteur va servir à l'optimisation de la distribution du champ magnétique dans la plaque conductrice contenant un défaut.

L'optimisation de capteurs à Courants de Foucault avec les fréquences de travail associées, afin d'augmenter la sensibilité aux défauts recherchés tels que des manques de fusion superficiels ou sub-surfaciques et des porosités locales. Ces optimisations seront menées par simulation en se basant sur la plateforme de simulation FLUX 3d co-développé par le G2Elab et CEDRAT (Flux [4]). Il procédera à l'évaluation expérimentale du capteur conçu.

D'une manière générale, un problème d'optimisation peut s'écrire de la façon suivante :

$$\text{Max } f(x) \in \mathcal{R} \quad (3.1)$$

$$g_i(x) \leq 0 \quad i=1 \dots, m \quad (3.2)$$

$$x_k^{\min} \leq x_k \leq x_k^{\max} \quad k=1 \dots, n \quad (3.3)$$

Où :

x est un vecteur de n composantes

x_k sont les inconnues de paramètres de conception (dimensions géométriques)

$f(x)$ est le critère à maximiser appelé aussi fonction d'objectif (impédance)

x_k^{\min} et x_k^{\max} sont les contraintes de domaine (limite des paramètres géométrique de la bobine).

III.2- Modèle d'étude

Cette étude décrit la modélisation d'un contrôle par courant de Foucault d'une bobine à air double fonction survolant une plaque plane monocouche contenant une encoche rectangulaire qui est le défaut dont sa conductivité électrique égale à zéro ($\sigma=0$), représenté sur le schéma ci-dessus Figure 1 avec la bobine à air de courant de Foucault, voir Figure 1.

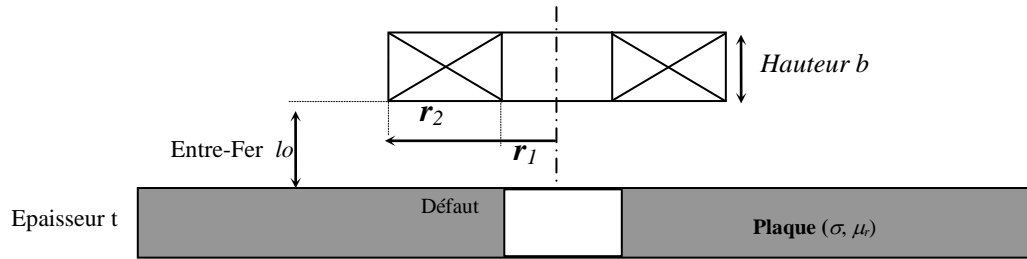


Figure.1 : Configuration du problème en 2d.

Cette sonde de courant de Foucault se déplace au-dessus sans contact de la surface du spécimen. Lorsque cette bobine est sur une zone sans défaut, il n'y a pas de perturbation de signal créé entre les bornes de cette bobine puisqu'elles survolent un matériau électriquement conducteur saine, sinon un signal bruité est produit, ce qui signifie que la sonde est au-dessus du défaut.

III.3- Capteur utilisé

Le capteur étudié est une bobine à air formée de 70 spires. La bobine est en cuivre de conductivité $18.85 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ et d'une hauteur de 3.49mm, alimenté par une source de tension de 5V ; Son principe de fonctionnement est décrit par les lois de l'induction magnétique, largement utilisés dans le domaine de contrôle non destructif, non intrusif (technologie NII) et sans contact, par le champ magnétique qui assure la liaison entre l'objet à contrôler et le capteur à courant de Foucault. Cette technique n'a néanmoins pris son essor qu'à partir de 1938 [KNE 38].

III.3.1- Dimensionnement de la bobine à air

En se basant sur la méthode de Wheeler [WHE 28], nous allons dimensionner l'inductance de la bobine à courant de Foucault, afin de la dimensionner avec un minimum de pertes pour être plus efficace au control non destructive par courant de Foucault.

$$L = 0.8 \frac{a^2 N^2}{6a+9b+10c} \text{ (micro Henry)} \quad (3.4)$$

$$a = \frac{r_1+r_2}{2} \text{ (Pouce)} \quad (3.5)$$

$$c = r_2 - r_1 \text{ (Pouce)} \quad (3.6)$$

D'où :

La bobine à air double fonction de control non destructif par courant de Foucault est géométriquement décrite par quatre paramètres comme décrit sur la figure 2. dont le rayon

interne r_1 (pouce), le rayon externe r_2 (pouce), la hauteur b (pouce) et le nombre de spire N ; Son diamètre extérieur et intérieur, doivent être choisi afin d'optimiser le rapport entre la valeur d'inductance et la surface occupée sur le circuit.

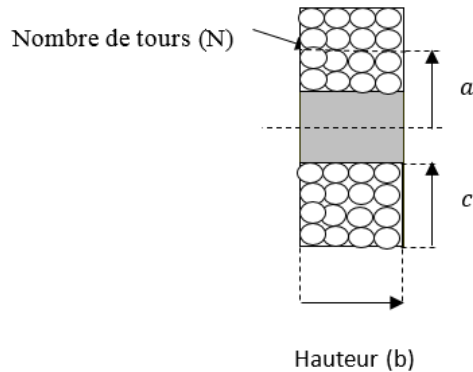


Figure. 2 : Les différents paramètres constituant la bobine à air

Le tableau suivant, représente respectivement tous les paramètres (physique et géométrique) :

Désignation	Symbole	Valeur
Bobine		
Rayon intérieur en mm	r_1	2.01
Rayon extérieur en mm	r_2	3.975
Longueur en mm	b	3.49
Nombre de tour	N	70
Cible en aluminium		
Epaisseur en mm	t	1
Perméabilité	μ	1
Conductivité en MS/m	σ	18.85
Entre fer en mm	ℓ_0	0.34
Défaut de la cible		
Longueur en mm	L	20
Largeur en mm	W	2
Profondeur en mm	D	4

Tableau 1 : Paramètres géométrique et physique de la bobine, de la cible et du défaut

III.4- Résultats expérimentaux

Le travail présenté dans ce chapitre porte sur la conception et l'optimisation de capteur à courants de Foucault (CF) pour le contrôle non destructif (CND). Le CND par CF consiste en l'induction de courants de Foucault dans un milieu conducteur à inspecter à l'aide d'un champ magnétique généré par une bobine.

Par la variation de l'impédance de la bobine qui est mesurée, donnant ainsi une information sur l'état du matériau inspecté

Cette méthode est employée dans différentes applications telles que la caractérisation des métaux, la mesure d'épaisseur ou encore la détection de défauts.

Les résultats obtenus avec ce capteur balayant au-dessus de la plaque monocouche, montrent la variation des composants réel et imaginaire de l'impédance pour les fréquences 50, 100 et 300kHz, décrit sur la figure 3 (a) et (b).

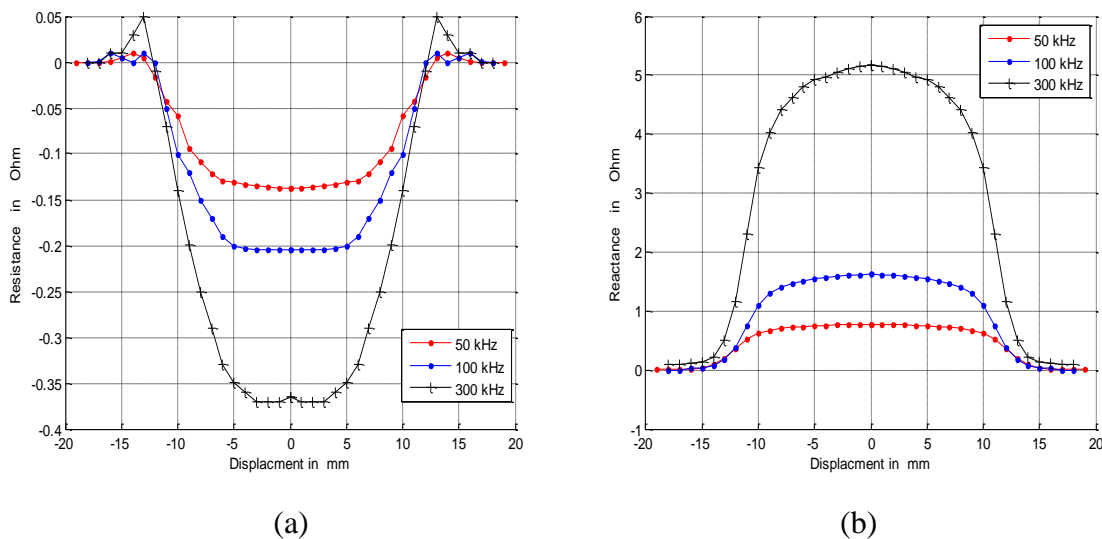


Figure 3 : Variation des parties réelle (a) et imaginaire (b) d'impédance influence par le défaut en fonction de la position du capteur

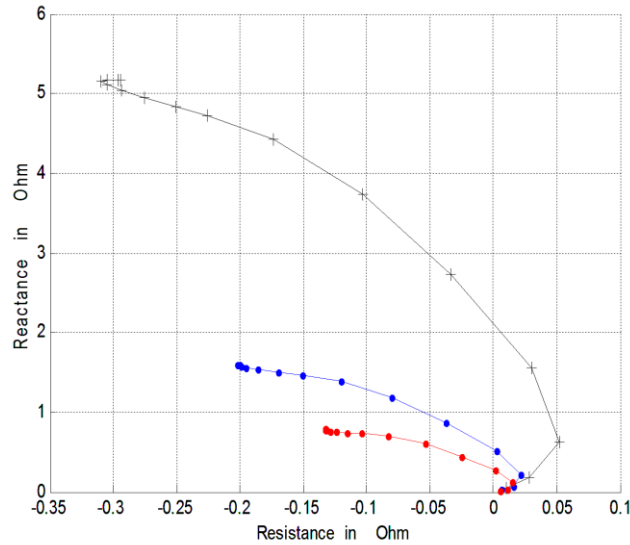


Figure. 4 : Courbe de Lissajous du plan d'impédance

Traditionnellement, les contrôleurs sont conçus sur la base d'une description mathématique d'un système et sur les propriétés des solutions du modèle linéarisé. Par conséquent, il est difficile de mettre en œuvre ces contrôleurs basés sur des modèles à un réel système, en particulier, à un système complexe et non linéaires tels que les sondes de courant de Foucault. Notre problématique est la minimisation d'une fonctionnelle d'erreur entre les mesures réelles obtenus par l'expérimentation et les résultats de simulation, que l'on appelle aussi fonction objective.

Les algorithmes génétiques et SPSA étant deux techniques d'optimisation stochastique travaillant sur les mêmes types de problèmes font partie de ce que l'on appelle les métaheuristiques au même titre que les méthodes de recuit simulé, de recherche avec tabous, de colonies de fourmis, d'essaims particulaires, . . ., grâce auxquelles on tente de résoudre des problèmes d'optimisation difficiles comme les paramètres géométrique de la sonde à courant de Foucault.

III.5- Choix de la méthode d'optimisation

Une méthode d'optimisation est un processus automatique permettant d'identifier l'optimum d'une fonction objectif, Il existe un grand nombre de méthodes d'optimisation, elles-mêmes appliquées au control non destructif par courant de Foucault, qui se divise en deux catégories [LEP, LZY 06] :

- les méthodes déterministes : La plupart des méthodes déterministes existantes [Nelder Mead] ne permettent de rechercher qu'un minimum local, ou elles opèrent leur

recherche en se basant sur la connaissance d'une direction de recherche, habituellement donnée par le gradient de la fonction objectif [HAJJ]. Elles sont généralement rapides (nombre d'itérations réduit) et faciles à implémenter et sensibles aux optimums locaux. Toutefois, le problème de convergence peut être contourné en recommençant l'optimisation en considérant d'autres points initiaux [BRIS].

- les méthodes stochastiques : La méthode stochastique a été choisie parce qu'elle appartient à une famille d'algorithmes très intéressants conduisant à trouver l'optimum global du problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, pour atteindre la solution optimale, elles ne nécessitent ni un point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectif surtout avec les résultats obtenus de la simulation par éléments finis. Une étude précédente a ainsi montré qu'au-delà de deux paramètres, une méthode d'optimisation de type gradient donne des résultats très décevants [MAL 03]. Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluations avant d'arriver à la solution du problème. Parmi les méthodes stochastiques fréquemment employées en control non destructif par courant de Foucault, on retrouve les méthodes basées sur des algorithmes génétiques (GA) et l'algorithme d'approximation de la perturbation stochastique simultanée (SPSA).

L'objectif est de déterminer avec l'algorithme génétique les paramètres géométriques du capteur r_1 , r_2 et la hauteur b en fonction de l'impédance Z (Ohm), la réponse de la sonde CF, afin d'obtenir des variations d'impédance les plus adaptées en fonction des facteurs r_1 , r_2 et b . Le signal (impédance) délivré par le capteur optimal doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Sensibilité la plus importante,
- Variation la plus linéaire possible, en fonction de la fréquence.

Donc le principe est de trouver une fonction objectif (l'impédance mesurée Z), qui prenne en compte ces trois critères afin d'optimiser l'impédance délivré par le capteur en fonction des paramètres géométriques de la bobine à courant de Foucault,

Le but est d'estimer les paramètres de la bobine à partir de l'impédance mesurée, on utilise l'algorithme (algorithme génétique et SPSA).

Le modèle de résolution est très complexe pour établir une relation directe Z , pour surmonter ces problèmes, la méthode du SPSA est appliquée, pour minimiser la différence entre impédance mesurées et impédance calculées.

III.6- Mesure d'impédance

L'impédance (Z) d'un capteur à courants de Foucault (CF) est une propriété propre au capteur dans le cas d'un régime linéaire et harmonique. Elle est complexe avec une partie réelle résistive et la partie imaginaire dite inductive :

$$Z = R + j L\omega$$

Avec Z : impédance [Ohm], ω : pulsation [rd/s], R : résistance [Ohm] et L : inductance [H].

Pour déterminer la caractéristique géométrique de la bobine, d'abord il faut exécuter le modèle direct pour avoir l'impédance mesurée au bord du capteur. Ensuite nous injectons cette valeur de l'impédance dans le modèle inverse.

La simulation est faite pour les trois fréquences standard de contrôle utilisé pour CND par courant de Foucault à savoir 50KHz, 100KHz, 300KHz.

III.7- Algorithmes d'optimisations

Les méthodes d'optimisations (méthodes inverses) reposent sur la connaissance préalable d'un modèle direct qui estime le signal de courant de Foucault. La principale entrée du modèle inverse est l'impédance mesurée. Cependant parmi les caractéristiques géométriques et électromagnétiques certaines sont des entrées. La sortie du modèle dépend de la nature du contrôle à réaliser, dans notre cas on s'intéresse à déterminer les caractéristiques géométriques, rayon interne (r_1), rayon externe (r_2) et la hauteur (b) de la sonde à courant de Foucault.

La principale entrée du modèle inverse est l'impédance mesurée ou simulée (Z). Cependant parmi les caractéristiques géométriques et électromagnétiques certaines sont des entrées. La sortie du modèle dépend de la nature du contrôle à réaliser. La forme générale d'un modèle inverse basé sur le modèle direct est représentée sur la figure 5 [2]

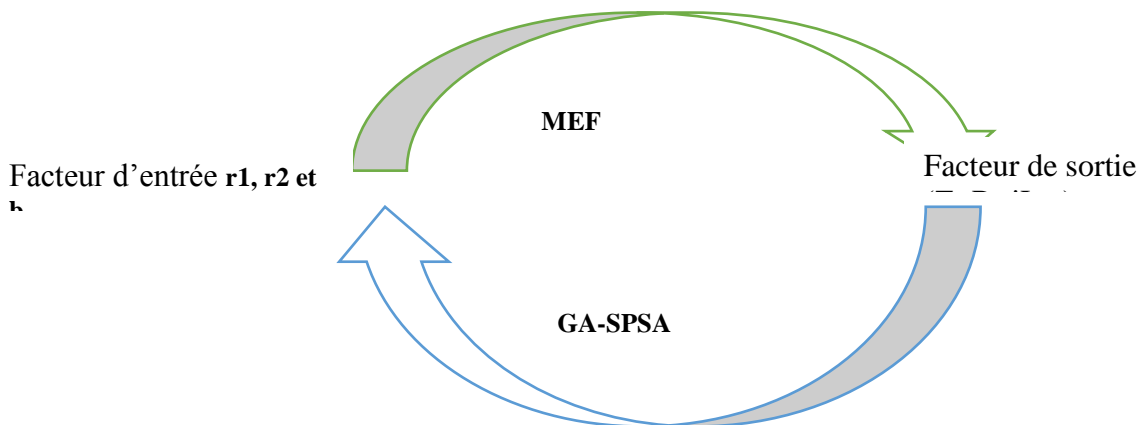


Figure 5 : Schéma général d'un modèle inverse

Le phénomène inverse du contrôle non destructif par courant de Foucault est en général étudié par les méthodes numériques, les algorithmes génétiques (GA) et par l'algorithme d'approximation des perturbations stochastiques simultanées (SPSA) ; qui se sont évaluées en termes d'efficacité, coût de calcul et précision de l'approche.

III.7.1- La méthode des perturbations stochastiques par approximation simultanées (SPSA)

La méthode des perturbations stochastiques par approximation simultanées (SPSA) a attiré une attention considérable dans le domaine de contrôle non destructif par courant de Foucault, optimisation basée sur la simulation et la conception expérimentale.

Le procédé de SPSA dans l'optimisation des paramètres géométrique de la bobine à courant de Foucault pour le contrôle non destructif est représenté sur la Figure 6.

Les ingénieries doivent souvent faire des compromis entre différents facteurs pour obtenir les résultats souhaités. Le choix de ces compromis de la meilleure façon est l'essence même du problème d'optimisation. Les algorithmes mathématiques de recherche et d'optimisation jouent un rôle important dans la recherche des meilleures options pour de nombreux problèmes d'ingénierie.

De tels algorithmes commencent par une estimation initiale d'une solution, et cette solution estimée est mise à jour itération par itération dans le but d'améliorer la mesure de la performance (fonction objectif).

Dans la plupart des problèmes pratiques, la solution dépend de plusieurs facteurs, ce qui conduit au problème d'optimisation multivariée consistant à minimiser ou à maximiser une fonction objective dépendant de multiples facteurs.

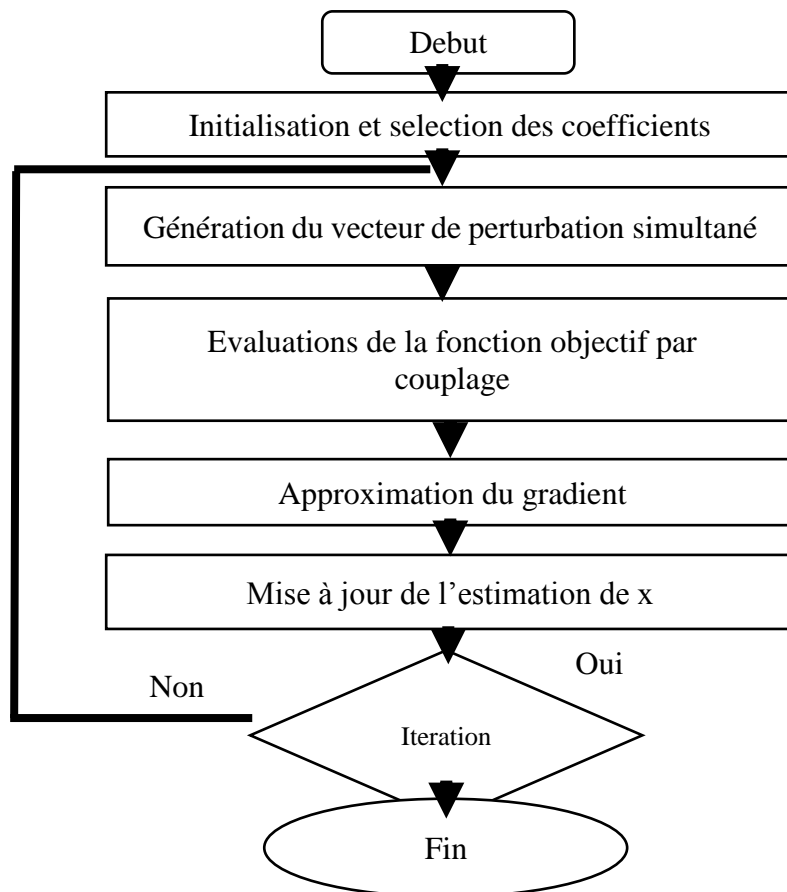


Figure 6 : Organigramme d'un SPSA

La méthode des perturbations stochastiques par approximation simultanées (SPSA), est un algorithme d'approximation de gradient stochastique. Par rapport à un autre algorithme de recherche d'optimum, il est capable de minimiser la fonction d'erreur lorsque la relation entre la fonction objective et les variables à optimiser est inconnue et ne peut être estimée qu'avec des observations bruitées. SPSA part d'une estimation initiale du vecteur variable et trace de manière itérative une séquence d'estimations variables permettant de faire converger la fonction objective vers zéro en fonction de l'approximation du gradient. Son principal avantage est l'efficacité de la calibration simultanée d'un grand nombre de paramètres. Parce que dans SPSA, toutes les variables du vecteur de décision sont perturbées en même temps, et l'approximation du gradient ne nécessite que deux évaluations de fonction, quel que soit le nombre de variables.

L'application de SPSA avec différents points initiales permet d'explorer l'espace de recherche et déterminer ainsi les régions avec les plus faibles valeurs de la fonction objective, et cela sans avoir besoin de calculer des dérivées

La méthode de directions aléatoires SPSA [SPA 92]] a été introduite par James Spall en 1992, c'est une variante de l'algorithme d'approximation stochastique (SA), capable de trouver des optimums globaux. Sa principale caractéristique est l'estimation du gradient à l'aide de perturbations aléatoires, qui requiert seulement deux évaluations de la fonction objectif par itération, peu importe les dimensions du problème d'optimisation.

la méthode SPSA a la même formulation récursive générale de l'approximation simultanée qui donne une estimation de θ sous la forme suivante [SPA 98, SPA 03]:

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k - a_k \hat{g}_k(\hat{\theta}_k) \quad (3.7)$$

Où:

- $\hat{\theta}_k$ est un vecteur aléatoire (gradient approximatif), qui peut être approché par l'estimateur suivant :

$$\hat{g}_k(\hat{\theta}) = \frac{y(\hat{\theta}_k + c_k \Delta_{kj}) - y(\hat{\theta}_k - c_k \Delta_{kj})}{2c_k \Delta_{kj}}, \quad n \geq 1, j=1, \dots, d \quad (3.8)$$

Où:

- a_k représente la boucle d'itération dont $a_k \geq 0$
- $\hat{g}_k(\hat{\theta})$ est l'estimation du gradient $g(\theta) = \frac{\partial f}{\partial \theta}$ en $\hat{\theta}_k$
- Δ_{kj} est un vecteur de j perturbations

Avec :

$$a = 0.16, c = 1, A = 100, \alpha = 0.602 \text{ et } \gamma = 0.101$$

III.7.1.1- Caractéristiques de SPSA

SPSA présente plusieurs caractéristiques qui le rendent attrayant pour de nombreuses applications pratiques, tels que mentionnées ci-dessous.

1. En raison de l'approximation efficace du gradient, l'algorithme convient aux problèmes de grande dimension où de nombreux termes sont déterminés dans le

processus d'optimisation. De nombreuses applications pratiques ont un nombre important de termes à optimiser.

2. SPSA permet à l'entrée de l'algorithme d'être des mesures de la fonction objectif corrompue par du bruit. Par exemple, cela est idéal dans le cas où des simulations Monte Carlo sont utilisées car chaque exécution de simulation fournit une estimation bruyante de la mesure de performance. Ceci est particulièrement pertinent dans la pratique, car un très grand nombre de scénarios doit souvent être évalué et il ne sera pas possible d'exécuter un grand nombre de simulations à chaque scénario (afin de moyenner le bruit). Un algorithme explicitement conçu pour gérer le bruit est donc nécessaire.
3. Les garanties de performance pour SPSA existent sous la forme d'une théorie de convergence étendue. La théorie concerne à la fois l'optimisation locale (Spall, 1992) et l'optimisation globale face à de nombreux optima locaux (Maryak et Chin, 2008) et tient pleinement compte des valeurs bruitées de la fonction objectif. L'algorithme présente des propriétés souhaitables pour l'optimisation globale et locale, en ce sens que l'approximation du gradient est suffisamment bruyante pour permettre d'échapper aux minima locaux tout en fournissant suffisamment d'informations sur la pente de la fonction pour faciliter la convergence locale. Cela évite peut-être au grand nombre de problèmes d'optimisation globale de devoir passer manuellement d'un algorithme global à un algorithme local.
4. La mise en œuvre de SPSA peut être plus facile que d'autres méthodes d'optimisation stochastique (telles que les formes de l'algorithme génétique) car il y a moins de coefficients d'algorithme à spécifier, et certaines directives publiées fournissent des indications sur la manière de choisir les coefficients dans des applications pratiques (Spall, 1998). (Cela ne veut pas dire qu'une implémentation sérieuse de SPSA sur un problème difficile sera facile. Certes, une expérimentation "tâtonnement" sera nécessaire pour une mise en œuvre efficace. Aucune méthode d'optimisation générale ne peut l'éviter.)
5. Bien que la méthode SPSA d'origine soit conçue pour des problèmes d'optimisation continus, des problèmes ont récemment été étendus à des problèmes d'optimisation discrets (Hill, 2005). Cela peut être pertinent pour certains problèmes de conception, par exemple lorsque l'on souhaite trouver le meilleur nombre d'éléments à utiliser dans une application particulière.

6. Bien que SPSA de base utilise uniquement des mesures de fonction objective pour effectuer le processus d'itération dans un analogue stochastique de la méthode de descente la plus raide de l'optimisation déterministe, il est également possible d'avoir des analogues stochastiques efficaces du célèbre algorithme de Newton-Raphson à partir de l'optimisation déterministe, qui utilise les gradients et les matrices de Hessian (dérivée seconde) de la fonction objectif. Cette extension est l'algorithme adaptatif SPSA de Spall (2000) et Spall (2009), qui construit une estimation de la matrice de Hessian à partir de mesures (noisy) de la fonction de perte ou, le cas échéant, à partir de mesures directes (noisy) du gradient de la fonction de perte.
7. Les comparaisons algorithmiques théoriques et numériques formelles de SPSA avec d'autres méthodes d'optimisation de pointe (recuit simulé, algorithme génétique, etc.) ont généralement montré que SPSA était compétitif (et peut-être plus efficace) en termes de coût global de la solution. C'est particulièrement le cas lorsque seules les valeurs bruitées de la fonction objectif sont disponibles.

III.7.2- Algorithme génétique

Le déroulement d'un algorithme génétique peut être découpé en cinq parties

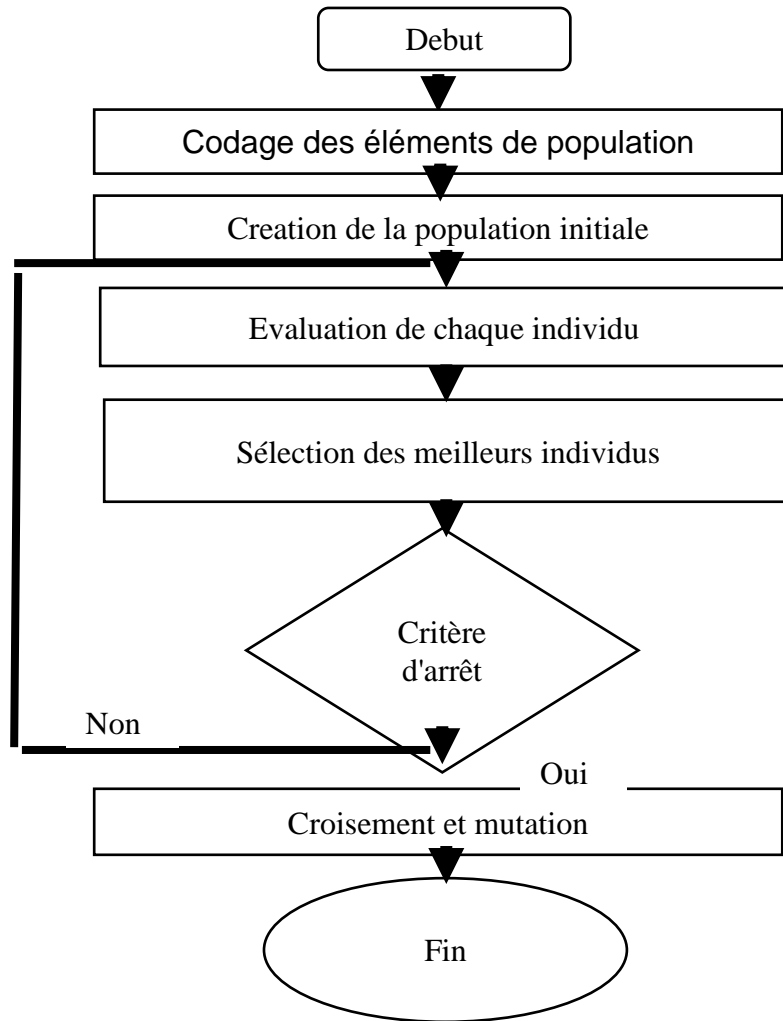


Figure 7 : Organigramme d'un AG

III.7.2.1- aractéristiques d'AG

Les algorithmes génétiques, en tant qu'approche de résolution de problèmes, se caractérisent par certains aspects particuliers: le codage des paramètres du problème à traiter, l'espace de recherche et la fonction d'évaluation qui permet de déterminer la pertinence d'une solution trouvée et l'évolution d'une génération à une autre par la sélection des chromosomes qui participent à la reproduction et les chromosomes à disparaître (42), tels que mentionnées ci-dessous.

1. Codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. Le choix du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires (0 et 1) ont été

très employés pour créer des opérateurs de croisement et de mutation simples. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs, pour l'optimisation de problèmes à variables continues.

2. Génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.
3. Une fonction à optimiser. Celle-ci prend ses valeurs dans \mathbb{R}^+ et est appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu. Celle-ci est utilisée pour sélectionner et reproduire les meilleurs individus de la population.
4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'état.
5. Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

En revanche leur inconvénient majeur réside dans le nombre important d'évaluations nécessaires et leur temps de convergence.

III.8- Comparaison

Nous comparons deux algorithmes d'optimisation efficaces, une méthode approximation stochastique Perturbation simultanée et un algorithme génétique.

SPSA et la méthode GA atteignent le même niveau de précision statistique pour un nombre donné d'itérations, même si SPSA utilise fois moins de mesures de la fonction objectif à chaque itération (chaque approximation de gradient n'utilisant que le nombre de mesures de fonction). Cela indique que SPSA convergera vers la solution optimale dans un niveau de précision donné avec fois moins de mesures de la fonction objectif que la méthode GA

Méthodes/Fréquences	50 kHz	100 kHz	300 kHz
Expérimental	-0.1370+j0.7697	-0.2050+j1.6211	-0.3650+j5.1648
Réel	-0.1349+j0.7558	-0.2017+j1.6019	-0.3592+j5.1
Erreur relative ΔZ en %	1.8	1.19	1.25
SPSA	-0.1374+j0.7701	-0.2048+j1.6282	-0.3672+j5.1935
Erreur relative ΔZ en %	0.072	0.4347	0.556
AG	-0.1394+j0.7894	-0.2081+j1.6709	-0.3759+j5.3164
Erreur relative ΔZ en %	2.538	3.053	2.93

Tableau 2 : Valeur max d'impédance pour chaque méthode pour une cible contenant un défaut avec les fréquences 50, 100 et 300 kHz

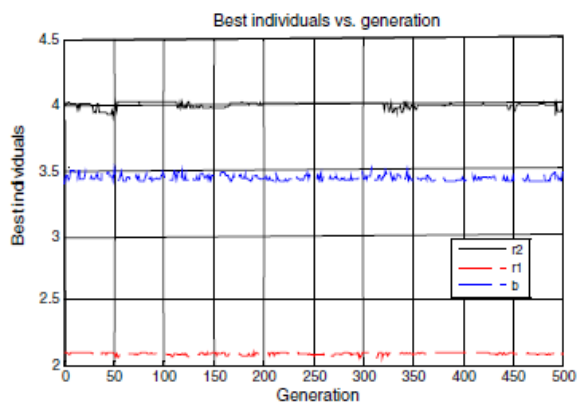
	Analytique (Ana)	FEM	Expérimental (Exp)	Erreur relative en %	
				Exp/Anal	Exp/FEM
Inductance en air (μH)	200.25	200.15	204.5	2.08	2.13

Tableau 3 : Valeur d'inductance de la bobine pour une fréquence de résonance $F=9.15$ MHz

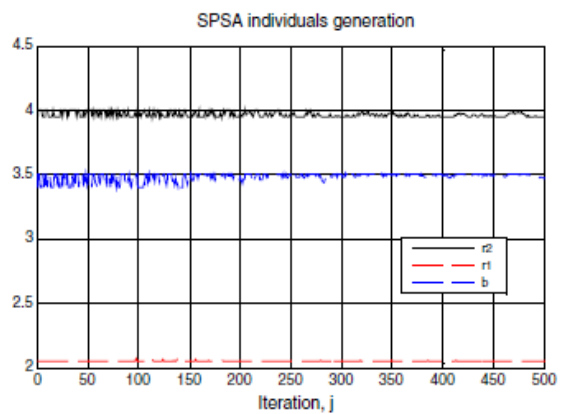
Paramètres géométrique de la bobine	Min	Max
Rayon intérieur r_1 en (mm)	2	2.1
Rayon intérieur r_2 en (mm)	2.97	4.001
Hauteur b en (mm)	3.4	3.5

Tableau 4 : Limite des paramètres géométrique de la bobine utilisé en SPSA et AG

La convergence des méthodes numériques d'optimisation SPSA et AG sont étudiée suivant la figure 6, pour plusieurs itérations et les résultats du meilleur individu sont décrits dans le tableau 5



(a)



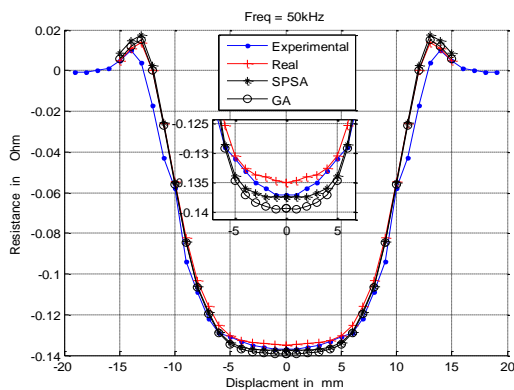
(b)

Figure 6 : Evaluation sous AG (a) et SPSA (b)

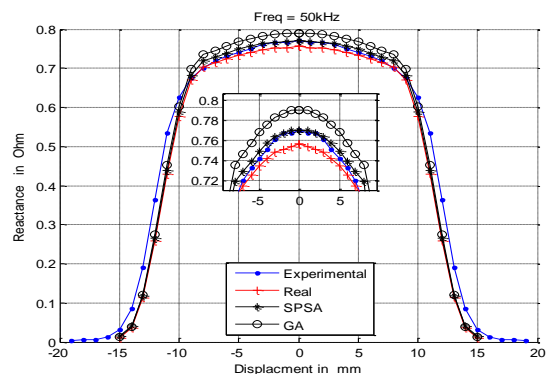
Paramètres	Valeur réelle	Valeur AG	Valeur SPSA
Désignation	mm	mm	mm
r ₁	2.01	2.0917	2.0498
r ₂	3.975	3.9741	3.9506
b	3.49	3.4679	3.4723

Tableau 5 : Paramètres optimisés sous SPSA et AG

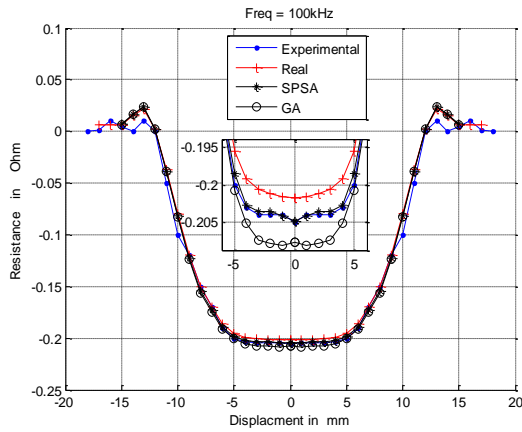
Compte tenu des résultats obtenues et vérifié sous flux 3d cédrat, nous avons opté pour les méthodes stochastiques SPSA par rapport à l'AG du point de vue de la diminution de l'erreur, entre les résultats expérimentaux et celles des méthodes des éléments finis.



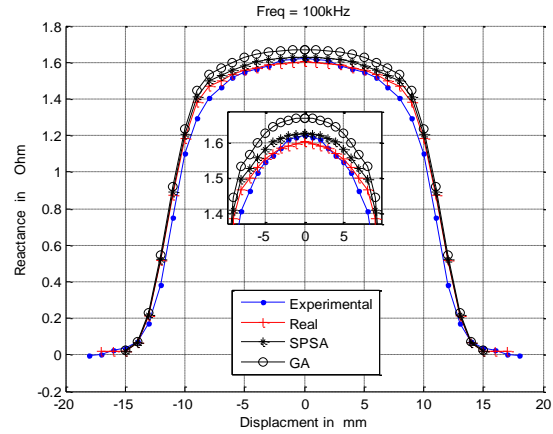
(a)



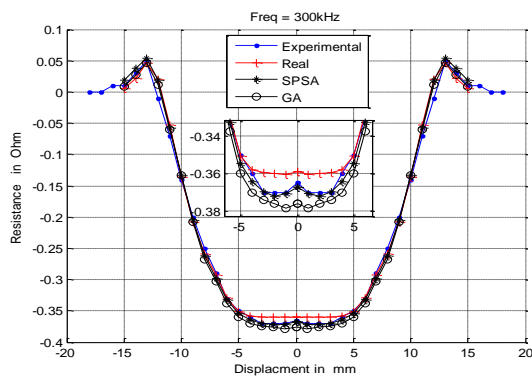
(b)



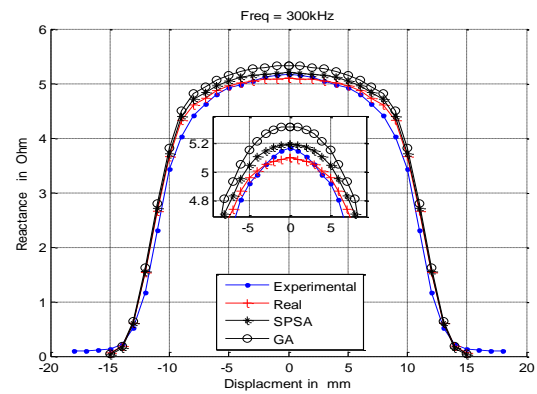
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure. 6 : Variation des parties réelles et imaginaires optimisés en fonction du déplacement bobine

Les figures 6a, 6b, 6c, 6d, 6e et 6f représentent la variation de l'impédance pour différentes valeurs de la fréquence F_r , de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance en fonction du déplacement de plaque non saine défaut pour les fréquences 50 kHz, 100 kHz et 300 kHz.

On remarque que plus la valeur de la fréquence augmente, plus la valeur de la Réactance augmente, c'est-à-dire variation proportionnelle à la fréquence. On remarque que la valeur de la fréquence diminue, la valeur de la Résistance diminue, c'est-à-dire variation inversement proportionnelle à la fréquence. L'augmentation de la fréquence permet de concentrer les courants induits sur une petite surface possible (minimisation de l'effet de peau) d'où variation de l'impédance proportionnelle à la fréquence.

L'analyse comparative entre les résultats de l'expérience et SPSA montre que ces deux courbes se ressemblent, c'est-à-dire qu'il y a un bon accord entre les résultats éléments finis après optimisation et les résultats issus de notre modèle expérimental avec une erreur de 0.072 %

pour 50kHz, 0.4346% pour la fréquence de 100kHz et 0.556 % d'erreur avec une fréquence de 300kHz.

III.9- Conclusion

Les algorithmes génétiques et le SPSA étant deux techniques d'optimisation stochastique travaillant sur les mêmes types de problèmes, il est logique de chercher à les comparer afin de tirer de leurs avantages respectifs. Après plusieurs évaluations de ces deux techniques sur le problème de l'optimisation des paramètres géométriques de la bobine destinée pour au contrôle non destructif par courant de Foucault, on remarque que le SPSA converge généralement plus vite vers la solution optimale lorsque le problème est de taille raisonnable, Il est conclu que SPSA peut être utilisé efficacement dans l'optimisation de la sonde à courant de Foucault.

Come conclusion, SPSA est une méthode puissante d'optimisation pour résoudre des problèmes non linéaires complexes. Il a une base théorique solide et est souvent plus efficace et plus facile à mettre en œuvre que des méthodes bien connues telles que les algorithmes génétiques.

Chapitre 4

CND-CF des plaques planes multicouche sans rivet

IV- Introduction

Les structures métalliques multicouches sont de plus en plus utilisées par l'industrie aérospatiale et de nombreuses industries. La détection des défauts dans les structures multicouches conductrices est une tâche très importante dans la protection de l'appareil, où un petit défaut peut avoir un grand impact sur la sécurité d'un système. Nous devons donc traiter les défauts avant de détruire le système. Par conséquent, le contrôle par courants de Foucault est une technique efficace pour détecter les défauts dans les matériaux conducteurs [PIN 06, YLI 07]. L'objectif de ce travail est d'utiliser la méthode des éléments finis pour simuler la géométrie multicouche avec rivet en utilisant différents capteurs avec une variation dans la longueur du noyau de ferrite pour la sensibilité de se dernier dans la détection des défauts.

IV.1- Type des capteurs courants de Foucault

Les capteurs de courant de Foucault se décomposent en deux configurations :

- Capteurs à double fonction : le plus simple et les plus couramment utilisés, est constitué d'une seule bobine (cf. figure 1.8 a), dont le champ magnétique de réaction varie selon la circulation des courant de Foucault dans le matériau. En cas de perturbation, ce champ de réaction modifie les parties réelle (R) et partie imaginaire (Xl) de l'impédance du bobinage ; c'est-à-dire la réactance inductive et la résistance effective de la bobine ; donnant ainsi une information sur l'état du matériau inspecté.
- Capteurs à fonctions séparées : composés d'éléments distincts pour l'émission et la réception. La fonction d'émission est assurée par au moins une bobine, représenté en figure 1.9, la fonction de réception est réalisée par l'intermédiaire d'une bobine.

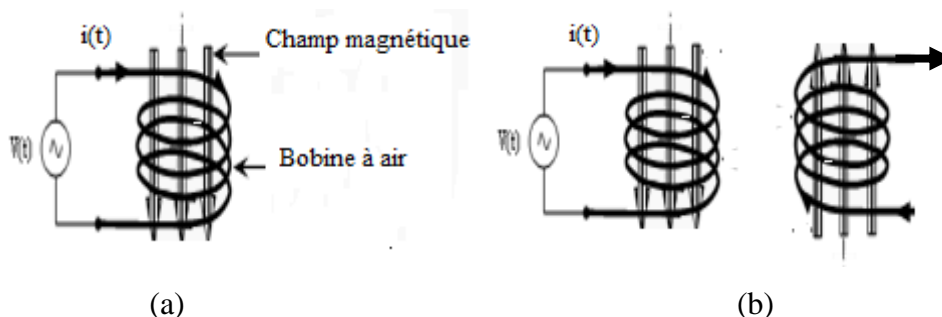


Figure.1 : Capteur à double fonction (a) et séparée (b)

IV.2- Modes de mesure des courants de Foucault

Les modes de mesure se réfèrent, en partie, au branchement des éléments constituant le capteur. On distingue deux modes de mesure :

- **Mesure absolue** : Une mesure absolue se compose, dans son principe, d'un seul récepteur. Cette mesure permet d'être sensible à la fois aux paramètres électromagnétiques du matériau (conductivité électrique et perméabilité magnétique) et à l'épaisseur du matériau. Avant le contrôle d'une pièce, un équilibrage sur cale étalon peut, dans certains cas, être effectué pour compenser le signal afin d'atteindre une valeur prédéterminée.
- **Mesure différentielle** : La mesure différentielle se compose d'au moins deux éléments récepteurs proches. Cette mesure revient à effectuer une différence des acquisitions réalisées simultanément entre les éléments récepteurs, sensible aux défauts locaux présents dans le matériau inspecté. Lors du déplacement du capteur, en cas de présence d'un défaut, un déséquilibre du signal est perçu. Ce déséquilibre apparaît lorsqu'un seul des récepteurs se situe à proximité du défaut.

IV.3- Modes d'excitation des courants de Foucault

L'excitation des capteurs à courant de Foucault peut se faire par trois modes :

- **Excitation mono-Fréquence** : Cette excitation, consiste à alimenter l'émetteur par un courant sinusoïdal et de fréquence donnée. La fréquence des CF est identique à celle qui leur a donné naissance. Dans le cas d'une détection de défauts, le choix de la fréquence dépend essentiellement de la profondeur des défauts recherchés et du matériau.
- **Excitation multifréquence** : Cette excitation peut permettre, par rapport à l'excitation mono-fréquence, de s'affranchir de paramètres perturbateurs du fait que les informations relatives aux matériaux (conductivité électrique, perméabilité magnétique, entrefer ou dimensions d'un défaut) sont potentiellement enrichies par les différentes fréquences utilisées.
- **Excitation pulsée** : elle est une alternative à l'excitation multifréquence, ou l'émetteur est excité avec un signal impulsionnel, à durée finie et de contenu spectral riche, qui peut être de différentes formes telles que rectangulaire, triangulaire ou bien demi-sinusoïdale.

IV.4- Forme de capteurs courants de Foucault

Les capteurs à courant de Foucault peuvent avoir une grande variété de formes. Le choix du type de capteur, par conséquent sa structure, dépend de l'application. On rencontre essentiellement trois types de capteurs que l'on peut décrire de la façon suivante [12718_2008]:

- Capteurs surfacique ou palpeurs : Permettent d'inspecter des surfaces planes ou bien de formes complexes voir figure (a).
- Capteurs encerclant : Destinés au contrôle de matériaux de formes cylindriques telles que les tubes, barres ou encore les fils voir figure (b)
- Capteurs internes ou sondes : Destinés au contrôle interne de tubes. Pour cela, on distingue notamment les sondes tournantes, nécessitant un mouvement de translation voir figure (c)

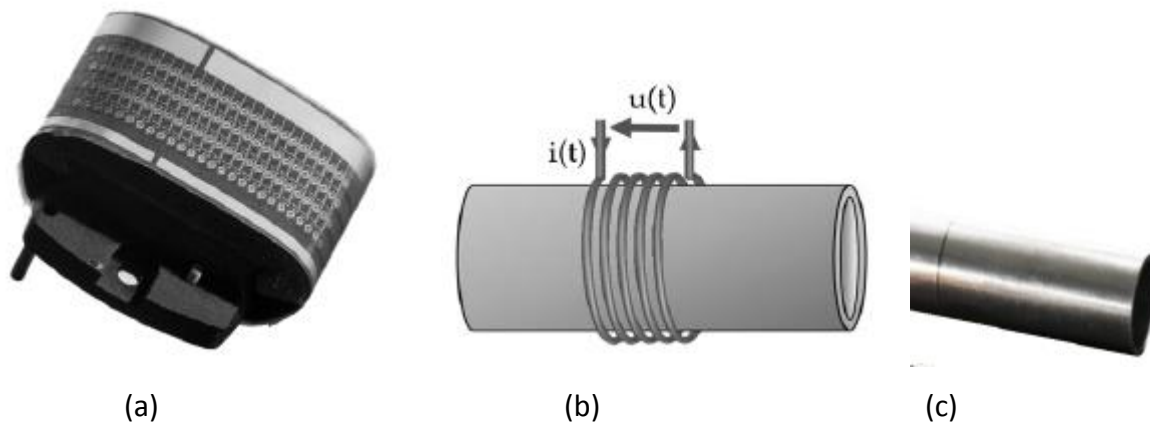


Figure.2 : Trois exemples de capteurs à courant de Foucault

IV.5- Mesure de La conductivité ' σ' '

La conductivité électrique mesurée par l'application de la loi d'Ohm, de manière directe, par Le principe de la méthode des 4 pointes est expliqué dès 1954 par Valdes [VAL 54] ; consiste à placer quatre pointes alignées et distantes du même espacement en contact du matériau à analyser (Figure 1). Un courant I [A] est imposé dans la paire de pointes extérieures et une différence de potentiel V [V] est mesurée entre les pointes de la paire intérieure d [m] entre les points 2 et 3. Plusieurs hypothèses sont nécessaires à l'obtention du résultat. Ainsi, les résistances de contact entre pointes et échantillon sont considérées négligeables, le diamètre

de contact entre pointe et échantillon est petit par rapport à la distance entre les pointes [VAL 54], la conductivité du matériau est supposée isotrope et homogène et le courant uniformément réparti à travers la section de l'échantillon. L'utilisation de 4 pointes (et non pas 2 pointes) permet de minimiser les résistances de contact parasite car alors un faible courant circule dans les pointes de mesure (pointes intérieures). Sous les conditions dictées précédemment, la conductivité électrique peut alors être directement déterminée analytiquement sachant que S [m²] est la section du matériau.

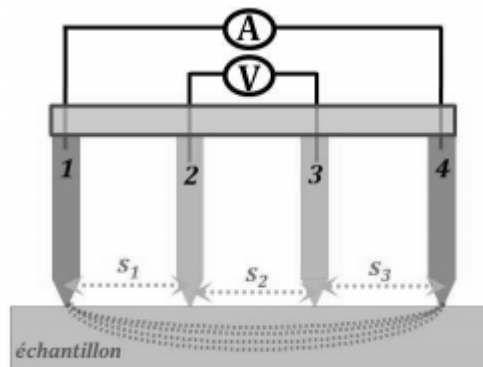


Figure.3: Représentation schématique de la sonde à 4 pointes alignées

L'estimation de la conductivité [S/m] est caractérisée par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{I \cdot d}{V \cdot S} \quad (4.1)$$

Nb : La surface de l'échantillon doit, en revanche, être exempte de traces de peinture ou de corrosion afin d'assurer un bon contact électrique entre les pointes de touche et le matériau.

IV.6- Mesure de la perméabilité ' μ '

L'évaluation de μ peut être réalisée au moyen d'un banc de mesure analogue à la méthode dite du perméamètre [A773_01]. Cette manipulation, représentée par la figure 2.2, est mise en œuvre au laboratoire Génie Électrique et Électronique de Paris (GeePs), dans le but de caractériser les propriétés magnétiques de matériaux ferromagnétiques sous contraintes [Dahia_2015].

Le perméamètre est un appareil, permettant ainsi de tracer la courbe $B(H)$ de l'échantillon sous test [Fiorillo_2010]. L'échantillon est entouré par une bobine d'excitation permettant de générer le champ magnétique H .

La variation du flux magnétique traversant l'échantillon donne naissance à une tension induite e [V], aux bornes de la B-Coil. La mesure de la tension induite permet d'évaluer la valeur de

l'induction B . Dans le cas où B est homogène dans le volume du bobinage, son expression peut être obtenue à partir de e par :

$$B = \frac{1}{N_{B_coil} S_{EC}} \int e(t) dt \quad (4.2)$$

Où S_{EC} [m²] est la section de l'échantillon caractérisé.

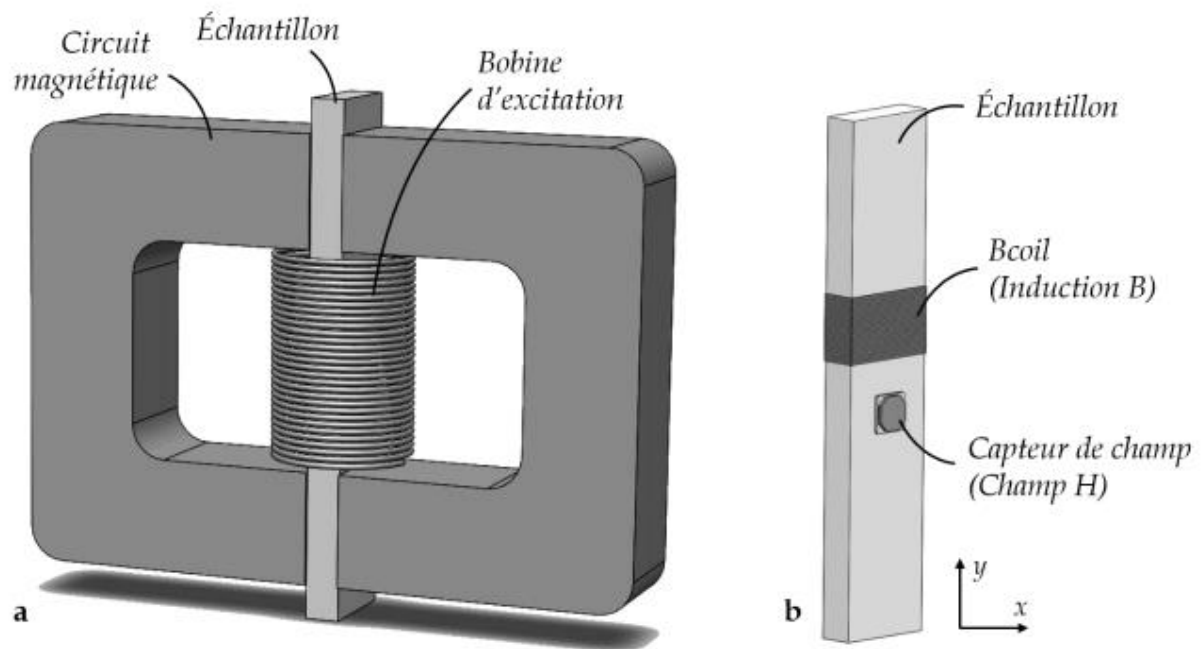


Figure 2.2 : Méthode du perméamètre (a). Détail de l'échantillon (b) [Délambre 16]

IV.7- Étude du problème

Pour valider les résultats du modèle électromagnétique par la technique des courants de Foucault développé lors de ce travail, les variations d'impédance en fonction de la fréquence sont mesurées par un analyseur d'impédance (Agilent). Cette partie d'expérimentale a été réalisée dans le labo ICEPS de l'université Djilali Liabes.

La bobine est connectée avec les fils qui sortent de l'analyseur d'impédance. Puis elle est installée sur la plaque qui va être caractérisée. Le défaut a été créé au niveau de la société Sonacome par la découpe laser (Bystronic) ; L'entrefer est réalisé par une bande adhésive. L'impédance mesurée est l'ensemble de la plaque avec et sans défaut et la bobine.

IV.8- Etude du problème multicouche sans rivet et bobine à air

Le CND par CF est couramment utilisé pour l'évaluation de la conductivité électrique de matériaux non ferromagnétiques aussi bien en laboratoire qu'en milieu industriel [Fischer_2002]. En pratique, deux modes d'excitation sont généralement utilisés : l'excitation pulsée, lorsque la bobine est alimentée par une source de type impulsion [Tai_1996] [Chen_2015], et l'excitation harmonique. Nous nous intéresserons dans cette partie à l'excitation harmonique du type mono-fréquence d'un capteur à double fonction qui est majoritairement employée pour l'évaluation de σ [E1004_2009]. Classiquement, c'est l'impédance Z aux bornes du capteur qui est mesurée [Zergoug_2000] [Dziczkowski_2013]

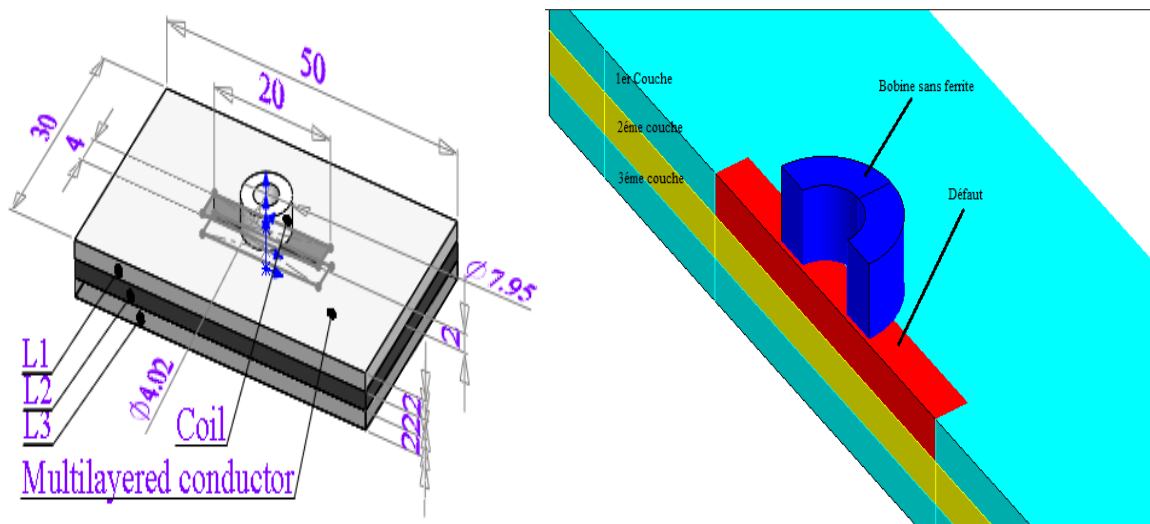


Figure.1 : Schéma de configuration du problème étudié

Le dispositif étudié, représenté sur la figure ci-dessus, comprend les éléments suivants :

- Une bobine à air
- Un bloc multicouche

Un bloc multicouche en aluminium de conductivité $\sigma = 30.6 \text{ MS/m}$, contenant un défaut externe dans la première couche (représenté sur le schéma ci-dessus par une encoche rectangulaire).

Une sonde à air de courant de Foucault composée d'une seule bobine, se déplace à la surface du bloc en transversal suivant la longueur du défaut.

Lorsque cette bobine à air soit sur une zone sans défaut, il n'y a pas de signal créé entre la bobine puisqu'elle survole un matériau identique. Lorsqu'elle survole un défaut, un signal est produit indiquant que le matériau est non identique ie la conductivité non identique.

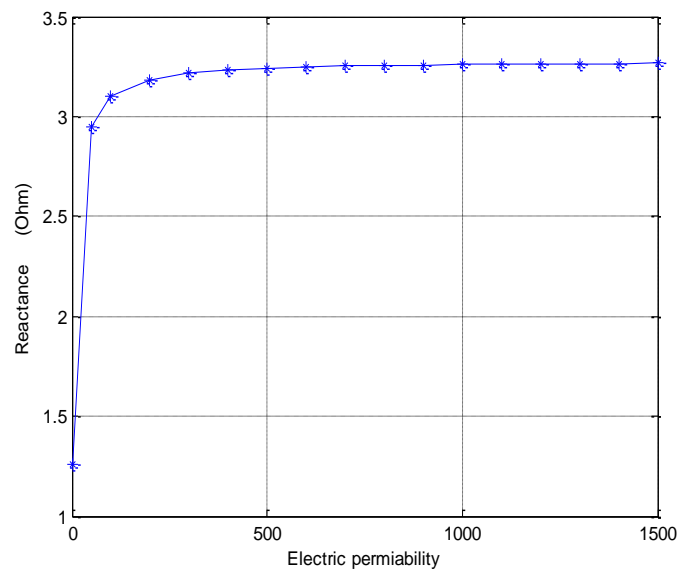
IV.9- Modèle mathématique

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \frac{1}{2} \iiint_{space} \frac{1}{\mu} \bar{B}^2 dv \\ W = \frac{1}{2} LI_{eff}^2 \end{array} \right. \quad (4.3)$$

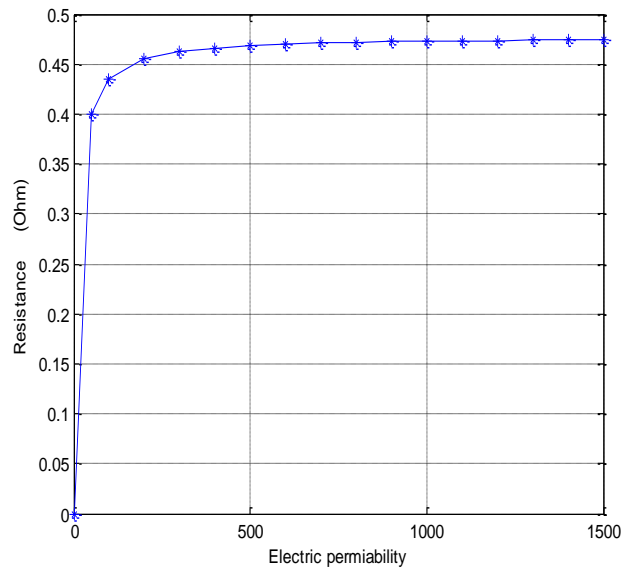
$$\left\{ \begin{array}{l} p = \frac{1}{2} \iiint_{conductor} \frac{1}{\sigma} \bar{J}^2 dv \\ p = RI_{eff}^2 \end{array} \right. \quad (4.4)$$

IV.10- Rôle du noyau en ferrite

Les noyaux de ferrite sont largement utilisés pour améliorer la sensibilité du capteur à courant de Foucault, pour la caractérisation des matériaux dans leurs structures. L'addition de noyau de ferrite joue un rôle important pour canaliser et concentrer le champ magnétique aux alentours de défaut. En fixant les caractéristiques électriques et géométriques de notre modèle et en faisant varier la perméabilité magnétique du noyau de ferrite, les variables de la réactance et la résistance du capteur en présence de la cible sont représentées sur les figures, exigeant que la ferrite est électriquement isolante.



(a)



(b)

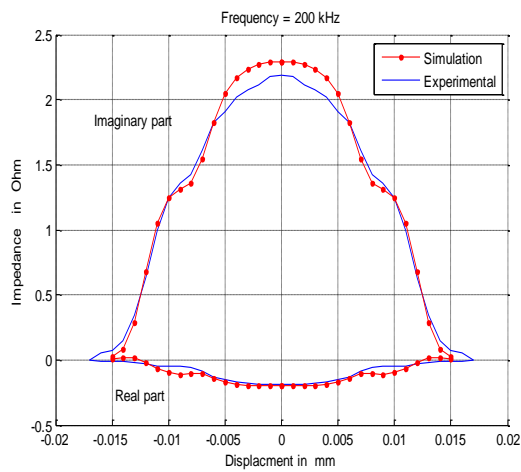
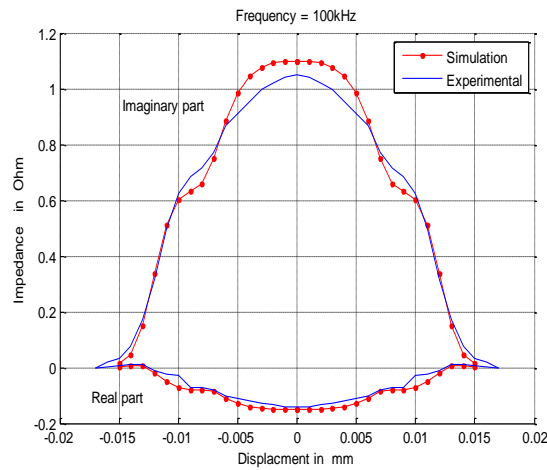
Figure.3 : Variation de la réactance (a) et résistance en fonction (b) de la perméabilité électrique

La figure 2.6 montre, la variation des composants réelles et imaginaire de la bobine à noyau de ferrite et avec ferrite lorsque la perméabilité évolue de 0 à 1500. La courbe évoque un croissant de lune que l'autre, ensuite se stabilise par la saturation de noyau de fer.

IV.11- Bobine sans ferrite

Les premières étapes de la simulation sont les calculs d'impédance. L'impédance de la bobine est directement calculée à partir des pertes Joule (partie réelle), équation (2), et de l'énergie magnétique (partie imaginaire), équation (1). Les résultats sont donnés par un solveur éléments finis de flux, où les fréquences de fonctionnement sont de 100 kHz et 200 kHz. La variation de la fréquence et la position du défaut nous ont permis de tracer l'impédance en fonction du déplacement du capteur.

Dans la première partie, la simulation est réalisée avec un conducteur multicouche dans lequel la sonde est sans noyau de ferrite et le défaut est dans la première couche. Ces résultats de simulation présentés dans la figure 5 donnent un bon accord avec les résultats expérimentaux suivant les figures ci-dessus.



(a)

(b)

Figure. 5. Caractérisation des défauts pour une structure multicouche sans rivet et sans ferrite

(a) $F=100$ kHz et (b) $F=200$ kHz

La figure 2.6 montre, la variation des composants réelles et imaginaire de la bobine à air lorsque cette dernière se déplace de façon transversal, avec allure relativement faible.

IV.12- Bobine avec ferrite

Dans la deuxième partie, la simulation est réalisée avec un conducteur multicouche dans lequel la sonde est avec noyau de ferrite de même longueur et diamètre interne de la bobine et le défaut est dans la première couche. Les résultats de simulation présentés dans la figure 5 donnent un bon accord avec les résultats expérimentaux suivant les

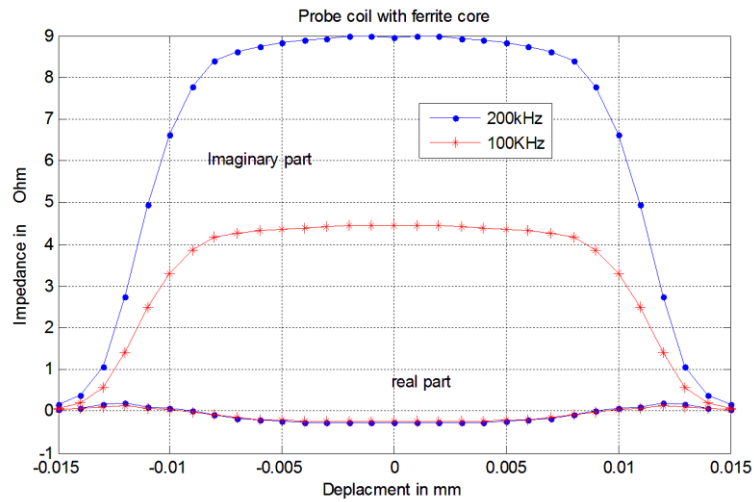


Figure. 5. Caractérisation des défauts pour une structure multicouche sans rivet et avec ferrite
(a) $F=100$ kHz et (b) $F=200$ kHz

La figure 2.6 montre, la variation des composants réelles et imaginaire de la bobine à noyau de ferrite lorsque cette dernière se déplace de façon transversal, avec des fortes amplitudes de l'allure par rapport à la figure 1 du à la présence de noyau de ferrite.

IV.13- Simulation du comportement de défaut profond

Dans le but d'étude numérique par la MEF de CND-CF du bloc multicouche contenant les même dimensions de défaut de la figure 1 en deuxième couche de la plaque, pour voir la réponse de la sonde CF à air réalisé.

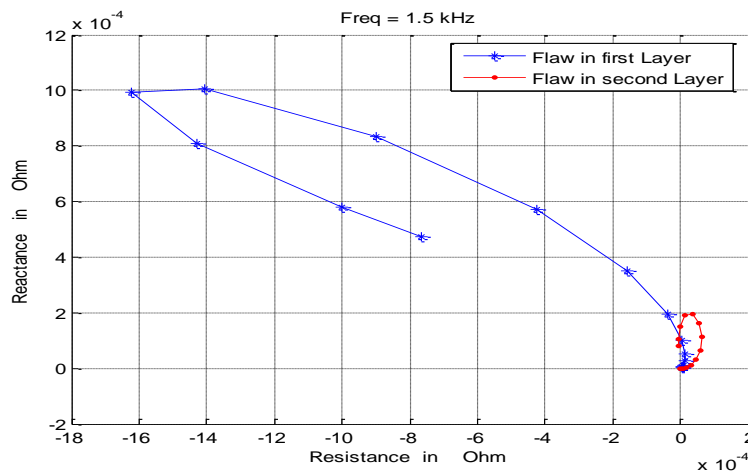


Figure. 4. Variations of the real and imaginary part of the impedance in the multi-layer structure pour $F = 1.5$ kHz.

La figure 2.6 montre, dans le plan complexe des parties réelles et imaginaire de la simulation de la réponse de la bobine lorsque 1.5 kHz.

Cette dernière représente des faibles mesures dans le cas où le défaut de conductivité $\sigma = 0$ est profond avec cette faible fréquence $F=1.5$ kHz du capteur à air en présence de matériaux purement conducteurs amagnétique porte un d défaut de conductivité $\sigma = 0$.

D'où la détection de défaut profond à 2mm de la surface est difficile au moyen d'une sonde CF optimisé

IV.14- Conclusion

Ce chapitre explique comment traiter la fissure à l'aide d'un logiciel de flux. CND-CF est technique efficace pour détecter des défauts dans les matériaux conducteurs multicouches. Cette méthode a été simulée par la méthode des éléments finis, pour examiner l'allure de la détection d'une fissure profonde et non profonde dans la structure multicouche de conductivité identique. Les résultats montrent que la bobine à noyau de ferrite est très sensible à la détection des défauts par rapport à la bobine de l'air. Le rôle du noyau de ferrite a été montré par une augmentation de la partie réelle de l'impédance. Le couplage entre le capteur et la ferrite est donc meilleur.

Le calcul montre qu'au-delà d'une certaines profondeur le capteur optimisé devient insensible et les variations de l'impédance correspondantes sont presque nulles. Un autre paramètre physique a été étudié, c'est la fréquence d'alimentation de la bobine. La variation de la résistance augmente en fonction de l'augmentation de la fréquence. Par contre la variation de réactance diminue.

Chapitre 5

CND-CF des plaques multicouches avec rivet

V.1- Introduction

Aujourd'hui, la simulation en CND par CF [13, 74] permet de modéliser la réponse d'un capteur sur une pièce de géométrie canonique [17, 130] ou tube [100, 119]

La méthode des éléments finis permet de traiter des configurations de contrôle très variées, d'un point de vue de la géométrie comme des caractéristiques physiques [2, 84,125].

Les avancées techniques dans la simulation numérique des méthodes de contrôle non-destructif par courant de Foucault ont permis à la simulation de prendre une place importante, aussi bien dans l'industrie que dans l'aéronautique. Dans ces domaines, la modélisation est aujourd'hui un outil indispensable en amont du contrôle.

Les structures métalliques multicouches sont de plus en plus utilisées par l'industrie aérospatiale et de nombreuses industries. Emplacement des défauts dans les structures multicouches conductrices est une tâche très importante dans la protection de l'appareil, où un petit défaut peut avoir un grand impact sur l'évolution d'un système. Nous devons donc traiter les défauts avant de pouvoir être fanatisé le système. Par conséquent, le contrôle des courants de Foucault non-destructif (CND-CF) est une technique efficace pour détecter des défauts dans des matériaux conducteurs [1] [5]. L'objectif de ce travail est d'utiliser la méthode des éléments finis pour simuler la géométrie multicouche. Cette méthode d'inspection est en cours d'extension pour détecter les défauts profonds et non profond dans ces structures rivetés. Le logiciel recommandé peut simuler la réponse de la sonde à la présence de deux défauts dans la première et dans la seconde couche est donc destiné au vaste monde du génie électrique, domaine dans lequel il est devenu une référence en conception par éléments finis. Cela se traduit par plus de 1000 références industrielles dans le monde aussi bien dans les industries, les bureaux d'études, les centres de recherche et l'enseignement. Les applications phares sont les moteurs et alternateurs, les capteurs, transformateurs, le traitement thermique, le Contrôle Non Destructif, la signature et l'enregistrement magnétique, la CEM.

V.2- Modèle mathématique

Les courants de Foucault, sont régis par les équations de Maxwell. L'intensité des courants de Foucault dans un matériau conducteur caractérisé par, la conductivité électrique σ [S/m], et la perméabilité magnétique μ [H/m], diminue avec la profondeur notée z [m]. Dans le cas d'une pièce conductrice infiniment épaisse à surface plane, excitée uniformément à une fréquence f [Hz] par une onde plane, le module de la densité de courant J [A/m²] est exprimé par [Le Bihan_2003] :

$$J = J_s e^{-z} \sqrt{\pi f \sigma \mu} \quad (5.1)$$

Où J_s est le module de la densité du courant de Foucault [A/m²] à la surface du matériau

L'équation 1 montre que l'amplitude de J diminue de manière exponentielle en fonction de la profondeur du matériau. Cette décroissance de l'amplitude du courant de Foucault en fonction de la profondeur du matériau δ [m], aussi dite profondeur de pénétration effective, caractérise la distance à laquelle la densité des courants de Foucault a perdu 63 % de son amplitude [Perdrix_1990]. Cette profondeur de pénétration est décrite par :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (5.2)$$

L'efficacité de détection des défauts, dans un matériau en CND par CF diffère selon le degré de perturbation de la circulation des courants et le type de détecteur à courant de Foucault. Idéalement, la circulation des courant de Foucault doit être perpendiculaire au défaut afin d'obtenir une réponse maximale [IAEA48_2011].

La figure 1.6, décrit trois configurations dans lesquelles, selon l'emplacement d'un défaut surfacique, la circulation des CF créés par une bobine circulaire, peut être impactée :

- Dans le défavorable où l'impact du défaut par rapport aux CF est limité.
- Dans le cas où le défaut est parallèle aux CF (figure 1.6(b)), le niveau de détection du défaut par le capteur reste faible,
- Dans le plus favorable contrairement à la figure (a) et (b), ici le défaut coupe perpendiculairement la circulation des CF.

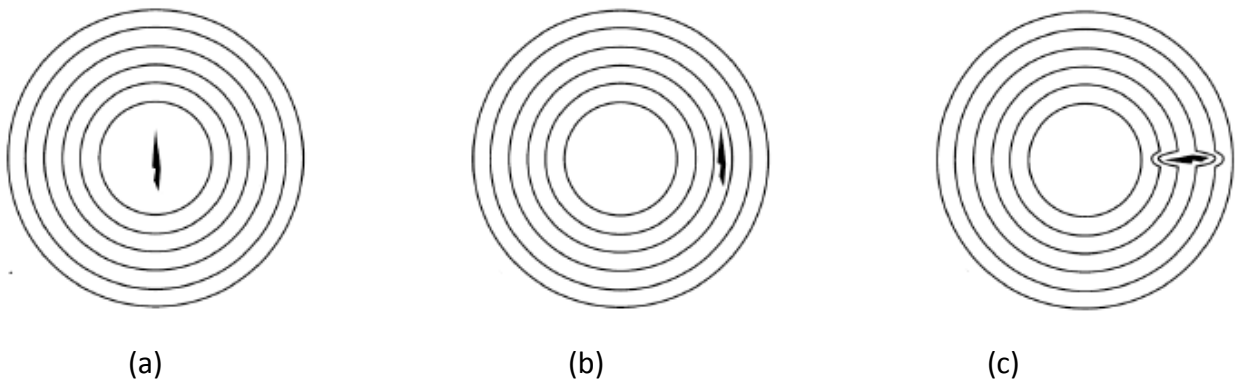


Figure 1. : Sensibilité réduite (a), faible (b) et maximum (c) à la détection d'un défaut selon son emplacement [Hellier_2001]

V.3- Sonde CF avec noyau de ferrite

Parfois les enroulements sont enroulés autour d'un noyau de ferrite. Puisque la ferrite est ferromagnétique, le flux magnétique produit par l'enroulement est canalisé par la ferrite que par l'air. Par conséquent, le noyau de ferrite concentre le champ magnétique près du centre de la sonde. Ceci, alternativement, concentre les courants de Foucault près du centre de la sonde. Des sondes avec des noyaux de ferrite tendent à être plus sensibles que les sondes de noyau d'air et à être affectées moins par les oscillations et par le décollage de la sonde, [22].



Figure.2. : Bobine CF avec ferrite

V.4- Sonde CF sans noyau de ferrite

La sonde à courants de Foucault sans noyau est facile à modéliser mais elle n'est pas très sensible car la distribution dans l'espace de l'énergie émis par le capteur n'est pas optimale, [10]. On peut augmenter la sensibilité du capteur à courants de Foucault en augmentant son diamètre, mais ceci nuit à sa résolution latérale, [21]



Figure.3 : Bobine CF sans ferrite

V.5- Problème étudié

Un des enjeux du CND par Courants de Foucault (CF) dans le domaine aéronautique est l'inspection de structures rivetées pour détecter d'éventuels défauts qui peuvent se créer en tige, corps ou sommet, Pour répondre à cette problématique une étude a été réalisée par la méthode des éléments finis en 3D. FLUX 3D a ainsi pu démontrer sa capacité à obtenir de bons résultats pour ce type d'étude et ce, pour des temps de calculs des plus raisonnables. La simulation de tels dispositifs de CND par CF nécessite de porter une attention toute particulière aux techniques de modélisation à employer (maillage, formulations, description du mouvement des sondes) de façon obtenir ces bons résultats.

Le problème modélisé est une plaque multicouche plane rivetée contenant un défaut circulaire au alentour de rivet illustrée sur la figure

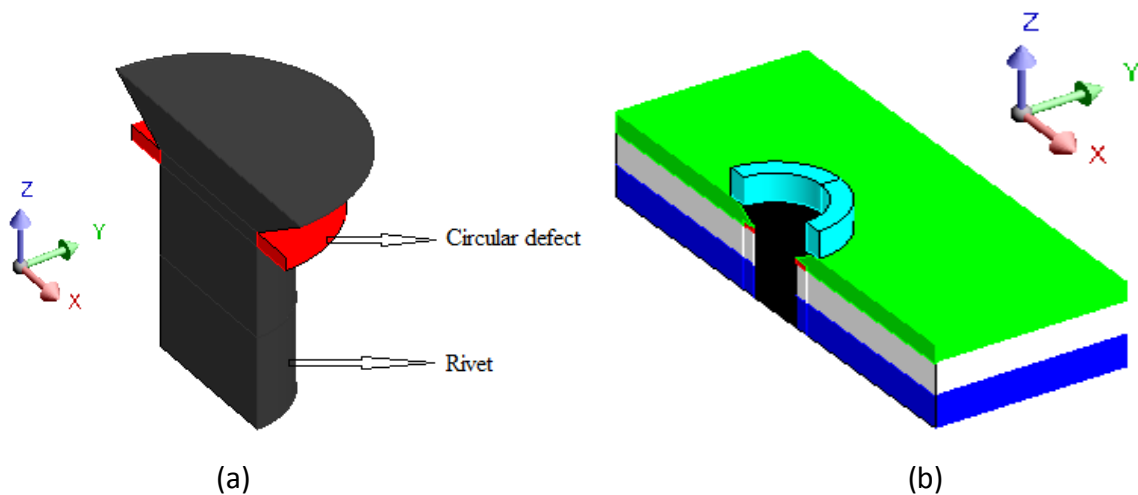


Figure.4 : Rivet avec défaut (a) et Problème 3D

V.6- Description du problème

L'approche de modélisation de la structure multicouche rivetée est de la même manière de la simulation étudié dans le chapitre, sauf que le défaut touche la surface de rivet. Le contact entre plaques a été réalisé par un rivet en titane de conductivité électrique $\sigma = 1.4 \text{ MS/m}$. Le diamètre du rivet est de 4,9 mm et l'épaisseur est de 5,27 mm avec une conductivité électrique de 15 MS / La perméabilité magnétique relative du noyau en ferrite est égale à $\mu_r = 2200$). Les paramètres physiques géométriques sont donnés dans le tableau 1

L'objectif principal de cette étude est pour calculer de la variation d'impédance de la bobine avec et sans noyau de ferrite pour une structure rivetée, d'où la mise en œuvre du modèle

mathématique qui a permis de calculer le potentiel vecteur magnétique [6] [7]. On peut déterminer l'impédance de la bobine d'interaction avec la structure métallique, en supposant que la cible est une structure linéaire et isotrope.

Pour obtenir des résultats proches de la précision avec le logiciel de flux 3D, on doit réunir les points clés de la simulation, présentés ci-dessous [11] :

1. Le flux magnétique doit être calculé dans une région à prise constante ;
2. mailles fines dans le constituant près de défaut et rivet
3. maille fine dans la partie du conducteur solide en dessous du déplacement de la sonde d'où les courants de Foucault sont créés.

Bobine	Rayon intérieur (r1)	1mm
	Rayon extérieur (r2)	1,6mm
	Longueur (h)	2 mm
	Nombre de tours	320
	Fréquences	[0, 9, 10] kHz
Plaque multicouche	Epaisseur de la première couche (t1)	1.27mm
	Epaisseur de la seconde couche (t2)	4 mm
	L'épaisseur de la troisième couche (t3)	4 mm
	Conductivité (σ)	1MS / m
	Lift-off (L0)	0.32mm
Défaut	Rayon interne (ra)	3,175
	Rayon extérieur (rb)	5 mm
	Hauteur (hc)	0,62 mm
	Profondeur (d)	0.65mm

Tableau.1 : Paramètres du système.

Les simulations ont été réalisées dans le cadre du logiciel Flux CEDRAT où la configuration générale des sondes traitées est [16] :

- a. Bobine sans ferrite
- b. Bobine à noyau de ferrite dont la longueur et la section de ferrite, la même que la longueur et diamètre interne de la bobine
- c. Bobine à noyau de ferrite dont la longueur est supérieure à la hauteur de la bobine mais les diamètres sont égaux

Les résultats obtenus avec le modèle 3D pour l'inspection par courants de Foucault d'une plaque multicouche affectée par un défaut circulaire au niveau de rivet avec les différentes sondes ont été présentés pour la validation du modèle de simulation. Cette partie est considérée pour la validation de notre modèle de simulation pour chaque capteur [12]. Les valeurs de l'impédance (réactance et résistance) du capteur en présence de la cible défectueuse sont présentées dans les figures suivantes.

Nous allons présenter les résultats obtenus par la simulation numérique lors des trois différentes bobines. Les tests élaborés ont pour but la détection des défauts et la mise en évidence des différents paramètres influents sur la mesure de l'impédance du couple «capteur-cible ».

V.7- Etude avec bobine sans noyau de ferrite

Dans cette partie, la simulation est réalisée avec un conducteur multicouche dans lequel la bobine de la sonde est sans noyau de ferrite et le défaut est dans le corps de rivet en contact avec la couche supérieur. Les résultats de simulation présentés sur la figure 6 sont présentés avec des fréquences différentes.

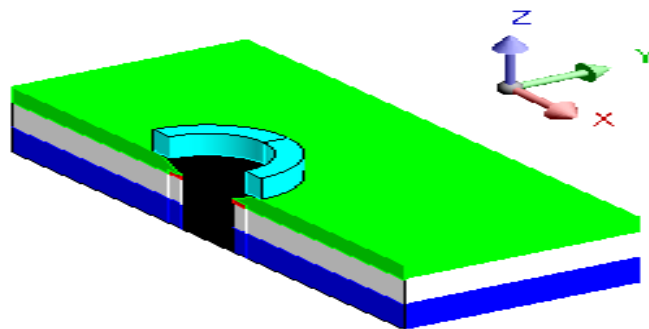
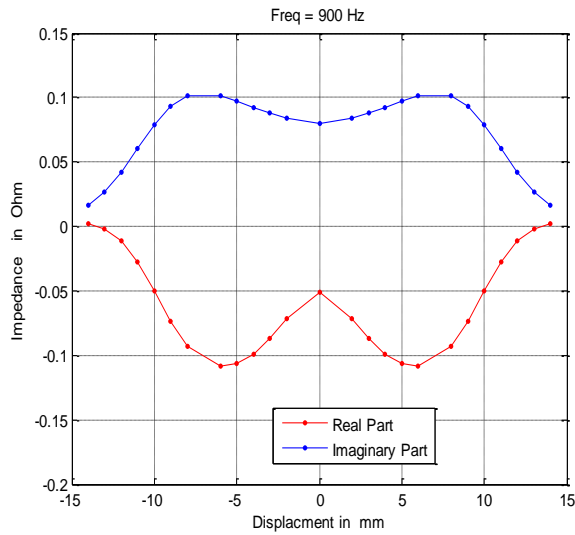
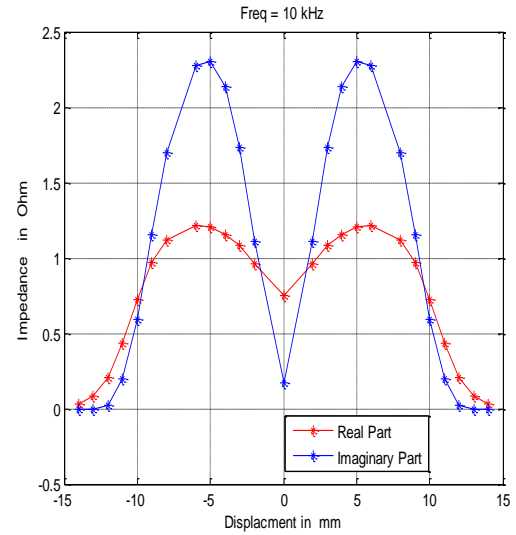


Figure .5 : plaque multicouches excitée par une bobine avec noyau de ferrite de longueur supérieure à la hauteur de la bobine

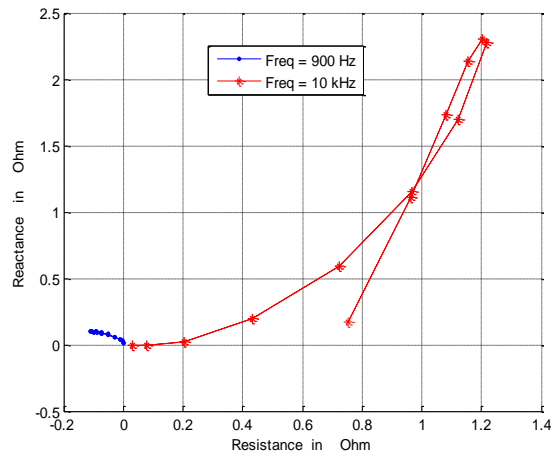
Nous allons présenter les résultats obtenus par la simulation numérique lors des trois différentes bobines. Les tests élaborés ont pour but la détection des défauts et la mise en évidence des différents paramètres influents sur la mesure de l'impédance du couple «capteur-cible ».



(a)



(b)



(c)

Figure.6 : (a) et (b) Variations de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence et (c) plan complexe de l'impédance

V.8- Etude avec bobine à noyau de ferrite de même longueur

Dans cette partie, la simulation est réalisée avec un conducteur multicouche dans lequel la bobine de la sonde est avec un noyau de ferrite et le défaut est dans la première couche. Le but du noyau de ferrite est de concentrer les champs magnétiques dans la pièce à usiner, pour augmenter la sensibilité de la sonde au défaut [4]. Les résultats de simulation présentés sur la figure 6 sont présentés avec des fréquences différentes.

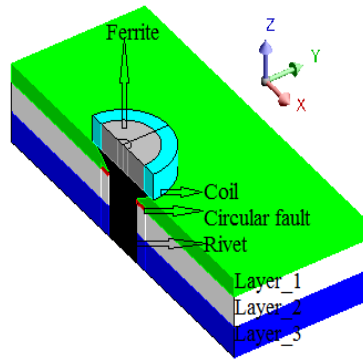


Figure.7 : plaque multicouche excité par une bobine avec noyau de ferrite de longueur supérieure à la hauteur de la bobine

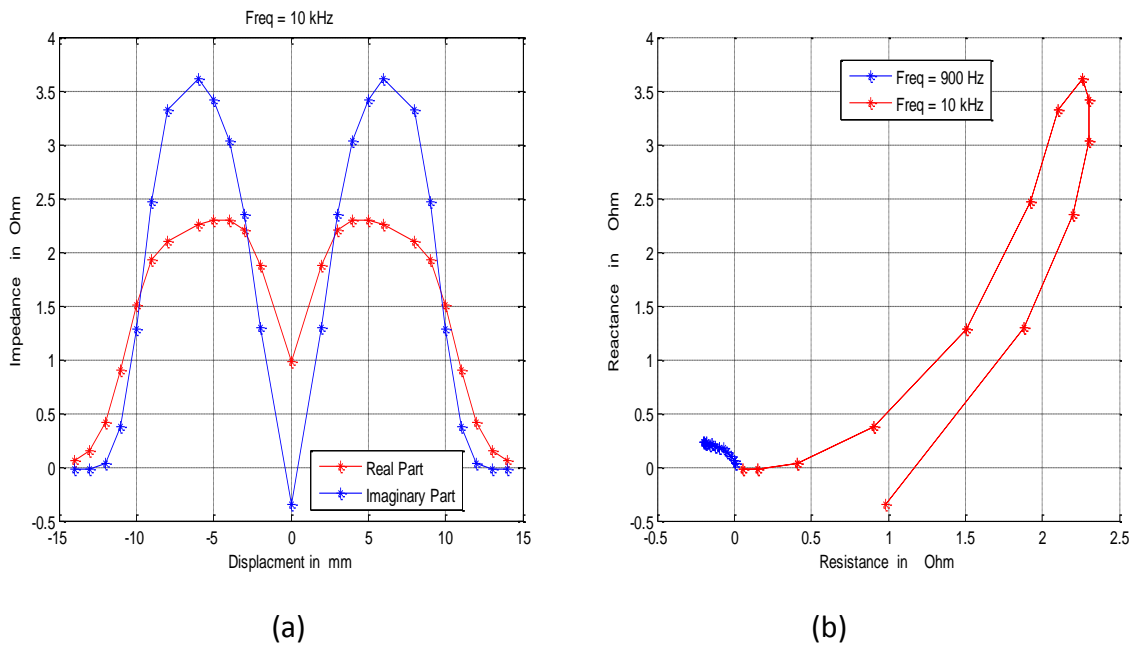


Figure.8: Variations of the real and imaginary part of the impedance using a first probe (a) et son plant complexe.

V.9- Etude avec bobine à noyau de ferrite d'une longueur grande

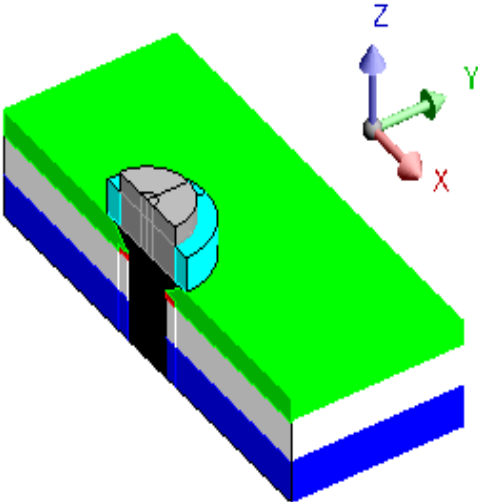


Figure.9 : plaque multicouches excité par une bobine avec noyau de ferrite de longueur supérieure à la hauteur de la bobine

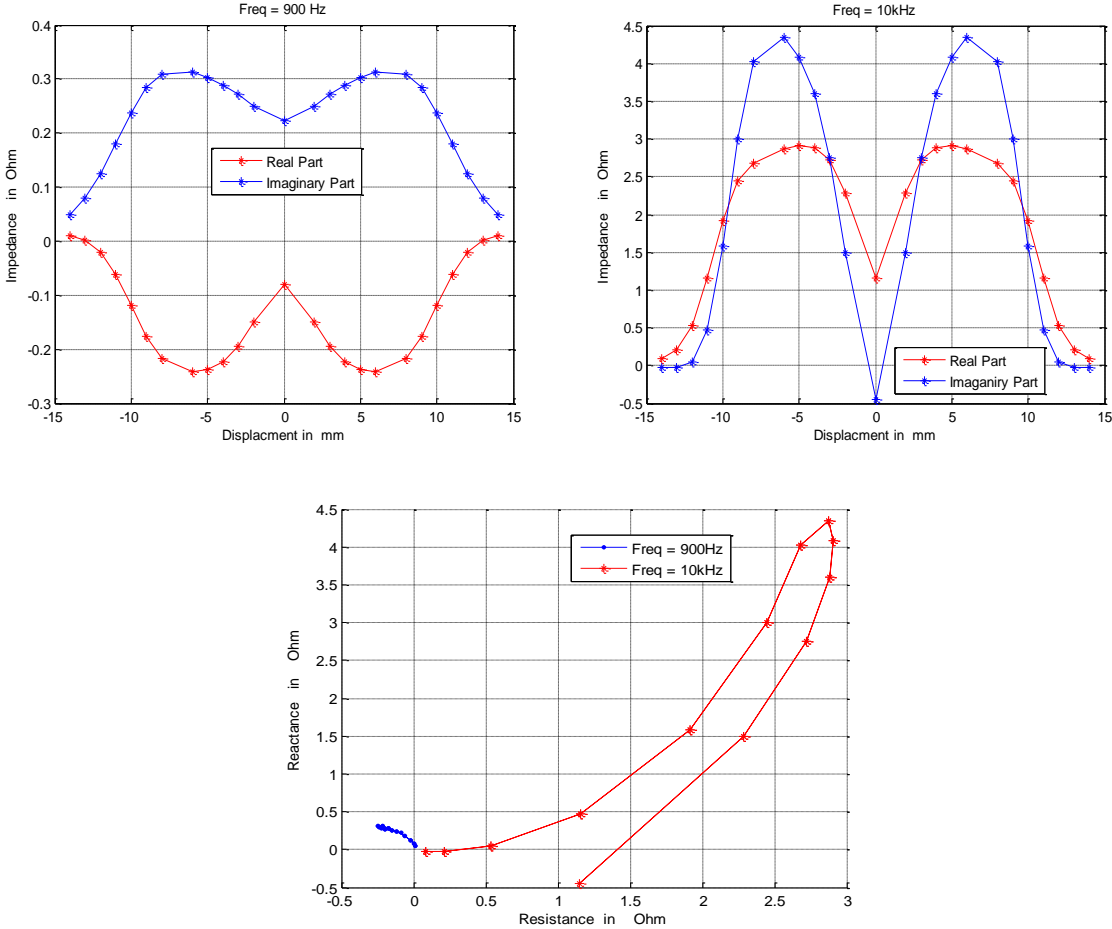


Figure.10: Variations of the real and imaginary part of the impedance using a second probe.

V.10- Comparaison des résultats

La sensibilité du capteur évolue en fonction de la fréquence. La fréquence de travail choisie doit accorder un fonctionnement optimal au capteur. Elle est obtenue lorsque la partie réelle est maximale [1]. Pour le problème étudié, elle correspond à $F = 900$ Hz comparer à la fréquence 10kHz.

- Pour la fréquence de 900 Hz

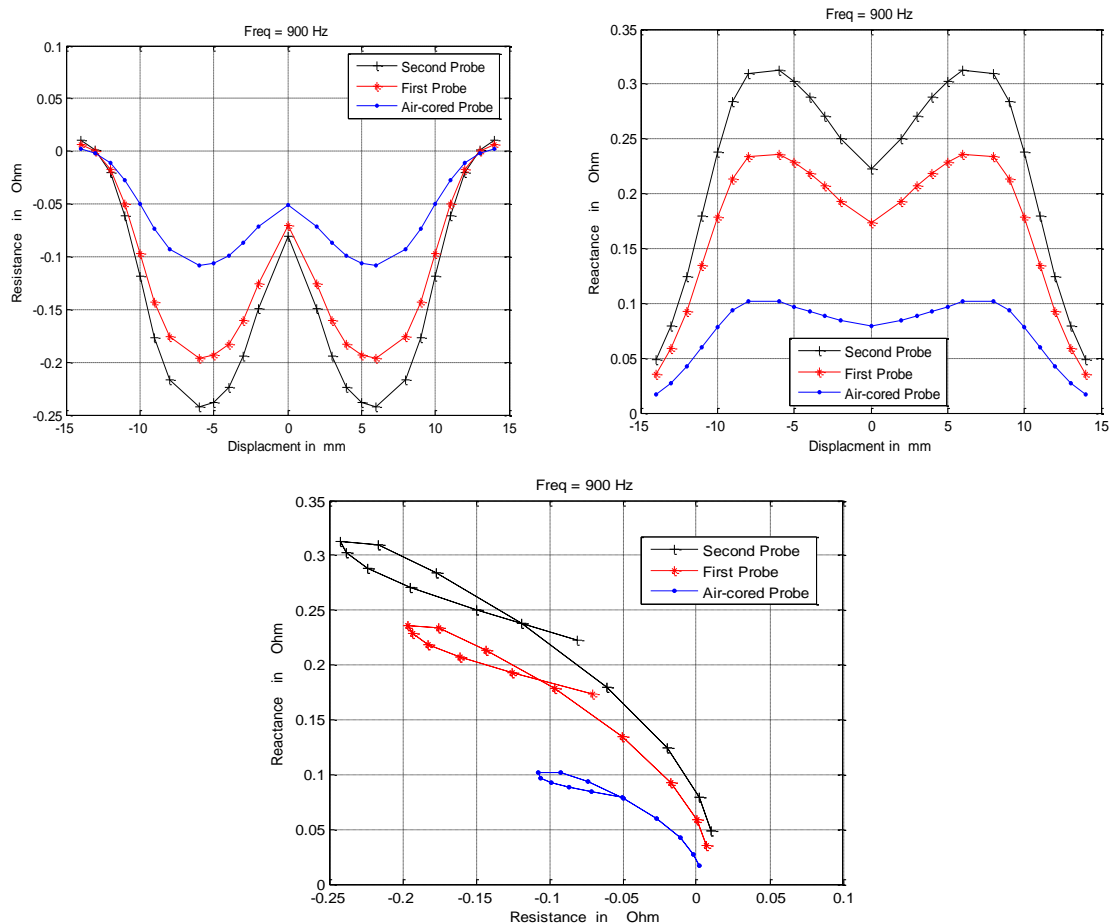


Figure 11 : Plan complexe des parties réelle et imaginaire des trois différents bobines

$F = 900$ Hz.

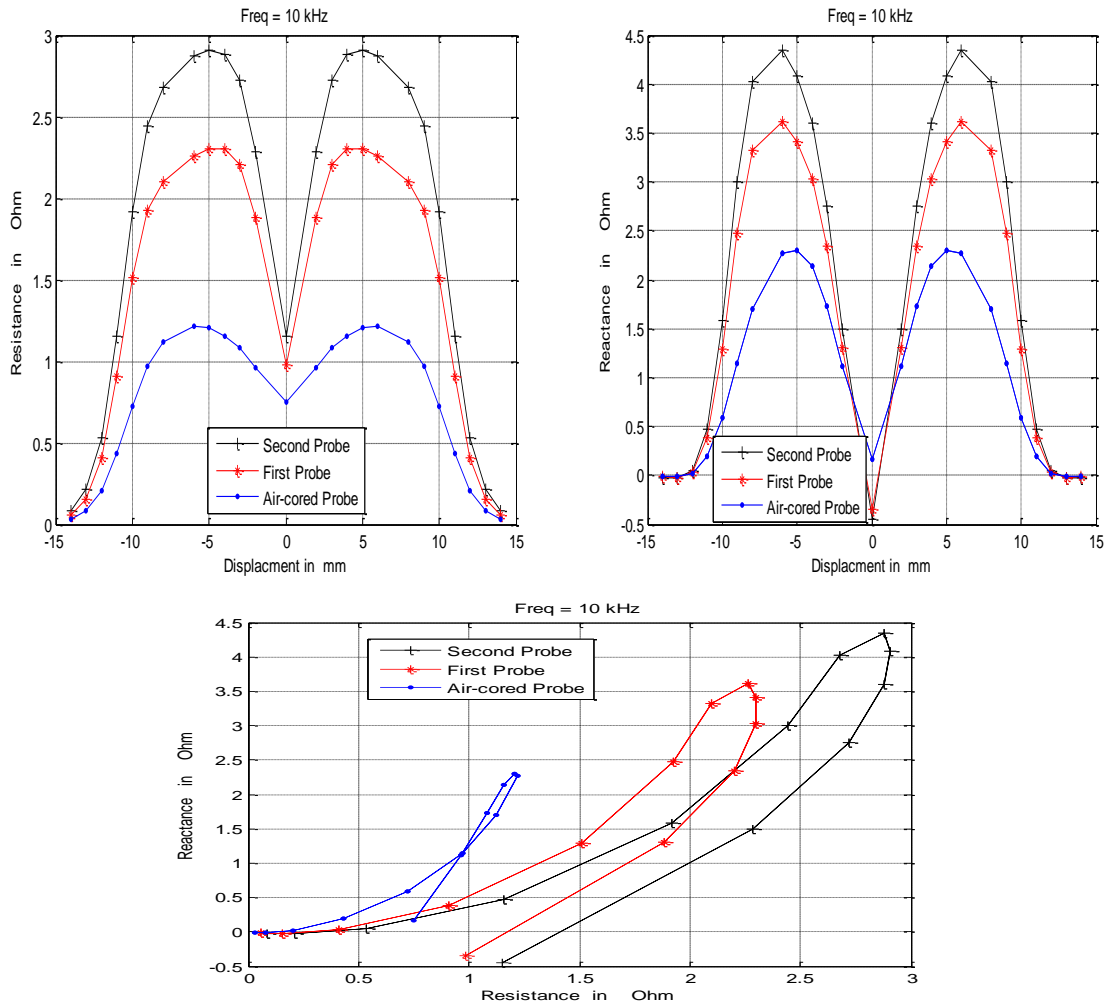


Figure 12 : Plan complexe des parties réelle et imaginaire des trois différents bobines

F = 10 kHz

Sur toutes les figures représentées l'influence de la variation de la distance « capteur-pièce » pour une cible en aluminium. Les résultats montrent clairement qu'on a la même constatation précédente. Par ailleurs, dont le défaut est profond, les résultats obtenus sont difficiles à interprétés. Le choix approprié de la fréquence d'excitation dépendra de l'épaisseur de la pièce à contrôler et aussi du type de défaut recherché (interne) et ceci afin d'adapter la fréquence d'excitation à la profondeur de peau désirée

V.11- Conclusion

Dans ce travail, différentes configurations de capteurs sont considérées pour évaluer la fissure dans les structures multicouches rivetées. Sur la base de la méthode des éléments finis, la simulation a été développée pour cette inspection. Le travail de simulation est approuvé pour le défaut situé dans le corps de rivet en utilisant de nombreux capteurs. L'utilisation et la variation de la longueur du noyau de ferrite ont provoqué la variation de l'amplitude du signal de la résistance et de la réactance. Les noyaux en ferrite sont largement utilisés pour améliorer la sensibilité du capteur dans les matériaux. Parce qu'ils permettent de concentrer le champ magnétique sur le lieu de l'inspection et une étendue élevée du signal.

Conclusion - Perspectives

Tout au long de cette thèse, nos travaux ont été consacrés au développement d'un modèle pour le contrôle par courants de Foucault de structures rivetées en système électro-énergétique. Plusieurs challenges ont dû être surmontés, aussi bien théoriques que numériques pour mettre au point notre modèle d'étude.

Les revendications croissantes en termes de sûreté de fonctionnement d'un produit industriel ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces qui le constituent, conduisent à mettre en place des contrôles de CND CF de plus en plus utilisés. L'emploi des courants de Foucault permet un contrôle non destructif fiable, rapide et peu coûteux des milieux conducteurs.

Comme note générale nous avons abordé dans le premier chapitre, des recherches et des études antérieures sur l'effet des défauts de court-circuit dans les systèmes électro-énergétiques, sur les performances des noyaux magnétiques ont montrent les résultats obtenus dans quelques littératures. De plus, les méthodes non destructives sont nécessaires pour détecter les défauts, en particulier la méthode non destructive par courant de Foucault.

Par la suite, nous avons présenté les équations de base d'un modèle dédié au CND par courants de Foucault dans le second chapitre. Les différentes étapes nécessaires sur le CND CF ont été rappelées. La discrétisation des équations de Maxwell et le problème des courants de Foucault ont été discutés. Les formulations qui permettent le calcul des champs dans le cas des problèmes magnéto statique, magnéto transitoire et magnéto harmonique ont été détaillées.

La méthode des éléments finis sur la base de la formulation $T-\phi$ est décrite et introduite. Avec cette méthode, le nombre des variables inconnues est réduit par rapport aux autres formulations, sauf Le plus important est que le maillage du conducteur est conservé, même lors de déplacement de la bobine balayant une plaque.

Nous avons ensuite donné une méthode de formulation à base de l'impédance de surface qui permet de calculer les champs dans le cas de faible profondeur de pénétration. Il est

nécessaire, en général, pour résoudre ces équations d'utiliser des méthodes numériques car la solution analytique n'est pas accessible.

Pour l'inversion et l'optimisation des paramètres du capteur deux méthodes ont été utilisées. Les algorithmes génétiques et le SPSA étant deux techniques d'optimisation stochastique travaillant sur les mêmes types de problèmes, il est logique de chercher à les comparer afin de tirer de leurs avantages respectifs. Après plusieurs évaluations de ces deux techniques sur le problème de l'optimisation des paramètres géométriques de la bobine destinée pour au contrôle non destructif par courant de Foucault, on remarque que le SPSA converge généralement plus vite vers la solution optimale lorsque le problème est de taille raisonnable, Il est conclu que SPSA peut être utilisé efficacement dans l'optimisation de la sonde à courant de Foucault.

Comme conclusion, SPSA est une méthode puissante d'optimisation pour résoudre des problèmes non linéaires complexes. Il a une base théorique solide et est souvent plus efficace et plus facile à mettre en œuvre que des méthodes bien connues telles que les algorithmes génétiques.

Une étude était consacrée à l'explication du traitement et la simulation des fissures à l'aide d'un logiciel Flux. Eddy technique actuelle est une méthode efficace pour détecter des défauts dans les matériaux conducteurs. Cette représentation a été simulée par la méthode des éléments finis et examinée pour la détection d'une fissure profonde dans une structure multicouche. Les résultats montrent que la bobine à noyau de ferrite est très sensible à la détection des défauts par rapport à la bobine en l'air.

Les perspectives pour ce travail sont nombreuses et couvrent les deux aspects, expérimental et numérique. On peut aussi avoir comme perspective des méthodes d'optimisation des composants utilisés en industrie qui conduit à des géométries de plus en plus complexes. Les courants de Foucault sont bien adaptés pour le contrôle rapide de ces nouveaux composants. Donc il serait nécessaire de travailler sur la technologie des capteurs en utilisant par exemple des capteurs en micro bobines ou des multi capteurs, ainsi que leur modélisation et inversion de signaux. Cette étude peut être complétée par l'analyse de l'influence des contraintes sur la vitesse d'acquisition et sur les variations d'entrefer.

Bibliographie

- [ALB99] R. Albaness, G. Rubinacci and F. Villone. "An Integral Computational Model for Crack Simulation and Detection via Eddy Current." *Journal of Computational Physics* 152, pp 736-755, 1999.
- [AYA08a] A. Ayad, A. Semmah, Y. Ramdani, H. Hamdaoui and K. M. Faroun. "Design of an Optimal Neural Network for Evaluating the Thickness and Conductivity of the Metal Sheet". *Journal of Computer Science (INFOCOMP)*, Vol 7, N° 2, pp 52-57, June 2008.
- [AYA08b] A. Ayad, A. Semmah, A. Lahcen and Y. Ramdani. "Numerical and Analytical Analysis of Eddy Current Non Destructive Testing in JSAEM Benchmark". *Journal of Electrical Engineering*, Vol 8, N° 3, October 2008.
- [BEN97] B. Benali. "Contribution à la Modélisation des Systèmes Electrotechniques à l'aide des Formulations en Potentiels : Application à la machine Asynchrone". Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologie de Lille, 2 Juillet 1997.
- [BEN04] M. Bensetti. "*Etude et modélisation de capteurs destinés au contrôle non destructif par courants de Foucault. Mise en œuvre de méthodes d'inversion*". Thèse de docteur en sciences, Orsay (Paris XI), 14 décembre 2004.
- [BEN05] M. Bensetti, Y. Le Bihan, C. Marchand, C.-M. Tassetti, G. Lissorgues, E.-D. Gergam, J.-P. Gilles. "An hybrid finite element method for the modeling of micro-inductors", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, N° 5, May 2005.
- [BEN02] Bensetti, M., Le Bihan, Y., Marchand, C., Prémel, D., "Non-destructive Evaluation of Layered Planar Media using MLP and RBF Neural Networks". *The 8th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Saarbrücken*, jun 12-14, 2002.
- [BOU88] F. Bouillault, A. Razek. "Hybrid numerical methods for movement consideration in electromagnetic systems". *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 24, No. 1, pp 259-261, 1988.
- [CAN01] A. Canova, Marco. Ottella, Roger John Hill-Cottingham. "3D eddy current FE analysis of electromechanical devices". *The international Journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering (COMPEL)*, Vol 20, N2, pp 332-347, 2001.
- [CEC93] V.S. Cecco, J.R. Carter et S.P. Sullivan. "An eddy current technique for detecting and sizing surface cracks in carbon steel". *Materials Evaluation*, 51(5) 572-577, mai 1993.
- [CHE06] W. Cheng, S. Kanemoto, I. Komuro, M. Shiwa. "Depth sizing of partial-contact stress corrosion cracks from ECT signals". *NDT&E International* 39, pp 374-384, 2006.

- [CHA00] T. Chady, M. Enokizono. “*Multi-frequency exciting and spectrogram-based ECT method*”. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 215-216 , p 700-703, 2000.
- [CHA00] T. Chady. M. Enokizono. R. Sikora. “Neural network models of eddy current multi-frequency system or non-destructive testing“. IEEE Transactions on Magnetism, Vol 36, No.4, July 2000.
- [CHA99] T. Chady. M. Enokizono. R. Sikora. “Crack detection and recognition using an eddy current differential probe“. IEEE Transactions on Magnetism, Vol 35, No.3, May 1999.
- [DAS02] M. Das. H. Shekhar. X. Liu., R. Polikar. P. amuhalli. L. Udpa. S. Udpa. “A generalized likelihood ratio technique or automated analysis of bobbin coil eddy current data“. NDT&E International 35, pp 329–336, 2002.
- [DOD68] C. V. Dodd, W. E. Deeds. “*Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems*”. Journal of Applied Physics, mai 1968.
- [DON] E. B. Don, K. S. Roderic. “*Nondestructive evaluation A tool in design manufacturing and service*”. Mechanical Engineering, General Engineering, Revised Edition.
- [DRE02] G. Dreyfus & al, “Réseaux de neurones- Méthodologie et applications“. Editions Eyrolles, 2002.
- [ENO98] M. Enokizono. Y. Tsuchida. T. Chady. “Crack size and shape determination by moving magnetic field type sensor“. IEEE Transactions on Magnetism, Vol 34, No.4, July 1998.
- [FEL82] M. Feliachi. A. Razek. “Considération du mouvement du rotor des machines électriques dans une modélisation par éléments finis“. Revue Générale d’Electricité, 10/82, pp 673-679, Octobre 1982.
- [FUK99] H Fukutomi, T Takagi, J Tani, F Kojima, “Crack shap characterization in eddy current testing“. Proceeding of the 3rd International Workshop on E’NDE, Vol 4 N°8, August 1999.
- [GAS96] N. Gasmi. “Contribution à la modélisation des phénomènes électriques-magnétiques couplés et du mouvement pour les systèmes électromagnétiques 3-D“. Thèse de Doctorat, université Paris VI, Octobre 1996.
- [GOL 97] C. Golovanov. Y. Maréchal and G. Meunier. “3D Mesh Connection Techniques Applied to Movement Simulation“. Compumag, the 11th Conference on the Computation Electromagnetic Fields Rio de Janeiro , November 03-06, pp 677-378, 1997.
- [HOA02] Hoang, D “ Détermination simultanée de la résistivité et de l’épaisseur des tôles métalliques et d’alliages non magnétiques par méthode électromagnétique sans contact” Thèse de docteur en sciences, L’école centrale de Lyon, 07 Février 2002.
- [HAG94] Hagan, M.T., Menhaj, M., "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm". IEEE Transactions on Neural Networks.v.5, No.6, p989-993, 1994.
- [IDA83] Ida, N, Palanistry, R, and Lord, W “Eddy current probe design using finite element analysis”. Materials Evaluation, pp1389-94, Nov 1983.

- [KEC02] R. Kechroud. “Contribution à la modélisation des Machines Electriques par la Méthode des Eléments finis Associés aux Multiplicateurs de Lagrange“. Thèse de Doctorat d'Etat. Ecole National Polytechnique, Algérie, 03 Avril 2002.
- [KHA02] V. Khandetsky. I. Antonyuk. “Signal processing in defect detection using back-propagation neural networks“. *NDT&E International* 35, pp 483–488, 2002.
- [LEB00] Y. Le Bihan. “*Conception et caractérisation d'un dispositif à courant de Foucault pour l'évaluation non destructive de l'épaisseur de paroi d'aubes de turbines creuses*“. Thèse de docteur de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 10juillet 2000.
- [LEB02] Y. Le Bihan. “Lift-off and tilt effects on eddy current sensor measurements a 3-D finite element study“. *The European physical Journal (EPJ), Applied physics* 17, pp 25-28, EDP Sciences 2002.
- [LEE91] K. S. Lee. M. J. D. Bortoli. M. J. Lee. S. J. Salon. “Coupling Finite Elements and Analytical Solution in the Air gap of Electric Machines“. *IEEE Trans.Mag*, Vol.27, No.5, September 1991.
- [LUQ70] J. W. Luquire, W. E. Deeds, C. V. Dodd. “*Alternating current distribution between planar conductors*“. *Journal of Applied Physics*, September 1970.
- [MAR99] A. Marco, C. Ermanno, R. Sikora. “*Numerical analysis of eddy current non destructive testing (JSAEM Benchmark Problem#2-flates plates with cracks)*“. *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (III)*, IOS press, p 303-314, 1999.
- [MAR91] Y. Marechal. “Modélisation des phénomènes magnétostatiques avec terme de transport. Application aux ralentisseurs électromagnétiques”, Thèse de Doctorat, INP Grenoble, 05 février 1991.
- [MOU92] Moulder, J.C., Uzal, E., and Rose, J.H. “Thickness and Conductivity of Metallic Layers From Eddy Current Measurements”. *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 63 , No.6, January 1992, pages 3455-3465.
- [NON95].Nonaka, Y., Nakane, H., Maeda, T. and Hasuike, K. “Simultaneous Measurement of the Resistivity and Permeability of a Film Sample with a Double Coil”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* Vol. 44, Jun 1995, pages 679-682.
- [NON96].Nonaka, Y. “A Double Coil Method for Simultaneously Measuring the Resistivity, Permeability and thickness of a Moving Metal Sheet”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* Vol. 45, April 1996, pages 478-482.
- [OUK97] L.Oukhellou. “*Paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif. Application à la reconnaissance des défauts de Rails par courants de Foucault*“. Thèse de docteur en sciences, Orsay (Paris XI) ,04 Juillet 1997.
- [OBR96] L.S. Obrutsky, V.S. Cecco, Sullivan S.P. et D. Humphrey. “Transmit-receive eddy current probes for circumferential cracks in heat exchanger tubes”. *Materials Evaluation*, 54(1), p 93–98, janvier 1996.
- [PIN05] H Pingjie, Z Zhou, Z Wu, “Quantifying hidden defect in multi-layered structures by using eddy current system combined with a scanner“ *7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Journal of Physics: Conference Series* 13,pp385-388, 2005.

- [PIN06] H Pingjie, G Zhang, Z Wu, J Cai, Z Zhou, "Inspection of defects in conductive multi-layered structures by an eddy Current scanning technique: Simulation and experiments" . *NDT&E International*39, pp578-584, 15 June 2006.
- [PRE92] K. Preis. I. Bardi. O. Biro. C. Magele. G. Vrisk. and K. R. Richter, " Different finite element formulation of 3D magnetostatic fields" IEEE Transactions Magnetics, Vol.28, n)2,Mars 1992.
- [RAC06] Rachek M'hemed. "Modélisation par éléments finis de systèmes électromagnétiques en mouvement de structures tridimensionnelles application au couplage magnétique- mécanique et au contrôle non destructif par courant de Foucault". Thèse de doctorat en électrotechnique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2006.
- [RAC05]M. Rachek. M. Feliachi. M. Zaouia. "Three dimensional finite element modelling for sensor movement simulating by geometrical band and nodal interpolation techniques in eddy current non destructive testing". WSEAS Transactions on Circuits and Systems, ISSN 1109-2734, Issue 6, Vol.4, pp 535-542, June 2005, Grèce.
- [RAM02]P. Ramuhalli. L.Udpa. S. S. Udapa. "Electromagnetic NDE signal inversion by Function-Approximation neural networks". IEEE Transactions on Magnetics, Vol 38, No.6, November 2002.
- [REK98]I.T. Rekanos, T.V. Yioultsis, T.D. Tsiboukis, "Non-destructive Testing of Layered Structures Using Generalised Radial Basis Function Networks Trained By the Orthogonal Least Squares Learning Algorithm". *Compl.*Vol.17, No.1/2/3, January 1998, pages 382-388.
- [ROD90] D. Rodger. H.C. Lai. P.J. Leonard. "Coupled Elements for problems involving movement". IEEE Trans.Mag, Vol.26, No.2, pp 548-550, March 1990.
- [SHI92] J. Shimone. K. Maeda. Y. Harada, "Applied Electromagnetics, JSEAM Studies in Applied Electromagnetics, Impedance measurement of unique shape crack by pancake type coil". Vol.5 . pp12-17,1992.
- [SIK99] R. Sikora, M. Komorowski, S. Gratkowski, C. Ermanno. "*Differential eddy current transducer for non-destructive testing of pipes*". Electromagnetic Nondestructive Evaluation (III), IOS press, p 45-57,1999.
- [SOP03] A. Sophian, G. Yun Tian, D. Taylor, J. Rudlin. "*A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT*". *NDT&E International* 36, 2003, 37-41.
- [SON00] S. J. Song, Y. K. Shin. "*Eddy current flaw characterization in tubes by neural networks and finite element modelling*". *NDT&E International* 33, pp 233-243, 2000.
- [TSU94] I. Tsukerman. "Accurate computation of ripple solution on moving finite element meshes". 6th Biennial IEEE conference on electromagnetic field computation (CEFC), July 5-7, Alpes France, 1994.
- [UDP04] L. Udpa, P. Ramuhalli, J. Benson et S. Udpa. "*Automated analysis of eddy current signals in steam generator tube inspection*". In 16th World Conference on non-destructive testing, août 2004.
- [WAI60] D. L. Waidlich. The attenuation of a pulsed field by conducting sheet" IEEE Transactions on instrumentation and measurements, Vol.18,N°4,pp326-330,1960.

- [WAN02] R. Wang. H. Mohellebi. T.J. Flack. M.J. Kamper. J.D Buys and M. Féliachi,. “Two-dimensional Cartesian air-gap element (CAGE) for dynamical finite-element modelling of electrical machines with a flat air gap“. IEEE Trans.Mag, Vol.38, No.2, pp 1357-1360, March 2002.
- [YAN98] M. Yan. S. Udpa. S. Mandayam. Y. Sun. P. Sacks. W. Lord. “Solution of inverse problems in electromagnetic NDE using finite element methods“. IEEE Transactions on Magnetism, Vol 34, No.5, September 1998.
- [ZAI04] M. Zaid. P. Gaydecki. S. Quek. G. Miller. “Extracting dimensional information from steel reinforcing bars in concrete“. NDT&E International 37, pp 551–558, 2004.

Titre : Détection de défauts profonds dans des Structures Multicouche utilisée dans les actionneurs électriques

Résumé : Le but de ce travail est d'utiliser la méthode des éléments finis pour visualiser le changement de l'induction magnétique, le champ magnétique ainsi que le courant induit créés par le bobinage d'un capteur CF (capteur à courant de Foucault) pour la détection des défauts profonds dans des structures multicouche utilisée dans la fabrication des actionneurs électriques. Le dysfonctionnement d'un composant de l'actionneur peut avoir de conséquences que le contrôle qualité est une nécessité

Le calcul de la réponse d'un capteur CF pour différentes positions de celui-ci par rapport à la pièce contrôlée à pour but de visualiser le changement du signal capté ainsi de caractériser le défaut dans le matériau..

Title: Deep Defect Detection in Multilayer Structures Used in Electric Actuators

Abstract : The purpose of this work is to use the finite element method to visualize the change of the magnetic induction, the magnetic field as well as the induced current created by the winding of a CF sensor (eddy current sensor) for the detection of deep defects in multilayer structures used in the manufacture of electric actuators. The malfunction of a component of the actuator can have consequences that quality control is a necessity.

The calculation of the response of a CF sensor for different positions of this one with respect to the controlled part for the purpose of visualizing the change of the signal captures thus characterized the defect in the material.

العنوان: اكتشاف عيب عميق في الهياكل متعددة الطبقات المستخدمة في المحركات الكهربائية

يدور العمل المنجز على هذه الأطروحة معرفة الفحص التجريبي للأوساط الناقلة بفعل تيار " فوكولت". الغرض من هذا العمل هو استخدام طريقة العناصر المحددة لتصوير تغيير الحث المغنطيسي ، والمجال المغنطيسي وكذلك التيار المستحث الناتج عن لف مستشعر CF (مستشعر التيار الدوامي) الكشف عن العيوب العميقة في الهياكل متعددة الطبقات المستخدمة في تصنيع المحركات الكهربائية. قد يكون لعطل أحد مكونات المشغل عواقب مفادها أن مراقبة الجودة ضرورية حساب استجابة جهاز استشعار CF لمواقف مختلفة من هذا واحد فيما يتعلق بالجزء المتحكم به لغرض تصور التغيير من التقاط الإشارة وبالتالي تمييز الخلل في المواد.