

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ثلجي

UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOAT

كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES

Département Sciences de la Matière



Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Physique

Option : Physique des Matériaux

Par :

SOURDI Namarik

THEME

Evaluation des propriétés électriques d'un matériau par méthode électromagnétique

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr LEFKAIER Iben Khaldoun	<i>Pr</i>	<i>Président</i>
Mr KADIRI Cheik	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>
Mr NOUIOUA Ismail	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>
Mr HELIFA Bachir	<i>MCA</i>	<i>Rapporteur</i>

Année Universitaire 2017- 2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, par leur participation et leur encouragement, m'ont permis de mener à bonne fin mon travail de mémoire.

Je tiens à remercier de manière très particulière **Monsieur HELIFABachir**, docteur à l'université de Laghouat Directeur de mémoire de m'avoir proposé et dirigé ce sujet, ainsi que sur pour sa disponibilité, je le remercie aussi de m'avoir suivi avec patience et intérêt. Ses conseils précieux et ses encouragements m'ont été d'une aide très précieuse dans la réalisation de ce projet.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du laboratoire de Physique des Matériaux de l'Université de Laghouat (LPM-UATL). J'exprime ici, ma vive gratitude à Monsieur le Professeur **Iben Khaldoun LEFKAIER** pour m'avoir accueilli dans son laboratoire en m'offrant tous les moyens nécessaires au bon déroulement de mon travail, Je voudrais le remercier, d'avoir accepté de présider mon travail.

Je remercie aussi Monsieur **KADIRI Cheikh** et Monsieur **NOUIOUA Ismaïl**, d'avoir accepté d'examiner mon mémoire.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes parents, mes sœurs Freiha, Chaima, Safaa ainsi que toute ma famille pour leurs encouragements et prières qui m'ont permis de finaliser ce travail.

J'exprime ma gratitude à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre l'élaboration de ce travail, en particulièrement M^{me}. Chaalani Eldjia, Mr. Belahrach

Je remercie ma chère amie : Maroua.

Enfin, je ne peux clôturer cette page de remerciements sans remercier vivement mes amis(es) de la promotion, Fatima, Ikram, Aicha, Imane.

Table des matières

Remerciements	iii
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux	ix
Notations et symboles.....	x
Introduction Générale	xi
I Contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault	1
I.1 Introduction.....	1
I.2 Historique du CND	1
I.3 Techniques de CND.....	1
I.4 CND par courants de Foucault.....	1
I.4.1 Historique	1
I.4.2 Principe Physique	2
I.4.3 Distribution des courants de Foucault	3
I.5 Eléments d'excitation et mesure	4
I.5.1 Type	4
I.5.2 La fonction.....	6
I.5.3 Le mode de fonctionnement	7
I.6 Plan d'impédance.....	8
I.7 Signaux d'excitation	10
I.7.1 Excitation mono fréquence.....	10
I.7.2 Excitation multifréquence.....	10
I.7.3 Excitation par courants pulsés	10
I.8 Intérêt et limites	11
I.9 Domaine d'application du CND par courants de Foucault.....	11
I.10 Conclusion	11
II Modélisation magnétodynamique du CND par CF et Méthode de résolution.....	12

II.1	Introduction.....	12
II.2	Modélisation d'un dispositif en CND-CF.....	12
II.3	Mise en équation.....	13
II.4	Equations de Maxwell	13
II.4.1	Relation du milieu	14
II.4.2	Conditions aux limites.....	16
II.4.3	Conditions de continuité.....	16
II.4.4	Equation électromagnétique	17
II.4.5	Formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique	18
II.5	Méthode numérique	21
II.5.1	La méthode des éléments finis (FEM).....	21
II.6	Conclusion	22
Simulation du CND par courants de Foucault.....		22
III	Simulation du CND par courants de Foucault	23
III.1	Introduction	23
III.2	Système étudié.....	23
III.3	Logiciel FEMM.....	24
III.3.1	Description du logiciel	24
III.3.2	Fonctionnement du logiciel	24
III.4	Barre du menu principal.....	24
III.5	Création d'une simulation électromagnétique.....	25
III.5.1	Paramètres du problème	25
III.5.2	Construction de la géométrie	25
III.5.3	Conditions aux frontières	25
III.5.4	Choix des matériaux et des milieux.....	25
III.5.5	Génération du maillage et simulation.....	25
III.6	Structure générale.....	25
III.6.1	Construction de la géométrie du système	26

III.6.2	Conditions aux limites	26
III.7	Etude d'une plaque d'aluminium (matériau amagnétique linéaire)	28
III.7.1	Iso-valeurs du potentiel vecteur magnétique	28
III.7.2	Induction magnétique B	29
III.7.3	Courants induits dans la plaque	29
III.8	Calcul de l'impédance	32
III.8.1	La Méthode par calcul de l'énergie électromagnétique de la bobine	32
III.9	Conclusion.....	36
Chapitre IV	.....	36
Procédures expérimentales	.....	36
IV Introduction	.....	37
IV.1	Dispositif expérimental et matériaux utilisés	37
IV.1.1	Capteur (bobine).....	38
IV.1.2	Matériaux utilisée	39
IV.1.3	Appareillage de mesure (Lock-in amplifier)	39
IV.2	Méthode de mesure de l'impédance à l'aide du Lock –In Amplifier.....	40
IV.3	Conclusion.....	46
Conclusion	.....	52
Conclusion générale	.....	53
Référence	.....	54

Liste des figures

Figure (I-1) : Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868)	2
Figure (I-2) : Principe du contrôle non destructif par courant de Foucault.....	3
Figure (I-3):Densité de courants induits et profondeur de pénétration	4
Figure (I-4) : Bobine interne avec noyau	5
Figure (I-5) : Sonde ponctuelle (palpeur).....	5
Figure (I-6) : Bobine plate.....	6
Figure (I-7) : Palpeur (bobine) à double fonctions.....	6
Figure (I-8) : Palpeur (bobine) à fonction séparées.....	7
Figure (I-9) : La variation d'impédance d'une bobine en présence de courants de Foucault	8
Figure (I-10) : Représentation du plan d'impédance	9
Figure (II-1) : Dispositif de CND-CF	12
Figure (II-2):Problème magnétodynamique type.....	13
Figure (II-3):Interface entre deux milieux différents.....	16
Figure (II-4):Système axisymétrique bobine – pièce.....	19
Figure (II-5):Modèle 2D axisymétrique.....	20
Figure (III-1):Système magnétodynamique du dispositif étudié	23
Figure (III-2):Géométrie du système axisymétrique en 2D.....	23
Figure (III-3):Premières composantes du logiciel FEMM	24
Figure (III-4):Composantes terminales du logiciel FEMM.....	24
Figure (III-5):Géométrie du système axisymétrique en 2D par FEMM.....	26
Figure (III-6):Conditions aux limites.....	27
Figure (III-7):Maillage du problème sous FEMM.....	27
Figure (III-8):Isovaleurs du potentiel vecteur magnétique par FEMM 1000Hz	28
Figure (III-9):Isovaleurs du potentiel vecteur magnétique par FEMM 10000Hz	28
Figure (III-10):Induction magnétique avec FEMM 1000Hz	29
Figure (III-11):Induction magnétique avec FEMM 10000Hz	29
Figure (III-12):Courants induits par FEMM 1000 Hz.....	30
Figure (III-13):Courants induits par FEMM 10000 Hz.....	30
Figure (III-14):Isovaleurs du potentiel vecteur magnétique par FEMM 1000Hz	31
Figure (III-15):Induction magnétique avec FEMM 1000Hz	31
Figure (III-16):Induction magnétique avec FEMM 10000Hz	32
Figure (III-17):Diagramme d'impédance normalisée par FEMM.....	35

Figure (IV-1): Montage expérimental (banc d'essai).....	37
Figure (IV-2) : Echantillon de test	39
Figure (IV-3) : <i>Lock-In</i> Amplifier	39
Figure (IV-4) : Lock-In Amplifier et connexion.....	41
Figure (IV-5) : Schéma du circuit électrique	42
Figure (IV-6) : Diagramme de l'impédance normalisée expérimental	46

Liste des tableaux

Tableau (III-1): Impédance de la bobine avec plaque par FEMM	33
Tableau (III-2): Impédance de la bobine sans plaque par FEMM.....	34
Tableau (III-3): L'impédance normalisée Z_N par FEMM.....	34
Tableau (IV-1): Les composants du montage experimental	38
Tableau(IV-2): Données de la bobine.	38
Tableau (IV-3): v_{IN} et v_{OUT} (La bobine en contact avec la plaque).....	42
Tableau(IV-4): v_{IN} et v_{OUT} (La bobine sans contact avec la plaque).....	43
Tableau (IV-5) : L'impédance de capteur pour la bobine en contact avec la plaque	43
Tableau (IV-6) : L'impédance de bobine (la bobine sans contact avec la plaque).....	44
Tableau (IV-7) : L'impédance normalisée Z_N par experimental.....	45

Notations et symboles

- H** : Excitation magnétique
- B** : Induction magnétique
- E** : Champ électrique
- D** : Induction électrique
- V** : Potentiel scalaire électrique
- J** : Densité de courant électrique
- I** : Intensité de courant électrique
- A** : Potentiel vecteur magnétique
- A** : Composante angulaire du potentiel vecteur magnétique
- J** : Composante angulaire de la densité de courant électrique
- N** : Nombre de spires
- Z** : Impédance électrique
- R** : Résistance électrique
- R0**: Résistance électrique à vide
- X** : Réactance électrique à vide
- X0** : Réactance électrique
- Z0** : Impédance totale à vide
- Z** : Variation de l'impédance
- R**: Axe des abscisses en coordonnées cylindriques
 - : Axe angulaire en coordonnées cylindrique
- z**: Axe des ordonnées en coordonnées cylindriques
 - : Frontière
 - : Domaine d'étude
 - : Profondeur de pénétration standard en régime sinusoïdale (épaisseur de peau)
 - : Conductivité électrique
 - : Pulsation électrique
- f**: Fréquence électrique
 - : Permittivité électrique
 - ϵ_0 : Permittivité électrique du vide
 - ϵ_r : Permittivité électrique relative
- μ** : Perméabilité magnétique
 - μ_0 : Perméabilité magnétique du vide
 - μ_r : Perméabilité magnétique relative
- CND – CF**: Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
- MEF**: Méthode des Eléments Finis.
- 2D**: Bidimensionnel.
- v_{IN} : La tension en bornes de la résistance
- v_{OUT} : La tension en bornes de la résistance et la bobine

Introduction Générale

Dans plusieurs secteurs industriels, de nombreuses méthodes de contrôle non destructif (CND) et d'évaluation non destructive (END) sont actuellement utilisées pour la recherche et la qualification des défauts dans les pièces d'une part, et la caractérisation des matériaux d'autre part, et ce à tous les stades de fabrication. Les méthodes des ultrasons, celle de la radiographie et les méthodes électromagnétiques sont parmi les plus importantes. Chaque méthode présente des performances liées au phénomène physique de base mis en œuvre. Les méthodes électromagnétiques sont principalement intéressantes pour les pièces conductrices, magnétiques ou non magnétiques. Dans cette catégorie de méthodes, les courants de Foucault sont de plus en plus utilisés dans les industries nucléaires, aéronautiques, métallurgiques, et plus généralement mécaniques.[1]

Dans le contrôle non destructif par courants de Foucault, on distingue deux techniques de contrôle; la plus utilisée est la technique de contrôle par courants de Foucault classique qui utilise un champ électromagnétique sinusoïdal pour créer des courants induits. Elle est surtout applicable pour la recherche des défauts surfaciques, par contre la méthode de contrôle par les courants de Foucault pulsés dérivée de la précédente ou le champ électromagnétique est généré par une impulsion de courant. Elle est très sollicitée pour le contrôle des matériaux multicouches et d'épaisseurs plus importantes.

Le travail présenté dans ce mémoire constitue une contribution à la caractérisation d'une plaque amagnétique linéaire et son comportement sous l'effet d'un champ magnétique appliqué.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- ❖ Nous présentons dans le premier chapitre une étude détaillée sur la technique de CND par courants de Foucault en abordant le principe de fonctionnement, le rôle de chaque élément du dispositif de contrôle, les différents types de capteurs, les modes d'excitations.
- ❖ Dans le deuxième chapitre nous présentons la modélisation d'un dispositif de Contrôle par Courant de Foucault qui est basée sur la résolution des équations de Maxwell, et nous traitons les formulations en question dans le cas 2D axisymétrique et nous exposons la méthode de résolution numérique des équations du champ électromagnétique basée sur la méthode des éléments finis.

- ❖ Dans le troisième chapitre, nous présentons le logiciel FEMM que nous utilisons pour la résolution des équations de la magnétodynamique de notre système, c'est un logiciel open source basé sur la méthode des éléments finis nodaux en 2D.
- ❖ Dans le quatrième chapitre nous présentons l'instrumentation utilisée pour l'acquisition des signaux courants de Foucault ensuite les résultats obtenus lors des essais pratiques faits au laboratoire et nous confrontons les résultats de simulation par FEMM et les résultats expérimentaux.

Chapitre I

Contrôle non destructif par courants de Foucault

I Contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la technique de CND par courants de Foucault en abordant le principe de fonctionnement, le rôle de chaque élément du dispositif de contrôle, les différents types de capteurs utilisés dans les applications de CND-CF, les modes d'excitations.

I.2 Historique du CND

Le Contrôle Non Destructif constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. L'histoire du Contrôle Non Destructif commence avec celle de la physique moderne à la fin du XIX siècle : découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la Piézo-électricité, etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de Contrôle Non Destructif ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une importante accélération du progrès et du développement des techniques du Contrôle Non Destructif s'est manifestée ensuite vers les années 1960-1970 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que les centrales électriques nucléaires ou encore l'aéronautique[2].

I.3 Techniques de CND

Les méthodes de CND sont pour la plupart fondées sur l'observation et l'exploitation d'un phénomène physique dépendant des propriétés constitutives ou géométriques du matériau et éventuellement perturbé par la présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité (défaut).

Les techniques utilisées sont diverses et dépendent de la nature même du contrôle envisagé, les plus répandues sont : les ultrasons, les rayons ionisants (X ou gamma), le ressuage, la thermographie et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault) [3].

I.4 CND par courants de Foucault

I.4.1 Historique

Le phénomène d'induction électromagnétique a été découvert par Faraday vers 1831 en cherchant à expliquer l'observation de François Arago en 1824 : les mouvements de l'aiguille d'une boussole sont freinés par la proximité d'une plaque de cuivre. Tout matériau conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège d'une force électromotrice (fem) d'induction. Cette fem donne naissance à des courants électriques appelés courants de Foucault selon le savant Jean Bernard Léon Foucault (figure I-1), ou encore désignés dans le monde anglo-saxon par eddy-current (courants tourbillonnants) [4].



Figure (I-1) : Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868)

I.4.2 Principe Physique

Le contrôle par courants de Foucault est basé sur les lois de l'induction électromagnétique (découverte par Faraday). On appelle courants de Foucault, les courants induits dans un matériau conducteur par une variation de flux d'induction magnétique. D'après la loi de Lenz, ces courants se développent de manière à s'opposer au phénomène qui leur a donné naissance. Considérons une bobine placée à proximité d'une pièce conductrice et parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits dans la pièce. Ces courants créent eux mêmes un flux magnétique induit qui s'oppose au flux d'excitation, modifiant par la même la f.é.m. de la bobine. C'est l'analyse de cette variation de la f.é.m. qui fournira les informations exploitables pour un contrôle ; en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physique et géométriques du corps considéré, ainsi que des conditions (paramètres électriques et géométriques du bobinage). On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation de la f.é.m. induite dans la bobine ou de manière équivalente la variation d'impédance (cas harmonique décelable au niveau de la d'excitation) [5].

Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault se développent principalement sur la surface des corps conducteurs (effet de peau) (Figure I-2).

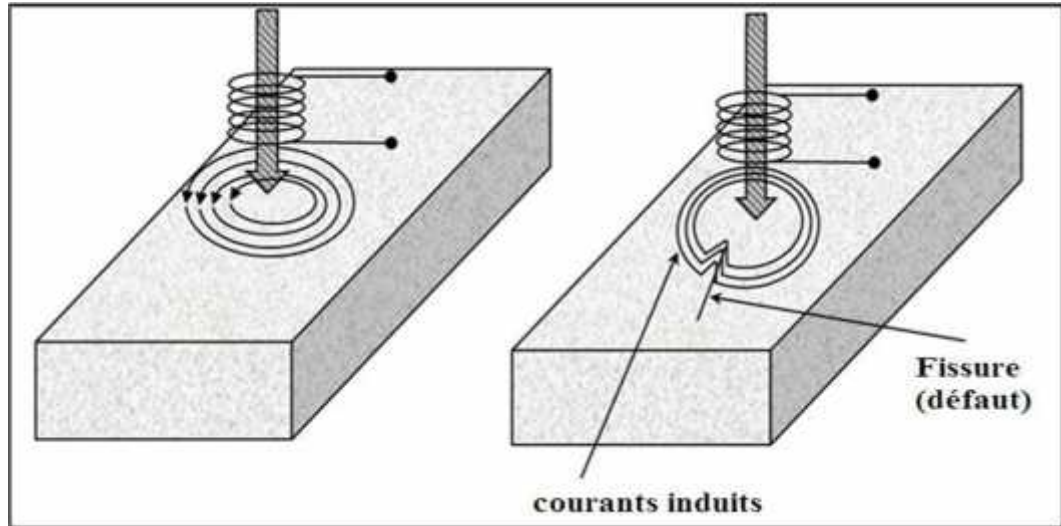


Figure (I-2) : Principe du contrôle non destructif par courant de Foucault

L'intensité et la répartition de l'induction, du champ magnétique ou des courants de Foucault dépend:

- Le couplage électromagnétique entre le matériau et l'inducteur
- la fréquence d'excitation f
- la géométrie de la pièce
- la conductivité électrique \uparrow
- la perméabilité magnétique \sim du matériau
- D'éventuels défauts superficiels tels que fissures, hétérogénéités chimique ou microstructurales...

I.4.3 Distribution des courants de Foucault

Les CF, non homogènes dans la profondeur du matériau, sont régis par les équations de Maxwell.

L'intensité des CF dans un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique \uparrow [S/m] et une perméabilité magnétique μ [/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 un champ électromagnétique, le module de la densité de courant J [A/m²] est exprimé par:

$$J(z) = J_s \exp(-z\sqrt{f\uparrow\mu}) = J_s \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \quad (\text{I.1})$$

Où J_s est le module de la densité des CF [A/m²] à la surface du matériau ($z=0$).

L'équation I.1 montre que l'amplitude de J diminue de manière exponentielle en fonction de la profondeur du matériau. Cette décroissance de l'amplitude des CF en fonction de la profondeur du matériau est représentée par la (figure I-3). L'épaisseur de peau u [m], aussi appelée profondeur de pénétration effective, caractérise la distance à laquelle la densité des CF a perdu 63 % de son amplitude. Cette profondeur de pénétration est décrite par [6] :

$$u = \frac{1}{\sqrt{f \mu \sigma}} \quad (I.2)$$

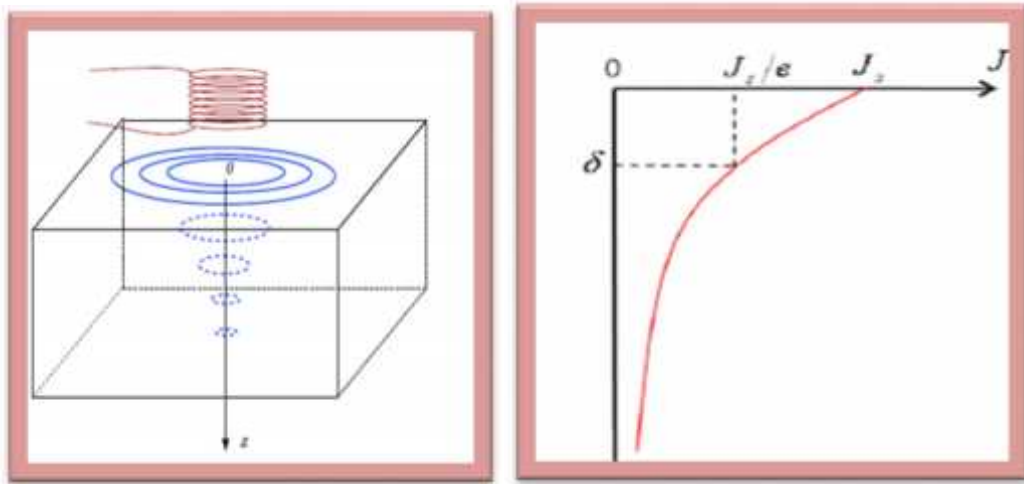


Figure (I-3):Densité de courants induits et profondeur de pénétration

I.5 Eléments d'excitation et mesure

L'élément de mesure peut être classé selon trois critères : le type, la fonction et le mode de fonctionnement.

I.5.1 Type

En pratique, on trouve essentiellement trois dispositions.

I.5.1.1 Première disposition : Sonde interne

C'est un Capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creu par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Il opère soit ou sans noyau (figure I-4) [5].

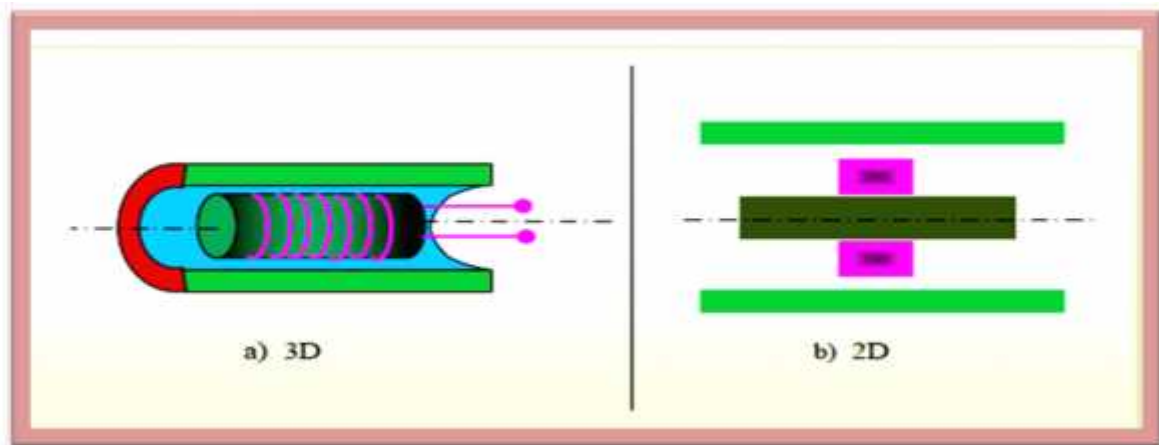


Figure (I-4) : Bobine interne avec noyau

I.5.1.2 Deuxième disposition : Sonde ponctuelle ou Palpeur

Elle est utilisée pour l'inspection des objets à des endroits précis. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce. En effet, ce capteur permet de faire un contrôle local des pièces même celles dont la géométrie est complexe (figure I-5) [5].

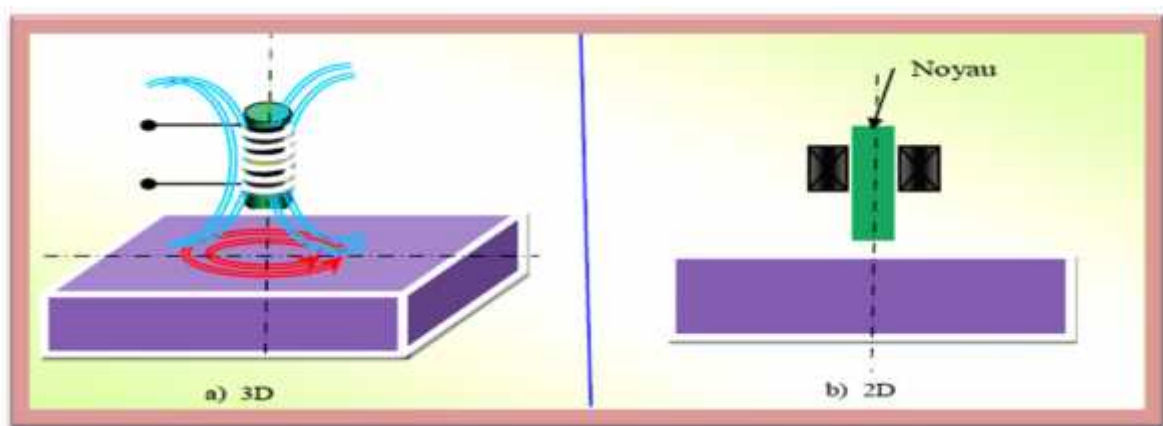


Figure (I-5) : Sonde ponctuelle (palpeur)

I.5.1.3 Troisième disposition : Palpeur (bobine) plate

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large, (figure I-6) [5].

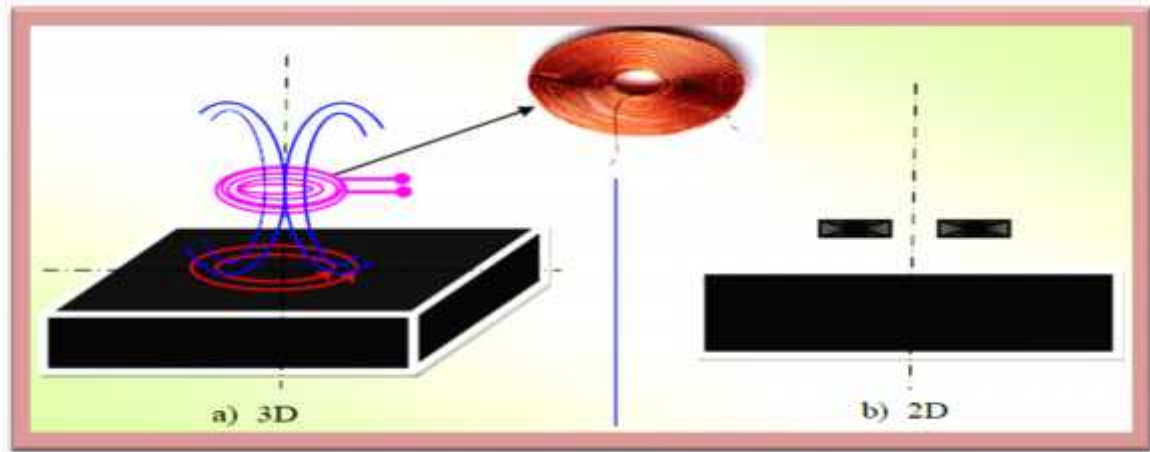


Figure (I-6) : Bobine plate

I.5.2 La fonction

I.5.2.1 Palpeur (bobine) à double fonction

Le capteur à double fonction est un capteur dont le ou les éléments constitutifs jouent simultanément le rôle d'émetteur et de récepteur. Le capteur à double fonction le plus simple est constitué d'une seule bobine (figure I-7). Le champ magnétique de réaction varie selon la circulation des CF dans le matériau. En cas de perturbation, ce champ de réaction modifie l'impédance du bobinage ; c'est-à-dire la réactance inductive et la résistance effective de la bobine. C'est une variation de l'impédance de la bobine qui est mesurée, donnant ainsi une information sur l'état du matériau inspecté. Les capteurs à double fonction sont les capteurs CF les plus couramment utilisés[7].

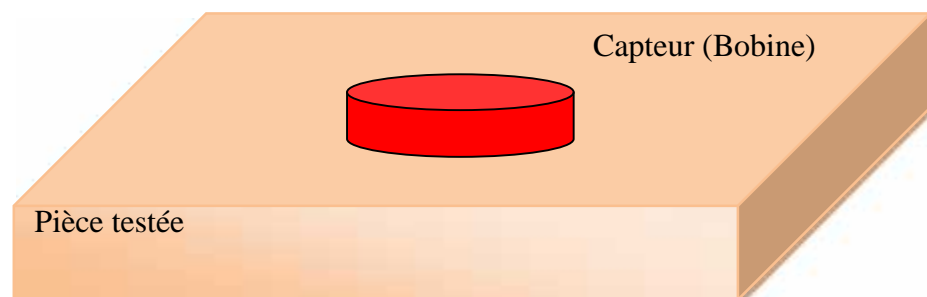


Figure (I-7) : Palpeur (bobine) à double fonctions

I.5.2.2 Palpeur (bobine) à fonction séparées

Dans le cas du capteur à fonction séparée, il existe au moins deux enroulements. L'un est réservé à la création du champ magnétique d'excitation. La mesure de la tension est faite aux bornes d'une seconde bobine qui peut être de taille réduite. Cette tension est induite par le passage du champ magnétique à travers l'ensemble des spires. Le champ magnétisant est dû au courant de conduction de la source mais aussi au courant induit dans les matériaux avoisinants[8].

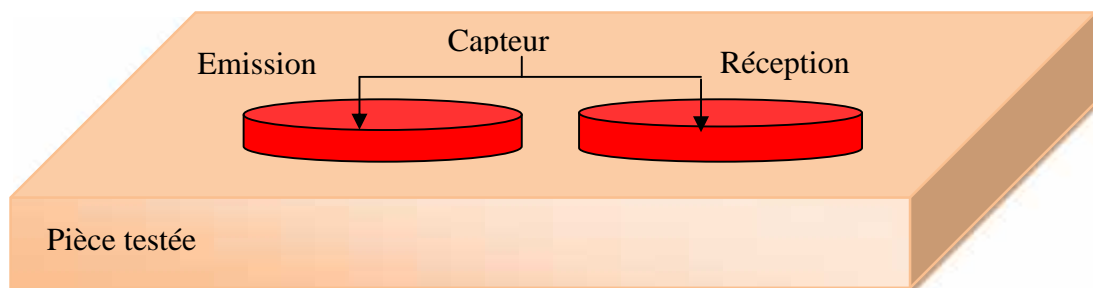


Figure (I-8) : Palpeur (bobine) à fonction séparées

I.5.3 Le mode de fonctionnement

Les modes de mesure existantes sont les suivantes :

I.5.3.1 Le mode absolu

Le même bobinage est utilisé pour l'excitation (la génération des courants de Foucault) et la réception, c'est un capteur dont la mesure est fournie directement [9], il permet d'accéder à toutes les grandeurs utiles et également perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique μ et la conductivité électrique du matériau à tester)[3].

I.5.3.2 Le mode différentiel

Un capteur en mode différentiel est un palpeur destinée à accéder aux seules variations locales des caractéristiques du produit examiné, par différence permanente de deux mesures simultanées en deux zones voisines. Le capteur peut être constitué de deux enroulements identiques dont on mesure l'écart de l'impédance. Cette bobine est particulièrement utilisée pour détecter des discontinuités lors de son déplacement le long d'une pièce en s'affranchissant des perturbations induites telle que les variations de la distance bobine-pièce (*lift-off*) [3].

L'organigramme de la (figure I.9) schématise la variation d'impédance à partir de ces phénomènes.

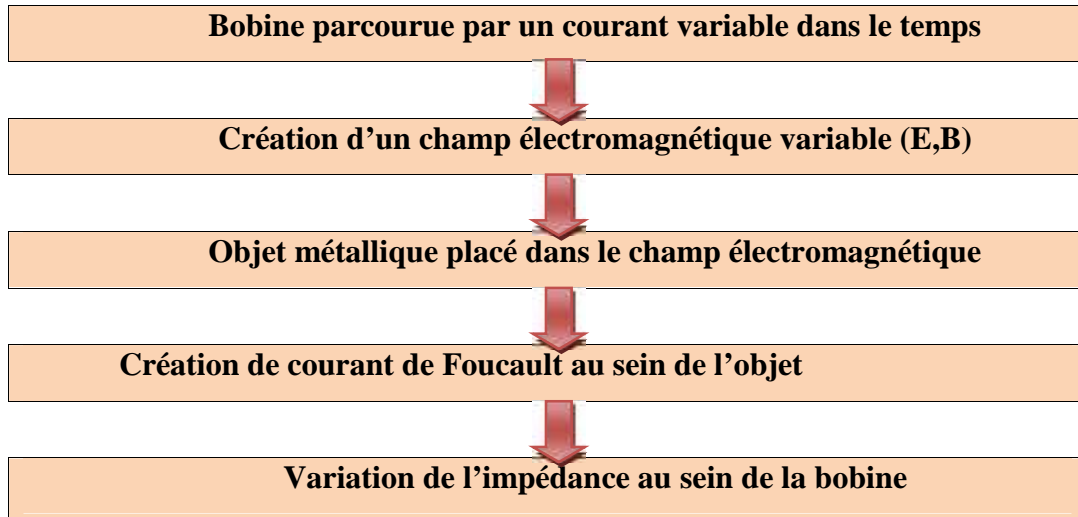


Figure (I-9) : La variation d'impédance d'une bobine en présence de courants de Foucault

I.6 Plan d'impédance

L'interaction bobine-cible peut s'étudier dans le cas d'une bobine à double fonctions en examinant l'impédance complexe de la bobine. Pour un bobinage de N spires parcouru par un courant alternatif sinusoïdal I_{exc} , cette impédance est définie par :

$$Z = \frac{V_{exc}}{I_{exc}} = R + jX \quad (I.3)$$

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

L'axe des abscisses de ce plan représente la partie résistive (R) et l'axe des ordonnées la partie réactive (X) de l'impédance d'une bobine. Ce plan (R, X) est couramment employé lorsque l'on effectue des mesures avec une bobine en mode double fonction[11].

L'expression de l'impédance Z d'une bobine, parcourue par un courant alternatif, placée dans l'air (lorsque la bobine est suffisamment éloignée de tout matériau conducteur) s'écrit :

$$Z = Z_0 = R_0 + jX_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (I.4)$$

Où R_0 , X_0 et L_0 représentent respectivement la résistance [], la réactance [] et l'inductance [H] de la bobine dans l'air. La pulsation s'écrit $\omega = 2\pi f$, avec f la fréquence [Hz].

En présence d'une pièce conductrice homogène, la répartition dans l'espace du champ magnétique est modifiée du fait des CF et l'impédance de la bobine devient :

$$Z = Z_{charge} = R_{charge} + jX_{charge} \quad (I.5)$$

Si cette pièce conductrice présente une inhomogénéité alors la circulation des CF est déviée. L'impédance de la bobine, en présence d'un défaut, peut s'écrire :

$$Z = Z_{charge-défaut} = Z_{charge} + \Delta Z_{défaut} \quad (I.6)$$

Nous pouvons considérer le plan d'impédance afin de mettre en évidence l'effet du défaut sur l'impédance du bobinage, (figure I-10). Le point 1 correspond à la valeur Z_{bob} dans l'air, le point 2 à la valeur $Z_{pièce}$ et le point 3 à la valeur $Z_{pièce-défaut}$. L'écart entre les points 2 et 3 représente la signature du défaut et c'est cette variation qui est exploitée pour détecter sa présence[10].

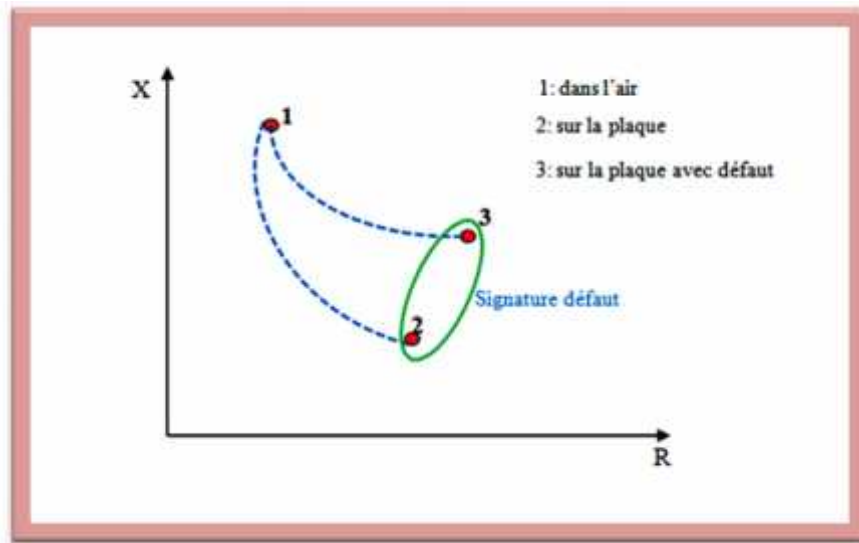


Figure (I-10) : Représentation du plan d'impédance

Dans le domaine du contrôle non destructif par courant de Foucault, les valeurs obtenues par la bobine de mesure sont souvent représentées dans le plan d'impédance normalisée. Nous donnons la formulation de la résistance et la réactance normalisées par les équations suivantes :

$$R_N = \frac{R_{charge} - R_{vide}}{X_{vide}} \quad (I.7)$$

$$X_N = \frac{X_{charge}}{X_{vide}} \quad (I.8)$$

R_{charge} est la composante résistive qui représente l'ensemble des pertes Joule causées soit par les courants de conduction dus à l'alimentation soit par les courants de Foucault dans la charge.

X_{charge} est la composante inductive qui représente la réactance du bobinage d'excitation en présence de la pièce à contrôler (charge).

R_{charge} et X_{charge} sont respectivement la résistance et la réactance du capteur sans la présence de pièces (à vide). Le plan d'impédance normalisé est le tracé de X_N en fonction de R_N . Cette représentation permet d'éviter l'influence des caractéristiques la sonde (résistance interne, nombre de spire).

I.7 Signaux d'excitation

Il existe trois types d'excitation pour les capteurs à courants de Foucault :

- ✓ Excitation mono fréquence
- ✓ Excitation multi fréquence
- ✓ Excitation par courants pulsés

I.7.1 Excitation mono fréquence

Dans le mode mono fréquence, le signal d'excitation est une onde sinusoïdale de fréquence fixe. Le choix de la valeur de la fréquence dépend de l'application visée. En effet les courants de Foucault à basse fréquence [1Hz:1kHz] conviennent pour le contrôle de produits de grande épaisseur et les matériaux ferromagnétiques. Pour les matériaux de faible ou moyenne épaisseur, on utilise les fréquences de valeurs moyennes [1kHz:1MHz]. Les fréquences supérieures à 1MHz sont peu utilisées[8].

I.7.2 Excitation multifréquence

Le principe de l'excitation multifréquence est d'alimenter successivement, ou simultanément, l'émetteur à plusieurs fréquences différentes. 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[7].

I.7.3 Excitation par courants pulsés

Une technique qui a vu le jour dans le milieu des années 50, destinait à l'évaluation de l'épaisseur de revêtement métallique, par la suite elle a été appliquée à la détection de défauts profonds, les dépôts sur les pièces dans le domaine de l'inversion du phénomène. Elle Consiste à émettre un champ magnétique de large bande de fréquence. La forme des signaux utilisés est variable dans le temps, c'est une excitation qui peut être des impulsions produite par une

décharge capacitive ou bien une excitation impulsionnelle rectangulaire, triangulaire, ou semi sinusoïdale, cette dernière étant la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre [2].

I.8 Intérêt et limites

L'intérêt de la méthode par courants de Foucault apparaît dans la simplicité et la précision de la mesure. La sensibilité des sondes permet de repérer un défaut de quelques dizaines de micromètres de long. En plus de la détection des défauts, la technique permet de mesurer les caractéristiques du matériau du point de vue géométrique (entrefer et épaisseur) et électromagnétique (propriété électrique et magnétique).

Néanmoins, la méthode présente ses limites, elle ne s'applique qu'aux matériaux conducteurs, l'épaisseur de peau limite la détection à des défauts de surface.

La méthode est longue à développer pour des géométries complexes ou des pièces non homogènes.

I.9 Domaine d'application du CND par courants de Foucault


Le CND-CF (contrôle non destructif par courant de Foucault) peut être appliqué aux :

- Matériaux conducteurs magnétiques ou amagnétique.
- Contrôles de tri (détection de métaux dans un environnement donné)
- Contrôle des tôles minces.
- Contrôles d'épaisseur de revêtement.
- Matériaux composite comportant des fibres conductrices[8].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général de la technique du contrôle non destructif par courants de Foucault qui tend à occuper une place de plus en plus importante. En effet, la technique est simple d'utilisation et permet des mesures sans contact. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons rapporté des notions sur la création des courants de Foucault et le principe de fonctionnement des différents types des capteurs inductifs utilisés dans les applications de CND-CF. A partir de la mesure d'impédance du capteur, il serait intéressant dans le domaine du contrôle.

Dans le prochain chapitre, on présentera la modélisation électromagnétique des phénomènes magnétodynamique et la résolution des problèmes directs de l'électromagnétisme en CND-CF par la méthode numérique.



Chapitre II
Modélisation
magnétodynamique du
CND par CF et
Méthode de résolution

II Modélisation magnétodynamique du CND par CF et Méthode de résolution

II.1 Introduction

La modélisation du Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault est basée sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la configuration à simuler, cette résolution peut être analytique ou numérique. Le développement technologique et les systèmes électromagnétiques qui deviennent complexes, font qu'une solution analytique est souvent insuffisante ou impossible à obtenir. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques permettant d'étudier des configurations bobine-pièce plus variées, comprenant des géométries quelconques de pièces, de capteurs, et qui consistent en une discrétisation des équations aux dérivées partielles. La modélisation numérique des systèmes électromagnétique constitue l'outil de base pour la conception et la modélisation des systèmes, elle passe par la résolution des équations du champ décrivant les phénomènes physiques et leurs couplages. La résolution numérique des équations aux dérivées partielles peut se faire par plusieurs méthodes, nous citons: méthode des différences finies, méthode des intégrale de Frontières, méthode des Intégrales, méthode des Volumes Finis et la méthode la plus répandue des approches numériques est celle des éléments Finis (MEF).

II.2 Modélisation d'un dispositif en CND-CF

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le système représenté sur la (Figure II.1) constitué d'une bobine placée au dessus d'une pièce conductrice fabriquée en aluminium par exemple.

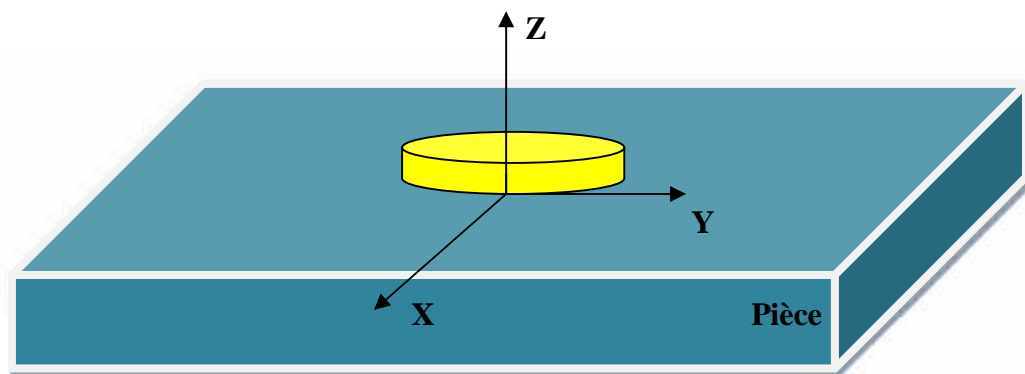


Figure (II-1) : Dispositif de CND-CF

L'objectif ici, consiste à évaluer l'impédance du capteur dans le cas suivant, sans défaut dans la pièce, ensuite on calcule l'impédance qui représente la grandeur d'intérêt dans un problème de CND-CF, par cela on peut caractériser les propriétés physiques et géométriques de la pièce en

question. la (Figure II-2) représente le domaine d'étude relatif à un problème type en CND-CF. Dans cette figure, le domaine d'étude Ω est composé d'une région conductrice amagnétique, une source de courant. Des conditions aux limites seront imposées sur la frontière, souvent sont les conditions dites de Dirichlet.

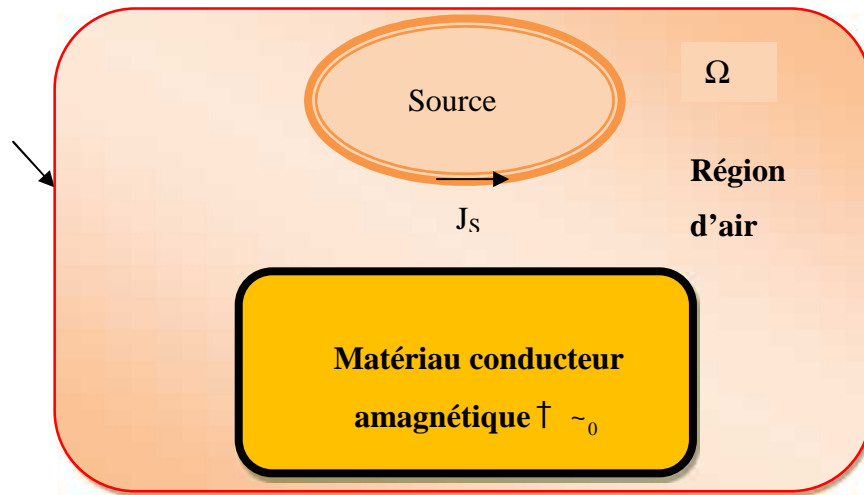


Figure (II-2):Problème magnétodynamique type

Dans le cas où le dispositif étudié présente des symétries, il est possible et intéressant de réduire l'étude à une partie du domaine, ce qui peut réduire considérablement le temps de résolution.

II.3 Mise en équation

La modélisation des systèmes électromagnétique est basée sur les équations de Maxwell, les relations constitutives du milieu et les relations de passage.

II.4 Equations de Maxwell

L'ensemble des phénomènes électromagnétique est régi par Les équations de Maxwell. Celles-ci constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques. Ces équations sont les suivantes[12].

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \dots \quad \text{Équation de Maxwell -Gauss} \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Équation Maxwell-Faraday} \quad (\text{II.2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de conservation du Flux} \quad (\text{II.3})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Équation Maxwell-Ampère} \quad (\text{II.4})$$

où ∂_t symbolise la dérivée partielle par rapport au temps

\vec{E} (V / m) : Champ électrique

\vec{H} (A / m) : Champ magnétique

\vec{D} (C / m²) : Induction électrique

\vec{B} (T) : Induction magnétique

... (C / m³) : Densité volumique de charges électriques

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité volumique de déplacement

\vec{J}_c (A / m²) : Densité de courant de conduction.

L'équation (II.1) de Maxwell-Gauss traduit la conservation de la charge électrique.

L'équation (II.2) de Maxwell-Faraday, correspond à la loi d'induction de Faraday qui établit un lien entre un champ électrique et un flux magnétique (relation entre un champ et sa source). Elle traduit un phénomène inductif qui se produit dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur en mouvement soumis à un champ magnétique constant.

L'équation (II.3) traduit la conservation du flux (champ magnétique).

L'équation (II.4) de Maxwell-Ampère, généralise le théorème d'Ampère et permet d'établir une relation entre le champ électromagnétique et les courants électriques. Elle traduit la création d'un champ magnétique par les courants électriques de conduction et de déplacement.

La loi de la conservation de la charge (II.5) est obtenue à partir des équations (II.3) et (II.4)

$$\text{div} \vec{J} + \frac{\partial \dots}{\partial t} = 0 \quad (\text{I.5})$$

II.4.1 Relation du milieu

Nous distinguons une relation magnétique qui exprime le lien entre le champ magnétique (\vec{H}) et le vecteur induction (\vec{B}) à travers la perméabilité magnétique et une relation diélectrique exprimant le lien entre le vecteur champ électrique (\vec{E}) et le vecteur déplacement électrique (\vec{D}) à travers la permittivité électrique [2].

➤ Cas linéaire

• Relation magnétique

$$\vec{B} = \tilde{\mu} \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

• Relation diélectrique

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

$$\tilde{\mu} = \tilde{\mu}_0 \tilde{\mu}_r \quad \text{avec} \quad \tilde{\mu}_r = C^{te} \quad (\text{II.8})$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad \text{avec} \quad \epsilon_r = C^{te} \quad (\text{II.9})$$

$\tilde{\mu}$: Perméabilité magnétique absolue.

$\tilde{\mu}_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$: Perméabilité magnétique du vide.

$\tilde{\mu}_r$: Perméabilité magnétique du milieu considéré.

ϵ : Permittivité électrique.

$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$: Permittivité du vide.

ϵ_r : Permittivité électrique relative du milieu considéré.

• Loi d'Ohm

Exprime la relation liant la densité de courant \vec{J} au champ électrique \vec{E} à travers la conductivité \dagger , elle est donnée par :

$$\vec{J} = \dagger \vec{E} \quad (\text{II.10})$$

Pour un conducteur, la densité de courant est donnée comme suit :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{II.11})$$

Avec

$$\vec{J}_{ind} = \dagger \vec{E} + \dagger (\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.12})$$

\vec{J}_{ind} : La densité des courants induits.

\vec{J}_s : La densité des courants sources

\dagger : La conductivité électrique.

\vec{v} : La vitesse linéaire de mouvement.

II.4.2 Conditions aux limites

D'une manière générale pour une variable u , les conditions aux limites s'énoncent pour un domaine de calcul Ω de frontière Γ comme suit :

- ✓ Condition de Dirichlet homogène $u \cdot \vec{A} = 0$
- ✓ Condition de Neumann homogène $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$

II.4.3 Conditions de continuité

Lors du passage d'un milieu à un autre, les champs électromagnétiques subissent des discontinuités. Cependant, il est possible de définir des conditions de passage des champs entre deux milieux. Considérons deux milieux Ω_1 et Ω_2 ayant des propriétés physiques différentes et séparés par une interface Σ comme le montre la (figure II-3). Les conditions traduisant la continuité des champs à l'interface Σ sont alors définies par les relations suivantes [13].

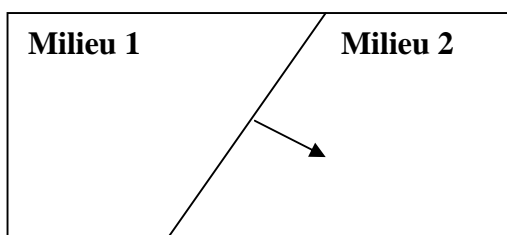


Figure (II-3): Interface entre deux milieux différents

Continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique E

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

Continuité de la composante normale du vecteur l'induction magnétique B

$$\vec{B}_1 \cdot \vec{n} = \vec{B}_2 \cdot \vec{n} \quad (\text{II.14})$$

Discontinuité de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique H

$$\vec{H}_1 \wedge \vec{n} - \vec{H}_2 \wedge \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{II.15})$$

Discontinuité de la composante normale du vecteur induction électrique D en présence de charges superficielles \dots_s :

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \dots_s \quad (\text{II.16})$$

Où \vec{n} : Vecteur normal à la surface de séparation entre les milieux Ω_1 et Ω_2 .

\vec{J}_s : Densité surfacique d'une nappe de courant entre les deux milieux.

L'ensemble de ces équations décrit globalement tous les phénomènes électromagnétiques

II.4.4 Equation électromagnétique

II.4.4.1 Hypothèse

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

- Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$
- La densité volumique de charges est considérée nulle, soit $\rho = 0$
- La densité surfacique de courant entre deux milieux est nulle ($\vec{J}_s = \vec{0}$)
- L'induction magnétique rémanente est considérée nulle ($\vec{B}_r = 0$), pas d'aimants.
- Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue .Ainsi la quantité peut être décomposée en une partie imposée \vec{J}_s (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit, pour la quelle on gardera la notion de $\dagger \vec{E}$ exprime uniquement la densité des courant de Foucault.

En tenant compte des hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell à considérer sont :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{II.17})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.18})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.19})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{II.21})$$

$$\vec{J}_c = \vec{J}_s + \vec{J}_{\text{induit}} \quad (\text{II.22})$$

$$\vec{J}_{\text{induit}} = \dagger \vec{E}_{\text{induit}} + \dagger (\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.23})$$

La résolution des équations de Maxwell associées aux lois de comportement peut être obtenue en considérant les champs comme inconnus. Néanmoins, on préfère exprimer les champs magnétique et électrique en fonction des potentiels qui peuvent être scalaires ou vectoriels [14].

II.4.5 Formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique

II.4.5.1 Modèle magnétodynamique

Regardons la bibliographie, formulations existent pour la résolution des problèmes électromagnétique telles que la formulation en potentiel vecteur magnétique A. la formulation en champ électrique E, la formulation en A à été introduite par plusieurs auteurs tel que par exemple dans,.....etc. A l'heure actuelle, la formulation qui reste attractive pour la résolution des problèmes de calcul des courants de Foucault en 2D et 3D, est celle en potentiels A-V (A est le **potentiel vecteur magnétique** et V est le **potentiel scalaire électrique**).

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la formulation A-V dans le cas général .Réécrivons deux équations de Maxwell :

$$\overline{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.24})$$

$$\overline{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.25})$$

La deuxième équation indique qu'il existe un vecteur \vec{A} donné par :

$$\vec{B} = \overline{rot} \vec{A} \quad (\text{II.26})$$

Le Vecteur A est appelé potentiel magnétique .La substitution de la (II.24) dans (II.26), donné :

$$\overline{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{0} \quad (\text{II.27})$$

Ceci nous permet de constater que le champ $\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)$ est un champ conservatif, il vient alors :

$$\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = -\overline{grad} V \quad (\text{II.28})$$

Soit :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overline{grad} V \quad (\text{II.29})$$

$$\overline{rot} \left(\frac{1}{\sim} \vec{B} \right) = \vec{J}_c \quad (\text{II.30})$$

Tenons compte les équations (II.22), (II.23) et (II.30) :

$$\overline{rot} \left(\frac{1}{\sim} \overline{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_s + \dagger \vec{E} + \dagger (\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.31})$$

D'où

$$\overline{\text{rot}}\left(\frac{1}{\sim}\overline{\text{rot}}\overline{A}\right)=\overline{J}_s-\dagger\left(\frac{\partial\overline{A}}{\partial t}+\overline{\text{grad}}V\right)+\dagger(\overline{v}\wedge\overline{B}) \quad (\text{II.32})$$

Soit :

$$\overline{\text{rot}}\left(\frac{1}{\sim}\overline{\text{rot}}\overline{A}\right)+\dagger\frac{\partial\overline{A}}{\partial t}+\dagger\overline{\text{grad}}V-\dagger(\overline{v}\wedge\overline{B})=\overline{J}_s \quad (\text{II.33})$$

On peut considérer le système (pièce +bobine) comme un système axisymétrique, Le modèle électromagnétique adopté est celui du potentiel vecteur magnétique.

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

Sur la figure (II-4) est présenté le système considéré.

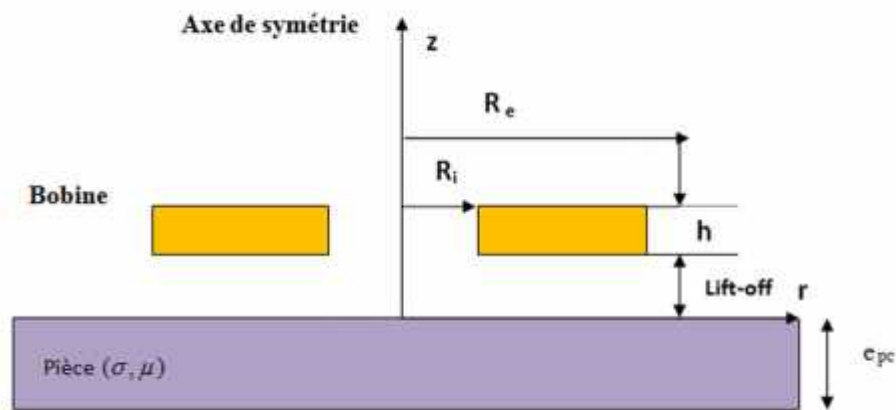


Figure (II-4):Système axisymétrique bobine – pièce

Le terme $\overline{\text{grad}}V$ en axisymétrie est nul. Pour des vitesses de déplacement faibles on peut négliger le terme $\dagger(\overline{v}\wedge\overline{B})$. L'équation (II.33) devient alors :

$$\overline{\text{rot}}\left(\frac{1}{\sim}\overline{\text{rot}}\overline{A}\right)+\dagger\frac{\partial\overline{A}}{\partial t}=\overline{J}_s \quad (\text{II.34})$$

Le terme $\dagger\frac{\partial\overline{A}}{\partial t}$ sera remplacé alors par $j\dagger\check{S}\overline{A}$, où \check{S} est la pulsation des courants sources.

Ainsi l'équation (II.34) devient :

$$\overline{\text{rot}}\left(\frac{1}{\sim}\overline{\text{rot}}\overline{A}\right)+\dagger j\overline{S}\overline{A}=\overline{J}_s \quad (\text{II.35})$$

L'utilisation de cette dernière formulation est très répondeuse pour la résolution des problèmes de CND-CF pour des problèmes axisymétriques.

II.4.5.2 Modèle 2D axisymétrique

Dans ce modèle, le courant J_s est dirigé suivant la direction ϕ (figure II-5), imposant ainsi pour le potentiel vecteur magnétique une seule composante A_ϕ . Le champ magnétique B possède alors deux composantes, l'une suivant la direction r et l'autre suivant la direction z .

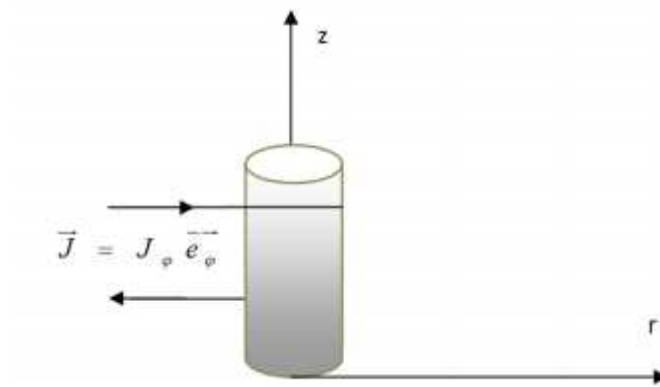


Figure (II-5):Modèle 2D axisymétrique

Lorsque le courant est orienté suivant la direction ϕ , alors $A = A_\phi$. Les différentes grandeurs vectorielles ont les composantes suivantes :

$$\vec{J} = \begin{Bmatrix} 0 \\ J_\phi \\ 0 \end{Bmatrix} ; \vec{E} = \begin{Bmatrix} 0 \\ E_r \\ 0 \end{Bmatrix} ; \vec{A} = \begin{Bmatrix} 0 \\ A_\phi \\ 0 \end{Bmatrix} ; \vec{B} = \begin{Bmatrix} B_r \\ 0 \\ B_z \end{Bmatrix} ; \vec{H} = \begin{Bmatrix} H_r \\ 0 \\ H_z \end{Bmatrix}$$

En coordonnées cylindriques, nous avons :

D'où :

$$\overline{rot\vec{A}} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} \overline{e_r} & \overline{e_\zeta} & a_{13} \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \zeta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_r & A_\zeta & A_z \end{pmatrix} \quad (\text{II.36})$$

$$\overline{rot\vec{A}} = \frac{1}{r} \left[-\frac{\partial(rA_\zeta)}{\partial z} \right] \overline{e_r} + \frac{1}{r} \left[-\frac{\partial(rA_\zeta)}{\partial r} \right] \overline{e_z} \quad (\text{II.37})$$

Soit :

$$\overline{rot} \left(\frac{1}{r} \overline{rot\vec{A}} \right) = \left[-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\zeta)}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_\zeta}{\partial z} \right) \right] \overline{e_\zeta} \quad (\text{II.38})$$

Remplaçant le terme rA_ζ par A^* , l'équation (II.38) devient :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A^*}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A^*}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial A^*}{\partial r} = -J_s \quad (\text{II.39})$$

II.5 Méthode numérique

En se basant sur des considérations physiques, nous avons traité notre problème physique en équation aux dérivées partielles (II.35).

Cette formulation ne peut être résolue de manière analytique pour des systèmes électromagnétiques complexes. Il est donc nécessaire d'avoir recours à une méthode de résolution numérique.

Les principales méthodes numériques sont : La méthode des différences finis (MDF), la méthode des éléments finis (MEF), la méthode des intégrales de frontières(MIF) et la méthode des volumes finis (MVF).

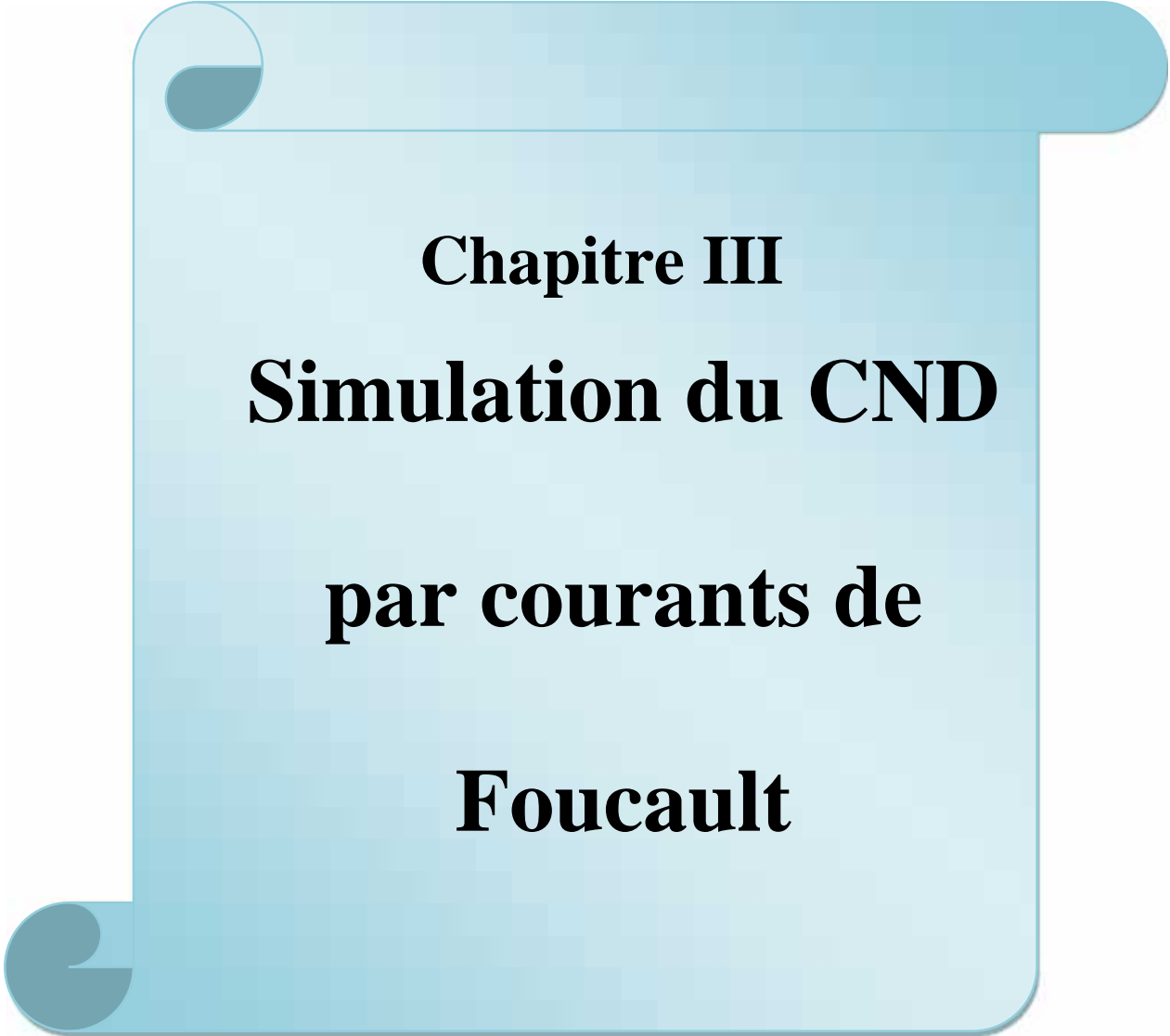
Pour la résolution de l'équation (II.35), notre choix s'est porté sur la méthode des éléments finis, l'une des méthodes les plus puissantes utilisées pour la résolution des systèmes d'équations aux dérivées partielles.

II.5.1 La méthode des éléments finis (FEM)

La méthode des éléments finis appartient à cette classe des procédures numériques qui peut transformer une relation fonctionnelle en un système d'équations linéaires. La FEM a connu un grand développement depuis les années 1970 et est devenue une méthode très populaire dans les nombreux domaines de la physique. Cette popularité est probablement due à sa capacité de pouvoir s'appliquer à des structures complexes. La MEF est une méthode rigoureuse qui offre des résultats avec une grande précision[15]

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, la résolution du problème direct du système électromagnétique (Plaque métallique + bobine) dans le domaine CND-CF a été faite par modélisation du système magnétodynamique via les équations de Maxwell. La formulation relative au problème magnétodynamique a été développée et le cas axisymétrique a été détaillé. La méthode des éléments finis a été choisie pour la transformation des équations EDP en équations algébriques.



Chapitre III
Simulation du CND
par courants de
Foucault

III Simulation du CND par courants de Foucault

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la description du logiciel FEMM, avec lequel toutes nos simulations ont été effectuées ainsi que les résultats de simulations obtenues.

Dans la (figure III.3) est présenté le système électromagnétique modélisant notre dispositif.

III.2 Système étudié

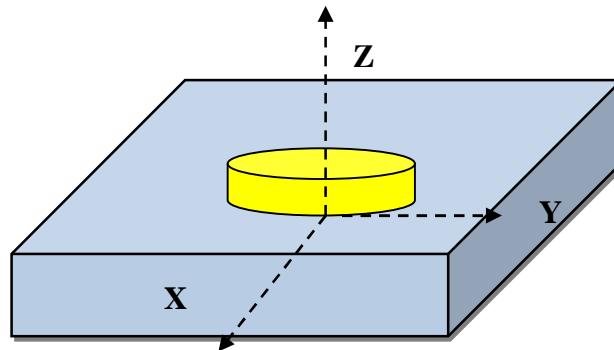


Figure (III-1):Système magnétodynamique du dispositif étudié

La présence d'un axe de symétrie permet de restreindre le domaine d'étude à la moitié de la section transversale (figure III-2). Les N spires constituant la grille métallique dans lesquels circule un courant I peuvent être modélisés par un seul anneau (de rayon interne r et externe R) sur lequel est appliquée une densité de courant J_s donné par [1] :

$$J_s = \frac{NI}{S} \quad (\text{III.1})$$

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

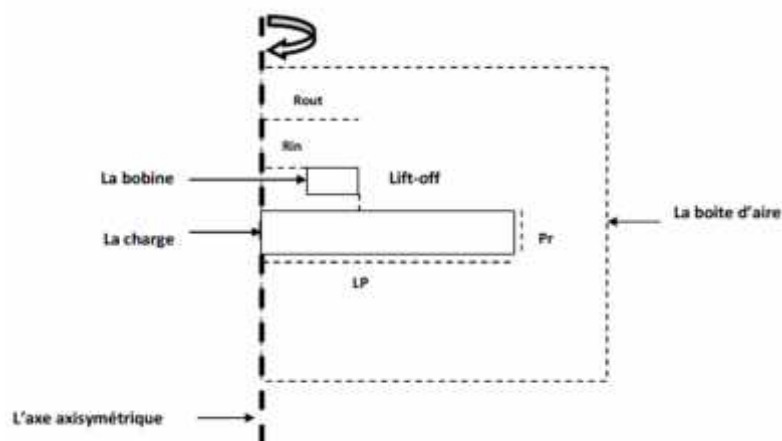


Figure (III-2):Géométrie du système axisymétrique en 2D

La (figure III-2) illustre la géométrie du système bidimensionnelle étudié, la structure est composée de trois sous domaines : une boîte d'air, la charge (matériau) et la source (bobine).

III.3 Logiciel FEMM

III.3.1 Description du logiciel

Le logiciel FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) comporte une suite de programmes permettant de résoudre des problèmes électromagnétiques 2D en basses fréquences. Ce logiciel développé par David Meeker, est disponible gratuitement (open source) par Aladdin free public licence [1].

III.3.2 Fonctionnement du logiciel

Les géométries des systèmes (problèmes) étudiés sont construites en 2D. Ensuite chaque solveur sélectionne un ensemble des fichiers des données qui correspond à notre problème. Puis le solveur résout les équations différentielles partielles correspondantes pour obtenir les valeurs du champ désiré. Les équations de Maxwell sont utilisées. Dans le cas des problèmes électromagnétiques, seul le champ magnétique nous intéresse [16].

III.4 Barre du menu principal

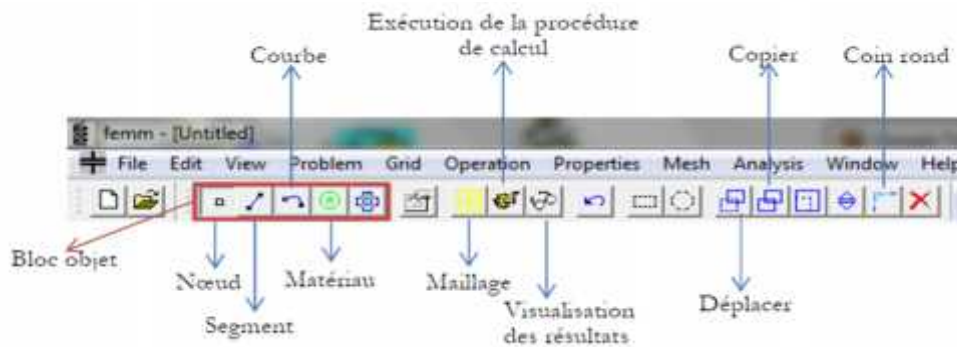


Figure (III-3): Premières composantes du logiciel FEMM

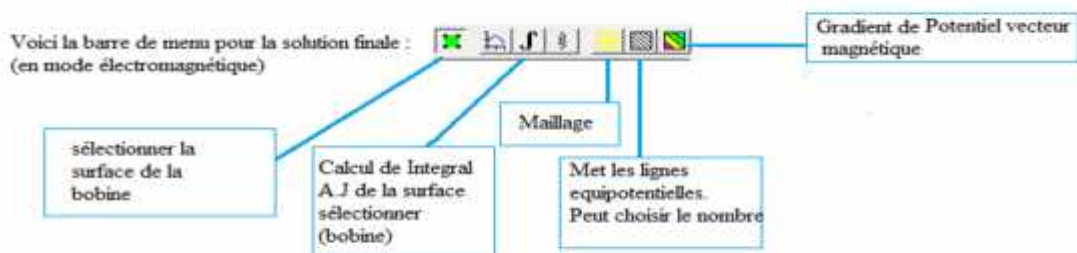


Figure (III-4): Composantes terminales du logiciel FEMM

III.5 Création d'une simulation électromagnétique

L'objectif principal de nos simulations est de calculer l'impédance de la bobine[16], on suit donc les différentes étapes pour faire une simulation d'un problème électromagnétique.

Nous choisissons le type de *Magnetics problem*. Une fenêtre apparaît avec les barres de menu principales.

III.5.1 Paramètres du problème

Pour spécifier la symétrie :

- Choix du type de symétrie : *Axisymétric*.
- Choix de l'unité des longueurs.
- On peut également jouer sur la précision et sur l'angle des triangles.
- Un commentaire utile peut aussi être noté dans la boîte Comment

III.5.2 Construction de la géométrie

Nous construisons la géométrie du système de notre problème en utilisant le bouton nœuds pour rentrer les coordonnées.

III.5.3 Conditions aux frontières

Il est nécessaire de définir une frontière pour permettre de limiter le calcul.

- Préciser la frontière extérieure
- Fixer les conditions aux limites correspondantes (Dirichlet ou Newman), pour notre cas, c'est les conditions de Dirichlet qu'on a imposé (Potentiel vecteur magnétique $A=0$).

III.5.4 Choix des matériaux et des milieux

Il est important de déterminer l'environnement autour de notre système d'étude.

III.5.5 Génération du maillage et simulation

- Il est maintenant temps de sauvegarder notre fichier
- Lancer le générateur de maillage (triangles)
- Lancer la procédure de calcul puis la visualisation

Après introduction des données géométriques et physiques ainsi que les conditions aux limites dans FEMM et maillage du domaine d'étude, puis résolution des équations aux dérivées partielles, la solution est affichée sous forme de contour de densité de flux (induction magnétique), ... le logiciel permet également d'évaluer un certain nombre d'intégrales et de tracer diverses quantités d'intérêt le long de contours qui nous intéressent [1].

III.6 Structure générale

Tout d'abord, nous présentons les étapes pour l'implémentation du modèle de problème magnétodynamique (linéaire).

III.6.1 Construction de la géométrie du système

La (figure III-5) illustre la géométrie du système bidimensionnelle élaborée sous FEMM, la structure est composée de trois sous domaines : une boîte d'air, la charge (matériau) et la source (bobine).

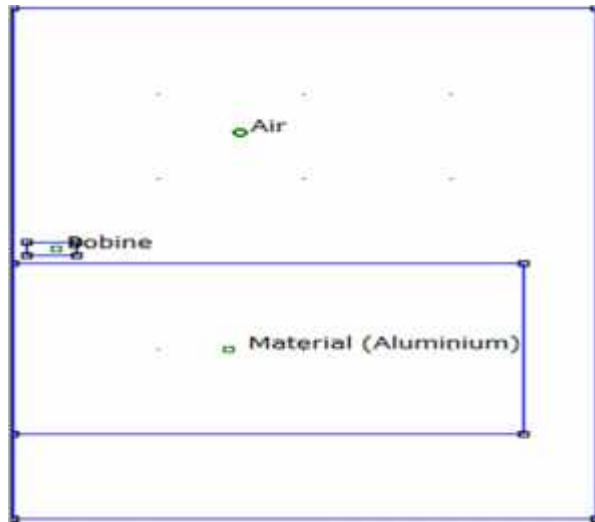


Figure (III-5):Géométrie du système axisymétrique en 2D par FEMM

III.6.2 Conditions aux limites

La figure III.6 montre les conditions introduites au bord du domaine. Nous supposons qu'à une certaine distance, généralement prise égale à la plus grande dimension de dispositif à étudier, les champs peuvent être considérés comme nuls (condition de type Dirichlet). Quant à l'axe de symétrie, et puisqu'il s'agit d'une symétrie de révolution, la direction du potentiel vecteur magnétique est opposée d'un côté par rapport à l'autre ce qui implique que le champ va s'annuler au voisinage sur l'axe.

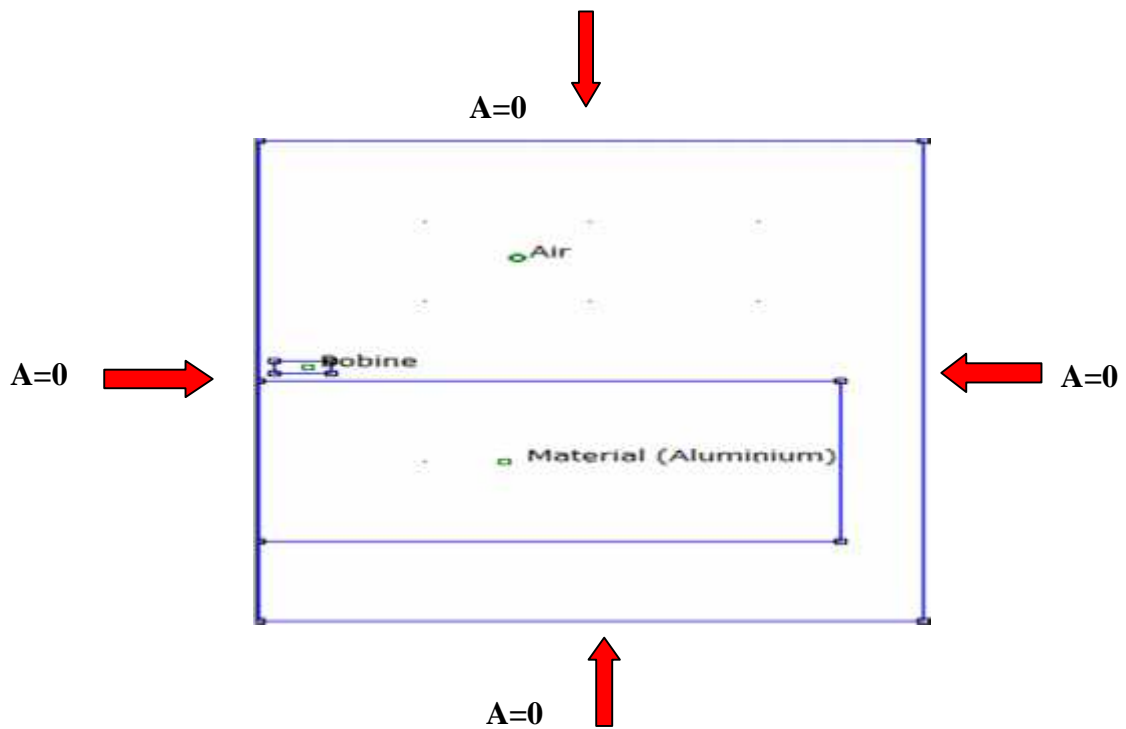


Figure (III-6): Conditions aux limites

Caractéristiques et discrétisation géométrique :

Sur la figure III-7 nous présentons les maillages obtenus FEMM.

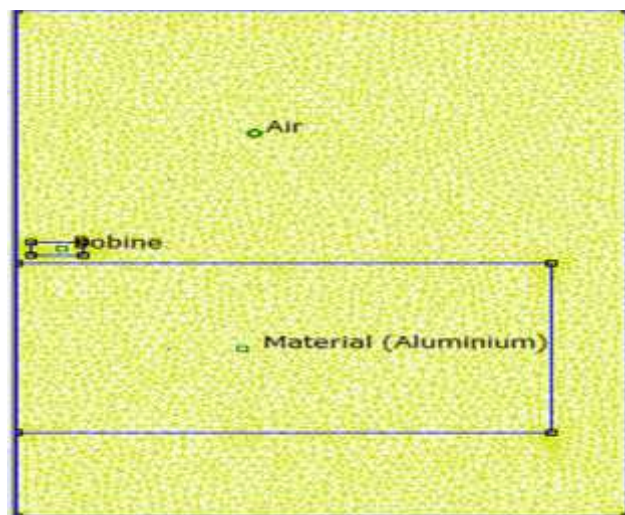


Figure (III-7): Maillage du problème sous FEMM

Caractéristiques physiques :

- Intensité de courant source $I = 3.82 \cdot 10^{-3} \text{ A}$
- La section de l'anneau $s = 5.25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
- La densité de courant source $J_s = 0.582 \text{ MA/m}^2$

Capteur :

- Perméabilité magnétique : $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ [H/m].
- Fréquence : $f = 1000$ jusqu'à 10000 [Hz].

Charge : Plaque en Aluminium

- Conductivité électrique : 38.5MS.m^{-1}

III.7 Etude d'une plaque d'aluminium (matériau amagnétique linéaire)

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus pour le cas de l'aluminium.

III.7.1 Iso-valeurs du potentiel vecteur magnétique

Les (figures III-8 et III-9) représentent respectivement la distribution du potentiel vecteur magnétique A (Contour) calculé par FEMM. Ces résultats ont été obtenus à une fréquence de 1000Hz et 10000Hz .

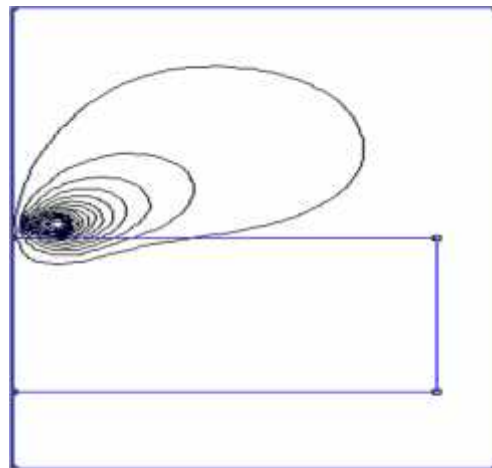


Figure (III-8): Isovaleurs du potentiel vecteur magnétique par FEMM 1000Hz

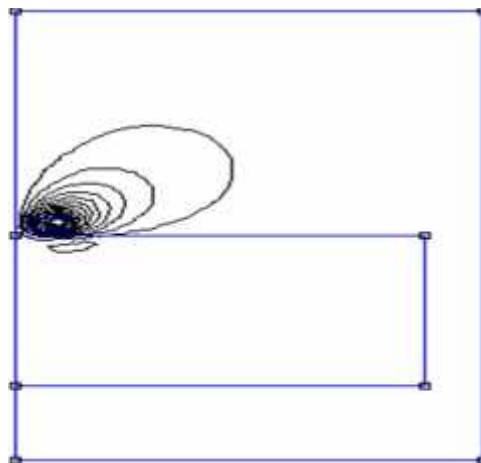


Figure (III-9): Isovaleurs du potentiel vecteur magnétique par FEMM 10000Hz

Nous remarquons bien l'effet de la fréquence sur la pénétration des lignes de champ.

III.7.2 Induction magnétique B

Les figures III-10 et III-11 représentent respectivement la distribution de l'induction magnétique B calculé par FEMM dans l'environnement proche de la pièce amagnétique linéaire d'aluminium par un courant ayant une fréquence de 1000Hz et 10000 Hz

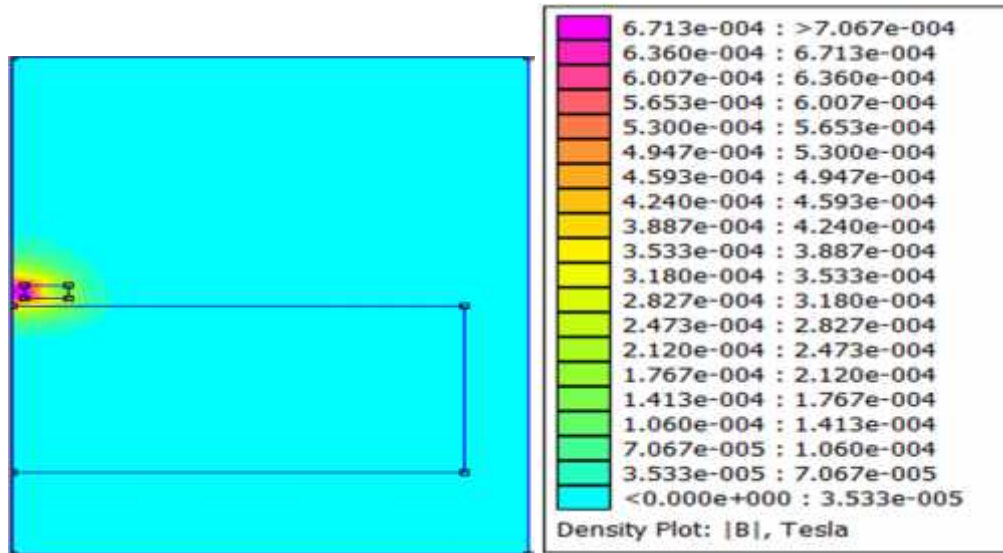


Figure (III-10): Induction magnétique avec FEMM 1000Hz

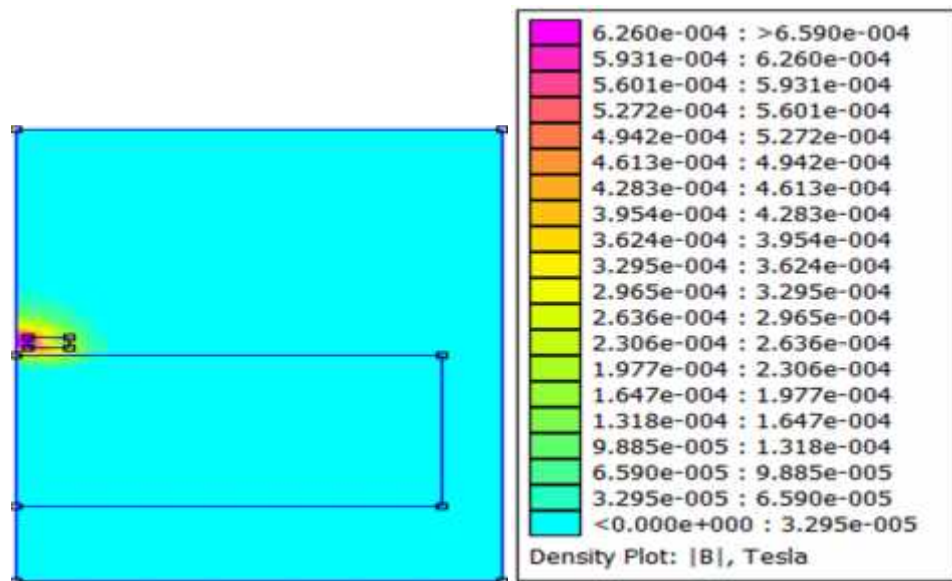


Figure (III-11): Induction magnétique avec FEMM 10000Hz

Nous remarquons bien l'effet de la fréquence sur la pénétration de l'induction magnétique.

III.7.3 Courants induits dans la plaque

Les figures III-12 et III-13 représentent respectivement la distribution des courants induits calculés avec MA / m_2 par FEMM pour un matériau d'aluminium pour une fréquence d'excitation de 1000Hz et 10000Hz

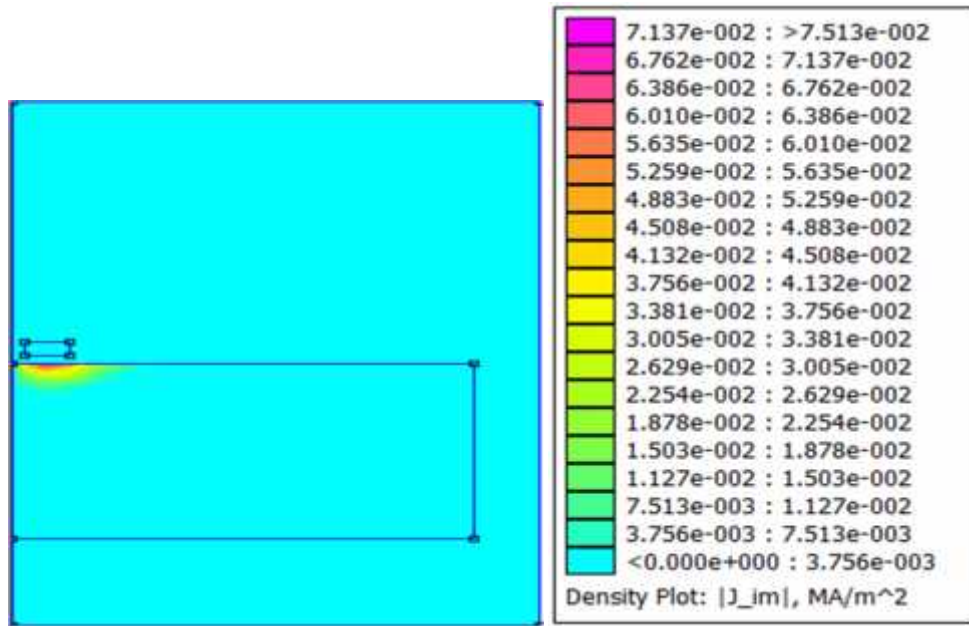


Figure (III-12): Courants induits par FEMM 1000 Hz

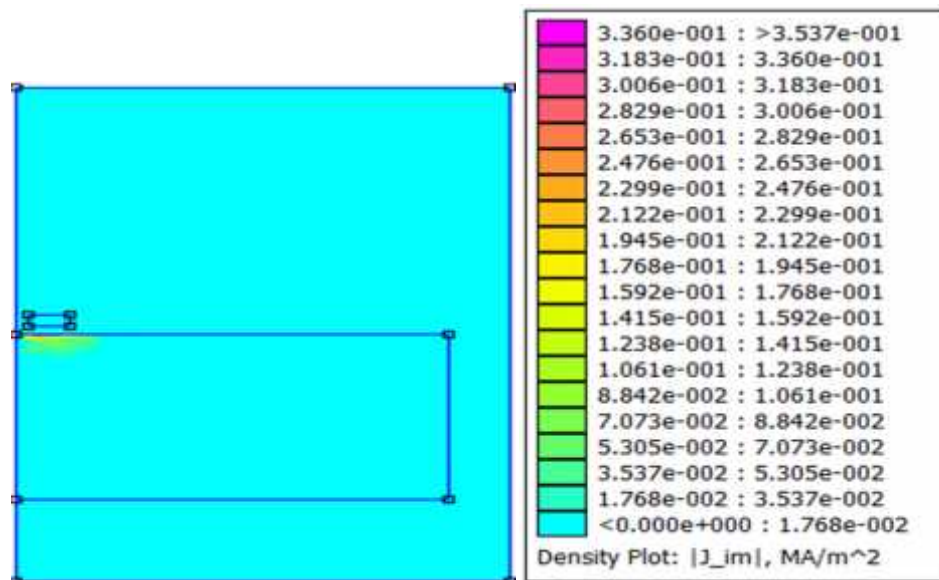


Figure (III-13): Courants induits par FEMM 10000 Hz

Tous ces résultats nous montre bien l'effet de la fréquence sur la pénétration des lignes du potentiel vecteur magnétique ou de l'induction magnétique et par voie de conséquence la pénétration des courants de Foucault, c'est l'effet de peau.

Remarque : Iso valeurs du potentiel vecteur magnétique et induction magnétique dans le cas du système sans plaque

La figure III-14 représente la distribution du contour du potentiel vecteur magnétique A calculé par FEMM à une fréquence de 1000Hz dans le cas du système sans plaque.

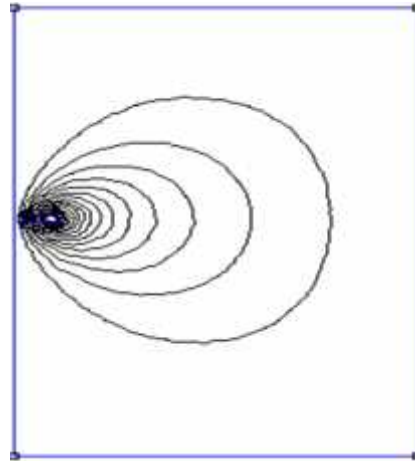


Figure (III-14): Isovaleurs du potentiel vecteur magnétique par FEMM 1000Hz

Les figures III.15 et III.16 représentent la distribution de l'induction magnétique B calculé par FEMM, par un courant ayant une fréquence de 1000Hz et 10000 Hz dans le cas du système sans plaque.

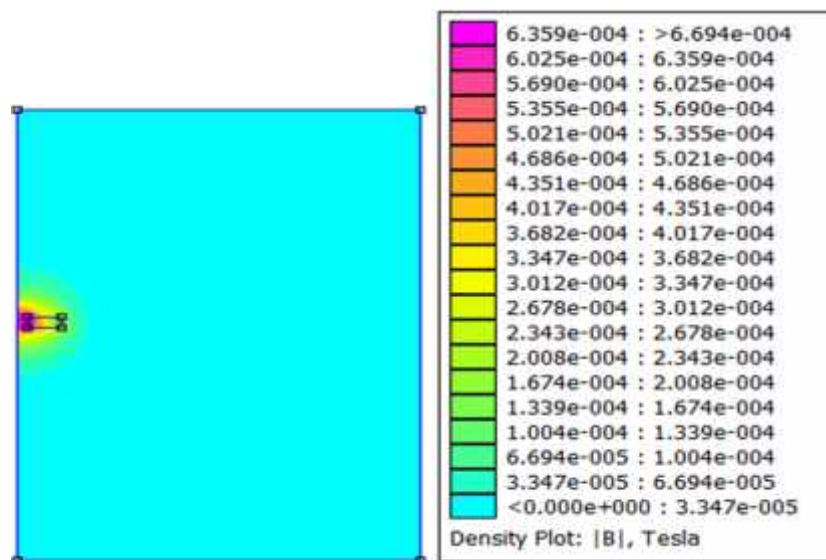


Figure (III-15): Induction magnétique avec FEMM 1000Hz

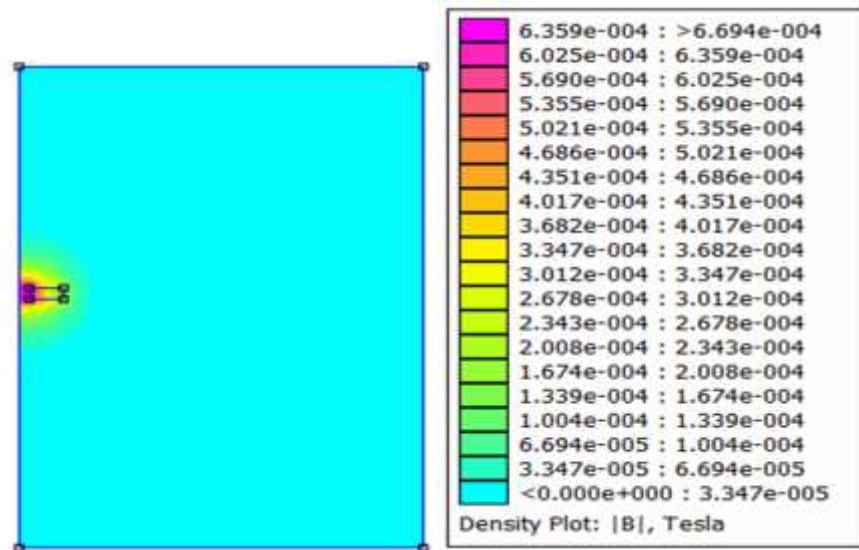


Figure (III-16): Induction magnétique avec FEMM 10000Hz

III.8 Calcul de l'impédance

La mesure des courants de Foucault n'est pas directement accessible à l'expérience, et il faut donc passer nécessairement par la mesure d'une grandeur connexe, en l'occurrence :

- la mesure de l'induction, généralement par effet Hall
- la mesure d'impédance

La mesure de ces grandeurs doit être faite pour un matériau sain et pour un matériau comportant des défauts.

Notre choix s'est porté sur le calcul de l'impédance, étant donné que nos expériences sont basées sur la mesure de la variation d'impédance de la bobine [17]. Nous disposons maintenant du modèle qui nous permet de calculer le champ électromagnétique. Il est nécessaire de trouver alors une méthode pour calculer l'impédance Z du système vue par la bobine.

Il y a plusieurs manières de calculer cette impédance.

III.8.1 La Méthode par calcul de l'énergie électromagnétique de la bobine

L'impédance peut être déterminée en calculant l'énergie électromagnétique de la bobine constituant le capteur.

Cette impédance est donnée par la formule d'Auld [17] et s'exprime par la relation suivante :

$$I^2 Z = - \int \vec{E} \cdot \vec{J}_s \Omega_s \quad (\text{III.2})$$

où \vec{E} est le champ électrique et I est l'intensité du courant parcourant la bobine et Ω_s

Dans la bobine, le champ électrique s'écrit :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -j\tilde{S}\vec{A} \quad (\text{III.3})$$

D'où l'expression de l'impédance :

$$I^2 Z = j\tilde{S} \int_{\Omega_s} \vec{A} \cdot \vec{J}_s d\Omega_s \quad (\text{III.4})$$

\vec{A} est le potentiel vecteur magnétique.

On doit noter que le terme $\int_{\Omega_s} \vec{A} \cdot \vec{J}_s d\Omega_s = I^2 Z / j\tilde{S}$ représente l'énergie électromagnétique de la

bobine.

Tableau (III-1): Impédance de la bobine avec plaque par FEMM

Fréquence (Hz)	$\int \vec{A} \cdot \vec{J}_s d\Omega_s$	Z
1000	$3.23947*10^{-8} - 1.97733*10^{-9}i$	0.85+13.94i
1500	$3.17765*10^{-8} - 2.14008*10^{-9}i$	1.38+20.52i
2000	$3.13084*10^{-8} - 2.20628*10^{-9}i$	1.89+26.95i
2500	$3.0938*10^{-8} - 2.27000*10^{-9}i$	2.39+33.29i
3000	$3.06359*10^{-8} - 2.22462*10^{-9}i$	2.87+39.59i
3500	$3.03831*10^{-8} - 2.20948*10^{-9}i$	3.33+45.77i
4000	$3.01677*10^{-8} - 2.18738*10^{-9}i$	3.76+51.94i
4500	$2.99812*10^{-8} - 2.16152*10^{-9}i$	4.19+58.07i
5000	$2.98178*10^{-8} - 2.13373*10^{-9}i$	4.59+64.17i
5500	$2.9673*10^{-8} - 2.105*10^{-9}i$	4.98+70.25i
6000	$2.95436*10^{-8} - 2.07646*10^{-9}i$	5.36+76.29i
6500	$2.9427*10^{-8} - 2.04806*10^{-9}i$	5.72+82.33i
7000	$2.9321*10^{-8} - 2.02021*10^{-9}i$	6.09+88.35i
7500	$2.92247*10^{-8} - 1.99308*10^{-9}i$	6.43+94.06i
8000	$2.91362*10^{-8} - 1.9667*10^{-9}i$	6.77+100.33i
8500	$2.9054*10^{-8} - 1.94122*10^{-9}i$	7.01+106.30i
9000	$2.8979*10^{-8} - 1.9165*10^{-9}i$	7.42+112.26i
9500	$2.89089*10^{-8} - 1.89275*10^{-9}i$	7.74+118.21i
10000	$2.88435*10^{-8} - 1.86977*10^{-9}i$	8.05+124.15i

Tableau (III-2): Impédance de la bobine sans plaque par FEMM

Fréquence (Hz)	$\int \bar{A} \bar{J}_s d\Omega_s$	Z
1000	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	14.79i
1500	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	22.19i
2000	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	29.59i
2500	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	36.99i
3000	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	44.38i
3500	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	51.78i
4000	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	59.18i
4500	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	66.58i
5000	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	73.98i
5500	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	81.37i
6000	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	88.77i
6500	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	96.17i
7000	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	103.57i
7500	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	110.97i
8000	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	118.36i
8500	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	125.76i
9000	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	133.16i
9500	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	140.56i
10000	$3.43748 \cdot 10^{-8}$	147.96i

Tableau (III-3): L'impédance normalisée Z_N par FEMM

Fréquence (Hz)	Résistance normalisée R_N	Réactance normalisée X_N	L'impédance normalisée Z_N
1000	0.057	0.943	0.057 + 0.943i
1500	0.062	0.925	0.062 + 0.925i
2000	0.064	0.896	0.060 + 0.896i
	0.065	0.899	0.065 + 0.899i
3000	0.065	0.892	0.065 + 0.892i
3500	0.063	0.884	0.063 + 0.884i
4000	0.064	0.878	0.064 + 0.878i

4500	0.063	0.872	0.063+0.872i
5000	0.062	0.867	0.062+0.867i
5500	0.061	0.863	0.061+0.863i
6000	0.060	0.859	0.060+0.859i
6500	0.059	0.856	0.059+0.856i
7000	0.058	0.853	0.058+0.853i
7500	0.058	0.847	0.058+0.847i
8000	0.057	0.848	0.057+0.848i
8500	0.056	0.845	0.056+0.845i
9000	0.056	0.843	0.056+0.843i
9500	0.055	0.841	0.055+0.841i
10000	0.054	0.839	0.054+0.839i

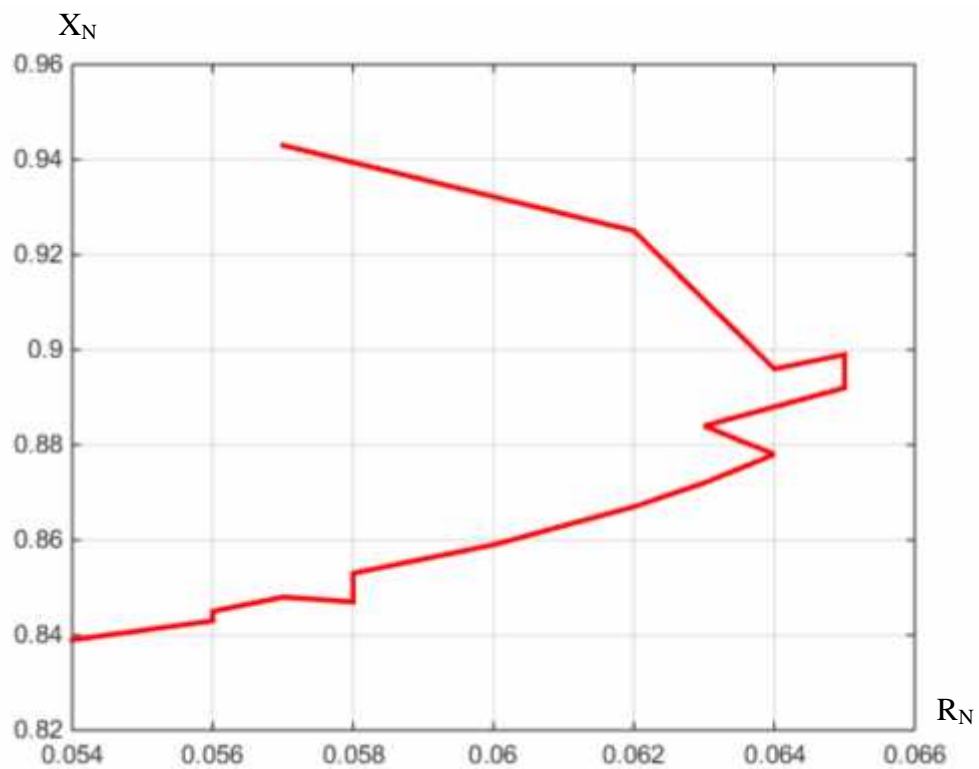
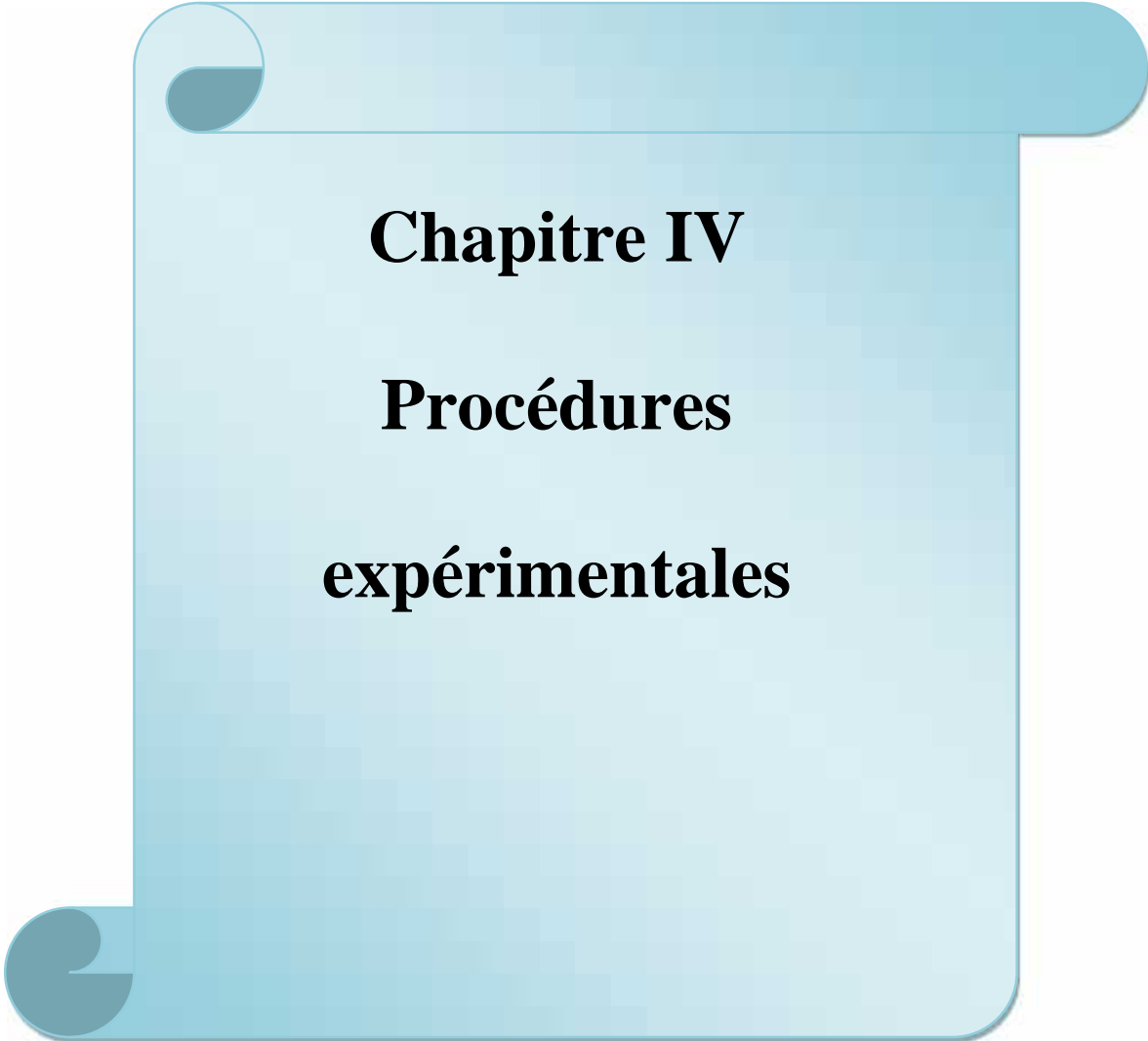


Figure (III-17):Diagramme d'impédance normalisée par FEMM

III.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exploité le logiciel FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) qui nous a permis de résoudre le problème magnétodynamique en 2D en basses fréquences. La simulation de notre système a été effectuée et nous avons calculé toutes les grandeurs électromagnétiques telles que le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique, les courants induits (courants de Foucault) puis nous avons calculé l'impédance de la bobine et tracer le diagramme d'impédance normalisé. Le logiciel FEMM nous a affranchis d'une implémentation pure et dure.



Chapitre IV

Procédures

expérimentales

IV Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus lors des essais pratiques réalisés au laboratoire. Tous ces essais ont été réalisés au laboratoire de physique des matériaux de l'université de Laghouat.

IV.1 Dispositif expérimental et matériaux utilisés

L'ensemble du matériel utilisé dans cette expérimentation est composé essentiellement de:

- ❖ Un capteur à courant de Foucault (bobine inductive)
- ❖ Une plaque d'aluminium (échantillon de test)
- ❖ Un Lock in Amplifier (amplificateur de détection synchrone) qui mesure la variation de la tension aux bornes du capteur.

Le banc de mesure utilisé est présenté sur la figure VI-1 et est détaillé dans le tableau VI-1.

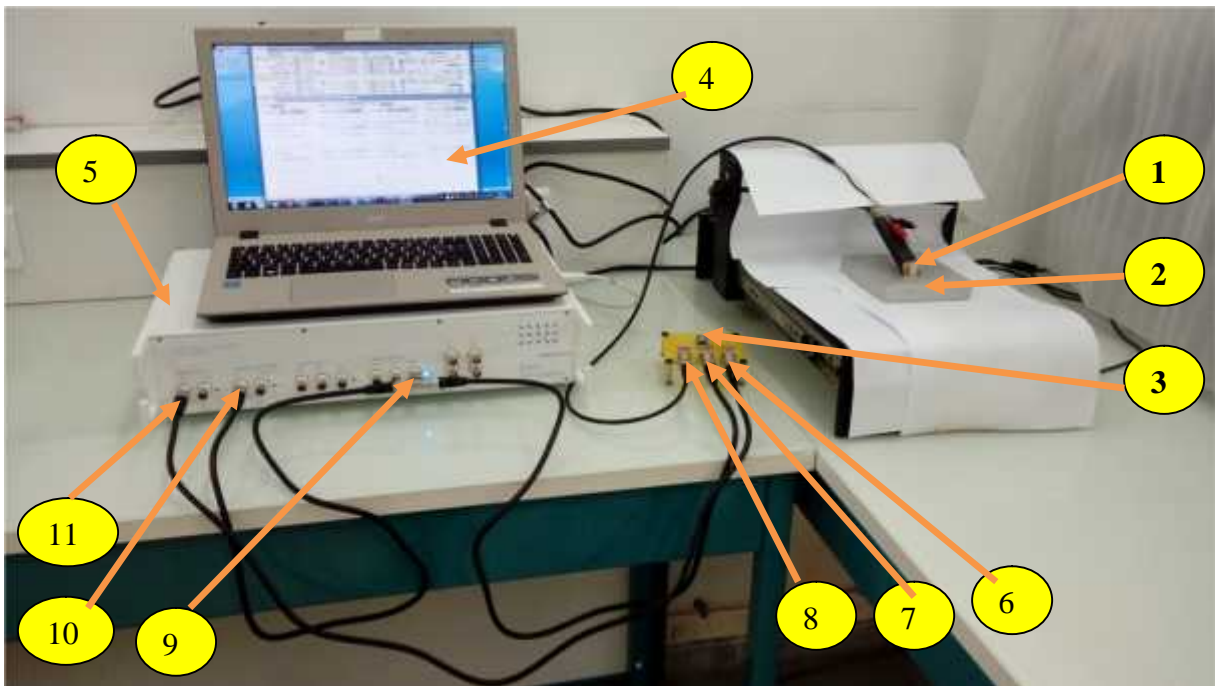


Figure (IV-1): Montage expérimental (banc d'essai)

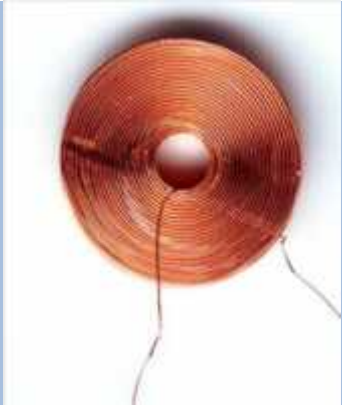
Tableau (IV-1):Les composants du montage exprimental

1	Capteur (bobine)
2	Echantillon de test
3	Interface de connexion
4	PC de pilotage du Lock-In Amplifier
5	Lock-In Amplifier
6	Fiche pour connecter la résistance
7	Fiche pour connecter la résistance en même temps la bobine
8	Placée la bobine dans la Coté colt parce que la bobine en série avec résistance (fiche de connexion pour connecter la bobine)
9	L'excitation de la résistance et la bobine
10	Mesurée la tension en bornes de la résistance et la bobine
11	Mesurée la tension en bornes de la résistance

IV.1.1 Capteur (bobine)

Le capteur utilisé est constitué d'une seule bobine (type double fonction), c'est-à-dire que la fonction d'excitation et de réception sont assurées par le même enroulement. Nous avons utilisé la même bobine qui a été utilisé dans nos modélisations et dont on connait toutes ses caractéristiques (Tableau VI.2).

Tableau(IV-2):Données de la bobine.

Désignation : CAP2	Caractéristiques	Observations
	<ul style="list-style-type: none"> - Diamètre extérieur : 09mm - Diamètre intérieur : 02mm -Hauteur : 01.5mm -Nombre de spires : 800 -Epaisseur d'une couche:0.07mm -Diamètre du fil : 0.06mm -Conductivité du fil : Celle du Cuivre -Fréquence de résonance : $f_c=717k$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Bobine plate de forme très régulière - L'impédance mesurée est en très bonne adéquation avec le modèle théorique de Dodd et Deeds [Sciensoria]

IV.1.2 Matériaux utilisée

Une plaque en Aluminium est utilisée comme pièce de test, ayant une conductivité électrique $\dagger = 38.5 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$ et ne présentant pas de défauts.

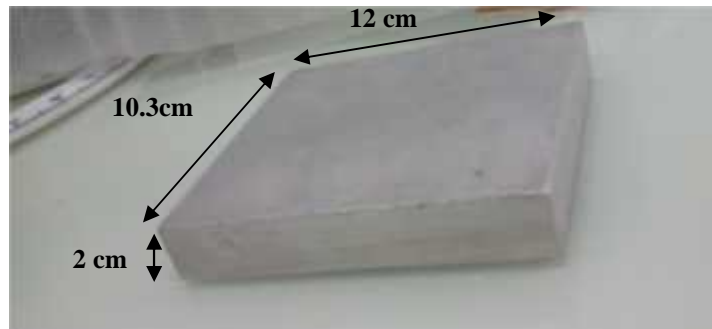


Figure (IV-2) : Echantillon de test

IV.1.3 Appareillage de mesure (Lock-in amplifier)

La détection synchrone est utilisée pour traiter le signal. Très souvent, le signal est de très faible amplitude et de haute fréquence et est noyé dans un bruit de mesure qui est lui de très basse fréquence. La détection va servir à déterminer l'amplitude du signal bien qu'il soit minime. L'amplitude de ce signal peut être de l'ordre des nano Volts et être détectée grâce à cette méthode. Pour pouvoir récupérer ce signal, il est isolé de toutes les autres fréquences et phases indésirées. Ainsi le bruit ne peut pas affecter la mesure. Pour pouvoir être isolé, il faut avoir une fréquence de référence. Pour réaliser cette mesure on utilise un amplificateur à détection synchrone ou « Lock-in amplifier » (figure IV-3) qui, afin d'extraire l'amplitude recherchée.



Figure (IV-3) : Lock-In Amplifier

IV.2 Méthode de mesure de l'impédance à l'aide du Lock-In Amplifier

L'amplificateur à détection synchrone ne mesure pas l'impédance du capteur mais la tension aux bornes de celui-ci. C'est pour cela, nous avons utilisé une méthode indirecte pour la mesure de l'impédance du capteur comme s'est montré dans la figure (IV.4) et par utilisation des relations suivantes :

$$Z = \frac{v_Z}{I} \quad (\text{IV.1})$$

$$v_R = v_{IN} = RI \Rightarrow I = \frac{v_R}{R} \quad (\text{IV.2})$$

$$Z = \frac{v_Z}{v_{IN}} \cdot R \quad (\text{IV.3})$$

$$v_{OUT} = v_Z + v_R \quad (\text{IV.4})$$

$$v_Z = v_{OUT} - v_{IN} \quad (\text{IV.5})$$

$$Z = \left(\frac{(v_{OUT} - v_{IN})}{v_{IN}} \right) \cdot R \quad (\text{IV.6})$$

La figure suivante montre un détail du montage expérimental et le schéma électrique explicatif pour mesurer l'impédance Z du capteur.

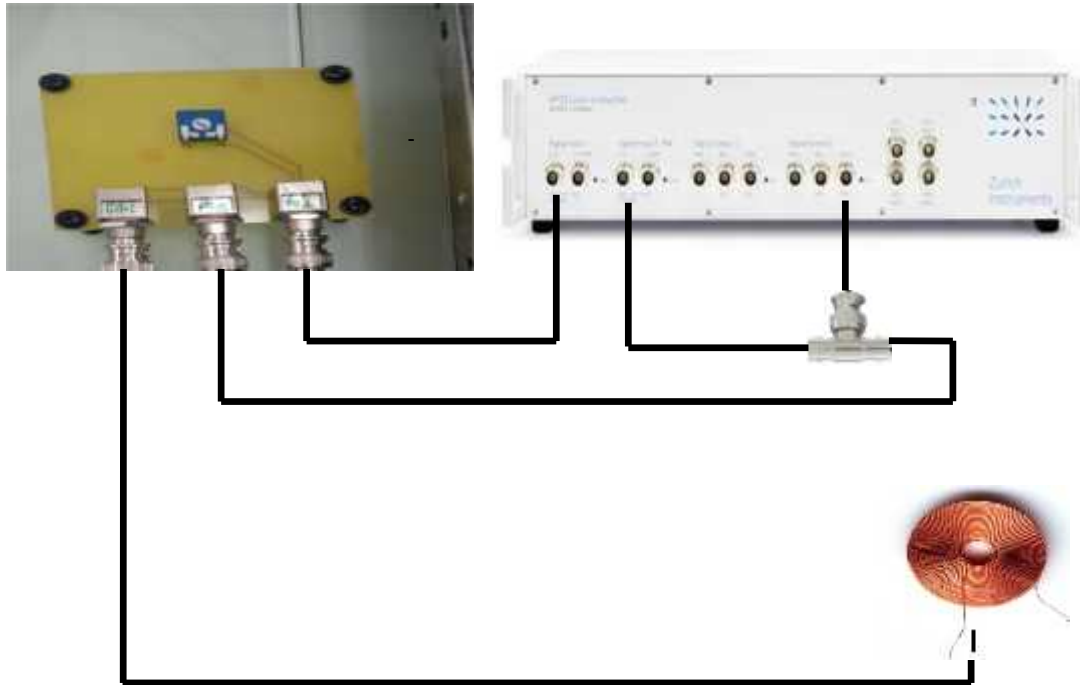


Figure (IV-4) : Lock-In Amplifier et connexion

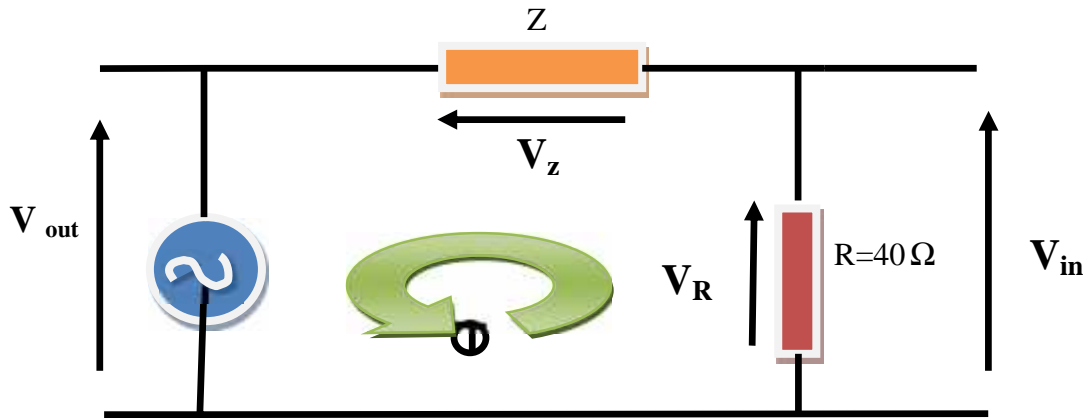


Figure (IV-5) : Schéma du circuit électrique

Nous avons à dessein choisi d'introduire tous les tableaux de mesures réalisées dans ce mémoire pour qu'ils puissent être exploités par d'autres chercheurs qui font de la modélisation.

La mesure des valeurs de v_{OUT} et v_{IN} pour chaque fréquence sont données dans les tableaux suivants.

Tableau (IV-3): v_{IN} et v_{OUT} (La bobine en contact avec la plaque)

Fréquence(Hz)	1000	1500	2000	2500
v_{IN} (mV)	152.08-15.14i	149.39-21.51i	146.34-27.19i	143.07-32.26i
v_{OUT} (mV)	469.82+23.69i	473.86+33.60i	478.54+42.44i	483.72+50.34i
Fréquence(Hz)	3000	3500	4000	4500
v_{IN} (mV)	139.51-36.76i	135.94-40.93i	132.29-44.37i	128.66-47.5i
v_{OUT} (mV)	489.04+57.38i	494.56+63.65i	500.30+69.25i	505.99+74.21i
Fréquence(Hz)	5000	5500	6000	6500
v_{IN} (mV)	125.04-5039i	121.34-52.88i	117.78-55.07i	114.29-57i
v_{OUT} (mV)	511.68-78.62i	517.22+82.51i	522.79+85.94i	528.23+88.95i
Fréquence(Hz)	7000	7500	8000	8500
v_{IN} (mV)	110.86-58.67i	107.52-60.12i	104.22-61.35i	101.16-62.61i
v_{OUT} (mV)	533.56+91.57i	538.74+93.84i	543.82+95.79i	549.10+97.58i
Fréquence(Hz)	9000	9500	10000	
v_{IN} (mV)	98.02-63.47i	94.98-64.18i	92.14-64.68i	
v_{OUT} (mV)	553.68+98.97i	558.18+100.15i	562.61+101.03	

Tableau(IV-4): v_{IN} et v_{OUT} (La bobine sans contact avec la plaque)

Fréquence (Hz)	1000	1500	2000	2500
v_{IN} (mV)	153.44-16.59i	151.26-24.54i	148.31-32.10i	144.66-39.15i
v_{OUT} (mV)	467.16+25.84i	470.51+38.16i	475.09+49.85i	480.75+60.75i
Fréquence (Hz)	3000	3500	4000	4500
v_{IN} (mV)	140.44-45i	135.77-51.43i	130.75-56.56i	125.20-61.06i
v_{OUT} (mV)	487.22+70.74i	494.48+79.76i	502.11+87.85i	510.26+94.85i
Fréquence (Hz)	5000	5500	6000	6500
v_{IN} (mV)	119.78-64.93i	114.38-68.18i	108.93-70.84i	105.63-73i
v_{OUT} (mV)	518.64+100.83i	527.10+105.88i	535.47+100.02i	543.70+113.33i
Fréquence (Hz)	7000	7500	8000	8500
v_{IN} (mV)	98.42-74.64i	93.38-75.90i	88.55-76.78i	83.90-77.29i
v_{OUT} (mV)	551.68+115.9i	559.55+117.91i	567+119.27i	574.17+120.14i
Fréquence (Hz)	9000	9500	10000	
v_{IN} (mV)	79.47-77.53i	76.42-78.45i	71.34-77.31i	
v_{OUT} (mV)	581+120.53i	590.86+120.75i	593.68+120.28i	

Tableau (IV-5) : L'impédance de capteur pour la bobine en contact avec la plaque

Fréquence (Hz)	1000	1500	2000	2500
L'impédance Z	81.74+18.35i	83.03+26.71i	84.35+34.70i	85.50+42.37i
Fréquence (Hz)	3000	3500	4000	4500

L'impédance Z	87.06+49.93i	88.26+57.34i	89.66+64.42i	90.94+71.42i
Fréquence (Hz)	5000	5500	6000	6500
L'impédance Z	92.09+78.38i	93.33+85.30i	94.49+92.07i	95.61+98.76i
Fréquence (Hz)	7000	7500	8000	8500
L'impédance Z	96.73+105.40i	97.86+11.89i	98.94+118.55i	99.72+125.06i
Fréquence (Hz)	9000	9500	10000	
L'impédance Z	100.77+131.54i	101.82+138.01i	102.99+144.24i	

Tableau (IV-6) : L'impédance de bobine (la bobine sans contact avec la plaque)

Fréquence (Hz)	1000	1500	2000	2500
L'impédance Z	79.65+19.67i	79.63+29.50i	79.62+39.34i	79.62+49.17i
Fréquence (Hz)	3000	3500	4000	4500
L'impédance Z	78.18+58.01	79.61+68.81i	79.60+78.61i	79.76+88.71i
Fréquence (Hz)	5000	5500	6000	6500
L'impédance Z	79.75+98.58i	79.72+108.39i	79.72+118.26i	79.60+137.86i
Fréquence (Hz)	7000	7500	8000	8500
L'impédance Z	79.61+147.73i	79.54+115.53i	79.54+157.53i	79.53+167.39i
Fréquence (Hz)	9000	9500	10000	
L'impédance Z	79.51+177.26i	78.99+185.36i	79.47+196.92i	

Pour calculer l'impédance normalisée, nous utilisons les définitions de la résistance et de la réactance normalisées par les relations suivantes :

$$R_N = \frac{R_{charge} - R_{vide}}{X_{vide}}$$

$$X_N = \frac{X_{charge}}{X_{vide}}$$

Tableau (IV-7) : L'impédance normalisée Z_N par expérimental

Fréquence(Hz)	Résistance normalisée R_N	Réactance normalisée X_N	L'impédance normalisée Z_N
1000	0.106	0.933	0.106+0.933i
1500	0.115	0.905	0.115+0.905i
2000	0.120	0.882	0.120+0.882i
2500	0.139	0.862	0.139+0.862i
3000	0.144	0.861	0.144+0.861i
3500	0.125	0.833	0.125+0.833i
4000	0.128	0.819	0.128+0.819i
4500	0.126	0.806	0.126+0.806i
5000	0.126	0.865	0.126+0.865i
5500	0.125	0.787	0.125+0.787i
6000	0.124	0.778	0.124+0.778i
6500	0.130	0.787	0.130+0.787i
7000	0.124	0.765	0.124+0.765i
7500	0.124	0.757	0.124+0.757i
8000	0.123	0.752	0.123+0.747i
8500	0.121	0.747	0.121+0.742i
9000	0.120	0.742	0.120+0.742i
9500	0.123	0.745	0.123+0.745i
10000	0.119	0.733	0.119+0.733i

Et finalement nous traçons le diagramme de l'impédance normalisée expérimental (figure IV-6).

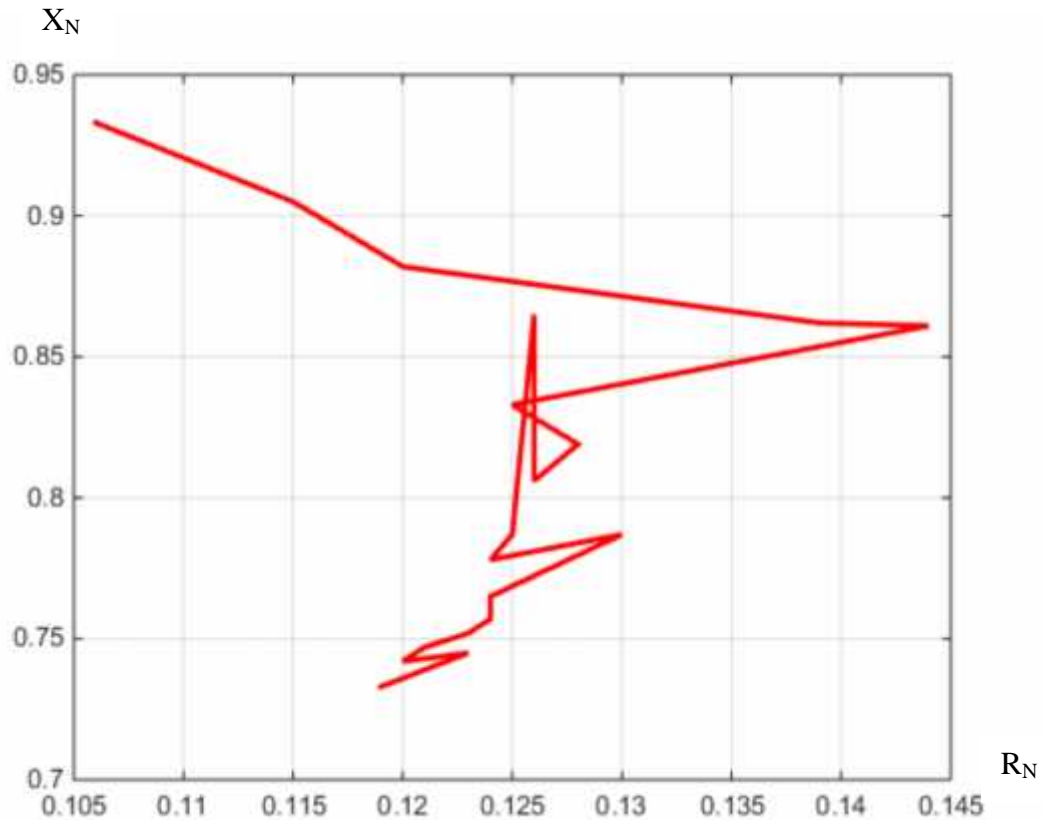


Figure (IV-6) : Diagramme de l'impédance normalisée expérimental

A première vue, nous remarquons une grande ressemblance du diagramme d'impédance normalisée expérimental et simulé ce qui valide le modèle développé dans ce travail.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'aspect pratique de ce travail qui consiste en une campagne expérimentale menée au laboratoire en utilisant un banc d'essai conçu pour cette fin. Plusieurs mesures ont été effectuées afin de mesurer l'impédance de la bobine et par voie de conséquence tracer le diagramme d'impédance normalisée expérimental. Ce travail expérimental a permis de valider le modèle développé sous le logiciel FEMM.



Conclusion

Générale

Conclusion générale

- Dans ce travail, la résolution du problème direct du système électromagnétique (Plaque métallique + bobine) dans le domaine CND-CF a été faite par modélisation du système magnétodynamique via les équations de Maxwell.
- La formulation relative au problème magnétodynamique a été développée et le cas axisymétrique a été détaillé.
- La méthode des éléments finis a été choisie pour la transformation des équations EDP en équations algébriques.
- Le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics) a été exploité et nous a permis de résoudre le problème magnétodynamique en 2D en basses fréquences.
- La simulation de notre système a été effectuée et nous avons calculé toutes les grandeurs électromagnétiques telles que le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique, les courants induits (courants de Foucault)
- Nous avons calculé l'impédance de la bobine et tracer le diagramme d'impédance normalisé.
- L'aspect pratique de ce travail qui consiste en une campagne expérimentale a été menée au laboratoire en utilisant un banc d'essai conçu pour cette fin.
- Plusieurs mesures ont été effectuées afin de mesurer l'impédance de la bobine et par voie de conséquence tracer le diagramme d'impédance normalisée expérimental.
- Ce travail expérimental a permis de valider le modèle développé sous le logiciel FEMM.

Référence

- [1] E. Chaalani, « Détermination des dimensions d'un défaut par la méthode élément finis nodaux pour un matériau magnétique non linéaire », 2017.
- [2] N. ZEMOURI, « Etude et Réalisation d'un Système Multicapteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs », 2016.
- [3] A. Abdelhak, « controle non destructif par courants de Foucault Etude et Réalisation d'un Capteur Inductif », 2006.
- [4] D. E. ABDELLI, « [ABD 14]-Djamel Eddin ABDELLI, Modélisation par les volumes finis d'un problème de contrôle non destructif de forme complexe, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra .2014.pdf ». 2014.
- [5] N. BENHADDA, « Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND) ».
- [6] D. Benjamin, « Développement de capteurs flexibles à courants de Foucault: applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique », p. 153, 2016.
- [7] C. Zorni, « Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques: de l'expérience au modèle d'interaction », p. 120.
- [8] S. ZERGUINI, « Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault ».
- [9] S. MEBREK, « Étude des défauts dans les aciers ferromagnétiques par les méthodes électromagnétiques », p. 87.
- [10] C. Zorni, « Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques: de l'expérience au modèle d'interaction », p. 120.
- [11] D. Benjamin, « Développement de capteurs flexibles à courants de Foucault: applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique », p. 153.
- [12] Y. Choua, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault », 2009.
- [13] B. NABIL, « Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault », 2006.
- [14] C. FARIDA, « SPECIALITE : ELECTROTECHNIQUE OPTION : ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES », p. 97.
- [15] N. Mohammed, « Développement d'un Code de Calcul pour l'Etude du Rayonnement Electromagnétique des Panneaux Solaires en Champ Proche », 2011.

[16] Marlène Clisson et Marc Boulé, « Tutoriel pour le logiciel FEMM (Simulations électromagnétiques avec la méthode des éléments finis).pdf ». 2014.

[17] H. Bachir, « CONTRIBUTION A LA SIMULATION DU CND PAR COURANTS DE FOUCAULT EN VUE DE LA CARACTERISATION DES FISSURES DEBOUCHANTES », 2012.

Résumé :

Ce travail relève du domaine du Contrôle Non destructif (CND) par courants de Foucault (CF) dans ses aspects : modélisation et expérimental. Tout d'abord, à partir d'une modélisation suivie d'une simulation numérique par éléments finis en utilisant un logiciel de simulation FEMM (*Finite Elément Method Magnetics*) en 2D du système (matériau amagnétique+capteur), toutes les grandeurs électromagnétiques telles que le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique, les courants induits (courants de Foucault) ont été calculées dans le but de déterminer l'impédance de la bobine et tracer le diagramme d'impédance normalisé. En second lieu, une campagne expérimentale a été menée au laboratoire en utilisant un banc de mesure dans le but de mesurer l'impédance de cette bobine et par voie de conséquence valider le modèle numérique.

Mots clés : CND, courants de Foucault, modélisation magnétodynamique, simulation, logiciel FEMM, calcul de champs, impédance normalisée, matériaux conducteur amagnétique.

Abstract

This work is the report of non-destructive testing (CND) by eddy current in its aspects: modeling and experimental. First, from a modeling followed by a finite element numerical simulation using FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) simulation software in 2D of the system (non-magnetic material + sensor), all the electromagnetic quantities such as magnetic vector potential, magnetic induction, induced currents (eddy currents) were calculated for the purpose of determining the impedance of the coil and plotting the normalized impedance diagram. In the second place, an experimental companion was conducted in the laboratory using a measuring bench in order to measure the impedance of this coil and consequently validate the numerical model.

Key words: CND, eddy currents, magnetodynamic modeling, simulation, FEMM software, field computation, normalized impedance, nonmagnetic conductor materials.

يصب هذا العمل في إطار المراقبة غير عن طريق تيارات فوكو الذي يشمل في جوانبه المحاكاة والتجربة . في البداية قمنا بمحاكاة رقمية للمجموعة (مادة غير مغناطيسية + لاقط) باستخدام برنامج femm و الذي يعتمد في حساباته على طريقة العناصر المنتهية. حيث تم حساب جميع المقادير الكهرومغناطيسية (الحقل المغناطيسي , الحث المغناطيسي , تيارات فوكو...) بهدف حساب الممانعة و من ثمة رسم مخطط الممانعة بدلالة التواتر (مخطط الممانعة المعياري). لتقارن في الأخير هذه المحاكاة مع تجربة اجريت على مستوى المخبر و بالتالي التحقق من صحة النموذج العددي .

الكلمات المفتاحية : المراقبة غير الهدامة , تيارات فوكو , محاكاة مغناطيسية ديناميكية , برنامج femm , ممانعة نظامية , مادة ناقلة غير مغناطيسية.