

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



DEPARTEMENT : PHYSIQUE

MEMOIRE DE MAGISTER

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Physique

Option : Interaction champ-matière

THEME DU PROJET :

Détermination par éléments finis d'arêtes des dimensions d'un défaut dans un matériau amagnétique homogène

Présenté par :

Mme. Safia KHELFI

Dirigé par :

Dr. Bachir HELIFA
Dr. Mohammed NAÏDJATE

DEVANT LES MEMBRES DU JURY

M. LEFKAIER Iben Khaldoun	Pr	Université de Laghouat	Président
M. BENSALD Samir	Pr	Université de Bouira	Examineur
M. YOUSFI Belkacem	MCA	Université de Laghouat	Examineur
M. HELIFA Bachir	MCA	Université de Laghouat	Encadreur
M. NAIDJATE Mohammed	MAA	ENS de Laghouat	Co-encadreur

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2018-2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَقَدْ

رَزَقْنِي مِنْهَا



Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail à :

*Mon cher père et ma chère mère, que Dieu les
garde;*

Mon mari et mon fils ;

Mon frère et mes sœurs ;

A toute ma famille et tous mes amis.

Remerciements

*Je tiens profondément à remercier **Dieu** de nous avoir éclairci le chemin du savoir, de patience et santé. J'ai eu la chance d'évoluer parmi des personnes qui m'ont toujours assuré de leur soutien.*

*J'exprime ma sincère gratitude à **mes parents et mon mari** qui m'ont soutenu par tous les moyens afin que je puisse réussir dans mes études. Surtout, par leurs encouragements qui m'animent de volonté.*

*J'exprime ma sincère gratitude à Monsieur **Mohamed YOUSFI**, Professeur à l'Université de Laghouat et ex directeur de l'ENS de Laghouat pour nous avoir donné l'occasion de préparer ce projet de magister.*

*J'adresse mes plus vifs sentiments de gratitude à Monsieur **Ibn Khaldoun LEFKAIER**, Professeur à l'Université de Laghouat, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire en m'offrant tous les moyens nécessaires au bon déroulement de mon travail.*

*Je tiens à remercier très vivement **Mr Bachir HELIFA**, Maître de conférences 'A' à l'Université de Laghouat et encadrant de ce travail pour son encadrement exemplaire et pour son aide précieuse. La patience et la maîtrise du sujet dont il a fait preuve ont été source d'encouragements dans les moments difficiles, je le remercie profondément.*

*De même, je remercie mon Co-encadreur **Prof. Mohammed NAÏDJATE** pour son honnêteté et ses orientations ainsi que ses critiques et ses remarques fondées et objectives.*

*Mes sincères remerciements vont à **Mr Mohand BEN TOBACHE** prof à l'université AMAR TELIDJI de Laghouat qui, sereinement, m'a orienté, corrigé et conseillé durant ce projet.*

*Je suis particulièrement sensible à l'honneur que m'a fait le Dr. **BENSAID Samir** de l'Université de Bouira en participant au jury.*

*J'exprime à Dr **YOUSFI Belkacem** de l'Université de Laghouat, ma reconnaissance pour avoir bien voulu s'intéresser à cette étude et honorer le Jury par sa présence.*

Mes sincères remerciements vont à TWIL, Mr DAAS, Mr HIBA, Mr CHETOUH, Mr LAHRECH, Mme SOURDI, CHETTIH, HADJ AISSA pour leurs aides et leurs encouragements.

Je remercie également tous les enseignants du laboratoire de physique des matériaux (LPM) de l'université de Laghouat de m'avoir accueilli dans le laboratoire, et pour leurs encouragements.

المخلص

يتدرج عملنا ضمن مجال الفحص غير المتلف بواسطة تيارات فوكو في جانبية: التجريبي والنموذجي، ويهدف الى تحديد ابعاد شق موجود في صفيحة لا مغناطيسية متجانسة باستعمال طريقة عناصر الحواف المحدودة. قمنا بتصميم نموذجنا المتكون من (صفيحة لا مغناطيسية ناقلة للكهرباء وبها عيب على شكل متوازي المستطيلات+ جهاز استشعار) وذلك باستعمال طريقة عناصر الحواف المحدودة ثلاثية الابعاد بالاستعانة ببرنامج كومسول ميلتيفيزكس. سمحت لنا النمذجة من ناحية بتحديد المؤثرات الرئيسية على المراقبة وذلك من أجل تهيئة الظروف الملائمة التي تضمن الى حد ما دراسة سليمة ونتائج واضحة. ومن ناحية أخرى، لدراسة حساسية النموذج فيما يتعلق بأحجام مختلفة من العيب، في هذه الحالة الطول والعمق والسمك، على الإشارة القادمة من مستشعر تيارات فوكو. انتقلنا في الأخير الى التحقق من صحة البرنامج عن طريق المقارنة بين النتائج التجريبية والنتائج المتحصل عليها بالمحاكاة. أعطت نتائج حسابنا بواسطة الكومسول توافق كبير جدا مع نتائجنا التجريبية، مما أتاح لنا الفرصة لدراسة لحالات كثيرة بدون اجراء تجارب و بطريقة مثالية وفي وقت قياسي وأيضا المساهمة في انشاء قاعدة بيانات سليمة جاهزة لدراسة المشكل العكسي.

الكلمات المفتاحية: طرق الفحص الغير متلف، تيارات فوكو، الشق، صفيحة لا مغناطيسية متجانسة، جهاز استشعار، طريقة عناصر الحواف المحدودة، برنامج الكومسول.

Résumé

Ce travail est consacré au contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF) dans ses aspects de modélisation et expérimental dans le but de déterminer les dimensions d'un défaut dans un matériau amagnétique homogène. Nous avons modélisé notre système constitué d'une (plaque conductrice non magnétique contenant une fente parallélépipédique + capteur inductif) par un modèle éléments finis d'arêtes en 3D par la formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique $\vec{A}V-\vec{A}$ implémenté sous le logiciel COMSOL Multiphysics. La modélisation nous a permis d'une part d'identifier les principaux paramètres influant le contrôle dans le but d'optimiser les paramètres opératoires du contrôle et d'autre part, d'étudier la sensibilité du modèle concernant les différentes grandeurs de la fissure, en l'occurrence la longueur, la profondeur et l'épaisseur, sur le signal issu du capteur CF. Le deuxième volet de cette étude concerne l'aspect expérimental dans le but de valider notre modèle. Les résultats de nos calculs par COMSOL Multiphysics sont en très bonne concordance avec les données expérimentales, ce qui nous permettra d'examiner de nombreux cas de manière optimale afin de créer une base de données prête pour une étude de problème inverse.

Mots clés : Contrôle non destructif, courants de Foucault, méthode des éléments finis d'arêtes 3D, matériaux amagnétiques, défaut, COMSOL Multiphysics.

Abstract

The present work aims at identifying the Non-destructive Control (NDC) by eddy currents (FC) in its various modeling as well as experimental aspects, in order to recognize the various dimensions of a fault in a homogenous magnetic material. The researcher has modeled the system that is composed of (a non-magnetic conductive plate including "parallelepipedic" slot + inductive sensor) through 3D model edge elements by formulating magnetic vector potentials and electrical scalar $\vec{A}V-\vec{A}$ implemented by the COMSOL Multiphysics software. On the one hand, such a modeling process allows us to identify the basic parameters affecting the control process, the aim of which is to optimize the operating parameters of the control itself. However, on the other hand, the target is to explore the sensibility of the model, as far as the several grandeurs of the fissure are concerned at the level of length, depth and thickness on the sensor issue signal CF. The second part of this study involves the experimental aspect, the objective of which is to validate our model. Our calculations' findings using COMSOL Multiphysics software are highly reliable and in harmony with the experimental data, this definitely permits us to examine numerous other cases in a perfect way, so as to create a database ready for a study pertinent to inverse problems.

Key Words: Non-destructive Control, eddy current, edge element method 3D, Non-magnetic materials, fault, COMSOL Multiphysics.

Sommaire

Introduction Générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Le Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault

I.1. Introduction	3
I.2. Les différents défauts détectés en CND	3
I.2.1. Les défauts surfaciques	3
I.2.1.1. Les défauts ponctuels	3
I.2.1.2. Les défauts d'aspect	4
I.2.2. Les défauts internes	4
I.3. Principe de détection d'un défaut	4
I.4. Les différentes techniques	5
I.4.1. Procédés optiques	5
I.4.1.1. L'examen visuel	5
I.4.1.2. Inspection automatique	6
I.4.2. Le ressuage	6
I.4.2.1. Les étapes	6
I.4.2.2. Les avantages	7
I.4.2.3. Les inconvénients	7
I.4.3. Magnétoscopie	7
I.4.3.1. Avantages.....	8
I.4.3.2. Inconvénients	8
I.4.4. Ultrasons.....	9
I.4.4.1. Les avantages.....	10
I.4.4.2. Les inconvénients.....	10
I.5. Le Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault.....	10
I.5.1. Historique.....	10
I.5.2. Principe du contrôle non destructif par courants de Foucault.....	11
I.5.3. Effet de peau.....	11
I.5.4. Mode d'excitation.....	12
I.5.4.1. Contrôle mono-fréquence.....	13
I.5.4.2. Contrôle multi-fréquences.....	13
I.5.4.3. Contrôle par courants de Foucault pulsés.....	13
I.5.5. Différents types des capteurs inductifs.....	14

Sommaire

I.5.5.1. Capteur absolu.....	14
I.5.5.2. Capteur double.....	14
I.5.5.3. Capteur différentiel	15
I.5.6. Plan d'impédance.....	15
I.5.7. Calcul de l'impédance.....	17
I.5.8. Les avantages du CND par courants de Foucault.....	17
I.5.9. Limites du CND par courants de Foucault.....	17
I.6. Conclusion.....	18

Chapitre II : Modélisation des systèmes électromagnétiques

II.1. Introduction.....	20
II.2. Modélisation électromagnétique.....	20
II.3. Equation de base de l'électromagnétisme.....	21
II.3.1. Historique.....	21
II.3.2. Equation de Maxwell.....	21
II.3.3. Lois de comportement.....	22
II.3.4. Equation de continuité.....	23
II.3.5. Relations de passages.....	23
II.3.6. Conditions aux limites.....	24
II.3.7. Condition de jauge.....	24
II.3.8. Hypothèses simplificatrices.....	25
II.4. Formulations magnétodynamiques.....	26
II.4.1. Formulations de type électrique.....	26
II.4.1.1. Formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique $\vec{A}V-\vec{A}$	26
II.4.1.2. Formulation en champ électrique E.....	28
II.4.2. Formulations de type magnétique.....	28
II.4.2.1. Formulation en champ magnétique \vec{H}	28
II.4.2.2. Formulation magnétique $\vec{T}-\phi$	28
II.5. Methodes numériques.....	29
II.5.1. La méthode des différences finis (MDF).....	29
II.5.2. La méthode des intégrales de frontières (MIF).....	29
II.5.3. La méthode des volumes finis (MVF).....	30
II.5.4. La méthode des éléments finis (MEF/ éléments de Whitney).....	30
II.6. Méthode des éléments finis d'arêtes.....	30

Sommaire

II.6.1. Discrétisation du domaine d'étude.....	30
II.6.2. Modèle 2D axisymétrique.....	31
II.6.2.1.Approximation par éléments finis d'arête en formulation \vec{H}	32
II.6.2.1.1. Forme intégrale de la formulation magnétodynamique.....	33
II.6.2.1.2.Formulation en champ magnétique \vec{H}	33
II.6.2.1.3. Calcul des intégrants surfaciques pour les éléments finis triangulaires	35
II.6.2.1.4. Calcul des intégrants surfaciques en 2D.....	36
II.6.2.1.4.1. Matrice masse élémentaire.....	37
II.6.2.1.4.2. Matrice raideur élémentaire.....	38
II.6.2.1.4.3. Vecteur force élémentaire.....	40
II.6.3. Modèle tridimensionnel	41
II.7.Conclusion.....	43

Chapitre III : Procédures expérimentales et outil logiciel

I. Introduction	45
II. Procédures expérimentales.....	45
II.1. Chaîne de mesure	45
II.1.1. Capteur (bobine).....	45
II.1.2. Matériaux utilisés.....	47
II.1.3. Etalons	47
II.1.4. Appareillage de mesure (Lock-in amplifieur)	48
II.2. Méthode de mesure de l'impédance à l'aide du Lock –In Amplifieur.....	49
II.3. Système de déplacement du Capteur.....	50
III. Outil logiciel	51
III.1. COMSOL Multiphysics.....	51
III.1.1. Description du Logiciel	51
III.1.2. Diagramme de résolution d'un problème aux dérivées partielles.....	52
III.1.3. Création du modèle de simulation	53
III.1.3.1. Création du modèle géométrique.....	53
III.1.3.2. Affectation des propriétés du matériau	55
III.1.3.3. Définition des variables et des conditions aux limites	55
III.1.3.4. Choix du régime de résolution	56
III.1.3.5. Maillage.....	56

Sommaire

III.1.3.6. Excitation	56
III.1.3.7. Résultats en termes d'induction magnétique et densité de courant	57
III.1.3.7.1.1. L'effet de la conductivité électrique.....	58
IV. Conclusion	61

Chapitre IV : Résultats et discussions

I. Introduction	63
II. Validation.....	63
II.1. Première application	63
II.2. Deuxième application.....	66
II.3. Troisième application	68
II.3.1. Essai N° 01	69
II.3.2. Essai N° 02	70
II.3.3. Essai N° 03	71
II.3.4. Essai N° 04	72
II.3.5. Essai N° 05	72
II.3.6. Essai N° 06	73
II.3.6.1. Effet de lift_off.....	74
II.3.6.2. Effet de la fréquence	74
III. Résultats et discussions.....	75
III.1. Principaux paramètres influant le contrôle.....	75
III.1.1. Effet de la conductivité du matériau.....	76
III.1.2. Paramètres liés au montage	77
III.1.3. Paramètres électriques	79
III.2. Effet des dimensions de la fissure sur le signal CF.....	81
III.2.1. Effet de la longueur du défaut.....	81
III.2.2. Effet de l'épaisseur du défaut.....	82
III.2.3. Effet de la profondeur du défaut.....	83
IV. Conclusion.....	85
Conclusion générale.....	87
Bibliographie.....	90

Liste des figures

Chapitre I : Le Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault

Figure. I.1. Principe de contrôle par l'examen visuel	6
Figure. I.2. Etapes du contrôle par le ressuage.....	7
Figure. I.3. Principe de contrôle par magnétoscopie.....	8
Figure. I.4. Appareil de contrôle par magnétoscopie.....	9
Figure. I.5. Principe de contrôle par ultrasons.....	10
Figure. I.6. (a) Génération d'un champ magnétique par la bobine.....	11
Figure. I.6. (b) Induction de CF dans l'échantillon et apparition d'un champ de réaction	11
Figure. I.7. Densité des courants induits et la profondeur de la pénétration.....	12
Figure. I.8. Capteur absolu.....	14
Figure. I.9. Capteur double.....	14
Figure. I.10. Capteur différentiel.....	15
Figure. I.11. Influence de la conductivité et du lift-off sur le diagramme d'impédances normalisées.....	16

Chapitre II : Modélisation des systèmes électromagnétiques

Figure II.1. Système capteur-fissure.....	20
Figure. II.2. Domaine d'étude.....	21
Figure. II.3. Interface entre deux milieux différents.....	23
Figure II.4. Eléments typiques : une dimension, deux dimensions, trois dimensions.....	31
Figure II.5. Eléments triangulaire et tétraédrique.....	31
Figure II.6. Modèle 2D axisymétrique.....	32
Figure II.7. Modèle géométrique tridimensionnel.....	41
Figure II.8. Volumes élémentaires D.....	42

Chapitre III : Procédures expérimentales et outil logiciel

Figure III.1. Montage expérimental – Chaîne de mesure.....	46
Figure III.2. Micromètre extérieur digital.....	48
Figure III.3. <i>Lock-In</i> Amplifier.....	49
Figure III.4. Montage expérimental.....	49
Figure III.5. Schéma électrique.....	49
Figure III.6. Système de déplacement du Capteur.....	50
Figure III.7. Diagramme de résolution sous COMSOL Multiphysics.....	52

Liste des figures

Figure III.8. Construction de la bobine.....	54
Figure III.9. Insertion de la fissure.....	54
Figure III.10. Détermination de la géométrie.....	54
Figure III.11. Insertion de la plaque.....	55
Figure III.12. Insertion de la boîte d'air.....	55
Figure III.13. Affectation des paramètres du modèle.....	55
Figure III.14. Excitation du capteur.....	56
Figure III.15. Maillage.....	56
Figure III.16. Distribution des vecteurs de l'induction magnétique B en 3D.....	57
Figure III.17. Densité de courant sur la surface (xOy) d'une plaque conductrice amagnétique portant une fente parallélépipédique (Aluminium).....	58
Figure III.18. Module de l'induction magnétique et densité de courant d'une plaque de cuivre ($\sigma = 5.91 \cdot 10^7$) sans défaut.....	58
Figure III.19. Module de l'induction magnétique et densité de courant d'une plaque d'aluminium ($\sigma = 3.85 \cdot 10^7$) sans défaut.....	59
Figure III.20. Module de l'induction magnétique et densité de courant d'une plaque Inconel-600 ($\sigma = 10^6$) sans défaut.....	59
Figure III.21. Module de l'induction magnétique et la densité de courant d'une plaque cuivre avec défaut.....	60
Figure III.22. Module de l'induction magnétique et la densité de courant d'une plaque aluminium avec défaut.....	60
Figure III.23. Module de l'induction magnétique et la densité de courant d'une plaque Inconel-600 ($\sigma = 10^6$) avec défaut.....	61

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1. Détail du TEAM Workshop Pb N°15-1.....	63
Figure IV.2. Variation de la résistance en fonction du déplacement du capteur.....	66
Figure IV.3. Variation de l'inductance en fonction du déplacement du capteur.....	66
Figure IV.4. Variation absolue de l'impédance (langueur de défaut =12mm) en fonction de la position de bobine.....	67
Figure IV.5. Variation absolue de l'impédance (langueur de défaut =8mm) en fonction de la position de bobine.....	68

Liste des figures

Figure IV.6. Variation absolue de l'impédance (fissure N° 01) en fonction de la position de bobine.....	69
Figure IV.7. Variation absolue de l'impédance (fissure N° 02) en fonction de la position de bobine.....	70
Figure IV.8. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour deux valeurs de la profondeur du défaut : (0.9mm, 1.75mm).....	70
Figure IV.9. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour deux valeurs de la profondeur du défaut : (0.9mm, 1.75mm).....	70
Figure IV.10. Variation absolue de l'impédance en fonction de la position du capteur pour deux valeurs de la profondeur du défaut : (0.9mm, 1.75mm).....	71
Figure IV.11. Variation absolue de l'impédance (fissure N° 03) en fonction de la position de bobine.....	71
Figure IV.12. Variation absolue de l'impédance (fissure N° 04) en fonction de la position de bobine.....	72
Figure IV.13. Variation absolue de l'impédance (fissure N° 05) en fonction de la position de bobine.....	72
Figure IV.14. Variation absolue de l'impédance en fonction de la position du capteur pour deux valeurs de la profondeur du défaut : (1mm, 2.75mm).....	73
Figure IV.15. Variation de l'inductance en fonction de la position du capteur.....	73
Figure IV.16. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différents lift_off.....	74
Figure IV.17. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences.....	74
Figure IV.18. Variation de la résistance et de la réactance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux.....	76
Figure IV.19. Variation absolue de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux.....	76
Figure IV.20. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux.....	77
Figure IV.21. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différentes lift_off.....	78

Liste des figures

Figure IV.22. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différentes lift_off.....	78
Figure IV.23. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes lift_off.....	78
Figure IV.24. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences.....	79
Figure IV.25. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences.....	80
Figure IV.26. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences.....	80
Figure IV.27. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs.....	81
Figure IV.28. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs.....	81
Figure IV.29. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs.....	82
Figure IV.30. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différentes l'épaisseurs.....	82
Figure IV.31. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différentes épaisseurs.....	83
Figure IV.32. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes épaisseurs.....	83
Figure IV.33. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut.....	84
Figure IV.34. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut.....	84
Figure IV.35. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes épaisseurs.....	84

Liste des tableaux

Tableau III.1. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du capteur.....	46
Tableau III.2. Composants du montage expérimental.....	46
Tableau III.3. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques de cible.....	47
Tableau III.4. Caractéristiques géométriques des fentes.....	48
Tableau III.5. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système.....	53
Tableau IV.1. Paramètres du problème Benchmark TEAM Workshop Pb N°15-1.....	64
Tableau IV.2. Variation de la résistance et de la réactance en fonction de la position du capteur..	65
Tableau IV.3. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système.....	67
Tableau IV.4. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du capteur.....	68
Tableau IV.5. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques des fentes.....	69
Tableau IV.6. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système.....	75

Introduction générale

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

Les techniques utilisées en CND sont diverses (ultrasons, courants de Foucault, rayons X, radiographie, ressuage, inspections visuelles...). Elles dépendent à la fois de la nature du matériau, de la précision requise et de la géométrie à contrôler. Ces techniques peuvent être classées en deux familles : les techniques de volume et les techniques de surface ou, plus exactement, les techniques de contrôle des couches superficielles [HEL 12].

La conception de nouvelles configurations et l'optimisation de ces nouveaux dispositifs de CND par courants de Foucault (CF) demande une modélisation fine des phénomènes physiques mis en jeu tant au sein de l'échantillon étudié qu'à sa surface

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

La simulation par éléments finis des systèmes de CND-CF permet de répondre aux exigences industrielles croissantes en intervenant lors des phases de conception, de qualification et d'utilisation d'une méthode de CND. Ainsi, elle fournit des résultats reproductibles et proches des conditions expérimentales [BEN 15, ABB 15].

Ce travail de mémoire est consacré au contrôle non destructif (CND) appliqué à un système électromagnétique constitué d'un capteur et d'une plaque conductrice pour déterminer des dimensions d'un défaut, il permet une meilleure compréhension de l'interaction champ magnétique et matériau amagnétique homogène

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente les bases du contrôle non destructif, les différents types de défauts détectés sur les pièces critiques des installations industrielles, les différents types de capteurs, ainsi que la chaîne de mesure utilisés dans les essais par courants de Foucault.

Le deuxième chapitre énumère les équations électromagnétiques dans les dispositifs électromagnétiques, ainsi que les principales formulations mathématiques qui permettent de modéliser les phénomènes électromagnétiques dans un contrôle non destructif par courants de Foucault. Aussi, la modélisation du problème électromagnétique par la méthode des éléments finis d'arrêtes d'un système (plaque amagnétique + capteur) est présenté en 2D puis en 3D dans le but de déterminer l'impédance du capteur.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre, nous présentons le dispositif expérimental de mesure et le mode opératoire associé pour l'acquisition du signal de mesure. Nous complétons ce chapitre par la présentation du logiciel de modélisation et de simulation d'un problème de contrôle à courants de Foucault en 3D, en l'occurrence COMSOL Multiphysics 5.3.a. Toutes les étapes de simulation pour résoudre un type de problème de CND CF sont détaillées et expliquées.

Le quatrième chapitre est consacré à la validation du modèle élaboré et la discussion ainsi que l'interprétation des résultats obtenus.



Chapitre I

I.1. Introduction

Dans l'ensemble des secteurs industriels, les matériaux doivent généralement être contrôlés régulièrement en cours de production, de fonctionnement ou lors de la maintenance afin de déterminer s'ils présentent des défauts ou non. Les techniques employées pour réaliser cette vérification ne doivent évidemment pas endommager la structure. De nombreuses méthodes ont été développées au cours de ces dernières décennies et ont toutes été regroupées sous le terme de Contrôle Non Destructif (CND) [KUH 13].

Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité . . .), soit pour déceler la présence de défauts et les caractériser. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault . . .). Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui . . .), les conditions de mise en œuvre . . . [CHO 10].

Ce chapitre est consacré à une analyse bibliographique sur le CND. Les principales méthodes de CND sont rappelées et le contrôle basé sur les courants de Foucault est particulièrement détaillé.

I.2. Différents défauts détectés en CND

Le terme défaut est relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité [ZEM 16]. Un défaut (défectuosité) détecté dans un matériau homogène, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Généralement, on classe les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface et les défauts internes [RAM 09, LAK 11, ZEM 16].

I.2.1. Défauts surfaciques

Sont les plus problématiques sur le plan technologique [ZOR 12]. Ces défauts sont accessibles à l'observateur directement mais pas toujours visibles à l'œil nu, à cet effet on peut les classer en deux types distincts :

I.2.1.1. Défauts ponctuels

Correspondant aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques [LAK 11, RAM 09], l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (de l'ordre de quelques μm) et elles

peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre [LAK 11], ce qui implique l'emploi pour leur détection des méthodes sensibles et non destructives, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons [RAM 09, LAK 11].

I.2.1.2. Défauts d'aspect

C'est à dire à des plages dans lesquelles une variation des paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche souvent à le remplacer par des contrôles optiques automatiques [RAM 09, LAK 11].

I.2.2. Défauts internes

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle.

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

Ici le contrôle visuel est généralement exclu [RAM 09, LAK 11] et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge et la neutronographie [LAK 11].

I.3. Principe de détection d'un défaut

Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. On exploite donc un phénomène physique pour détecter une hétérogénéité dans un matériau [ZEM 16, RAM 09, HAM 12]. Les phénomènes physiques comme l'atténuation ou la diffraction des rayons X, réflexions ou diffraction des ultrasons, perturbation des courants de Foucault, sont à la base des essais non destructifs ou ils peuvent servir à caractériser les matériaux (présence de fissure ...). En effet, par CND et pour notre étude (cas d'un matériau homogène) on sous-entend toujours qu'il ne s'agit non pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'un contrôle d'homogénéité.

Les techniques de CND diffèrent généralement par l'énergie employée : énergie mécanique (Ultrasons, ressuage), électromagnétique (magnétoscopie, courants de Foucault ...) ou thermique (thermographie infrarouge ...). Cependant, quelle que soit la méthode employée, un processus de détection des défauts est généralement mis en place. Il est constitué de deux étapes principales : la détection et la localisation des défauts (décider que le

système est en défaut ou non et déterminer quelle partie du système est affectée) et l'indentification (estimer l'ampleur et le type des défauts) [RAM 09, HAM 12].

I.4. Différentes techniques de CND

Du fait que les origines et les types des défauts sont multiples, plusieurs techniques de CND ont été développées pour répondre aux différentes problématiques rencontrées [HAM 12, RAM 09]. Le choix d'une méthode de CND dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position ou forme de défaut ...), le type de contrôle à effectuer (contrôle en ligne sur pièce mobile, possibilité de contact ou non avec la pièce ...) [BEN 15, CHO 10, ELG 16] et les problèmes économiques [HAM 12, RAM 09].

Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Il n'est pas question ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du CND, mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement [BEN 15, RAV 08]. Pour la plupart de ces méthodes, les moyens d'acquisitions ont été automatisés, permettant ainsi le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données.

Nous présentons dans ce qui suit les principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault qui constituera l'objet de notre étude.

I.4.1. Procédés optiques

Les procédés optiques constituent un type de techniques qu'il convient de séparer en deux catégories, selon que le contrôle soit automatisé ou non.

I.4.1.1. Examen visuel

L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur [TAL 13].

Le contrôle visuel est le plus ancien des contrôles non destructifs. C'est la méthode la plus utilisée de par le monde, car la moins chère à mettre en œuvre [ZEM 16], il est à la base des contrôles optiques non automatiques. Il peut être aidé, par un éclairage laser ou classique, une loupe binoculaire, ou un système de télévision. Il reste cependant sujet aux inconvénients liés à l'œil humain, c'est-à-dire une faible productivité et une certaine subjectivité, entraînant un manque de fiabilité [RAM 09, RAV 08].

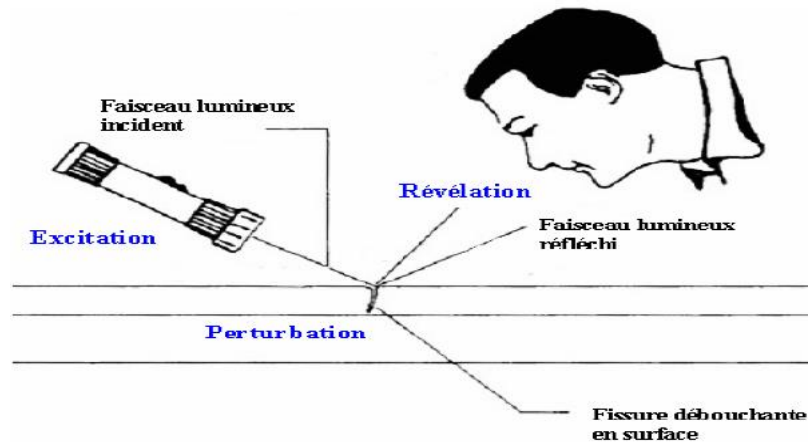


Figure. I.1. Principe de contrôle par l'examen visuel.

I.4.1.2. Inspection automatique

Sont réalisées en général des acquisitions d'images par balayage laser ou par utilisation de barrettes de capteurs optiques, suivies de traitement d'images tel que le seuillage ou la reconnaissance de formes. Ce type de contrôle, beaucoup plus efficace, est cependant beaucoup plus complexe à mettre en œuvre et par conséquent restreint à des applications très particulières [RAM 09, RAV 08].

I.4.2. Le ressuage

La méthode « huile et poussière de craie », autrefois utilisée par les industries ferroviaires dans les années 1920. Le contrôle par liquide de pénétration (ressuage) a été revêcu en 1941 par Robert et Joseph Switzer [ELG, LAK 11], il est l'une des techniques du CND les plus anciennes après le procédé optique [RAM 09]. Il est appliqué dans le cas des matériaux non magnétiques (alliages à base d'Al, de Cu, de Ti, aciers inoxydables, etc.). Son mode d'emploi est très simple [TAL 13]. Il est un moyen de contrôle basé sur la capillarité qui permet de détecter les défauts superficiels (débouchant plus précisément), il consiste à appliquer un pénétrant coloré qui s'introduit dans les défauts, suivi du révélateur qui facilitera l'observation [ELG].

I.4.2.1. Les étapes

- Nettoyage, à l'aide d'un chiffon,
- Application d'un produit coloré qui pénètre dans le défaut par capillarité,
- Elimination de l'excès : c'est une étape extrêmement délicate qui consiste à se débarrasser de l'excès de pénétrant. Il faudra prendre des précautions lors du rinçage,
- Application d'un révélateur (constitué d'une poudre blanche très fine qu'on pulvérise sur la surface de l'échantillon) à travers lequel le pénétrant diffuse et on observe les différentes taches résultantes sous un éclairage adapté.

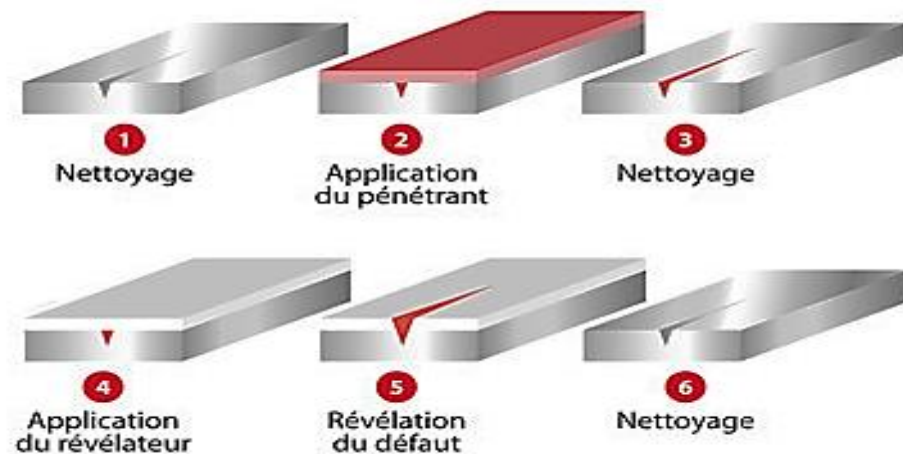


Figure. I.2. Etapes du contrôle par le ressuage.

I.4.2.2. Avantages

- Mise en œuvre relativement simple.
- Peu coûteuse dans une application manuelle.
- Localisation précise des défauts et appréciation de leurs longueurs.
- Possibilité d'automatisation [ELG].

I.4.2.3. Inconvénients

- L'interprétation des résultats est subjective : Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.
- Danger des solvants toxiques, corrosifs et inflammables [LAK 11].
- Pas d'appréciation des défauts en profondeur.
- Pas de détection de défauts internes.
- Non utilisable dans les matériaux poreux [ELG].

I.4.3. Magnétoscopie

C'est une technique qui révèle les défauts débouchants ou sous-cutanés. Toutefois, elle ne s'applique qu'aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte...). L'examen par magnétoscopie consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Une poudre magnétique est ensuite projetée à la surface et se répartit de façon homogène si la pièce est saine. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques. Lorsqu'un défaut est présent dans la pièce au voisinage de la surface, l'orientation du flux de l'induction magnétique est modifiée localement et son intensité augmente en surface. Il apparaît alors une concentration de particules magnétiques qui révèle la présence du défaut comme l'illustre la figure (I.3). [HAM 12, CHO 10, BEN 15].

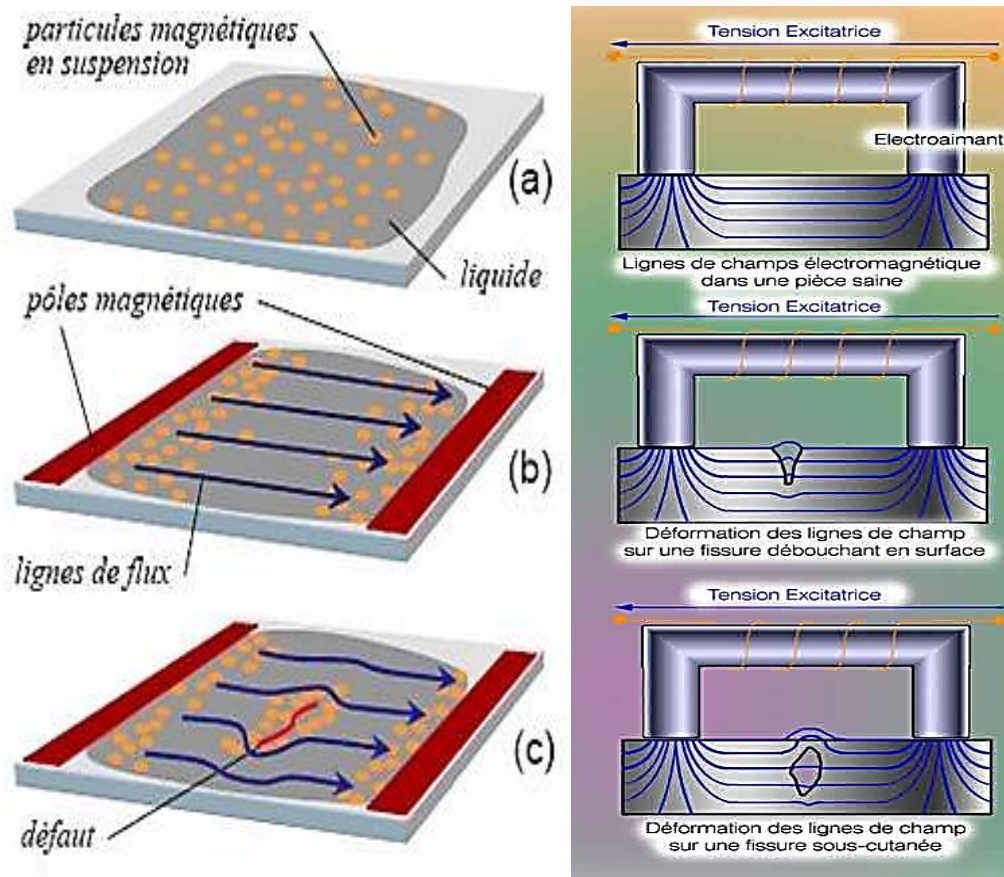


Figure. I.3. Principe de contrôle par magnétoscopie et le type des défauts détectés.

Dans cette méthode, le plus important c'est l'aimantation de la pièce. Il existe deux techniques, la première consiste à créer le champ magnétique à l'aide d'un aimant ou d'un électro-aimant (cette méthode est utilisée pour détecter des défauts transversaux), alors que dans la deuxième technique, l'aimantation est produite en faisant circuler un courant électrique de forte intensité à l'intérieur de la pièce (ce qui convient à la détection des défauts longitudinaux) [RAM 09].

I.4.3.1. Avantages

- Simple, peu coûteuse et rapide ;
- Détection des défauts débouchant et sous-jacents.

I.4.3.2. Inconvénients

- Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques ;
- Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée ;
- La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce.
- Désaimantation nécessaire des pièces avant et après contrôle [LAK 11, ELG].



Figure. I.4. Appareil de contrôle par magnétoscopie.

I.4.4. Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propagent dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) [CHO 10, BEN 15] présentant une certaine élasticité. Contrairement aux techniques précédentes, le contrôle par ultrasons se prête bien au contrôle du cœur de pièces, même très épaisses (jusqu'à plusieurs mètres) [BEN 15].

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler [ELG 16, TAL 13]. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure [CHO 10, HAM 12].

Les impulsions ultrasonores sont un train d'ondes ultrasonores, dont la fréquence est choisie en fonction des caractéristiques du matériau à contrôler (on utilise en général des fréquences comprises entre 1 et 10 MHz) [BEN 15, RAM 09].

Aux fréquences utilisées, les ultrasons ne se propagent pas dans l'air, pour assurer le passage des ultrasons entre le transducteur et la pièce à contrôler, il faut placer entre eux un milieu couplant, un liquide (graisse, huile, eau). La figure I.5 présente le principe de contrôle par ultrasons [BEN 15, RAM 09, CHO 10].

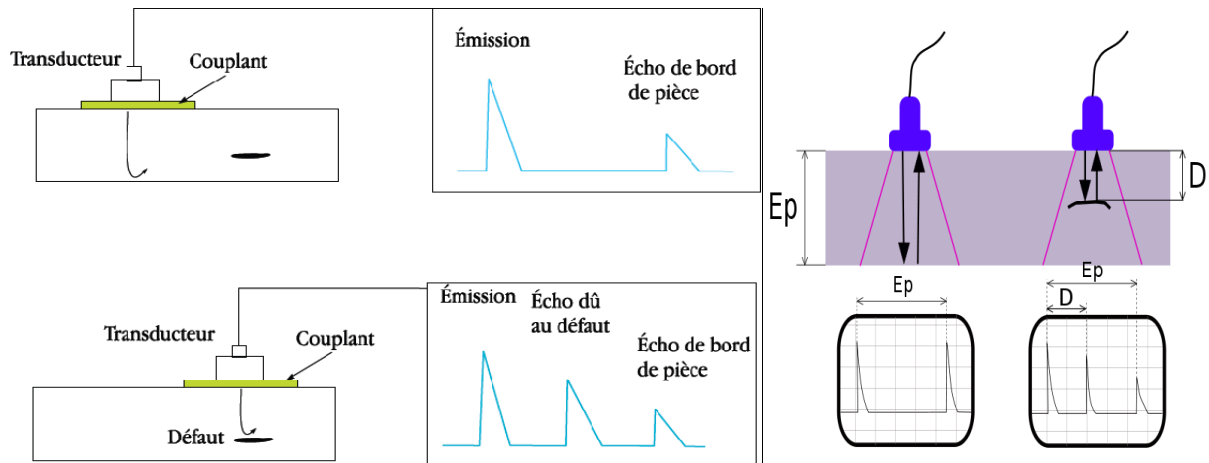


Figure. I.5. Principe de contrôle par ultrasons.

I.4.4.1. Avantages

- Grand pouvoir de pénétration.
- Détection, localisation et dimensionnement des défauts.
- Grande sensibilité surtout pour les défauts plans correctement orientés (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore).
- Souplesse d'utilisation (utilisation sur chantier aussi bien qu'en contrôle automatisé). [ELG 16, LAK 11].

I.4.4.2. Inconvénients

- Interprétation délicate des défauts et de leurs dimensions, nécessitant un personnel qualifié.
- Un milieu de couplage est nécessaire entre le palpeur et la pièce, afin d'assurer une bonne propagation des ondes.
- Sensible à la géométrie (forme, rugosité).
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- Mise en œuvre difficile sur certains matériaux (fonte par exemple) [ELG 16].

I.5. Le contrôle non destructif par courant de Foucault CND CF

I.5.1. 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, ou encore désignés dans le monde anglo-saxon par eddy-current (courants tourbillonnaires) [ABD 14, BEL 02].

I.5.2. Principe du contrôle non destructif par courants de Foucault

Un capteur CF (une bobine) placé sur une pièce conductrice à contrôler induit des courants de circulation électrique. Cette interaction crée un champ électromagnétique de réaction (les CF). En présence d'un défaut, la circulation des courants est modifiée et sont révélés par une variation d'impédance du capteur. Les capteurs CF sont utilisées pour des fréquences variant de quelques Hertz à une centaine de kHz, voire des MHz. La fréquence d'utilisation des capteurs est généralement choisie en fonction de la pénétration dans la pièce des champs induits par le capteur, que l'on adapte à la profondeur et à la dimension des défauts recherchés [PAI 08].

La répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent de la conductivité électrique σ , de la perméabilité magnétique μ , de la fréquence de travail f , de la géométrie du matériau à contrôler, du couplage entre le capteur et le matériau et d'éventuels défauts dont la présence se manifeste à travers une combinaison complexe des paramètres précédents [HAM 12].

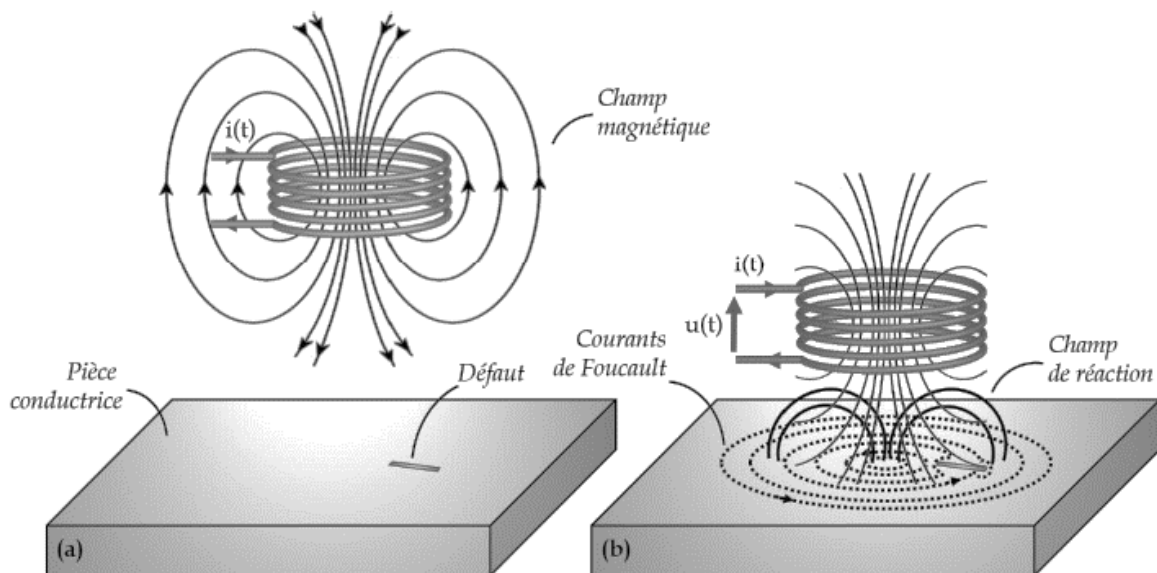


Figure. I.6. (a) Génération d'un champ magnétique par la bobine.

(b) Induction de CF dans l'échantillon et apparition d'un champ de réaction

I.5.3. Effet de peau

L'intensité des courants de Foucault dans une cible constituée d'un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique σ (en Sm^{-1}) et une perméabilité magnétique μ (en Hm^{-1}), diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle δ (en m), souvent nommée épaisseur de peau. En pratique, on peut détecter des défauts jusqu'à une profondeur de quelques δ . L'épaisseur de peau est définie par [ABD 14, ZOR 12] :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (\text{I.1})$$

Cette expression permet de constater que :

- Pour un matériau donné (μ et σ constants) la valeur de δ augmente lorsque la fréquence f diminue et réciproquement (effet de peau),
- Pour une fréquence f donnée, les matériaux caractérisés par une perméabilité magnétique élevée (matériaux ferromagnétiques) ou une conductivité électrique importante (cuivre, aluminium) présentent une faible profondeur de pénétration [ELG 16].

Si on considère une pièce plane infinie (grande épaisseur) et en (r, z) , excitée par une nappe de courants extérieure, de fréquence f , parallèle au plan, Il est montré que 63% du courant circule dans l'épaisseur de peau, le module de la densité de courant dans la pièce est exprimé par la relation suivante [BEN 15, ABD 14, TAL 13, ZOR 12, CHO 10] :

$$J(z) = J_s \exp\left(-z\sqrt{\pi f \sigma \mu}\right) = J_s \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \quad (\text{I.2})$$

- z la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce.
- $J(z)$ le module de la densité de courant à la profondeur z .
- J_s le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$).
- δ la profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.

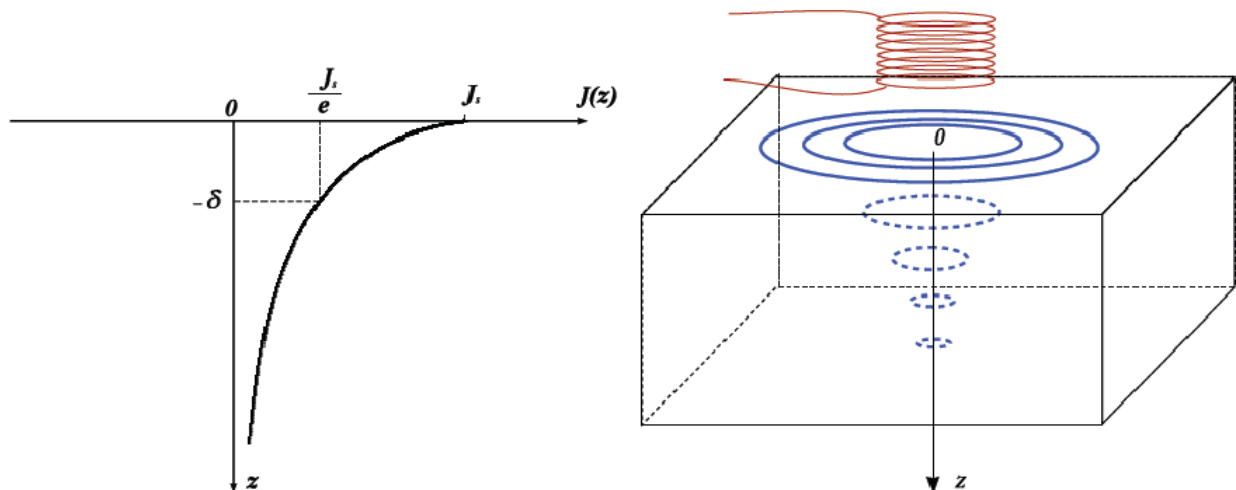


Figure. I.7. Densité des courants induits et la profondeur de la pénétration.

I.5.4. Mode d'excitation

La sensibilité de la méthode dépend de la fréquence du courant d'excitation. Celle-ci conditionne en effet, la profondeur de pénétration des courants induits dans le matériau à inspecter, ce qui destine la technique au contrôle surfacique (pièces minces) et volumiques (pièces de grande épaisseur) [HAM 12]. Alors, l'extraction de l'information sur la pièce à contrôler est liée au mode d'excitation du capteur [LAK 11]. On peut distinguer trois modes

d'excitation : excitation mono-fréquence, excitation multifréquences et l'excitation pulsée [LAK 11, DEL 16].

I.5.4.1. Contrôle mono-fréquence

Les courants de Foucault sont induits par une excitation sinusoïdale, de fréquence fixe [CHO 09, HAM 12, DEL 16], 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. Dans le cas de la détection de défauts surfaciques, il est souvent intéressant de travailler à hautes fréquences (en pratique de l'ordre du MHz). Au-delà, l'effet de résonance de la bobine peut apparaître. A contrario, lors de l'inspection de défauts enterrés ou bien dans le cas de matériaux magnétiques, l'équation (I.1) donne une fréquence de travail beaucoup plus basse [DEL 16].

I.5.4.2. Contrôle multifréquences

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 sont potentiellement enrichies par les différentes fréquences utilisées [DEL 16], ces paramètres peuvent être de différentes natures :

- Distance sonde / cible (lift-off).
- Conductivité électrique de la cible (σ).
- Perméabilité magnétique de la cible (μ).
- Défauts dans le matériau. – épaisseur du matériau à contrôler [CHO 09].

I.5.4.3. Contrôle par courants de Foucault pulsés

Cette méthode a été mise en place dans les années 50 pour une application d'évaluation d'épaisseur de revêtement métallique, puis elle a été appliquée à la détection de défauts profonds [CHO 09].

Elle consiste à émettre un champ magnétique à large bande de fréquence. Le courant d'excitation n'est pas une onde sinusoïdale mais variable dans le temps [HAM 12]. La forme des signaux d'alimentation peut être rectangulaire, triangulaire ou sinusoïdale, cette dernière étant la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre [CHO 09]. Dans ce type de contrôle, c'est l'évolution temporelle des signaux qui est utilisée. [CHO 09, LAK 11]. Sur le principe, une telle méthode est plus riche en informations qu'un contrôle par courants de Foucault sinusoïdal mono ou multifréquences. [CHO 09, LAK 11, HAM 12].

L'excitation pulsée est très utilisée dans l'inspection de défauts enterrés, la mesure d'épaisseur ou encore la mesure des paramètres électromagnétiques de matériaux [DEL 16].

I.5.5. Différents types des capteurs inductifs

Par définition, l'émetteur alimenté par un courant alternatif crée un champ magnétique, répondant ainsi à la fonction d'émission, et le récepteur fait une mesure de champ magnétique, c'est la fonction de réception [DEL 16]. Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre le bobinage afin de réaliser des capteurs à courants de Foucault [ABD 14].

I.5.5.1. Capteur absolu

C'est un capteur à double fonction, il est constitué d'une seule bobine émettrice - réceptrice qui crée le flux alternatif grâce au courant qui la parcourt et subit des variations d'impédance que l'on peut détecter en mesurant très finement son signal de sortie [ABD 14, CHO 09, DEL 16]. Ce type de capteurs est très utilisé dans les applications type courant de Foucault sinusoïdaux [TAL 13, BEN 15, DEL 16]. Il favorise la détection de grandeurs à évolution lente telles que l'épaisseur de revêtement, l'entrefer (lift-off) et la conductivité (figure I.8) [HAM 12, TAL 13].

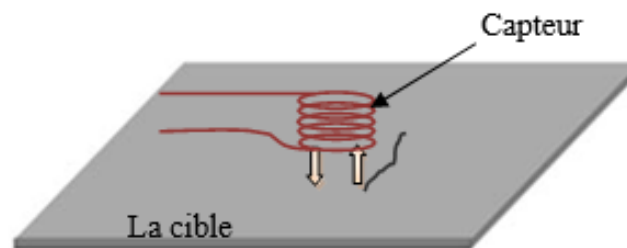


Figure. I.8. Capteur absolu

I.5.5.2. Capteur double

C'est un capteur à fonctions séparées, il est constitué de deux bobines une excitatrice pour créer le flux et l'autre réceptrice pour le recueillir. Ce type de capteur est très utilisé pour les contrôles à basses fréquences ($f < 1kHz$) (Figure I.9).

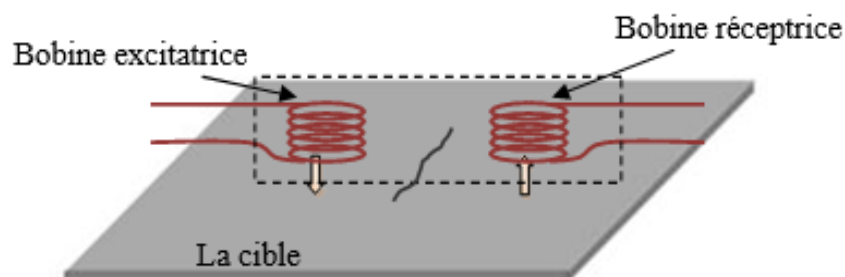


Figure. I.9. Capteur double.

I.5.5.3. Capteur différentiel

Un capteur en mode différentiel est une sonde 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 (Figure.I.10).

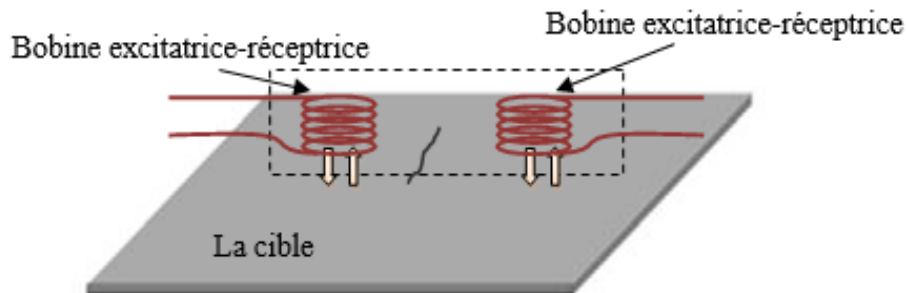


Figure. I.10. Capteur différentiel.

I.5.6. Plan d'impédance

La présence d'un défaut produit la perturbation de la circulation des courants de Foucault dans la pièce (Fig.I.10), modifiant ainsi l'impédance du capteur inductif. La mesure de la variation d'impédance entre les deux états de la pièce (sain et fissuré) constitue le paramètre recherché [ABD 14] :

$$\Delta Z = Z_0 - Z \quad (\text{I.03})$$

Le capteur inductif est toujours un bobinage de N spires, de formes variées. Il est 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 du champ magnétique émises par le capteur [HEL 12, HAM 12, LAK 10, ABD 14, CHO 09].

$$Z = R + jX \quad (\text{I.04})$$

Pour ne conserver dans l'expression de l'impédance que les variations dues à la présence de la cible, on introduit traditionnellement la notion d'impédance normalisée. Cette impédance normalisée Z_n se déduit de l'impédance de la sonde Z à l'aide de l'expression [CHO 09, LAK 11, HEL 12, ABD 14] :

$$Z_n = R_n + jX_n = \frac{Z - R_0}{X_0} \quad (\text{I.05})$$

Avec $Z_0 = R_0 + jX_0$ est l'impédance du capteur à vide (sans cible).

En procédant à cette normalisation, la mesure devient indépendante de certaines caractéristiques propres de la bobine excitatrice (nombre de spires, pertes à vide) et de la croissance de la réactance en fonction de la fréquence. Elle dépend uniquement des paramètres de structure que sont la fréquence d'excitation et la géométrie de la sonde, et des paramètres de la cible à savoir sa géométrie, sa conductivité électrique σ , sa perméabilité magnétique μ et la distance capteur cible (lift-off). L'étude des variations de Z_n s'effectue dans le plan d'impédances normalisées en traçant X_n en fonction de R_n [CHO 09, LAK 11, HEL 12, ABD 14].

Pour un capteur donné, toute variation de l'un des paramètres de la pièce induit un déplacement du point représentatif de Z_n dans le plan d'impédance normalisée.

La figure I.11 illustre l'allure des trajectoires que décrit le point d'impédance de la sonde pour des variations de conductivité électrique σ et de distance de mesure (lift-off) [CHO 09, HEL 12, LAK 11].

La prédétermination de ces trajectoires pour une cible quelconque est un problème relativement complexe qui nécessite une modélisation complète du dispositif. Un modèle de type transformateur a par exemple permis d'identifier, à partir des deux mesures (R_n, X_n), la conductivité locale de la cible et la distance séparant la sonde de la cible.

La présence de défauts ou d'inhomogénéités de la cible induit une modification dans l'espace de l'un ou de plusieurs des paramètres influents (σ , lift-off ...), qui se traduit dans le plan d'impédance (R_n, X_n), par un déplacement du point représentatif du capteur [HEL 12, CHO 09].

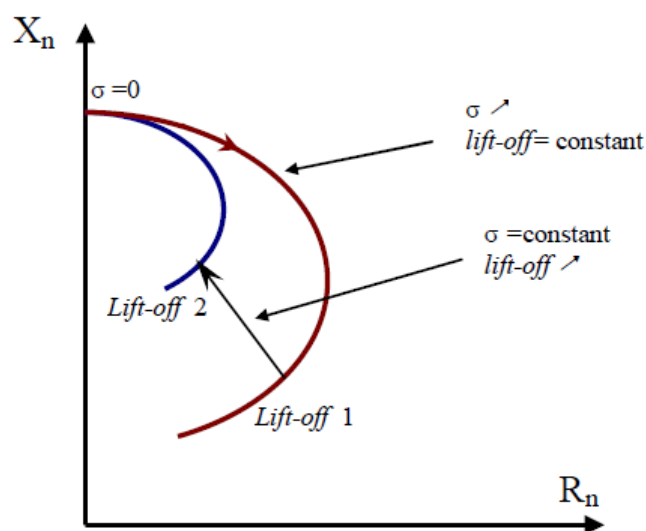


Figure. I.11. Influence de la conductivité et du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée.

I.5.7. Calcul de l'impédance

Pour quantifier les courants de Foucault, il est nécessaire de passer par des grandeurs mesurables exprimant l'effet de ces courants telles que :

- Le champ d'induction magnétique : mesuré par effet Hall.
- L'impédance électrique : mesure de courant, tension et déphasage.

La mesure de ces grandeurs doit être effectuée [ELG 16, HEL 12] pour :

- L'END-CF : on mesure la variation de la grandeur, définie par la différence entre la grandeur mesurée en présence de la cible à évaluer et la grandeur en l'absence de cette cible (mesure à vide).
- Le CND-CF : variation de la grandeur en présence de la cible saine (matériau étalon) et en présence de la cible avec défaut et de même type de matériau.

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.

I.5.8. Avantages du CND par courants de Foucault

Le CND par CF :

- Permet la détection des défauts débouchants ou faiblement enfouis (quelques millimètres) dans tout matériau conducteur.
- Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplants. Ceci en facilite par conséquent l'utilisation. De même, aucune nuisance ou pollution n'est engendrée ni pour l'utilisateur ni pour l'environnement, contrairement, par exemple au ressuage, largement utilisé, qui nécessite l'application de produits chimiques nocifs.
- Transportabilité : le CND par CF ne nécessite pas de dispositif encombrant, et peut donc être effectué à des endroits difficilement accessibles moyennant un équipement portable. De même les contrôles à température élevées sont possibles [CHO 09, HAM 12].

I.5.9. Limites du CND par courants de Foucault

- Il ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs.
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur.
- L'interprétation des signaux est souvent complexe [CHO 09, HAM 12].

I.6. Conclusion

Ce chapitre a concerné le principe de la technique du contrôle non destructif, leur principe de fonctionnement, l'effet de peau qui en décrit la décroissance en fonction de la profondeur de la pièce.

Dans le chapitre suivant, nous allons modéliser les problèmes relatifs au contrôle non destructif par courants de Foucault avec la méthode des éléments finis d'arête.



Chapitre II

II.1. Introduction

Un problème électromagnétique est entièrement décrit par les équations de Maxwell, les lois de comportement électromagnétique des matériaux et les conditions aux limites. La résolution d'un tel système permet de déterminer les grandeurs locales (champs magnétique et électrique, densité de courants...) et d'en déduire des grandeurs globales (flux, impédance...). Cependant, ce système ne possède pas généralement une solution analytique. Il est ainsi indispensable de faire appel aux méthodes numériques. La méthode des éléments finis est considérée parmi les méthodes les plus adaptées pour la simulation des problèmes de contrôle non destructif [ZAI 12].

Ce chapitre est consacré à la modélisation du problème électromagnétique par la méthode des éléments finis. Dans cette étude, on abordera particulièrement la modélisation par éléments finis d'arêtes en formulation H en 2D puis en formulation AV-A en 3D d'un système de CND par courants de Foucault.

II.2. Modélisation électromagnétique

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le système représenté sur la figure II.1. Un matériau, constituant la pièce critique et contenant la fissure, est soumis à l'action d'un champ électromagnétique produit par une bobine représentant un capteur CF où une densité de courant variable dans le temps est imposée. [HEL 12].

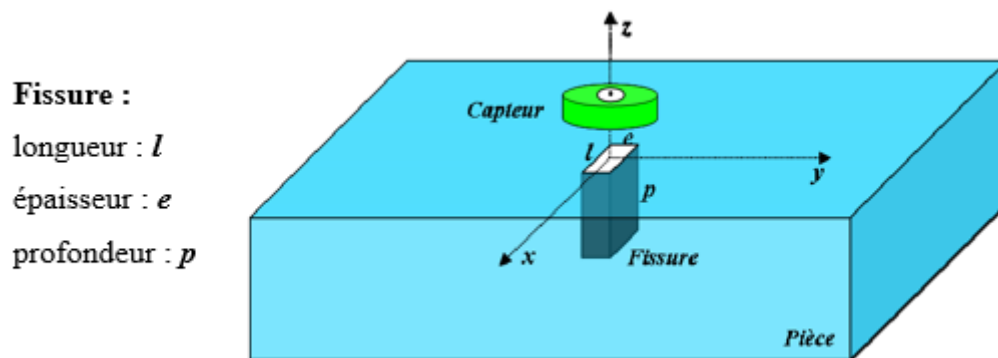


Figure II.1. Système capteur-fissure [HEL 12].

Tous les systèmes électromagnétiques peuvent se mettre sous la forme du schéma de principe représenté sur la figure II.2 [BEN 15].

Les problèmes liés au calcul des courants de Foucault peuvent être schématisés par un modèle type composé de l'air, du matériau conducteur (amagnétique) et d'une source de courant. Ces trois objets forment le domaine de calcul Ω de frontière Γ [LAK 11].

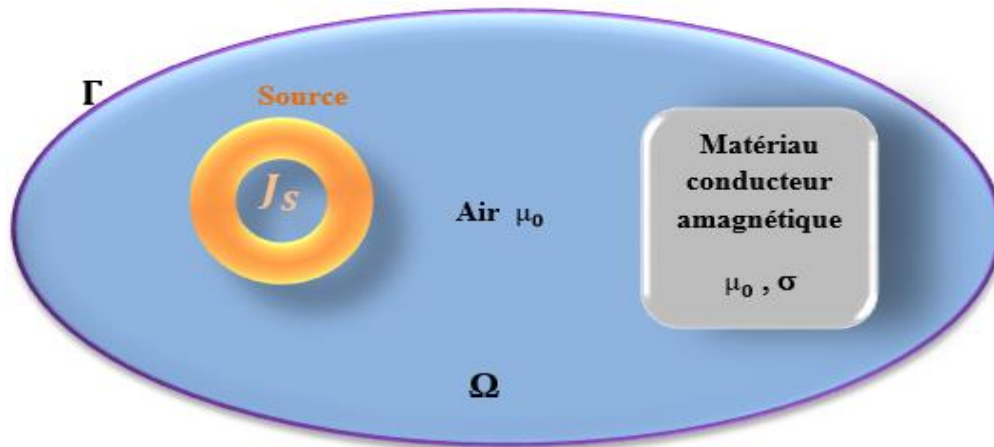


Figure.II.2. Domaine d'étude.

II.3. Equation de base de l'électromagnétisme

II.3.1. Historique

Tout au début, les phénomènes électriques et magnétiques ont été étudiés séparément. Les interactions entre ces deux phénomènes ont été mise en évidence pour la première fois par Ampère (1775-1836), qui a prouvé que la source du magnétisme est le courant électrique, Gauss (1777-1855), qui a démontré que la source du champ électrique est la charge électrique statique, et Faraday (1791-1867) qui relie la création de l'un des champs électrique et magnétique par l'autre et vis-versa. Le couplage des deux phénomènes qu'on regroupe en un mot « *électromagnétisme* », on le doit à James Clark Maxwell (1831-1879) [HAM 12]. En 1873, Maxwell fonde la théorie moderne de l'électromagnétisme avec la publication de son *Traité sur l'électricité et le magnétisme* [MON 03, CAR 17].

Maxwell a exploité les découvertes des précédents, pour donner une formulation la plus complète de l'électromagnétisme liant les grandeurs électriques et magnétiques [HAM 12].

II.3.2. Equations de Maxwell

Les phénomènes électromagnétiques classiques sont régis par les équations de Maxwell, qui constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques, et qui unifient tous les principes de l'électromagnétisme [MEU 08, GOL 97, DAH 14, CHR 14, AND 01, DUL 96, KHE 07].

Ces équations sont les suivantes :

➤ Théorème d'Ampère-Maxwell :
$$\overrightarrow{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (II.1)$$

➤ Loi de Faraday :
$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II.2)$$

➤ Théorème de Gauss :
$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (II.3)$$

➤ Loi de conservation du flux : $\operatorname{div}\vec{B} = 0$ (II.4)

\vec{E} : Champ électrique [V/m]

\vec{H} : Champ magnétique [A/m]

\vec{B} : Induction magnétique [T]

\vec{D} : Induction électrique [C/m²]

\vec{J} : Densité de courant [A/m²]

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

$$\vec{J} = \vec{J}_i + \vec{J}_s \quad (\text{II.5})$$

Avec :

\vec{J}_i : densité de courants induits.

\vec{J}_s : densité de courants source.

L'équation (II.1) est la loi d'Ampère avec la correction apportée par Maxwell. Elle exprime le fait que les champs magnétiques peuvent être générés par un courant électrique [LOH 14] (Un champ électrique variable crée un champ magnétique) [DJE 13]. La loi de Faraday (II.2) met en évidence comment la variation d'un champ magnétique peut induire un champ électrique. La loi de Gauss (II.3) décrit l'effet de la présence de charges électriques sur le champ de déplacement, et la condition sur la divergence (II.4) exprime qu'il n'existe pas de charges magnétiques [LOH 14].

II.3.3. Lois de comportement

Les formules (II.1-II.4) ne sont pas suffisantes pour déterminer le champ électromagnétique et il convient d'ajouter les lois de comportement établissant des relations de dépendance entre les couples \vec{D} et \vec{E} , \vec{B} et \vec{H} et \vec{J} et \vec{E} , ces relations expriment les propriétés de matériaux [GOL 97, LAB 16]. Il s'agit de :

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.7})$$

Et la loi d'Ohm qui s'exprime dans un milieu conducteur par :

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} + \sigma(\vec{v} \operatorname{rot}\vec{B}) \quad (\text{II.8})$$

ϵ : Permittivité électrique [F/m].

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

σ : Conductivité électrique [S/m].

\vec{B}_r : Induction magnétique rémanente [T].

\vec{v} : Vecteur vitesse [m/s].

ϵ , μ , et σ généralement non linéaires et tensorielles tenant compte de l'effet de l'anisotropie du milieu et la non linéarité entre champs et inductions, elles peuvent être aussi des scalaires, modélisant alors le comportement de matériaux isotropes [LAB 16, NAÏ 12].

Dans l'équation (II-8) le terme $\sigma \vec{E}$ exprime la densité des courants résultant du champ électrique \vec{E} (imposé et/ou induit) et le terme $\sigma (\vec{v} \overrightarrow{rot} \vec{B})$ exprime la densité des courants résultant du mouvement [NAÏ 12].

Pour assurer l'unicité de la solution du système (II.1-II.8), il est nécessaire d'ajouter trois types de conditions : les conditions aux limites, les conditions de continuité ainsi que les jauges [LAB 16].

II.3.4. Equation de continuité

Equation de continuité appelée aussi équation de la conservation de la charge électrique est donnée par [HAM 12, ZEM 16] :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{II.9}$$

II.3.5. Relations de passages

Lors du passage d'un milieu à un autre, les grandeurs subissent des discontinuités et ne sont par conséquent pas différentiables. En intégrant les relations (II.1-II.4) sur des volumes incluant les interfaces et en appliquant le théorème de la divergence ou le théorème de Stokes [GOL 97], on obtient les conditions dites de transmission:

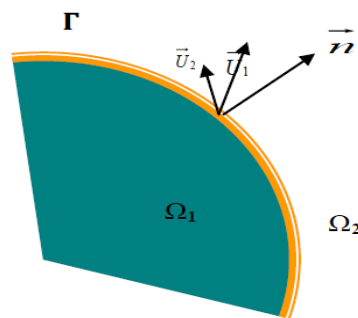


Figure. II.3. Interface entre deux milieux différents [BEN 15].

➤ continuité de la composante normale de \vec{B}

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \tag{II.10}$$

- saut de la composante tangentielle de \vec{H}

$$\vec{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = J_{sur} \quad (\text{II.11})$$

- continuité de la composante tangentielle de \vec{E}

$$\vec{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \quad (\text{II.12})$$

- saut de la composante normale de \vec{D}

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s \quad (\text{II.13})$$

Où $\vec{B}_1, \vec{H}_1, \vec{E}_1, \vec{D}_1$ et $\vec{B}_2, \vec{H}_2, \vec{E}_2, \vec{D}_2$ sont les grandeurs physique de part et d'autre de l'interface, ρ_s est une densité surfacique de charge sur l'interface, J_{sur} est une densité de courant surfacique et \vec{n} la normale associée à l'interface [GOL 97].

II.3.6. Conditions aux limites

Les conditions aux limites (spatiales) s'énoncent de façon générale pour un domaine Ω de frontière Γ avec \vec{n} un vecteur normal (unitaire) à Γ pour les valeurs d'un champ U [LAB 16], ce champ peut être soit :

- Normal (domaine symétrique) ce qui se traduit par Condition de Neumann homogène

$$\frac{\partial U}{\partial n} = 0 \quad (\text{II.14})$$

- Soit de valeur connue, ce qui se traduit par Condition de Dirichlet homogène

$$U \cdot n = 0 \quad (\text{II.15})$$

II.3.7. Condition de jauge

Pour assurer l'unicité de la solution d'un système, il est nécessaire d'ajouter une condition dite « condition de Jauge ». Dans les équations de Maxwell, les champs s'expriment soit à un gradient près (champ rotationnel), soit au rotationnel près (champ à divergence) ce qui justifie l'utilisation des jauges dans certaines formulations pour assurer l'unicité de la solution [ABD 14, HEL 12]

Soient U et W deux champs de vecteurs, les conditions de jauge s'écrivent de façon générale par :

$$\nabla \cdot U = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb} \quad (\text{II.16})$$

$$\nabla \cdot U + k \frac{\partial U}{\partial t} = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz} \quad (\text{II.17})$$

$$U \cdot W = 0 \quad \text{Jauge adaptée pour les éléments d'arêtes} \quad (\text{II.18})$$

II.3.8. Hypothèses simplificatrices

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

- Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$ (Approximation des Régimes Quasi Stationnaires ARQS).
- Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité $\sigma \vec{E}$ peut être décomposée en une partie imposée J_S (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit, pour laquelle on gardera la notation $\sigma \vec{E}$ qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault .
- En outre, dans cette étude nous nous intéressons, en particulier, qu'aux systèmes électromagnétiques lent ou sans mouvement ($\vec{v} = \vec{0}$) ce qui permet d'éliminer le terme $\sigma (\vec{v} \overrightarrow{rot} \vec{B})$ dans l'équation (II.8).
- La densité volumique de charge est considérée comme nulle ($\rho = 0$).
- Généralement, le courant n'existe qu'en volume ($\overrightarrow{J}_{Sur} = \vec{0}$), c'est-à-dire que la conductivité est finie et que la fréquence d'excitation n'excède pas quelques MHz (basses fréquences). Par conséquent, la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique aux interfaces où la perméabilité subit une discontinuité est assurée.

$$\vec{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{0} \tag{II.19}$$

- L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ($\vec{B}_r = \vec{0}$) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanent ou de matériau ferromagnétique [BEN 15, LAB 16, NAI 12].

Avec ces hypothèses, les équations à résoudre sont :

$$div \vec{B} = 0 \tag{II.20}$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{II.21}$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J}_S + \sigma \vec{E} \tag{II.22}$$

Avec les relations constitutives qui deviennent :

$$\vec{J} = \vec{J}_S + \sigma \vec{E} \quad (\text{II.23})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.24})$$

Et l'équation de continuité qui devient :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad \text{ou encore} \quad \text{div} (\vec{J}_S + \sigma \vec{E}) = 0 \quad (\text{II.25})$$

II.4. Formulations magnétodynamiques

La simulation d'un problème de CND par CF implique une modélisation magnétodynamique. Ce modèle est décrit par les équations de Maxwell, des lois de comportement et des conditions aux limites. Cela conduit à la mise en place des domaines de définition des variables électriques et magnétiques et des opérateurs différentiels [ZAI 12].

Plusieurs formulations ont été développées pour représenter le modèle de la magnétodynamique en vue de sa modélisation [LAK 11]. Les principales formulations rencontrées peuvent être classées en deux grandes familles :

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

II.4.1. Formulations de type électrique

II.4.1.1. Formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique \vec{A} V- \vec{A}

Ce modèle de formulation utilise le potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique uniquement dans les régions conductrices [HEL 12].

D'après l'équation de la conservation de flux (II.4), l'induction magnétique B dérive d'un potentiel magnétique A [HEL 12, BEN 15] tel que :

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

Lorsque cette équation est remplacée dans (II.21), on obtient :

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

Un potentiel électrique v peut être déterminé à partir de l'équation (II.27), qui est donné par la relation ci-après :

$$\begin{aligned}\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} &= -\overrightarrow{\text{grad}}(v) \\ \vec{E} &= -\overrightarrow{\text{grad}}(v) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\end{aligned}\tag{II.28}$$

La combinaison de l'équation (II.23) et (II.28) nous permet d'écrire :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} = \vec{J}_s - \sigma \left[\overrightarrow{\text{grad}}(v) + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right]\tag{II.29}$$

L'équation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire électrique s'écrit :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) + \sigma \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}}(v) \right] = \vec{J}_s\tag{II.30}$$

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

$$\text{div}(\vec{A}) = 0\tag{II.31}$$

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

$$\overrightarrow{\text{grad}} \left(\frac{1}{\mu} \text{div} \vec{A} \right)\tag{II.32}$$

En posant la transformation :

$$v = \frac{\partial V}{\partial t}\tag{II.33}$$

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

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) - \overrightarrow{\text{grad}} \left(\frac{1}{\mu} \text{div} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial}{\partial t} [\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}}(V)] = \vec{J}_s\tag{II.34}$$

$$\text{div} \left(\sigma \frac{\partial}{\partial t} [\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}}(V)] \right) = 0\tag{II.35}$$

II.4.1.2. Formulation en champ électrique E

La formulation en champ électrique s'obtient en faisant la dérivée de l'équation Maxwell-Ampère (II.1) par rapport au temps, tout en supposant que la perméabilité est invariante par rapport au temps (cas des matériaux linéaires) [HEL 12, BEN 15, LAB 16], la formulation s'écrit :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{E} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II.36})$$

Elle nécessite l'utilisation des éléments d'arêtes pour prendre en compte les conditions aux limites (de façon naturelle) et les discontinuités sur les composantes normales aux interfaces des champs de vecteur [HEL 12, LAB 16].

II.4.2. Formulations de type magnétique

La relation vérifiée par le champ magnétique \vec{H} est obtenue en combinant les équations de Maxwell. Elle donne lieu à plusieurs formulations de type magnétique dont les deux principales sont : la formulation en \vec{H} et la formulation en \vec{T} - ϕ [HEL 12].

II.4.2.1. Formulation en champ magnétique \vec{H}

La combinaison des équations (II.21), (II.22) et (II.24) conduit directement à l'équation à résoudre:

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \overrightarrow{rot} \vec{H} \right) + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II.37})$$

Aucune condition de jauge n'est nécessaire pour assurer l'unicité de champ magnétique lorsque les conditions aux limites sont adéquates [BEN 15].

II.4.2.2. Formulation magnétique \vec{T} - ϕ .

Comme la densité de courants induits J_{ind} dans les milieux conducteurs est à divergence nulle [RAM 09, HEL 12, ZEM 16], alors on peut définir à partir de la relation II.9, un potentiel vecteur électrique \vec{T} tel que :

$$\overrightarrow{rot} \vec{T} = \vec{J}_i \quad (\text{II.38})$$

Comme

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_i \quad (\text{II.39})$$

Le domaine étant simplement connexe, en regroupant (II.38) et (II.39), le champ magnétique peut être exprimé par la relation :

$$\vec{H} = \vec{T} - \overrightarrow{grad}\phi \quad (\text{II.40})$$

ϕ est le potentiel scalaire magnétique défini dans tout le domaine d'étude.

Comme pour la formulation \vec{A} - V l'unicité de la solution nécessite l'introduction d'une jauge (Jauge de Coulomb par exemple) [HEL 12]; ce qui donne l'expression ci-dessous :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \overrightarrow{rot}\vec{T} \right) - \overrightarrow{grad} \left(\frac{1}{\sigma} \overrightarrow{div}\vec{T} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \mu (\vec{T} - \overrightarrow{grad}\phi) = \vec{0} \quad (\text{II.41})$$

$$\overrightarrow{div}\mu (\vec{T} - \overrightarrow{grad}\phi) = 0 \quad (\text{II.42})$$

II.5. Méthodes numériques

Avec l'évolution de l'outil informatique, l'utilisation des méthodes numériques dans l'étude des configurations sonde-pièce les plus variées se généralise de plus en plus, elles sont d'autant plus utilisées que la configuration à traiter est complexe (géométrie, hétérogénéité, non linéarité) [ZEM 16].

Parmi ces méthodes, on pourra citer la méthode des différences finies (MDF), la méthode des intégrales de frontières (MIF), la méthode des volumes finis (MVF) et la méthode des éléments finis (MEF) [CHO 10].

II.5.1. Méthode des différences finis (MDF)

Historiquement la première, elle consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mailles rectangulaires et à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs de différences entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Si cette méthode est simple à programmer, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes [CHO 10, LAB 16].

II.5.2. Méthode des intégrales de frontières (MIF)

Lorsqu'on utilise la MDF ou la MEF, on calcule les variables inconnues dans tout le domaine. La MIF permet de ramener le maillage à la frontière du domaine, elle ne nécessite pas un maillage volumique ni des matériaux ni de l'espace. Ainsi, le calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. Pour ramener le problème sur les frontières, la MIF utilise le théorème d'Ostrogradski-Green.

Cette méthode a l'inconvénient de conduire à un système algébrique à matrice pleine sans termes nuls. Ceci augmente le temps utilisateur, donc le coût de calcul [LAK 11, BEN 15].

La méthode des intégrales de frontières est utilisée généralement en magnétostatique ou bien elle est couplée avec la méthode des éléments finis pour calculer des champs électromagnétiques dans les milieux linéaires et non conducteurs [ZEM 16]

II.5.3. Méthode des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis, appelée aussi méthode des volumes de contrôle a été développée par Spalding et Patankar, elle a été utilisée pour résoudre les équations elliptiques et paraboliques. La méthode s'appuie sur une subdivision du domaine d'étude en un nombre fini de sous-domaines élémentaires appelés volumes de contrôle, par une intégration sur des volumes finis entourant les nœuds du maillage plutôt qu'au nœud lui-même (cas de la méthode des différences finies). Dans cette méthode les inconnues sont les valeurs moyennes de la solution sur chaque cellule de contrôle. La méthode consiste à projeter et résoudre le problème sur chaque cellule [ZEM 16].

II.5.4. Méthode des éléments finis (MEF/ éléments de Whitney)

Le domaine d'étude est découpé en un nombre fini de petits éléments de discrétisation reliés entre eux par des nœuds, des facettes ou des arêtes. Les différentes inconnues sont portées par les nœuds (valeur aux nœuds), les arêtes (circulation le long des arêtes), les facettes (flux à travers les facettes) ou les volumes (intégrale sur le volume) des éléments composants le maillage. Une fonction de forme est ainsi associée à chaque : nœud (élément de Whitney d'ordre 0), arête (élément de Whitney d'ordre 1), facette (élément de Whitney d'ordre 2) et volume (élément de Whitney d'ordre 3) [CHR 14, DAH 14].

Dans notre travail, nous avons voulu au départ traiter notre problématique par une modélisation par éléments finis d'arêtes en 2D en utilisant la formulation en champ magnétique \vec{H} et en se basant sur des défauts axisymétriques, toutefois on s'est confronté à des problèmes numériques lors de l'implémentation de cette méthode sur Matlab, ce qui nous a contraint à basculer vers le logiciel COMSOL Multiphysics mais en faisant une modélisation plus complète en 3D. Dans ce chapitre, on va présenter les deux modèles abordés, en l'occurrence le modèle éléments finis d'arêtes en 2D par la formulation en champ magnétique \vec{H} et le modèle éléments finis d'arêtes en 3D par la formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique $\vec{A}V-\vec{A}$.

II.6. Méthode des éléments finis d'arêtes

II.6.1. Discrétisation du domaine d'étude

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques.

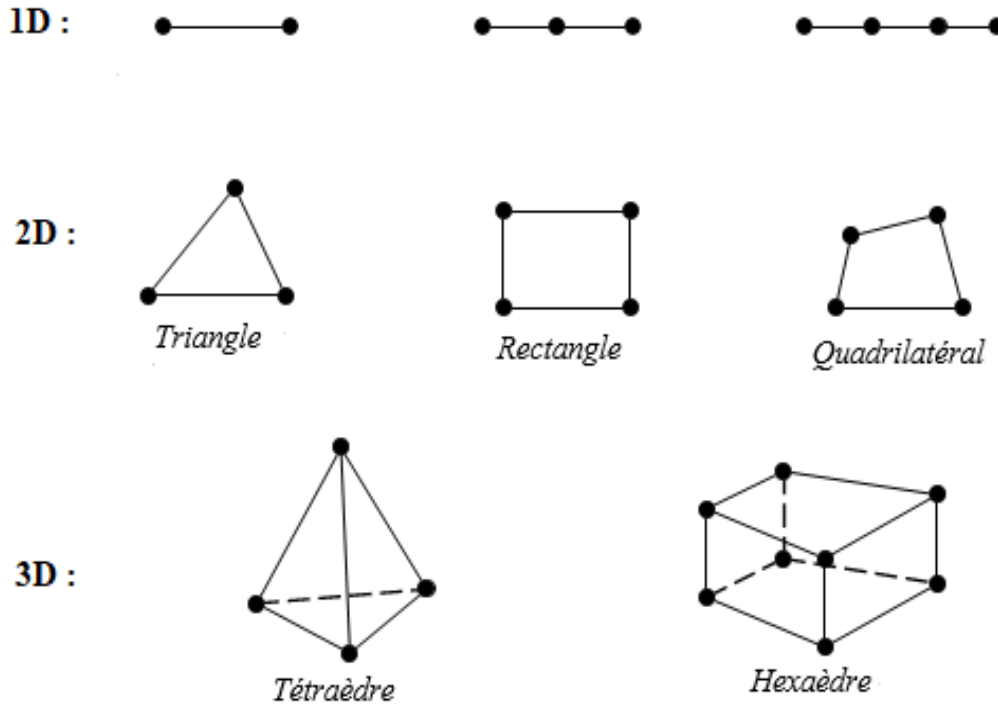


Figure II.4. Eléments typiques : une dimension, deux dimensions, trois dimensions

Dans notre étude, nous avons choisi de discrétiser le domaine par des triangles en 2D (trois nœuds et trois arêtes) et des tétraèdres en 3D (quatre nœuds et six arêtes) (figure II.5).

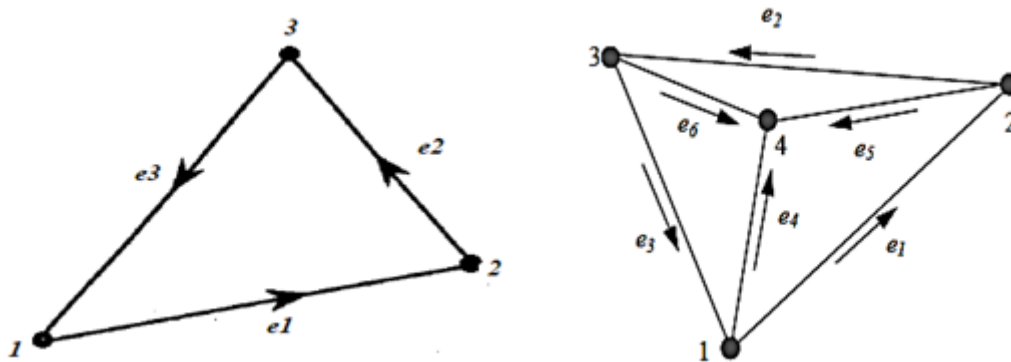


Figure II.5. Eléments triangulaire et tétraédrique.

II.6.2. Modèle 2D axisymétrique

On peut considérer le système (pièce + bobine) comme un système axisymétrique, Le modèle électromagnétique adopté est celui du champ magnétique \vec{H} . 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. La figure II.6 représente un modèle géométrique 2D axisymétrique.

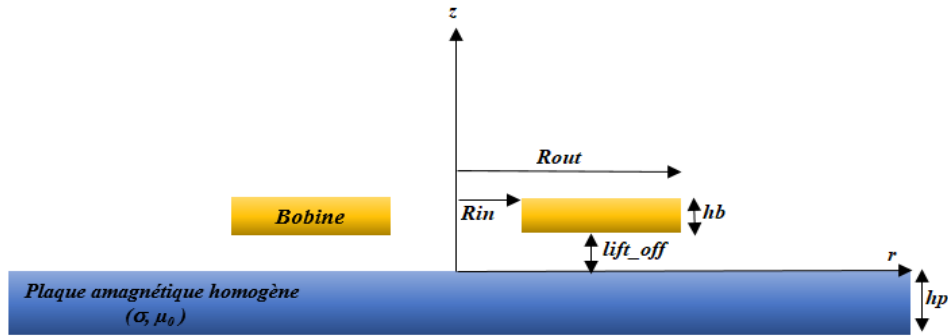


Figure II.6. Modèle 2D axisymétrique.

II.6.2.1. Approximation par éléments finis d'arêtes en formulation \vec{H}

Le champ magnétique \vec{H} est approximé à partir de sa circulation sur les arêtes du maillage. On utilise en conséquence des éléments d'arêtes, éléments de Whitney d'ordre 1 [Bossavit 1993], pour interpoler le champ magnétique en un point quelconque d'un élément Ω_e du domaine d'étude Ω . Cette interpolation est définie par:

$$\vec{H}^e(r, z) = \sum_{i=1}^3 H_i^e \vec{w}_i^e(r, z) \quad (\text{II.43})$$

Où

H_i^e est la composante tangentielle du champ magnétique le long de la $i^{\text{ème}}$ arête qui correspond à la circulation de \vec{H}^e le long de l'arête i .

\vec{w}_i^e est le vecteur d'interpolation (fonction de forme vectorielle), égale à 1 sur l'arête i et à 0 sur toutes les autres, définie par :

$$\vec{w}_i^e = \left(N_{i_1}^e \vec{\nabla} N_{i_2}^e - N_{i_2}^e \vec{\nabla} N_{i_1}^e \right) l_i^e \quad (\text{II.44})$$

Avec $N_{i_1}^e$ et $N_{i_2}^e$ les fonctions de forme associées aux nœuds i_1 et i_2 de l'arête i . La fonction \vec{w}_i^e est continue sur chaque élément et sa composante tangentielle est continue au passage de chaque facette du maillage.

l_i^e est la longueur de l'arête qui sert ici pour normalisation [JIA 02].

Les \vec{w}_i^e ont pour expression :

$$\begin{aligned} \vec{w}_1^e &= \left(N_1^e \vec{\nabla} N_2^e - N_2^e \vec{\nabla} N_1^e \right) l_1^e \\ \vec{w}_2^e &= \left(N_2^e \vec{\nabla} N_3^e - N_3^e \vec{\nabla} N_2^e \right) l_2^e \\ \vec{w}_3^e &= \left(N_3^e \vec{\nabla} N_1^e - N_1^e \vec{\nabla} N_3^e \right) l_3^e \end{aligned} \quad (\text{II.45})$$

Les N_i^e ont pour expression en coordonnées cylindriques :

$$N_i^e(r, z) = \frac{1}{2\Delta^e} (a_i^e + b_i^e r + c_i^e z) \quad i_1 = 1, 2, 3 \quad (\text{II.46})$$

II.6.2.1.1. Forme intégrale de la formulation magnétodynamique

La forme forte de la formulation magnétodynamique en champ magnétique est tirée à partir des équations de Maxwell :

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.47})$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II.48})$$

Avec les relations constitutives :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II.49})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.50})$$

II.6.2.1.2. Formulation en champ magnétique \vec{H}

En combinant les relations (II.47), (II.48), (II.49) et (II.50), nous obtenons l'équation à résoudre :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\sigma} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} \right) + \frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} = \overrightarrow{\text{rot}} \frac{1}{\sigma} \vec{J}_s \quad (\text{II.51})$$

Ou encore :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\sigma} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} \right) + i\mu\omega \vec{H} = \frac{1}{\sigma} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{J}_s \quad (\text{II.52})$$

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

$$(\mu_1 \vec{H}_1 - \mu_2 \vec{H}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{II.53})$$

Cette relation, implique que la discontinuité de la composante normale de \vec{H} dans le cas de discontinuité de perméabilité μ . Ceci la rend beaucoup moins intéressante dans le cadre des

éléments finis nodaux. En revanche, elle est bien adaptée aux éléments d'arêtes puisque la continuité de la composante tangentielle de \vec{H} est vérifiée. [NAI 12, CHO 09]

➤ *Remarque importante*

Au lieu de travailler directement avec \vec{J}_s , on cherche un champ magnétique source \vec{H}_s équivalent pour remplacer le \vec{J}_s .

Tout d'abord, \vec{J}_s peut s'écrire :

$$\vec{J}_s = \sigma \vec{E}_s \quad (\text{II.54})$$

tel que \vec{E}_s est un champ électrique source dû à \vec{J}_s .

Introduisant le rotationnel sur les deux termes de l'équation (II.54) :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{J}_s = \sigma \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E}_s = \sigma \left(-\frac{\partial \vec{B}_s}{\partial t} \right) = \sigma (-i\omega \vec{B}_s) = \sigma (-i\omega \mu \vec{H}_s) = -i\omega \sigma \mu \vec{H}_s \quad (\text{II.55})$$

D'où :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{J}_s = -i\omega \sigma \mu \vec{H}_s \quad (\text{II.56})$$

Et l'équation (II.52) peut s'écrire ainsi :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\sigma} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} \right) + i\mu\omega \vec{H} = -i\omega \mu \vec{H}_s \quad (\text{II.57})$$

D'après (II.55), le champ magnétique source \vec{H}_s dû à \vec{J}_s est :

$$\vec{H}_s = \frac{i}{\omega \sigma \mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{J}_s \quad (\text{II.58})$$

Or dans un système axisymétrique, le vecteur densité de courant est radial :

$$\vec{J}_s = J_s \vec{e}_\theta \quad (\text{II.59})$$

Le $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{J}_s$ en coordonnées cylindriques :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{J}_s = \vec{\nabla} \wedge \vec{J}_s = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial J_{sz}}{\partial \theta} - \frac{\partial J_{s\theta}}{\partial z} \right) \vec{e}_r + \left(\frac{\partial J_{sr}}{\partial z} - \frac{\partial J_{sz}}{\partial r} \right) \vec{e}_\theta + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial (r J_{s\theta})}{\partial r} - \frac{\partial J_{sr}}{\partial \theta} \right) \vec{e}_z \quad (\text{II.60})$$

D'où :

$$\overrightarrow{rot} \vec{J}_s = \vec{\nabla} \wedge \vec{J}_s = \frac{1}{r} J_s \vec{e}_z \quad (\text{II.61})$$

Donc \overrightarrow{H}_s est donnée par :

$$\vec{H}_s = i \frac{J_s}{r \omega \sigma \mu} \vec{e}_z \quad (\text{II.62})$$

En première approximation, on peut dire que \overrightarrow{H}_s est constant pour chaque élément "e" du maillage et il vaut :

$$\vec{H}_s = i \frac{J_s}{r_e \omega \sigma \mu} \vec{e}_z \quad (\text{II.63})$$

Où r_e est la coordonnée du barycentre de l'élément "e".

En introduisant l'expression de \overrightarrow{H}_s dans l'équation (II.57), on obtient la forme forte de la formulation magnétodynamique en champ magnétique à résoudre :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \overrightarrow{rot} \vec{H} \right) + i \mu \omega \vec{H} = J_{ss} \vec{e}_z \quad (\text{II.64})$$

D'où :

$$J_{ss} = \frac{J_s}{r_e \sigma}$$

II.6.2.1.3. Calcul des intégrants surfaciques pour les éléments finis triangulaires

En appliquant la méthode de Galerkin (les fonctions de pondération sont remplacées par les fonctions de forme \overrightarrow{w}_i^e) et en utilisant les identités vectorielles, on peut aboutir à la forme intégrale faible (pour des conditions aux limites naturelles) comme suit :

$$\int_{\Omega} \overrightarrow{w}_i^e \left[\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \overrightarrow{rot} \vec{H} \right) + i \mu \omega \vec{H} - J_{ss} \vec{e}_z \right] d\Omega = 0 \quad (\text{II.65})$$

Où :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \overrightarrow{w}_i^e \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{H} \right) d\Omega - \int_{\Gamma} \frac{1}{\sigma} \overrightarrow{w}_i^e (\vec{\nabla} \wedge \vec{H} \wedge \vec{n}_s) d\Gamma + \int_{\Omega} (i \mu \omega \overrightarrow{w}_i^e \cdot \vec{H}) d\Omega = J_{ss} \int_{\Omega} \overrightarrow{w}_i^e \cdot \vec{e}_z d\Omega \quad (\text{II.66})$$

Or :

$$\int_{\Gamma} \frac{1}{\sigma} \vec{w}_i^e (\vec{\nabla} \wedge \vec{H} \wedge \vec{n}_s) d\Gamma = 0 \quad (\text{II.67})$$

D'où :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_i^e \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{H} \right) d\Omega + \int_{\Omega} (i\mu\omega \vec{w}_i^e \cdot \vec{H}) d\Omega = J_{ss} \int_{\Omega} \vec{w}_i^e \cdot \vec{e}_z d\Omega \quad (\text{II.68})$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} \vec{H}^e(r, z) &= \sum_{i=1}^3 H_i^e \vec{w}_i^e(r, z) \\ \sum_{j=1}^3 H_j^e \int_{\Omega_e} \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_i^e \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_j^e \right) d\Omega + \sum_{j=1}^3 H_j^e \int_{\Omega_e} (i\mu\omega \vec{w}_i^e \cdot \vec{w}_j^e) d\Omega &= J_{ss} \int_{\Omega} \vec{w}_i^e \cdot \vec{e}_z d\Omega \end{aligned} \quad (\text{II.69})$$

D'où :

➤ **Matrice masse élémentaire**

$$M_{ij}^e = \int_{\Omega_e} \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_i^e \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_j^e \right) d\Omega \quad (\text{II.70})$$

➤ **Matrice raideur élémentaire**

$$R_{ij}^e = \int_{\Omega_e} (i\mu\omega \vec{w}_i^e \cdot \vec{w}_j^e) d\Omega \quad (\text{II.71})$$

➤ **Vecteur force élémentaire**

$$F_i^e = J_{ss} \int_{\Omega_e} \vec{w}_i^e \cdot \vec{e}_z d\Omega \quad (\text{II.72})$$

II.6.2.1.4. Calcul des intégrants surfaciques en 2D

Le $\overrightarrow{\text{grad}} N_i^e$ en coordonnées cylindriques :

$$\vec{\nabla} N_i^e = \frac{\partial N_i^e}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial N_i^e}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \vec{e}_z \quad (\text{II.73})$$

Donc :

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} N_{i_1}^e &= \frac{1}{2\Delta^e} (b_{i_1}^e \vec{e}_r + c_{i_1}^e \vec{e}_z) \\ \vec{\nabla} N_{i_2}^e &= \frac{1}{2\Delta^e} (b_{i_2}^e \vec{e}_r + c_{i_2}^e \vec{e}_z) \end{aligned} \quad (\text{II.74})$$

Les produits $N_{i_1}^e \vec{\nabla} N_{i_2}^e$ et $N_{i_2}^e \vec{\nabla} N_{i_1}^e$ peuvent se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned} N_{i_1}^e \vec{\nabla} N_{i_2}^e &= \frac{1}{2\Delta^e} N_{i_1}^e (b_{i_2}^e \vec{e}_r + c_{i_2}^e \vec{e}_z) \\ N_{i_2}^e \vec{\nabla} N_{i_1}^e &= \frac{1}{2\Delta^e} N_{i_2}^e (b_{i_1}^e \vec{e}_r + c_{i_1}^e \vec{e}_z) \end{aligned} \quad (\text{II.75})$$

Sachant que :

$$\vec{w}_i^e = (N_{i_1}^e \vec{\nabla} N_{i_2}^e - N_{i_2}^e \vec{\nabla} N_{i_1}^e) l_i^e$$

\vec{w}_i^e peut se mettre donc sous la forme :

$$\vec{w}_i^e = \frac{l_i^e}{2\Delta^e} N_{i_1}^e (b_{i_2}^e \vec{e}_r + c_{i_2}^e \vec{e}_z) - \frac{l_i^e}{2\Delta^e} N_{i_2}^e (b_{i_1}^e \vec{e}_r + c_{i_1}^e \vec{e}_z) \quad (\text{II.76})$$

\vec{w}_i^e peut se développer aussi sous la forme :

$$\begin{aligned} \vec{w}_i^e &= \frac{l_i^e}{(2\Delta^e)^2} [(b_{i_2}^e a_{i_1}^e - b_{i_1}^e a_{i_2}^e) + (b_{i_2}^e b_{i_1}^e - b_{i_1}^e b_{i_2}^e) r + (b_{i_2}^e c_{i_1}^e - b_{i_1}^e c_{i_2}^e) z] \vec{e}_r + \\ &\quad \frac{l_i^e}{(2\Delta^e)^2} [(c_{i_2}^e a_{i_1}^e - c_{i_1}^e a_{i_2}^e) + (c_{i_2}^e b_{i_1}^e - c_{i_1}^e b_{i_2}^e) r + (c_{i_2}^e c_{i_1}^e - c_{i_1}^e c_{i_2}^e) z] \vec{e}_z \end{aligned} \quad (\text{II.77})$$

\vec{w}_i^e est de la forme :

$$\vec{w}_i^e = \alpha \vec{e}_r + \beta \vec{e}_z \quad (\text{II.78})$$

Le $\vec{rot} \vec{w}_i^e$ en coordonnées cylindriques :

$$\vec{rot} \vec{w}_i^e = \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_i^e = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w_{iz}^e}{\partial \theta} - \frac{\partial w_{i\theta}^e}{\partial z} \right) \vec{e}_r + \left(\frac{\partial w_{ir}^e}{\partial z} - \frac{\partial w_{iz}^e}{\partial r} \right) \vec{e}_\theta + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial (r w_{i\theta}^e)}{\partial r} - \frac{\partial w_{ir}^e}{\partial \theta} \right) \vec{e}_z \quad (\text{II.79})$$

$$\vec{rot} \vec{w}_i^e = \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_i^e = \frac{l_i^e}{2(\Delta^e)^2} (b_{i_2}^e c_{i_1}^e - b_{i_1}^e c_{i_2}^e) \vec{e}_\theta \quad (\text{II.80})$$

II.6.2.1.4.1. Matrice masse élémentaire

$$\begin{aligned} M_{ij}^e &= \int_{\Omega_e} \left(\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_i^e \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_j^e \right) d\Omega \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_i^e \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{w}_j^e &= \frac{l_i^e l_j^e}{4(\Delta^e)^4} (b_{i_2}^e c_{i_1}^e - b_{i_1}^e c_{i_2}^e) (b_{j_2}^e c_{j_1}^e - b_{j_1}^e c_{j_2}^e) \end{aligned} \quad (\text{II.81})$$

D'où :

$$M_{ij}^e = \frac{l_i^e l_j^e}{4\sigma(\Delta^e)^3} (b_{i_2}^e c_{i_1}^e - b_{i_1}^e c_{i_2}^e)(b_{j_2}^e c_{j_1}^e - b_{j_1}^e c_{j_2}^e) \quad (\text{II.82})$$

D'où les éléments de la matrice masse élémentaire :

$$\begin{aligned} M_{11}^e &= \frac{l_1^e l_1^e}{4\sigma(\Delta^e)^3} (b_2^e c_1^e - b_1^e c_2^e)^2 \\ M_{22}^e &= \frac{l_2^e l_2^e}{4\sigma(\Delta^e)^3} (b_3^e c_2^e - b_2^e c_3^e)^2 \\ M_{33}^e &= \frac{l_3^e l_3^e}{4\sigma(\Delta^e)^3} (b_1^e c_3^e - b_3^e c_1^e)^2 \\ M_{12}^e &= M_{21}^e = \frac{l_1^e l_2^e}{4\sigma(\Delta^e)^3} (b_2^e c_1^e - b_1^e c_2^e)(b_3^e c_2^e - b_2^e c_3^e) \\ M_{13}^e &= M_{31}^e = \frac{l_1^e l_3^e}{4\sigma(\Delta^e)^3} (b_2^e c_1^e - b_1^e c_2^e)(b_1^e c_3^e - b_3^e c_1^e) \\ M_{23}^e &= M_{32}^e = \frac{l_2^e l_3^e}{4\sigma(\Delta^e)^3} (b_3^e c_2^e - b_2^e c_3^e)(b_1^e c_3^e - b_3^e c_1^e) \end{aligned} \quad (\text{II.83})$$

II.6.2.1.4.2. Matrice raideur élémentaire

$$\begin{aligned} R_{ij}^e &= \int_{\Omega_e} (i\mu\omega \vec{w}_i^e \cdot \vec{w}_j^e) d\Omega = i\mu\omega \int_{\Omega_e} (\vec{w}_i^e \cdot \vec{w}_j^e) d\Omega \\ \vec{w}_i^e \cdot \vec{w}_j^e &= l_i^e l_j^e (N_{i_1}^e \vec{\nabla} N_{i_2}^e - N_{i_2}^e \vec{\nabla} N_{i_1}^e) \cdot (N_{j_1}^e \vec{\nabla} N_{j_2}^e - N_{j_2}^e \vec{\nabla} N_{j_1}^e) = \\ &= l_i^e l_j^e N_{i_1}^e N_{j_1}^e (\vec{\nabla} N_{i_2}^e \cdot \vec{\nabla} N_{j_2}^e) - l_i^e l_j^e N_{i_1}^e N_{j_2}^e (\vec{\nabla} N_{i_2}^e \cdot \vec{\nabla} N_{j_1}^e) - l_i^e l_j^e N_{i_2}^e N_{j_1}^e (\vec{\nabla} N_{i_1}^e \cdot \vec{\nabla} N_{j_2}^e) + \\ &= l_i^e l_j^e N_{i_2}^e N_{j_2}^e (\vec{\nabla} N_{i_1}^e \cdot \vec{\nabla} N_{j_1}^e) \end{aligned} \quad (\text{II.84})$$

$$\vec{\nabla} N_{i_2}^e \cdot \vec{\nabla} N_{j_2}^e = \frac{1}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_2}^e \vec{e}_r + c_{i_2}^e \vec{e}_z) \cdot (b_{j_2}^e \vec{e}_r + c_{j_2}^e \vec{e}_z) = \frac{1}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_2}^e b_{j_2}^e + c_{i_2}^e c_{j_2}^e) \quad (\text{II.85})$$

Ainsi :

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} N_{i_2}^e \cdot \vec{\nabla} N_{j_2}^e &= \frac{1}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_2}^e b_{j_2}^e + c_{i_2}^e c_{j_2}^e) \\ \vec{\nabla} N_{i_2}^e \cdot \vec{\nabla} N_{j_1}^e &= \frac{1}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_2}^e b_{j_1}^e + c_{i_2}^e c_{j_1}^e) \\ \vec{\nabla} N_{i_1}^e \cdot \vec{\nabla} N_{j_2}^e &= \frac{1}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_1}^e b_{j_2}^e + c_{i_1}^e c_{j_2}^e) \\ \vec{\nabla} N_{i_1}^e \cdot \vec{\nabla} N_{j_1}^e &= \frac{1}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_1}^e b_{j_1}^e + c_{i_1}^e c_{j_1}^e) \end{aligned} \quad (\text{II.86})$$

Donc :

$$\begin{aligned} \vec{w}_i^e \cdot \vec{w}_j^e &= l_i^e l_j^e (N_{i_1}^e \vec{\nabla} N_{i_2}^e - N_{i_2}^e \vec{\nabla} N_{i_1}^e) \cdot (N_{j_1}^e \vec{\nabla} N_{j_2}^e - N_{j_2}^e \vec{\nabla} N_{j_1}^e) = \\ &= \frac{l_i^e l_j^e}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_2}^e b_{j_2}^e + c_{i_2}^e c_{j_2}^e) N_{i_1}^e N_{j_1}^e - \frac{l_i^e l_j^e}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_2}^e b_{j_1}^e + c_{i_2}^e c_{j_1}^e) N_{i_1}^e N_{j_2}^e - \frac{l_i^e l_j^e}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_1}^e b_{j_2}^e + \\ &+ c_{i_1}^e c_{j_2}^e) N_{i_2}^e N_{j_1}^e + \frac{l_i^e l_j^e}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_1}^e b_{j_1}^e + c_{i_1}^e c_{j_1}^e) N_{i_2}^e N_{j_2}^e \end{aligned} \quad (\text{II.87})$$

D'où :

$$\begin{aligned} R_{ij}^e &= i\mu\omega \int_{\Omega_e} (\vec{w}_i^e \cdot \vec{w}_j^e) d\Omega = \frac{i\mu\omega l_i^e l_j^e}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_2}^e b_{j_2}^e + c_{i_2}^e c_{j_2}^e) \int_{\Omega_e} N_{i_1}^e N_{j_1}^e d\Omega \\ &- \frac{i\mu\omega l_i^e l_j^e}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_2}^e b_{j_1}^e + c_{i_2}^e c_{j_1}^e) \int_{\Omega_e} N_{i_1}^e N_{j_2}^e d\Omega \\ &- \frac{i\mu\omega l_i^e l_j^e}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_1}^e b_{j_2}^e + c_{i_1}^e c_{j_2}^e) \int_{\Omega_e} N_{i_2}^e N_{j_1}^e d\Omega \\ &+ \frac{i\mu\omega l_i^e l_j^e}{4(\Delta^e)^2} (b_{i_1}^e b_{j_1}^e + c_{i_1}^e c_{j_1}^e) \int_{\Omega_e} N_{i_2}^e N_{j_2}^e d\Omega \end{aligned} \quad (\text{II.88})$$

Or

$$\int_{\Omega_e} (N_1^e)^l (N_2^e)^m (N_3^e)^n d\Omega = \frac{l!m!n!}{(l+m+n+2)!} 2\Delta^e \quad (\text{II.89})$$

Donc

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_e} N_{i_1}^e N_{j_1}^e d\Omega &= \frac{\Delta^e}{12} (1 + \delta_{i_1 j_1}) \\ \int_{\Omega_e} N_{i_1}^e N_{j_2}^e d\Omega &= \frac{\Delta^e}{12} (1 + \delta_{i_1 j_2}) \\ \int_{\Omega_e} N_{i_2}^e N_{j_1}^e d\Omega &= \frac{\Delta^e}{12} (1 + \delta_{i_2 j_1}) \\ \int_{\Omega_e} N_{i_2}^e N_{j_2}^e d\Omega &= \frac{\Delta^e}{12} (1 + \delta_{i_2 j_2}) \end{aligned} \quad (\text{II.90})$$

D'où

$$\begin{aligned}
 R_{ij}^e = i\mu\omega \int_{\Omega_e} (\vec{w}_i^e \cdot \vec{w}_j^e) d\Omega = & \frac{i\mu\omega l_i^e l_j^e}{48\Delta^e} (b_{i_2}^e b_{j_2}^e + c_{i_2}^e c_{j_2}^e) (1 + \delta_{i_1 j_1}) \\
 & - \frac{i\mu\omega l_i^e l_j^e}{48\Delta^e} (b_{i_2}^e b_{j_1}^e + c_{i_2}^e c_{j_1}^e) (1 + \delta_{i_1 j_2}) \\
 & - \frac{i\mu\omega l_i^e l_j^e}{48\Delta^e} (b_{i_1}^e b_{j_2}^e + c_{i_1}^e c_{j_2}^e) (1 + \delta_{i_2 j_1}) \\
 & + \frac{i\mu\omega l_i^e l_j^e}{48\Delta^e} (b_{i_1}^e b_{j_1}^e + c_{i_1}^e c_{j_1}^e) (1 + \delta_{i_2 j_2})
 \end{aligned} \tag{II.91}$$

D'où les éléments de la matrice élémentaire :

$$\begin{aligned}
 R_{11}^e &= \frac{i\mu\omega l_1^e l_1^e}{24\Delta^e} (b_1^e b_1^e + b_2^e b_2^e - b_2^e b_1^e + c_1^e c_1^e + c_2^e c_2^e - c_2^e c_1^e) \\
 R_{22}^e &= \frac{i\mu\omega l_2^e l_2^e}{24\Delta^e} (b_2^e b_2^e + b_3^e b_3^e - b_3^e b_2^e + c_2^e c_2^e + c_3^e c_3^e - c_3^e c_2^e) \\
 R_{33}^e &= \frac{i\mu\omega l_3^e l_3^e}{24\Delta^e} (b_1^e b_1^e + b_3^e b_3^e - b_1^e b_3^e + c_1^e c_1^e + c_3^e c_3^e - c_1^e c_3^e) \\
 R_{12}^e = R_{21}^e &= \frac{i\mu\omega l_1^e l_2^e}{48\Delta^e} (b_1^e b_2^e + b_2^e b_3^e - b_2^e b_2^e - 2b_1^e b_3^e + c_1^e c_2^e + c_2^e c_3^e - c_2^e c_2^e - 2c_1^e c_3^e) \\
 R_{13}^e = R_{31}^e &= \frac{i\mu\omega l_1^e l_3^e}{48\Delta^e} (b_1^e b_3^e + b_2^e b_1^e - b_1^e b_1^e - 2b_2^e b_3^e + c_1^e c_3^e + c_2^e c_1^e - c_1^e c_1^e - 2c_2^e c_3^e) \\
 R_{23}^e = R_{32}^e &= \frac{i\mu\omega l_2^e l_3^e}{48\Delta^e} (b_2^e b_3^e + b_3^e b_1^e - b_3^e b_3^e - 2b_2^e b_1^e + c_3^e c_1^e + c_2^e c_3^e - c_3^e c_3^e - 2c_2^e c_1^e)
 \end{aligned} \tag{II.92}$$

II.6.2.1.4.3. Vecteur force élémentaire

$$F_i^e = J_{ss} \int_{\Omega} \vec{w}_i^e \cdot \vec{e}_z d\Omega$$

Nous avons :

$$\vec{w}_i^e \cdot \vec{e}_z = l_i^e (N_{i_1}^e \vec{\nabla} N_{i_2}^e - N_{i_2}^e \vec{\nabla} N_{i_1}^e) \cdot \vec{e}_z \tag{II.93}$$

Or d'après l'équation (II.70) :

$$\vec{V}N_{i_1}^e = \frac{1}{2\Delta^e} (b_{i_1}^e \vec{e}_r + c_{i_1}^e \vec{e}_z) \quad \text{et} \quad \vec{V}N_{i_2}^e = \frac{1}{2\Delta^e} (b_{i_2}^e \vec{e}_r + c_{i_2}^e \vec{e}_z)$$

D'où :

$$\vec{w}_i^e \cdot \vec{e}_z = \frac{l_i^e}{2\Delta^e} (c_{i_2} N_{i_1} - c_{i_1} N_{i_2}) \tag{II.94}$$

$$F_i^e = \frac{l_i^e J_{SS}}{2\Delta^e} (c_{i_2} \int_{\Omega_e} N_{i_1} d\Omega - c_{i_1} \int_{\Omega_e} N_{i_2} d\Omega) \tag{II.95}$$

Or :

$$\int_{\Omega_e} (N_1^e)^l (N_2^e)^m (N_3^e)^n d\Omega = \frac{l!m!n!}{(l+m+n+2)!} 2\Delta^e \tag{II.96}$$

D'où le vecteur force élémentaire :

$$F_i^e = \frac{l_i^e J_{SS}}{6\Delta^e} (c_{i_2} - c_{i_1}) \tag{II.97}$$

D'où les éléments du vecteur force élémentaire :

$$\begin{aligned} F_1^e &= \frac{l_1^e J_{SS}}{6\Delta^e} (c_{i_2} - c_{i_1}) \\ F_2^e &= \frac{l_2^e J_{SS}}{6\Delta^e} (c_{i_3} - c_{i_2}) \\ F_3^e &= \frac{l_3^e J_{SS}}{6\Delta^e} (c_{i_1} - c_{i_3}) \end{aligned} \tag{II.98}$$

II.6.3. Modèle tridimensionnel

La figure III.7 représente un modèle géométrique tridimensionnel.

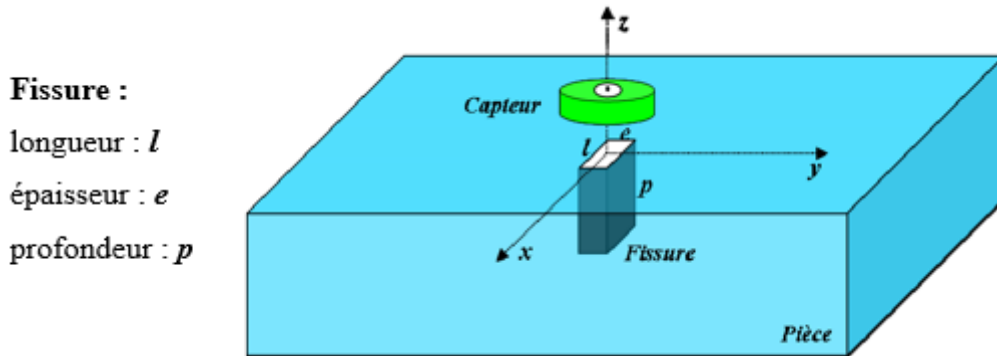


Figure II.7. Modèle géométrique tridimensionnel.

La résolution tridimensionnelle du système d'équations (II.34, II.35) par la méthode des éléments finis consiste à découper la géométrie du domaine d'étude en volumes élémentaires (éléments tétraédriques).

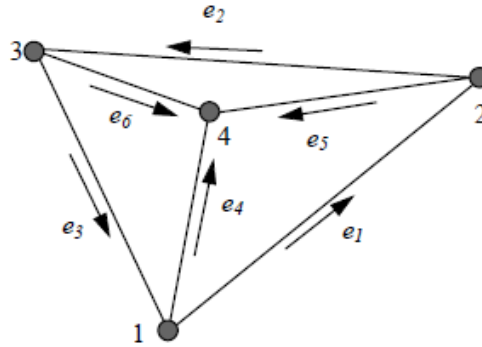


Figure II.8. Volumes élémentaires D.

Les fonctions d'interpolations sont données par les équations suivantes :

$$\overline{W}_i^e(x, y, z) = (N_{i1}^e \vec{\nabla} N_{i2}^e - N_{i2}^e \vec{\nabla} N_{i1}^e) l_i^e \quad (\text{II.99})$$

Les \overline{w}_i^e ont pour expression :

$$\overline{W}_1^e(x, y, z) = (N_1^e \vec{\nabla} N_2^e - N_2^e \vec{\nabla} N_1^e) l_1^e \quad (\text{II.100})$$

$$\overline{W}_2^e(x, y, z) = (N_2^e \vec{\nabla} N_3^e - N_3^e \vec{\nabla} N_2^e) l_2^e \quad (\text{II.101})$$

$$\overline{W}_3^e(x, y, z) = (N_3^e \vec{\nabla} N_1^e - N_1^e \vec{\nabla} N_3^e) l_3^e \quad (\text{II.102})$$

$$\overline{W}_4^e(x, y, z) = (N_1^e \vec{\nabla} N_4^e - N_4^e \vec{\nabla} N_1^e) l_4^e \quad (\text{II.103})$$

$$\overline{W}_5^e(x, y, z) = (N_2^e \vec{\nabla} N_4^e - N_4^e \vec{\nabla} N_2^e) l_5^e \quad (\text{II.104})$$

$$\overline{W}_6^e(x, y, z) = (N_3^e \vec{\nabla} N_4^e - N_4^e \vec{\nabla} N_3^e) l_6^e \quad (\text{II.105})$$

La variable recherchée ' \vec{A} ' est donnée par l'équation suivante:

$$\vec{A}^e(x, y, z) = \sum_{i=1}^6 \vec{A}_i^e \overline{W}_i^e(x, y, z) \quad (\text{II.106})$$

Pour des dispositifs à matériaux linéaires et pour une alimentation sinusoïdale, l'opérateur de dérivation temporelle $\frac{\partial}{\partial t}$ est remplacé en un facteur $j\omega$.

Le système d'équations en potentiel vecteur magnétique et scalaire électrique à résoudre est :

$$\iiint_D [\nabla \times (v \nabla \times \vec{A}) - \nabla(v \nabla \cdot \vec{A})] dx dy dz + j\omega \iiint_D [\sigma(\vec{A} + \nabla V)] dx dy dz = \iiint_D \vec{J}_s dx dy dz \quad (\text{II.107})$$

$$\iiint_D \nabla \cdot [-j\omega\sigma(\vec{A} + \nabla V)] dx dy dz = 0 \quad (\text{II.108})$$

L'implémentation du modèle 3D éléments finis par éléments d'arêtes représenté par le système d'équations (II.34, II.35) ne constitue pas l'objectif de ce travail, la raison par laquelle nous avons fait le choix d'utiliser le logiciel COMSOL Multiphysics pour résoudre ce système d'équations (objet du chapitre 3).

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des problèmes électromagnétiques liés aux équations de Maxwell dans le domaine CND-CF, les différentes formulations électromagnétiques ont été présentées.

Les deux modèles abordés, en l'occurrence le modèle éléments finis d'arêtes en 2D par la formulation en champ magnétique \vec{H} et le modèle éléments finis d'arêtes en 3D par la formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique $\vec{A}V-\vec{A}$ ont été évalués.

Au cours de ce travail, nous avons traité notre problématique par le modèle éléments finis d'arêtes en 3D par la formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique $\vec{A}V-\vec{A}$ implémenté sous le logiciel COMSOL Multiphysics en faisant une modélisation plus complète des défauts 3D au lieu d'une modélisation par éléments finis d'arêtes en 2D en utilisant la formulation en champ magnétique \vec{H} pour des défauts uniquement axisymétriques, ceci est dû à des problèmes numériques lors de l'implémentation de cette dernière méthode sur Matlab.



Chapitre III

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le dispositif expérimental utilisé au cours de ce travail. Ce dispositif comprend la chaîne de mesure, le capteur ainsi que les matériaux utilisés. Tous les essais sont réalisés au laboratoire de physique des matériaux (LPM) de l'université de Laghouat.

Un autre volet de cette étude est la modélisation qui constitue la mise en équations des phénomènes physiques basés sur des équations aux dérivées partielles. Dans ce chapitre, nous présentons le logiciel de simulation 3D COMSOL Multiphysics, qui peut servir d'une manière puissante et interactive à résoudre ces équations en se basant sur la méthode des éléments finis ou encore interagir avec des logiciels de programmation tels que Matlab.

II. Procédures expérimentales

II.1. Chaîne de mesure

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


- ❖ Un capteur à courant de Foucault (bobine inductive).
- ❖ Une table robotisée à deux moteurs pas à pas pilotée par Arduino pour le déplacement du capteur.
- ❖ Un échantillon de test (deux plaques aluminium et une plaque en cuivre présentant toutes des défauts).
- ❖ Un Lock in Amplifier (amplificateur de détection synchrone) qui mesure la variation de la tension aux bornes du capteur.
- ❖ Un PC pour le pilotage du Lock-in Amplifier.

L'ensemble du matériel utilisé est présenté dans la figure III.1 et est détaillé dans le tableau III.2.

II.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. Ce capteur a été fourni par SCIENSORIA SARL et qui est tout à fait adapté à des modélisations du fait que l'on dispose de toutes les données nécessaires comme le montre le tableau III.1.

Tableau III.1. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du capteur.

Désignation CAP2	Caractéristiques	Observations
	Diamètre extérieur : 9mm	- Bobine plate de forme très régulière - L'impédance mesurée est en très bonne adéquation avec le modèle théorique de Dodd et Deeds [Sciensoria]
	Diamètre intérieur : 2mm	
	Hauteur : 1.5mm	
	Nombre de spires : 800	
	Épaisseur d'une couche: 0.07mm	
	Diamètre du fil : 0.06mm	
	Conductivité du fil : Celle du Cuivre	
Fréquence de résonance : $f_c=717k$		

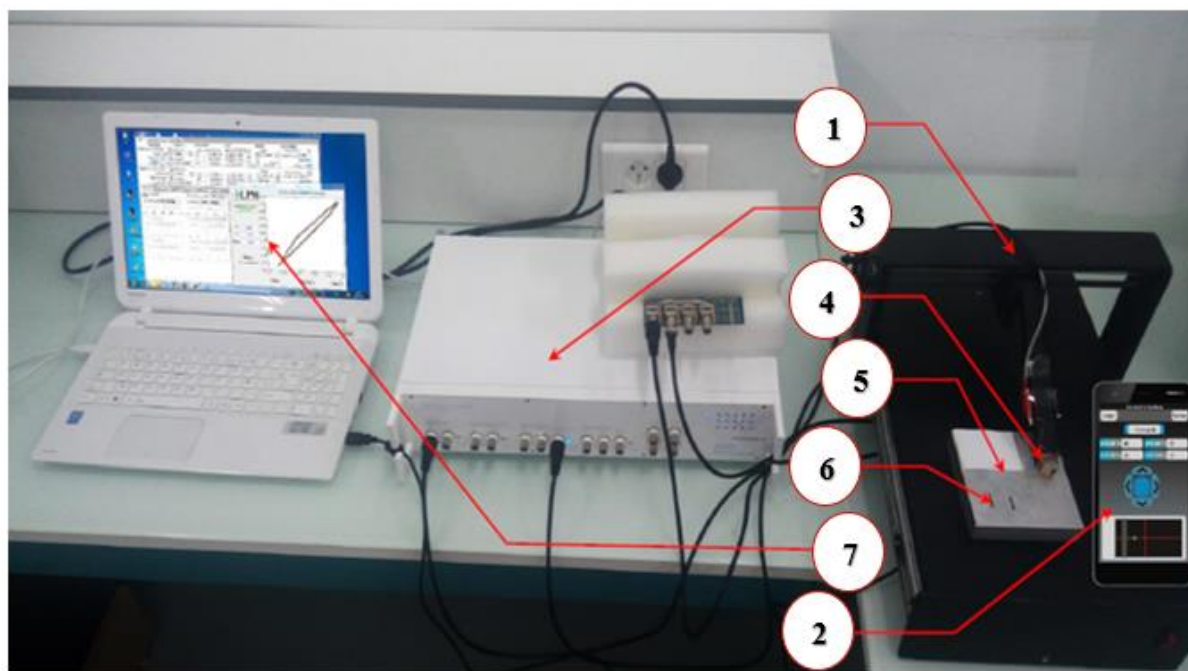


Figure III.1. Montage expérimental – Chaîne de mesure.

Tableau III.2. Composants du montage expérimental

1	Système de déplacement du capteur (table robotisée)
2	Application Android pour commander les moteurs pas à pas
3	Lock-in Amplifier HF2LI
4	Capteur (bobine)
5	Échantillon de test
6	Fissure débouchante
7	PC - Interface

II.1.2. Matériaux utilisés

Dans nos expériences, nous avons choisi d'utiliser des matériaux conducteurs amagnétiques présentant un ensemble de fissures de forme parallépipédiques ayant différentes dimensions. Les caractéristiques des matériaux utilisés sont montrées dans le tableau III.3.

Tableau III.3. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques de cible

Plaque 1 (Cuivre)	Longueur :120mm
	Largeur :120mm
	Epaisseur :4mm
	Conductivité électrique : $5.9 \cdot 10^7$
	Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^{-7}$
Plaque 2 (Aluminium)	Longueur :120mm
	Largeur :103mm
	Epaisseur :20mm
	Conductivité électrique : $3.85 \cdot 10^7$
	Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^{-7}$
Plaque 3 (Aluminium)	Longueur :100mm
	Largeur :65mm
	Epaisseur :4mm
	Conductivité électrique : $3.85 \cdot 10^7$
	Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^{-7}$

II.1.3. Etalons

Notre étude doit comprendre l'effet du changement de dimensions de la fissure sur le signal généré par les courants de Foucault, nous avons donc fait des défauts parallépipédiques de différentes dimensions.

- ✚ La première plaque est en cuivre portant deux fentes parallépipédiques.
- ✚ La deuxième plaque est en aluminium portant trois fentes parallépipédiques.
- ✚ La troisième plaque est aussi en aluminium portant une fente parallépipédique.

La réalisation de ces fissures a été faite au niveau du Laboratoires de Génie Mécanique et du laboratoire de Génie des Procédés de l'université de Laghouat. Les paramètres de chaque fissure sont détaillés dans le tableau III.4

Pour avoir différents Lift_off, nous avons utilisé un slide en plastique transparent et fin. L'épaisseur de ce slide a été mesuré par un micromètre extérieur digital (figure III.2).

Dans nos expériences, nous avons examiné l'évolution de la valeur de Lift_off et attribué plusieurs valeurs : lift_off = 0.14 mm (une seul slide) ; lift_off = 0.28 mm; lift_off = 0.56 mm ; lift_off = 0.70 mm ; lift_off = 0.84 mm.



Figure III.2. Micromètre extérieur digital.

Tableau III.4. Caractéristiques géométriques des fentes.

Plaque 1 (Cuivre)	Fissure N° : 01	Longueur : 12mm
		Largeur : 1mm
		Profondeur : 0.9mm
Plaque 2 (Aluminium)	Fissure N° : 02	Longueur : 12mm
		Largeur : 1mm
		Profondeur : 1.75mm
Plaque 2 (Aluminium)	Fissure N° : 03	Longueur : 10mm
		Largeur : 0.5mm
		Profondeur : 1mm
	Fissure N° : 04	Longueur : 10mm
		Largeur : 0.5mm
		Profondeur : 2.75mm
Plaque 3 (Aluminium)	Fissure N° : 05	Longueur : 15mm
		Largeur : 0.5mm
		Profondeur : 1.5mm
Plaque 3 (Aluminium)	Fissure N° : 06	Longueur : 14mm
		Largeur : 1mm
		Profondeur : 5mm

II.1.4. 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 fréquence élevée et est noyé dans un bruit de mesure qui est, lui, de très basse fréquence. La détection va servir à déterminer l'amplitude du signal bien qu'il soit minime. L'amplitude de ce signal peut être de l'ordre des *nano Volts* et être détectée grâce à cette méthode. Pour pouvoir récupérer ce signal, il est isolé de toutes les autres fréquences et phases indésirables. Ainsi le bruit ne peut pas affecter la mesure. Pour pouvoir être isolé, il faut avoir une fréquence de référence. Pour réaliser cette mesure on utilise un amplificateur à détection synchrone ou « Lock-in amplifier » (figure III.3) afin d'extraire l'amplitude recherchée.



Figure III.3. Lock-In Amplifier

II.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 c'est montré dans la figure III.4.

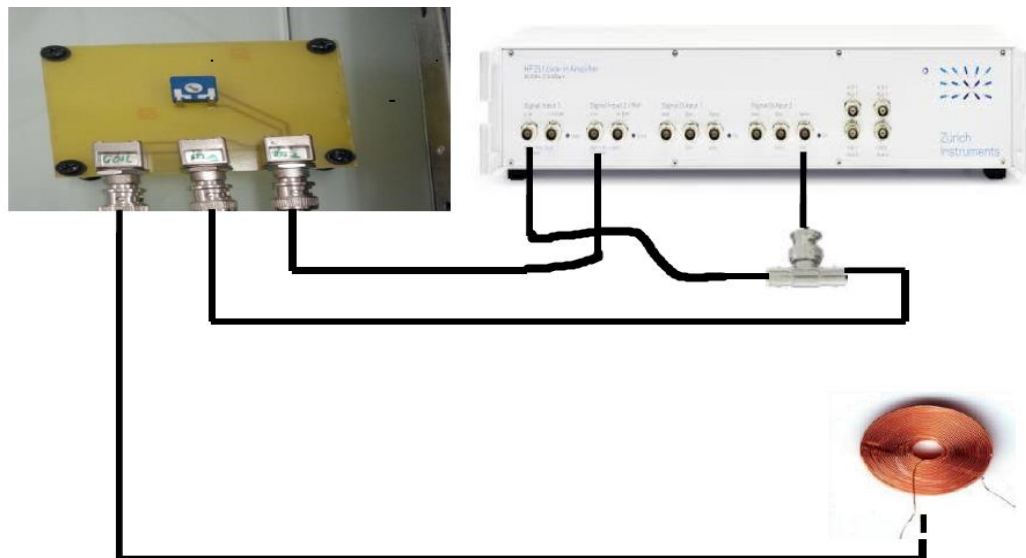


Figure III.4. Montage expérimental.

Et par utilisation du circuit de la figure III.5, on peut établir les relations suivantes [SOU 18]:

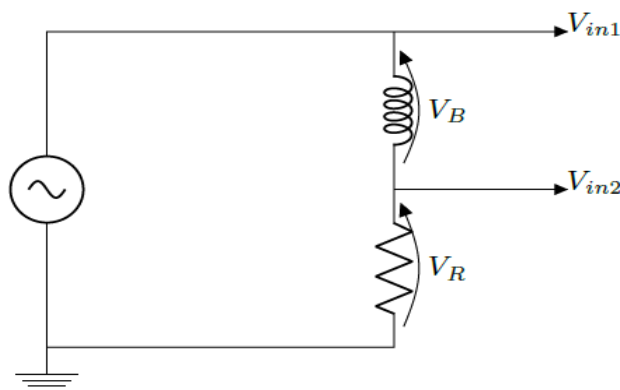


Figure III.4. Schéma électrique

$$Z = \frac{V_B}{I} \quad (III.1)$$

$$I = \frac{V_R}{R} \quad (III.2)$$

$$Z = R \frac{V_B}{V_R} \quad (III.3)$$

$$V_R = V_{in2}$$

$$V_B = V_{in1} - V_{in2}$$

D'où
$$Z = R \frac{V_{in1} - V_{in2}}{V_{in2}} \quad (III.7)$$

II.3. Système de déplacement du Capteur [CHE 18]

Le système de déplacement du capteur (Figure III.6) est constitué de 3 grandes parties:

- ✚ **Partie Commande** : c'est une application Android dans le but de transmettre des signaux pour effectuer des mouvements (déplacement du capteur).
- ✚ **Partie Électronique**: formée de:
 - Module Bluetooth, sa fonction est de recevoir des signaux du téléphone et de les transmettre à l'Arduino;
 - Carte Arduino (open source), sa fonction est de transmettre les signaux pour faire commander les moteurs pas à pas;
 - Deux moteurs pas à pas, leur but est de tourner les deux vis trapézoïdales pour avoir le mouvement sur les deux axes x et y.
- ✚ **Partie Mécanique**: est une table fait de bois (en effet, l'isolant ne perturbe pas les mesures) et contient:
 - Un support du capteur.
 - Deux vis trapézoïdaux.

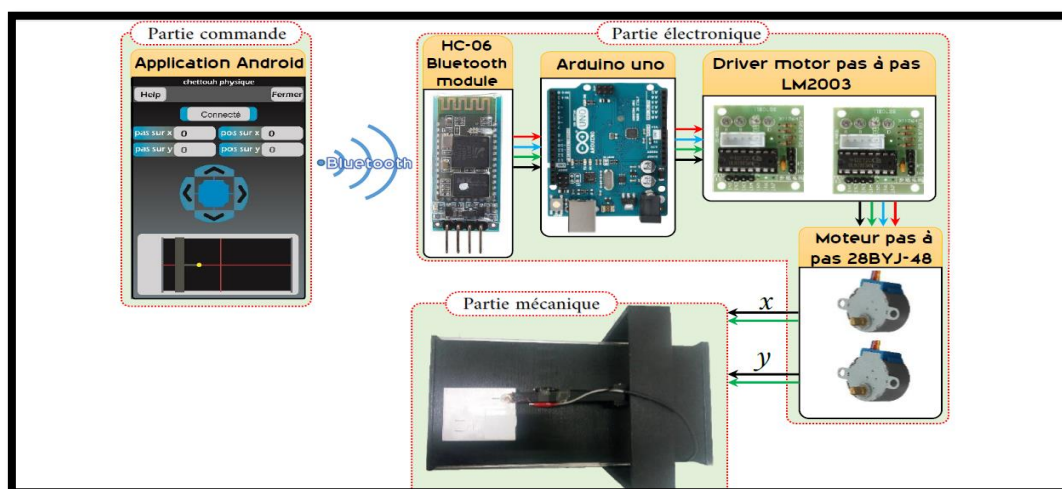


Figure III.6. Système de déplacement du Capteur [CHE 18].

III. Outil logiciel

III.1. COMSOL Multiphysics

III.1.1. Description du Logiciel

COMSOL Multiphysics est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies en mathématiques ou en analyses numériques. En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies, il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique...) et dans quel régime (stationnaire, temporel...) le modèle doit être construit. Selon ce choix, la modélisation est disponible en 1D, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D.

COMSOL Multiphysics utilise la méthode des éléments finis d'arrêtes pour résoudre les équations aux dérivés partielles, la raison pour laquelle nous avons choisi ce logiciel pour traiter notre modèle de CND_CF.

III.1.2. Diagramme de résolution d'un problème aux dérivées partielles

Dans la figure III.6 est présenté le plan général de résolution d'un problème aux dérivées partielles sous COMSOL Multiphysics.

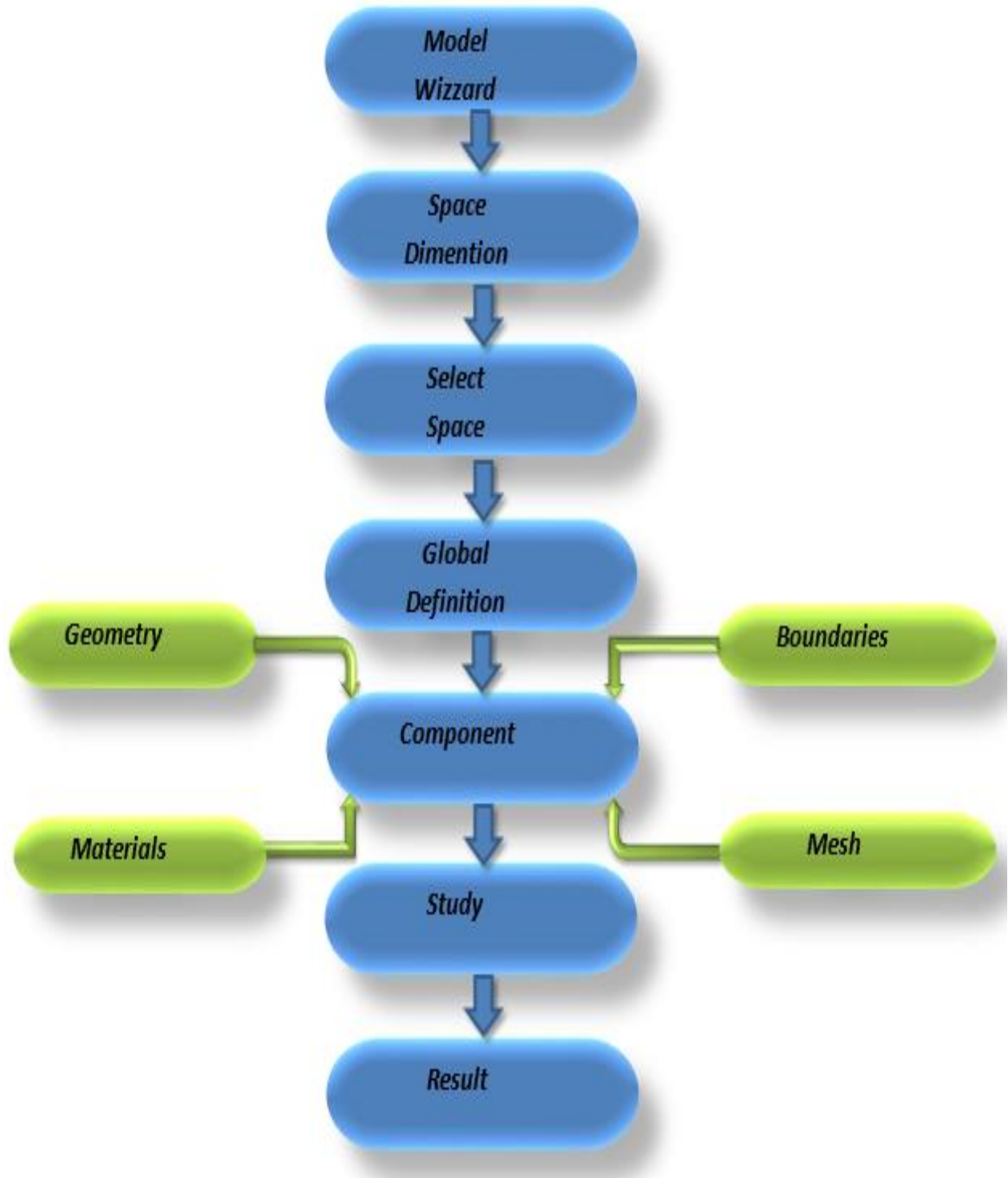


Figure III.7. Diagramme de résolution sous COMSOL Multiphysics

III.1.3. Création du modèle de simulation

Pour une meilleure approche des résultats expérimentaux, nous avons modélisé notre système par le logiciel de calcul par élément finis d'arêtes 3D COMSOL Multiphysics.

Il s'agit d'une bobine à air qui se déplace au-dessus d'une plaque électriquement conductrice et amagnétique comportant une fissure orientée selon l'axe Ox.

Les dimensions géométriques et physiques de chaque élément du dispositif sont listées ci-après :

Tableau III.5. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système.

LPM-Laghouat	
Capteur	<i>Nombre de spires : 800</i>
	<i>Rayon intérieur : 1mm</i>
	<i>Rayon extérieur : 4.5mm</i>
	<i>Hauteur : 1.5mm</i>
	<i>Conductivité électrique : $5,8 \cdot 10^7$</i>
	<i>Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^7$</i>
Charge	<i>Longueur : 120mm</i>
	<i>Largeur : 103mm</i>
	<i>Epaisseur : 20mm</i>
	<i>Conductivité électrique : $3,85 \cdot 10^7$</i>
	<i>Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^7$</i>
Défauts	<i>Longueur : 14mm</i>
	<i>Largeur : 1mm</i>
	<i>Profondeur : 5mm</i>

III.1.3.1. Création du modèle géométrique

La configuration étudiée dans notre cas est réalisée selon les étapes principales suivantes :

- **Plan de construction de la géométrie**

Cette étape est basée essentiellement sur l'option « *Work Plane* ». Cette option nous a permis de définir la forme géométrique de base sur un plan bidimensionnel (2 cercles « *circle* » dans notre cas), et après, il faut faire la différence entre les deux cercles pour déterminer la bobine (voir la figure III.8)

- **Surface de courant**

Les interfaces de courant sont définies par l'approche « *Bézier Polygon* ». En effet, cette option nous a permis de déterminer les surfaces transversales (plan xOz), où on impose les courants d'excitations.

• **Extension tridimensionnelle**

L'extension tridimensionnelle du système réalisée précédemment dans le plan de travail « *Work Plane* », est effectuée par le traitement « *Extrude* ». Cette option a l'aptitude de générer une extension des formes géométriques bidimensionnelles (2D) vers des géométries tridimensionnelles (3D), en définissant la troisième dimension d'extension. La géométrie obtenue est présentée sur la figure III.8. [HIB 18]

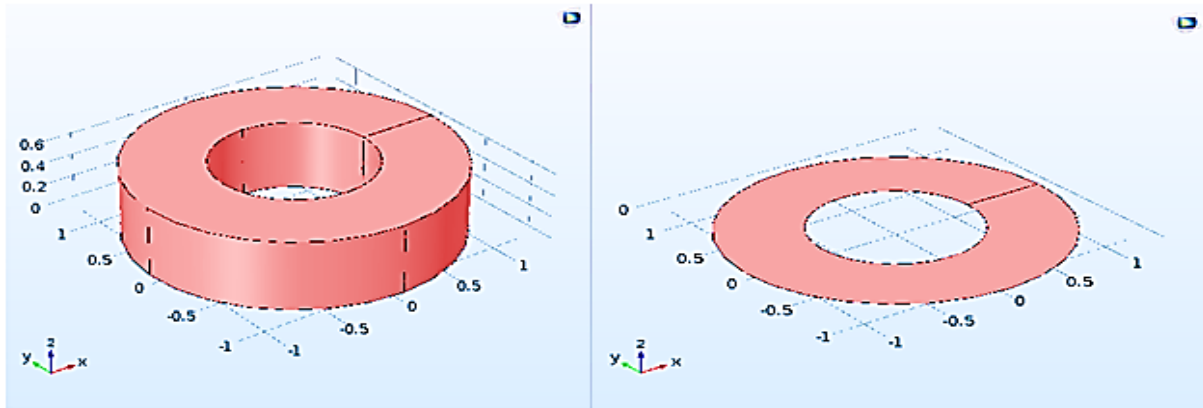


Figure III.8. Construction de la bobine

Ensuite, nous déterminons la géométrie de la plaque et le défaut ainsi que la boîte d'air, il suffit de faire un clic droit sur *Geometry* dans le *Model Builder* et choisir *Block*.

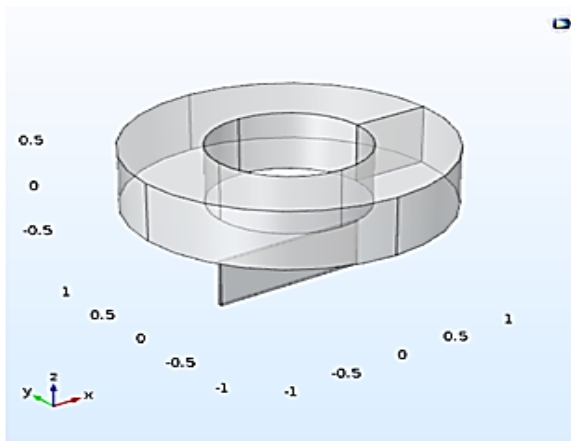


Figure III.9. Insertion de la fissure

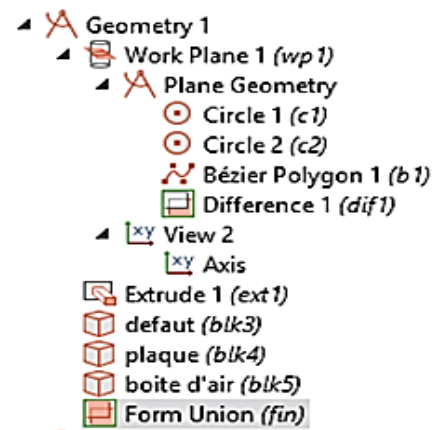


Figure III.10. Détermination de la géométrie

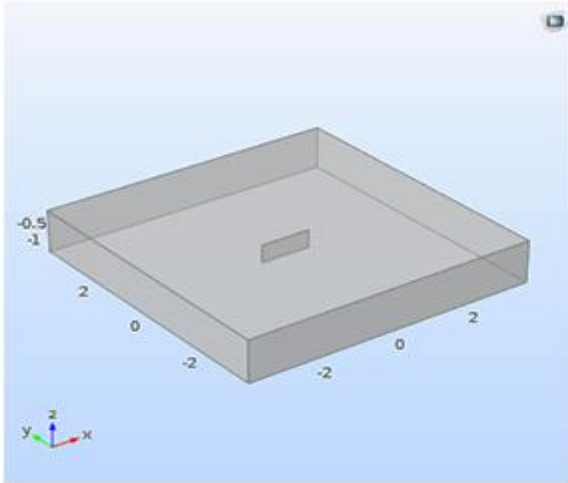


Figure III.11. Insertion de la plaque

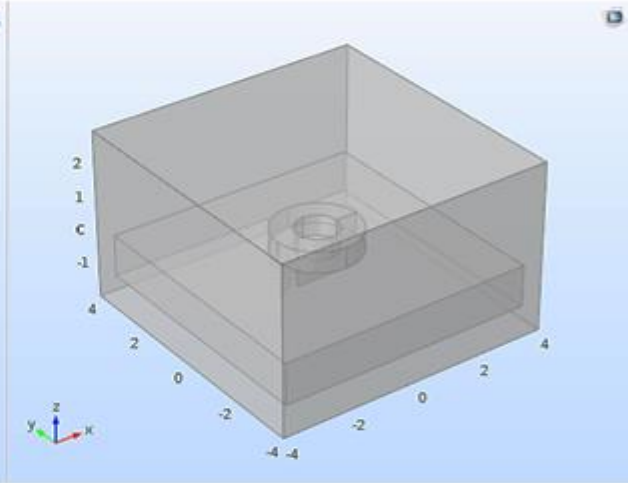


Figure III.12. Insertion de la boîte d'air

III.1.3.2. Affectation des propriétés du matériau

On sélectionne *Add Material*, une nouvelle fenêtre apparaît à droite pour choisir parmi une liste de matériaux.

Nous introduisons dans la boîte d'air et le défaut la même propriété physique que l'air et pour la bobine nous introduisons la même propriété physique que le cuivre, et pour la plaque on choisit l'aluminium puis le cuivre.

III.1.3.3. Définition des variables et des conditions aux limites

Cette étape consiste à définir pour l'ensemble des paramètres physiques de résolution, ceux qui ont un lien direct avec la solution. Il faut définir les variables spatiales et temporelles avec leurs conditions aux limites.

Name	Expression	Value
rin	0.615	0.615
rou	1.24	1.24
Lp	5.5	5.5
H0	1.222	1.222
H0	0.615	0.615
mu	4*pi*1e-7	1.2566E-6
N	3790	3790
IC	1[A]	1 A
freq	900[Hz]	900 Hz
sigma	30.6e6[S/m]	3.06E7 S/m
lift_off	0.088	0.088
Lep	8	8
Ld	1.26	1.26
Pd	0.5	0.5
Ed	0.028	0.028

Figure III.13. Affectation des paramètres du modèle

III.1.3.4. Choix du régime de résolution

Notre modèle est basé sur deux régimes de résolution. Le premier est le régime (**coil geometry analysis**) pour calculer la distribution dans le domaine qui concerne uniquement les bobines multi-tours, définies physiquement comme un faisceau de fils conducteurs connectés en série. Quant au deuxième est le régime (**frequency domain**) qui est utilisé pour calculer la réponse d'un système électromagnétique linéaire ou linéarisé soumis à une excitation harmonique pour une ou plusieurs fréquences.

III.1.3.5. Maillage

Le maillage adopté dans ce travail est un maillage décrit *normal* (voir la figure III.15), réalisé automatiquement par le logiciel COMSOL Multiphysics. Le maillage entier composé de 25214 éléments de domaine, 4091 éléments de frontière et 419 éléments d'arête.

III.1.3.6. Excitation

La figure (III.14) illustre l'introduction du courant d'excitation dans le capteur.

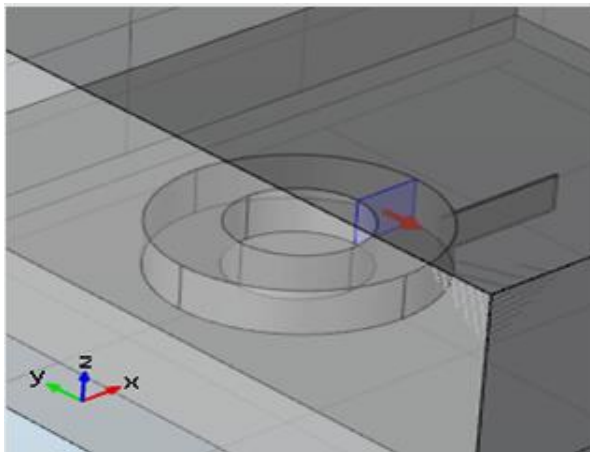


Figure III.14. Excitation du capteur

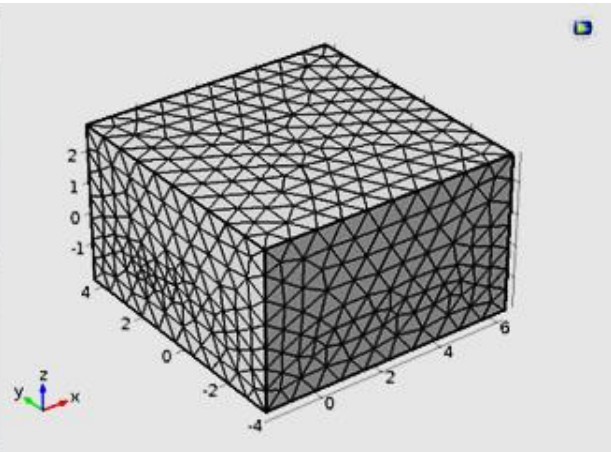


Figure III.15. Maillage

III.1.3.7. Résultats en termes d'induction magnétique et densité de courant

L'induction magnétique et la densité de courant visualisés dans la cible sont présentés en 2D et en 3D sur les figures suivantes.

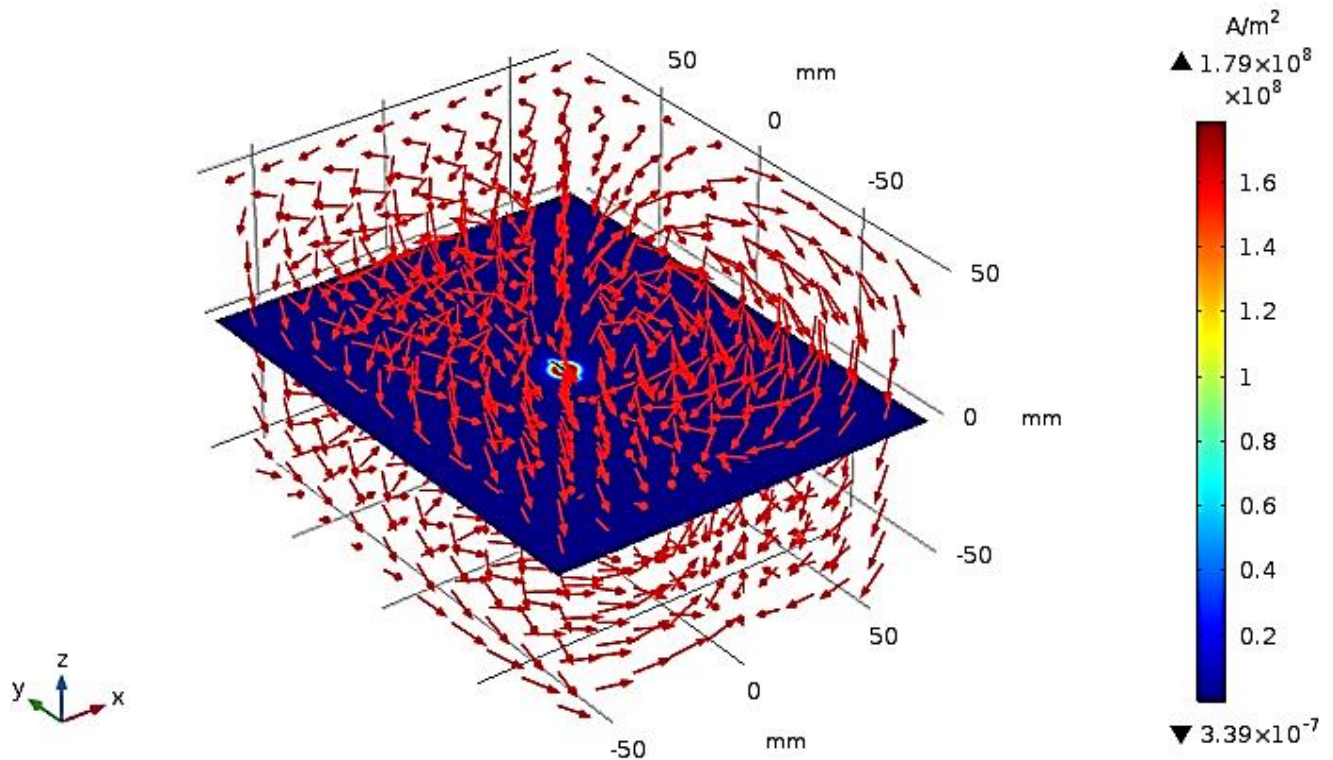


Figure III.16. Distribution des vecteurs de l'induction magnétique B en 3D.

Selon le théorème d'Ampère, tout courant parcourant un circuit crée un champ magnétique à travers la section qu'il entoure, c'est le phénomène d'induction électromagnétique.

On appelle courants de Foucault les courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu (le flux du champ à travers le milieu), soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique. Ils sont une conséquence de l'induction électromagnétique.

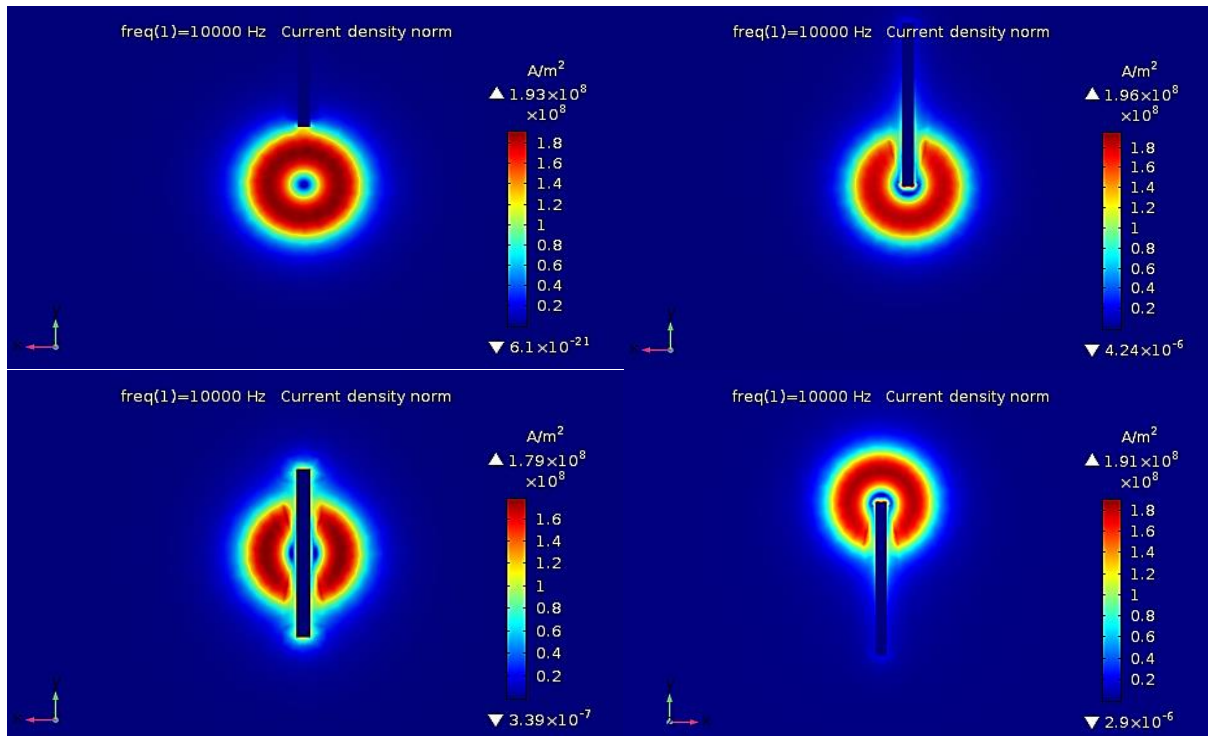


Figure III.17. Densité de courant sur la surface (xOy) d'une plaque conductrice amagnétique portant une fente parallélépipédique (Aluminium).

III.1.3.7.1.1. L'effet de la conductivité électrique

❖ Plaques sans défauts

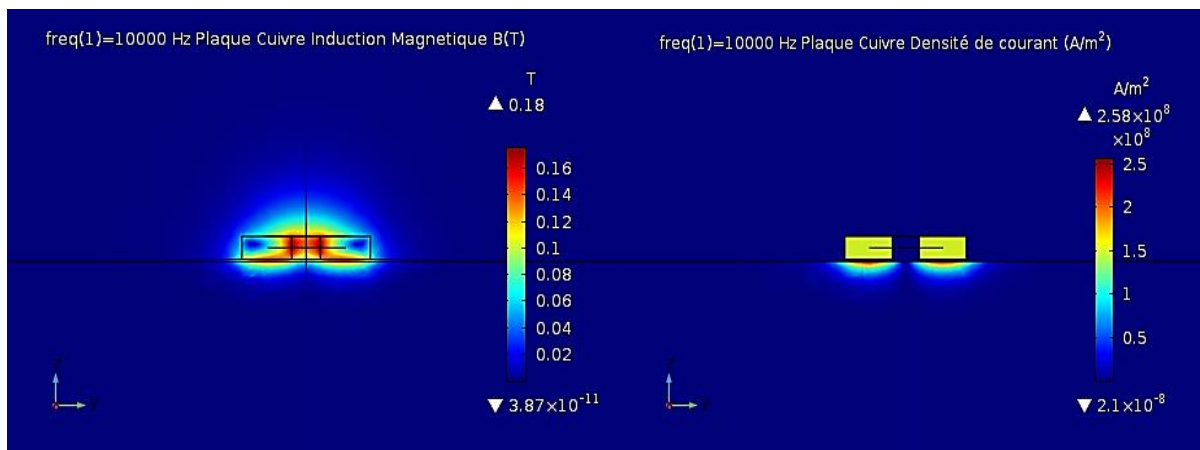


Figure III.18. Module de l'induction magnétique et densité de courant d'une plaque de cuivre ($\sigma = 5.91 \cdot 10^7$) sans défaut

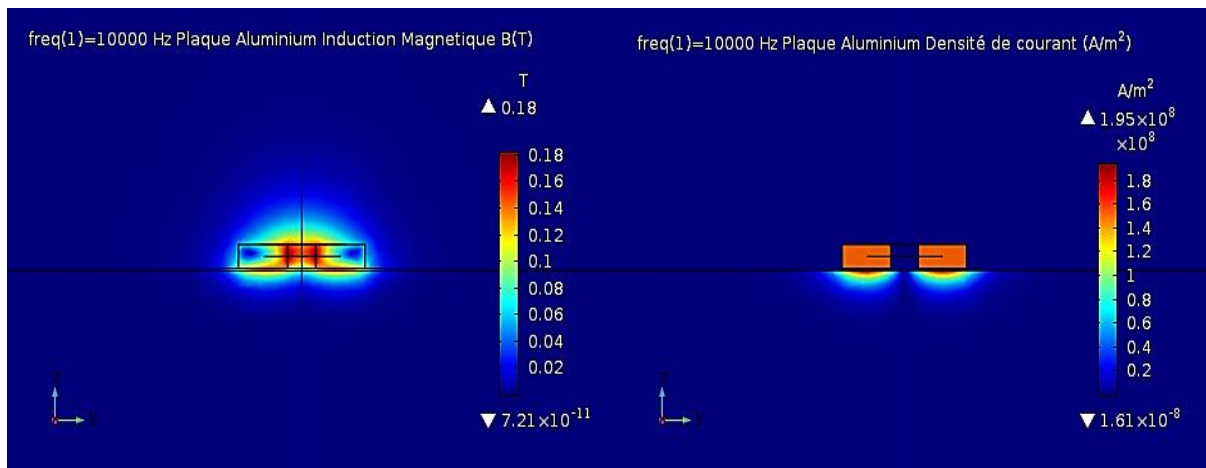


Figure III.19. Module de l'induction magnétique et densité de courant d'une plaque d'aluminium ($\sigma = 3.85 \cdot 10^7$) sans défaut

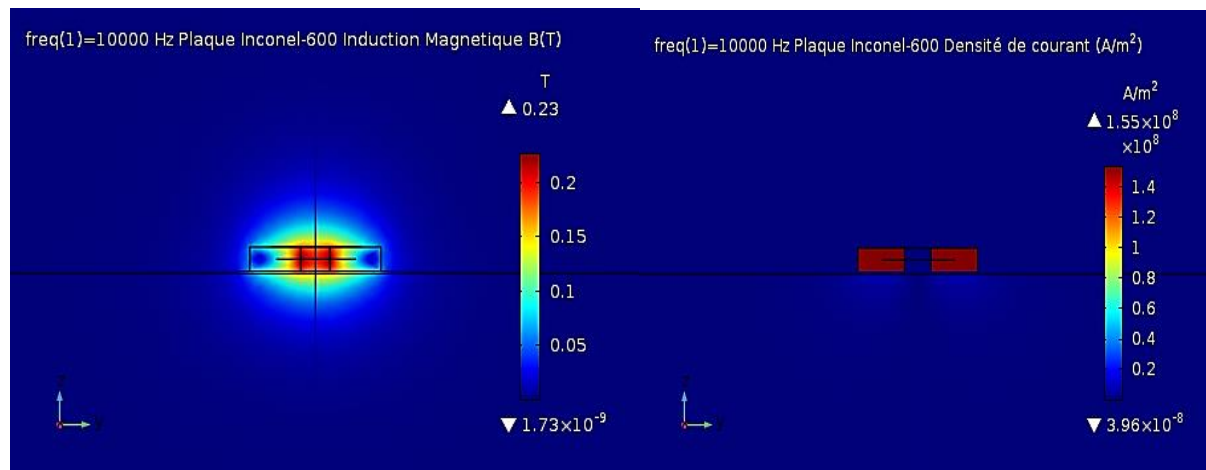
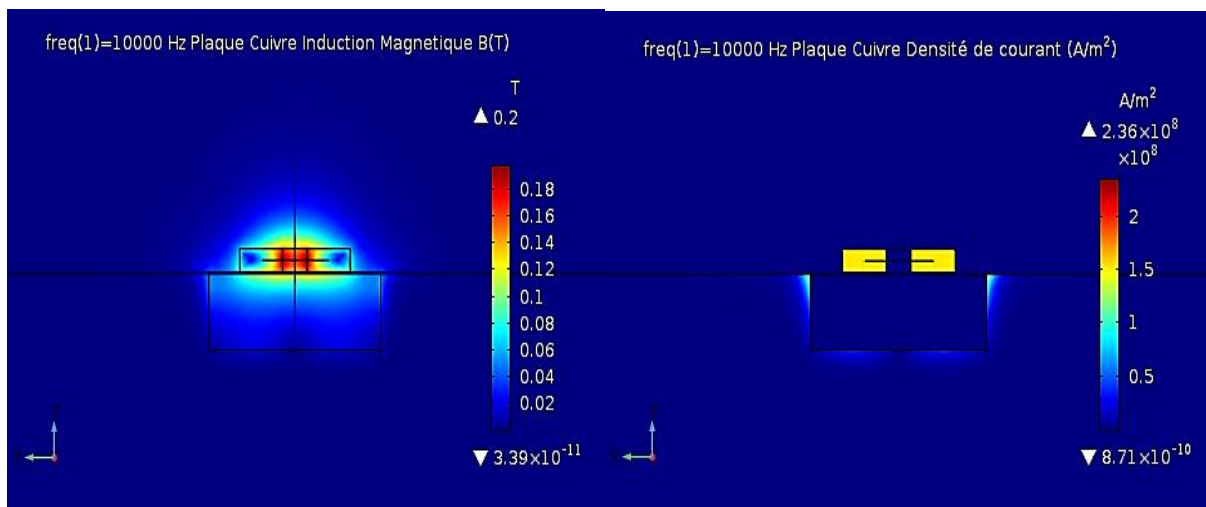


Figure III.20. Module de l'induction magnétique et densité de courant d'une plaque Inconel-600 ($\sigma = 10^6$) sans défaut

❖ Plaques avec défauts



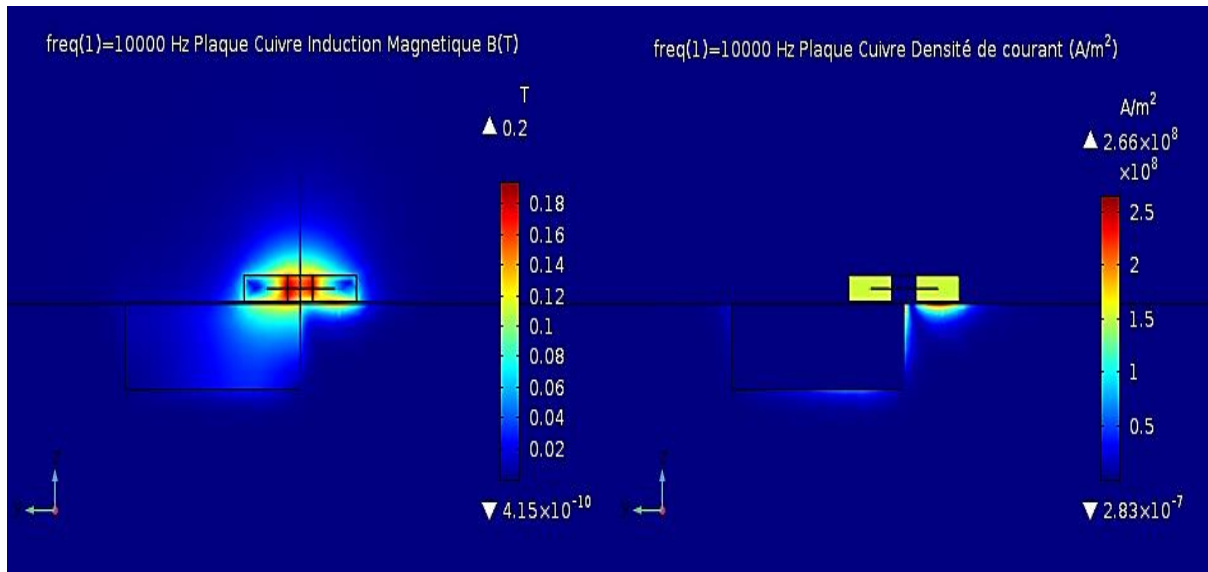


Figure III.21. Module de l'induction magnétique et la densité de courant d'une plaque cuivre avec défaut

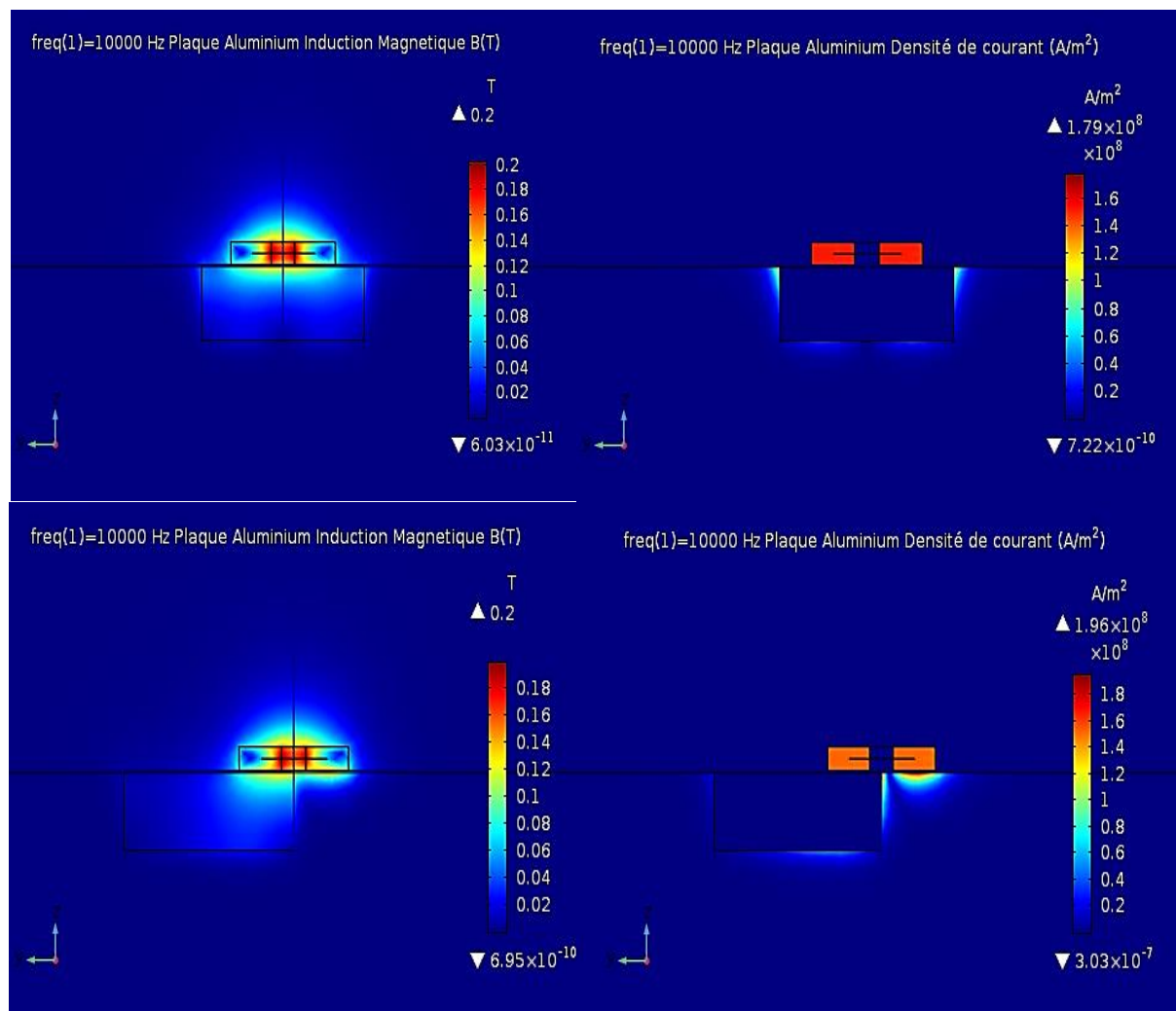


Figure III.22. Module de l'induction magnétique et la densité de courant d'une plaque aluminium avec défaut

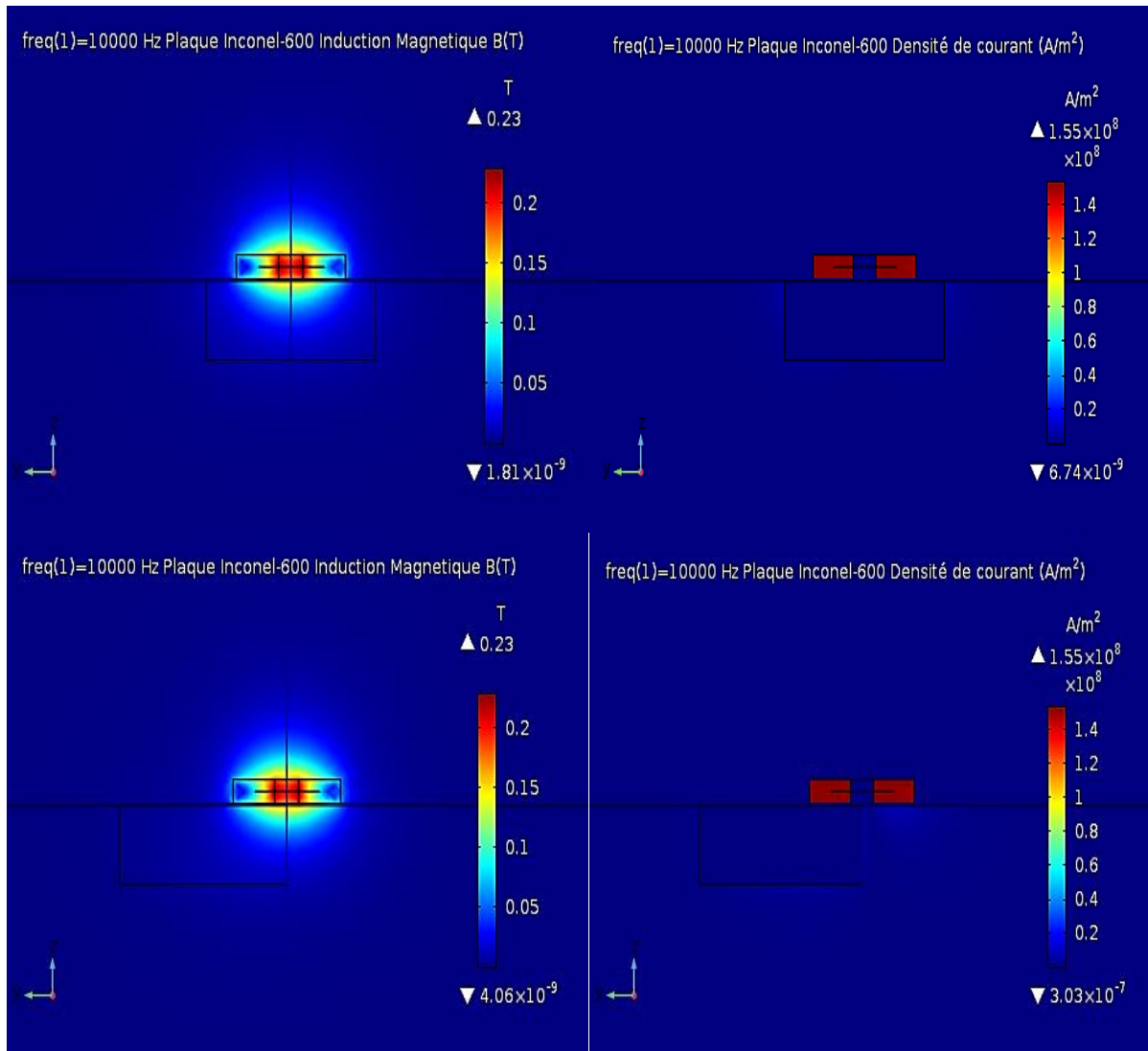


Figure III.23. Module de l'induction magnétique et la densité de courant d'une plaque Inconel-600 ($\sigma = 10^6$) avec défaut.

D'après les résultats de simulations obtenus, nous remarquons que l'amplitude des courants induits augmente lorsque la conductivité électrique de la plaque augmente, et que l'induction magnétique est de plus en plus absorbée dans la plaque conductrice lorsque la conductivité électrique de la plaque diminue.

IV. Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons présenté le dispositif expérimental de mesure et le mode opératoire associé pour l'acquisition du signal de mesure.

Nous avons présenté aussi le logiciel de modélisation et de simulation d'un problème de contrôle à courants de Foucault en 3D, en l'occurrence COMSOL Multiphysics 5.3.a. Toutes les étapes de simulation pour résoudre un type de problème de CND CF ont été détaillées et expliquées.



Chapitre IV

I. Introduction

Dans ce chapitre, tout d'abord on va valider le modèle élaboré sous le logiciel COMSOL Multiphysics 5.3.a. 3D utilisant les éléments finis d'arrêtes. Pour cela, nous avons choisis trois expériences d'un problème de contrôle par courants de Foucault, en l'occurrence le Benchmark TEAM Workshop N°15-1 ainsi qu'une campagne expérimentale réalisée au laboratoire. Ensuite, nous passons à une étape qui précède la phase d'essai qui consiste à identifier les principaux paramètres influant le contrôle. Finalement, nous interprétons et discutons certains résultats obtenus pour l'identification des dimensions d'une fissure dans une plaque conductrice, amagnétique et homogène sur le signal courants de Foucault.

II. Validation

II.1. Première application

Benchmark TEAM Workshop N°15-1

Il s'agit d'une bobine à air qui se déplace au-dessus d'une plaque métallique comportant une fissure débouchante orientée selon l'axe Ox. La fissure et la distance bobine-pièce (lift-off) sont toutes les deux imposées (figures IV.1 et tableau IV.1).

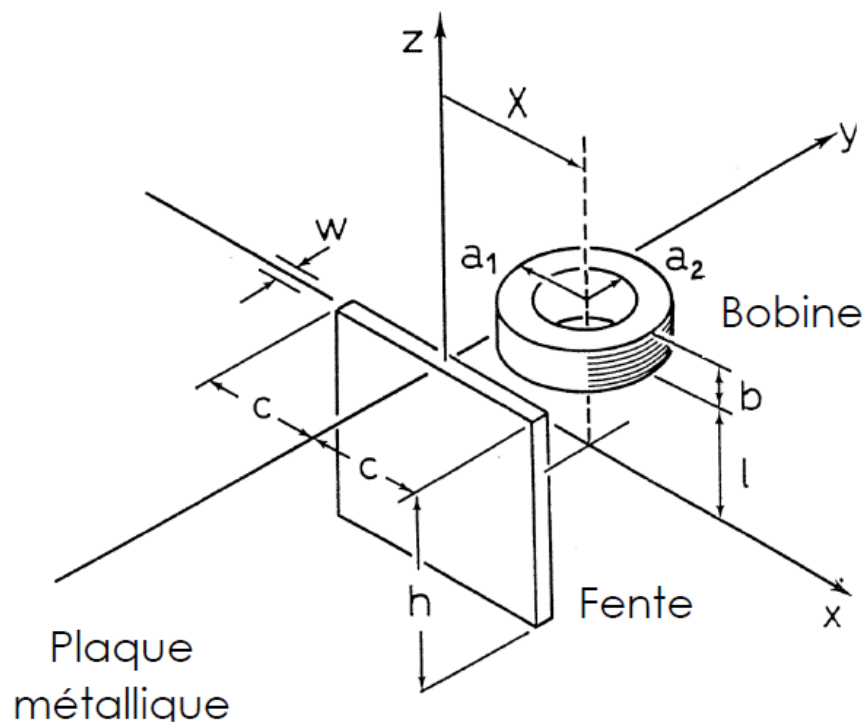


Figure IV.1. Détail du TEAM Workshop Pb N°15-1

Tableau IV.1. Paramètres du problème Benchmark TEAM Workshop Pb N°15-1

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

Le résultat expérimental de ce benchmark donne les variations de la résistance ΔR et de l'inductance ΔL , donc de l'impédance $\Delta Z = Z - Z_0$, de la bobine mesurée en fonction de la position de celle-ci. Z est l'impédance de la bobine en présence de la fissure et Z_0 est l'impédance de la bobine sans fissure.

Le tableau IV.2 et les deux figures IV.2 et IV.3 montrent la validation des résultats de la simulation obtenue.

Tableau IV.2. Variation de la résistance et de la réactance en fonction de la position du capteur

x (mm)	R1	X1	R0	X0	$\Delta R(\Omega)$	ΔX	$\Delta L(\text{mH})$
0	127.6112	1010.1724	127.3711	1007.4318	0.2401	2.7406	0.48
0.5	127.5962	1010.1701	127.3656	1007.4655	0.2306	2.7046	0.4782
1	127.5184	1010.4536	127.4018	1007.4559	0.1166	2.9977	0.5301
1.5	127.4221	1010.8835	127.3786	1007.5065	0.0435	3.377	0.5971
2	127.2909	1011.4037	127.3764	1007.4735	-0.0855	3.9302	0.6950
2.5	127.1092	1012.1036	127.3691	1007.4574	-0.2599	4.6462	0.8216
3	126.9298	1013.0029	127.3594	1007.4143	-0.4296	5.5886	0.9882
3.5	126.7269	1013.7865	127.3555	1007.4533	-0.6286	6.3332	1.1199
4	126.5099	1014.6768	127.3414	1007.4121	-0.8315	7.2647	1.2846
4.5	126.2956	1015.6334	127.3555	1007.4901	-1.0599	8.1433	1.4400
5	126.0960	1016.5816	127.3457	1007.4077	-1.2497	9.1739	1.6223
5.5	125.8807	1017.4118	127.3433	1007.3777	-1.4626	10.0341	1.7744
6	125.7130	1018.1678	127.3552	1007.3849	-1.6422	10.7829	1.9068
6.5	125.5618	1018.8694	127.3172	1007.3332	-1.7554	11.5312	2.0391
7	125.4423	1019.4864	127.3163	1007.3812	-1.874	12.1052	2.1406
7.5	125.3544	1019.9588	127.3087	1007.3401	-1.9543	12.6187	2.2314
8	125.3184	1020.2307	127.2976	1007.3463	-1.9792	12.8844	2.2784
8.5	125.3090	1020.5426	127.2799	1007.3478	-1.9709	13.1948	2.3333
9	125.3414	1020.6137	127.2970	1007.3161	-1.9556	13.2976	2.3515
9.5	125.4070	1020.4349	127.2689	1007.3101	-1.8619	13.1248	2.3209
10	125.4812	1020.2287	127.2696	1007.2166	-1.7884	13.0121	2.3010
10.5	125.5917	1019.9384	127.2498	1007.1953	-1.6581	12.7431	2.2534
11	125.7243	1019.4294	127.2310	1007.2920	-1.5067	12.1374	2.1463
11.5	125.8999	1018.9183	127.2131	1007.1212	-1.3132	11.7971	2.0861
12	126.1042	1018.2737	127.2154	1007.0838	-1.1112	11.1899	1.9788
12.5	126.3244	1017.4536	127.1916	1007.0375	-0.8672	10.4161	1.8419
13	126.5277	1016.6232	127.1766	1006.9254	-0.6489	9.6978	1.7149
13.5	126.7402	1015.7513	127.1513	1006.9340	-0.4111	8.8173	1.5592
14	126.9491	1014.8584	127.1264	1006.8168	-0.1773	8.0398	1.4217
14.5	127.1338	1013.8731	127.1029	1006.7444	0.0309	7.1287	1.2606
15	127.2882	1013.0155	127.0741	1006.6932	0.2141	6.3223	1.1180
15.5	127.4212	1012.0084	127.0431	1006.5767	0.3781	5.4317	0.9605
16	127.5510	1011.1276	127.0293	1006.5089	0.5217	4.6187	0.8167
16.5	127.5941	1010.3415	127.0360	1006.3849	0.5581	3.9566	0.6996
17	127.6468	1009.5312	127.0074	1006.2862	0.6394	3.245	0.5738
17.5	127.6564	1008.8618	126.9797	1006.0545	0.6767	2.8073	0.4964
18	127.6104	1008.1963	126.9495	1005.9225	0.6609	2.2738	0.4020
18.5	127.5841	1007.6835	126.9359	1005.7398	0.6482	1.9437	0.3437
19	127.5312	1007.0296	126.9149	1005.6775	0.6163	1.3521	0.2391
19.5	127.4606	1006.5208	126.9376	1005.5153	0.523	1.0055	0.1778
20	127.4251	1006.2744	126.9476	1005.0980	0.4775	1.1764	0.2080
20.5	127.3732	1005.6645	126.9528	1005.0467	0.4204	0.6178	0.1092
21	127.3110	1005.2439	126.9523	1004.7391	0.3587	0.5048	0.0892
22	127.2681	1004.4675	126.9969	1004.0190	0.2717	0.4485	0.0793

R1 : Résistance (plaque avec défaut) (Ω) / X1 : Réactance (plaque avec défaut) (Ω)
 R0 : Résistance (plaque sans défaut) (Ω) / X0 : Réactance (plaque sans défaut) (Ω)

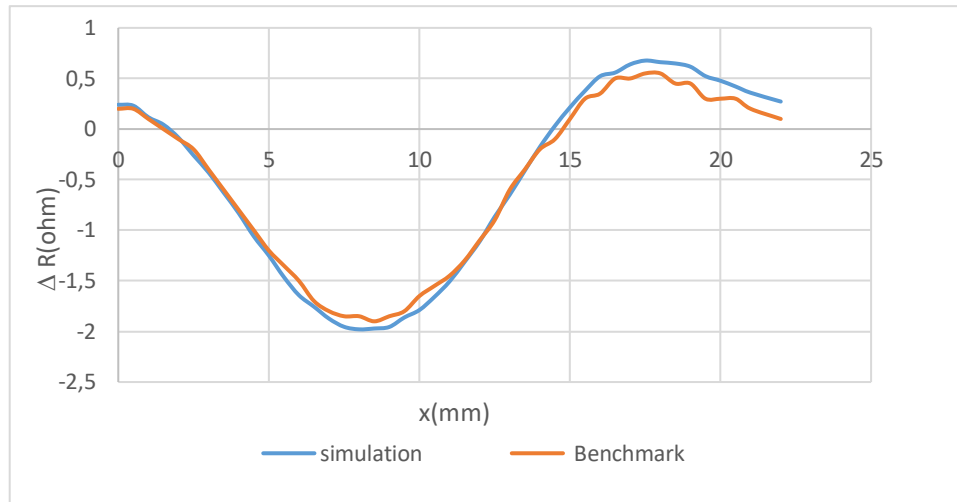


Figure IV.2. Variation de la résistance en fonction du déplacement du capteur

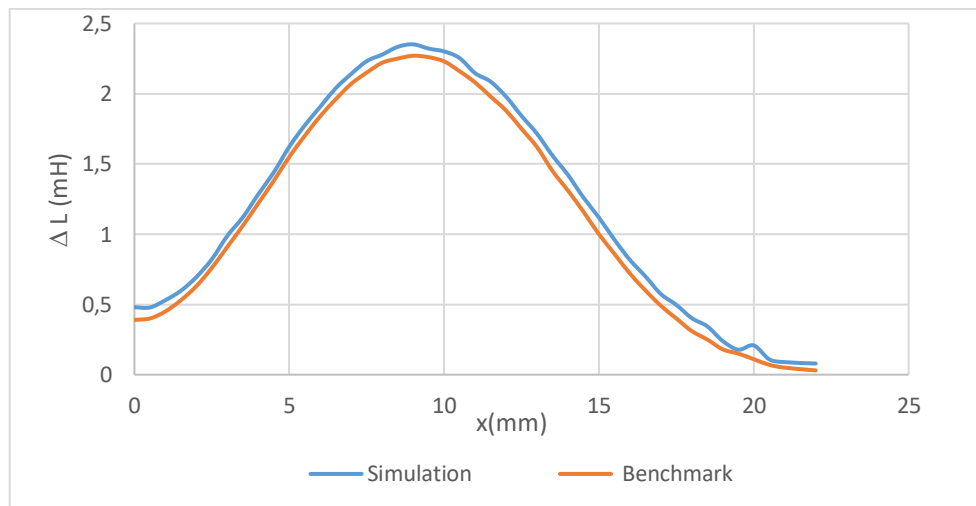


Figure IV.3. Variation de l'inductance en fonction du déplacement du capteur

Dans cette section nous avons confronté les résultats expérimentaux avec les résultats numériques de simulations 3D. Nous constatons que le calcul numérique correspond bien à celui obtenu expérimentalement.

II.2. Deuxième application [HAM 12]

Cette expérience a été effectuée par HAMEL (laboratoire du génie électrique LGE de l'UMMTO) sur une cible en cuivre avec défaut. Le système utilisé comprend :

- Un LCR mètre 8101_G (Gw INSTEK) fonctionnant sur une gamme de fréquence 20Hz - 1MHz.
- Une sonde à noyau d'air.
- Deux plaques en cuivre comportant deux défauts.

Les caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système sont portées dans le tableau suivant :

Tableau IV.3. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système.

LGE - UMMTO [HAM 12]	
Capteur	Nombre de spires : 170
	Rayon intérieur : 2.35mm
	Rayon extérieur : 4.5mm
	Hauteur : 2.2mm
	Conductivité électrique : $5,8 \cdot 10^7$
	Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^7$
Charge	Longueur : 110mm
	Largeur : 60mm
	Epaisseur : 4mm
	Conductivité électrique : $5.81 \cdot 10^7$
	Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^7$
Défauts	Longueur : 12mm et 8mm
	Largeur : 2mm
	Profondeur : 1.3mm

Les deux figure (IV.4 et IV.5) représentent la variation absolue de l'impédance du capteur, définie par :

$$\Delta Z = \|Z - Z_0\|$$

Où Z et Z_0 représentent respectivement l'impédance du capteur en présence et en absence de la fissure.

Les valeurs numériques de la variation absolue de l'impédance ont été comparées à celles relevées en expérience.

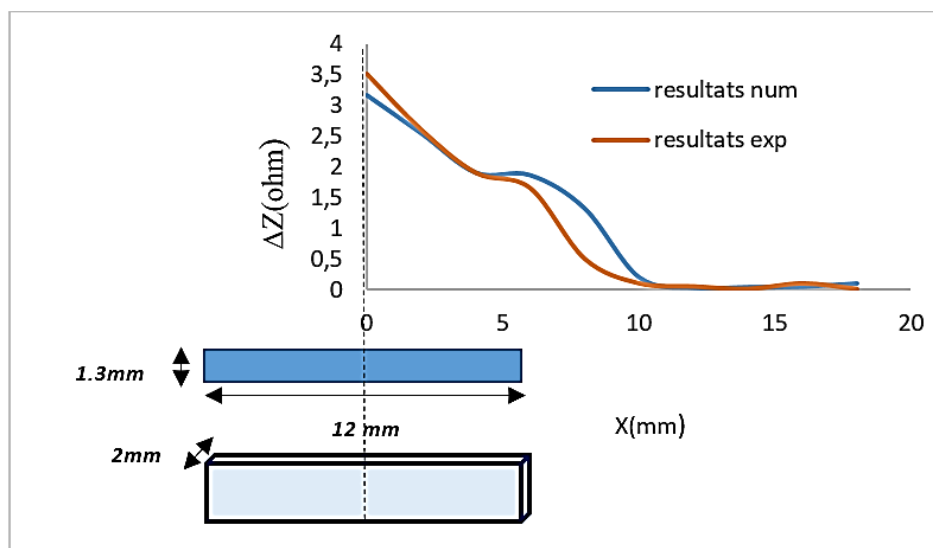


Figure IV.4. Variation absolue de l'impédance (longueur de défaut = 12mm) en fonction de la position de bobine

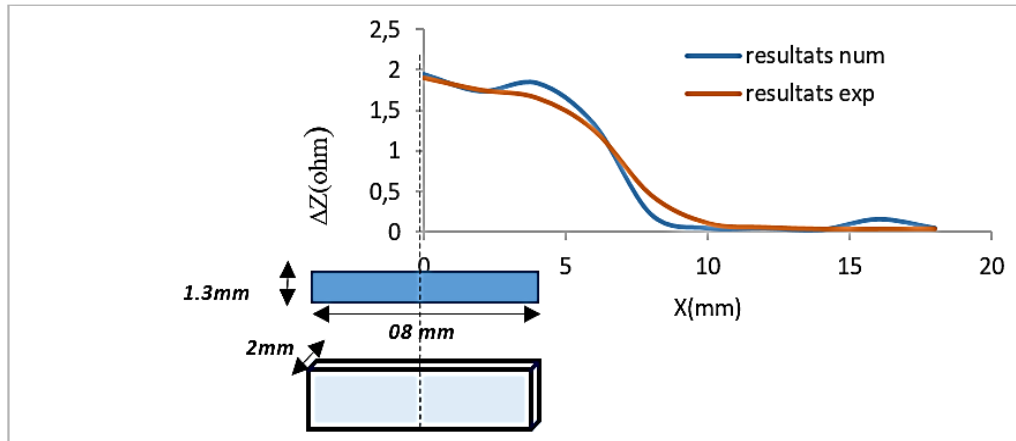


Figure IV.5. Variation absolue de l'impédance (longueur de défaut =8mm) en fonction de la position de bobine.

Les résultats de nos calculs COMSOL Multiphysics sont en très bonne concordance avec les données expérimentales. Cependant, un décalage des résultats est constaté, à notre avis, ceci est dû à la difficulté de mesurer les dimensions du défaut exacte lors de l'expérimentation.

II.3. Troisième application

Des acquisitions ont été réalisés au sein du laboratoire de physique des matériaux de l'université de Laghouat LPM. Il s'agit d'une bobine à air qui se déplace au-dessus de plaques conductrices amagnétiques (cuivre et aluminium) comportant des fissures débouchantes orientées selon l'axe Ox. Pour cela, six fentes parallélépipédiques, de différentes dimensions, simulant des fissures réelles sur des plaques en cuivre et en aluminium ont été réalisées au laboratoire.

Les dimensions géométriques et physiques de chaque élément du dispositif sont listées ci-après :

Tableau IV.4. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du capteur.

LPM-Laghouat	
Capteur	<i>Nombre de spires :800</i>
	<i>Rayon intérieur :1mm</i>
	<i>Rayon extérieur :4.5mm</i>
	<i>Hauteur :1.5mm</i>
	<i>Conductivité électrique :5,8 10⁷</i>
	<i>Perméabilité magnétique :4π 10⁷</i>

Tableau IV.5. Caractéristiques géométriques des fentes.

<i>Plaque 1(Cuivre)</i>	<i>Fissure N° 01</i>	<i>Longueur : 12mm</i>	
		<i>Largeur : 1mm</i>	
		<i>Profondeur : 0.9</i>	
<i>Fissure N° 02</i>		<i>Longueur : 12mm</i>	
		<i>Largeur : 1mm</i>	
		<i>Profondeur : 1.75</i>	
<i>Plaque 2(Aluminium)</i>	<i>Fissure N° 03</i>	<i>Longueur : 10mm</i>	
		<i>Largeur : 0.5mm</i>	
		<i>Profondeur : 1mm</i>	
	<i>Fissure N° 04</i>		<i>Longueur : 10mm</i>
			<i>Largeur : 0.5mm</i>
			<i>Profondeur : 2.75mm</i>
	<i>Fissure N° 05</i>		<i>Longueur : 15mm</i>
			<i>Largeur : 0.5mm</i>
			<i>Profondeur : 1.5mm</i>
	<i>Fissure N° 06</i>		<i>Longueur : 14mm</i>
			<i>Largeur : 1mm</i>
			<i>Profondeur : 5mm</i>

II.3.1. Essai N° 01

Les figures suivantes montrent les résultats de la variation de l'impédance du capteur en fonction de déplacement de ce dernier sur une plaque de cuivre comportant deux fentes parallélépipédiques pour une fréquence d'excitation de 10 kHz et un lift-off de 0.14mm.

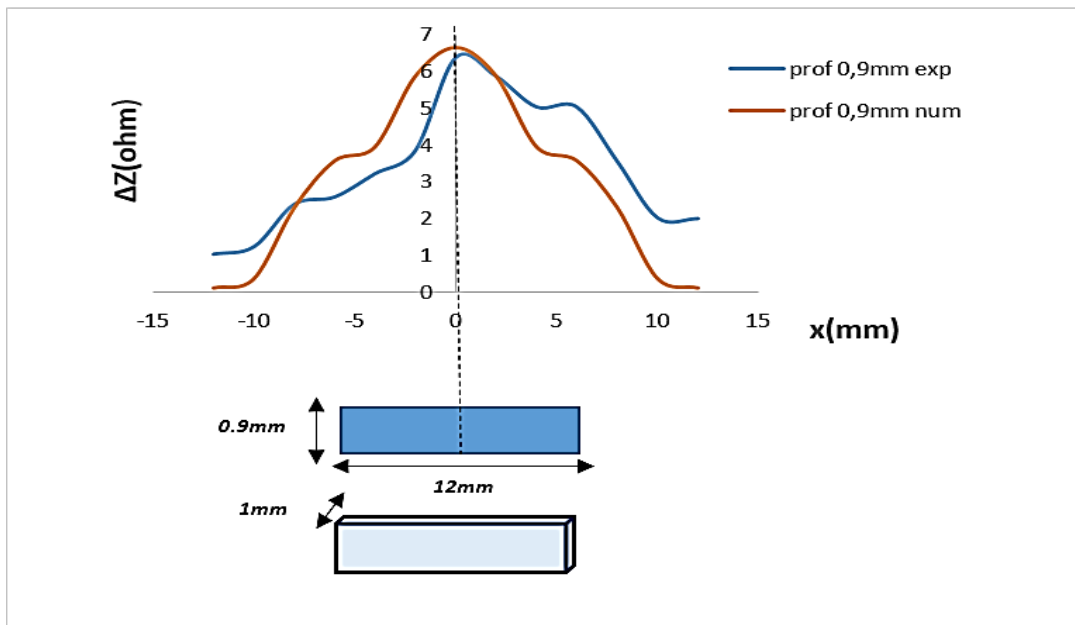


Figure IV.6. Variation absolue de l'impédance (fissure N° 01) en fonction de la position de bobine

II.3.2. Essai N° 02

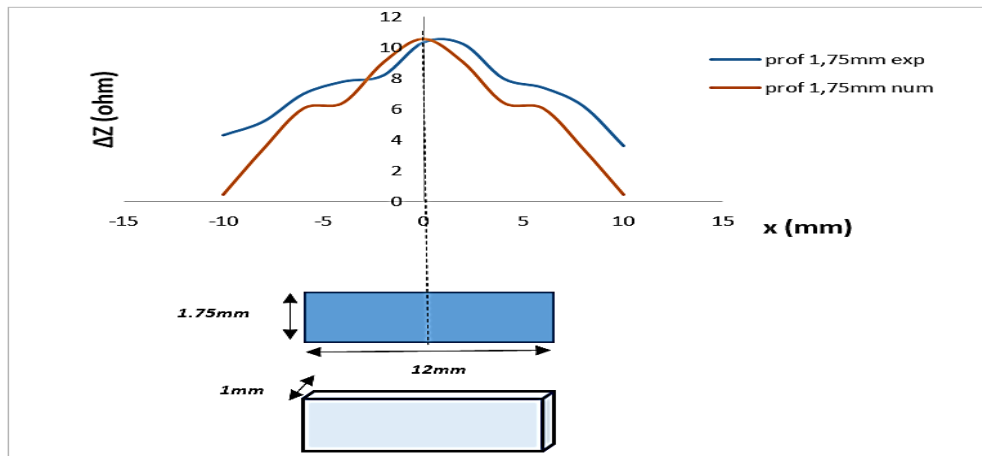


Figure IV.7. Variation absolue de l'impédance (fissure N° 02) en fonction de la position de bobine.

En comparant les résultats de fissure N°1 et fissure N°2, on peut dire que nous pouvons voir l'effet de profondeur du défaut (0.9mm, 1.75mm) sur le signal de Foucault.

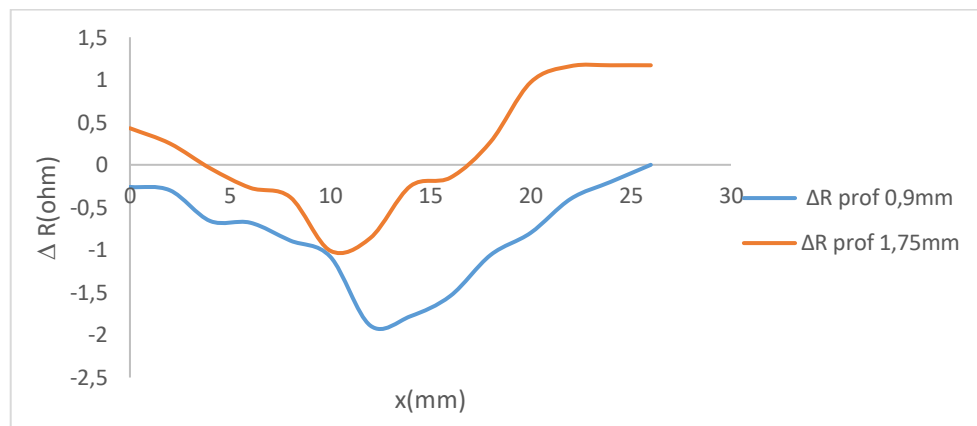


Figure IV.8. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour deux valeurs de la profondeur du défaut : (0.9mm, 1.75mm).

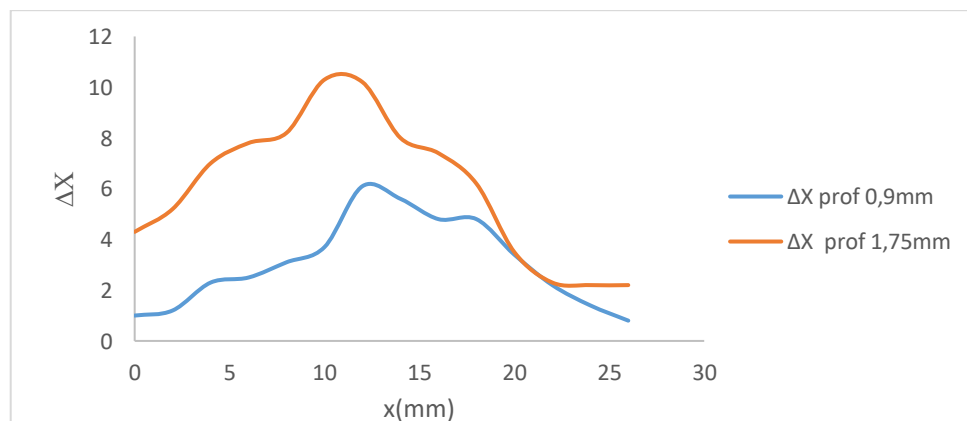


Figure IV.9. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour deux valeurs de la profondeur du défaut : (0.9mm, 1.75mm).

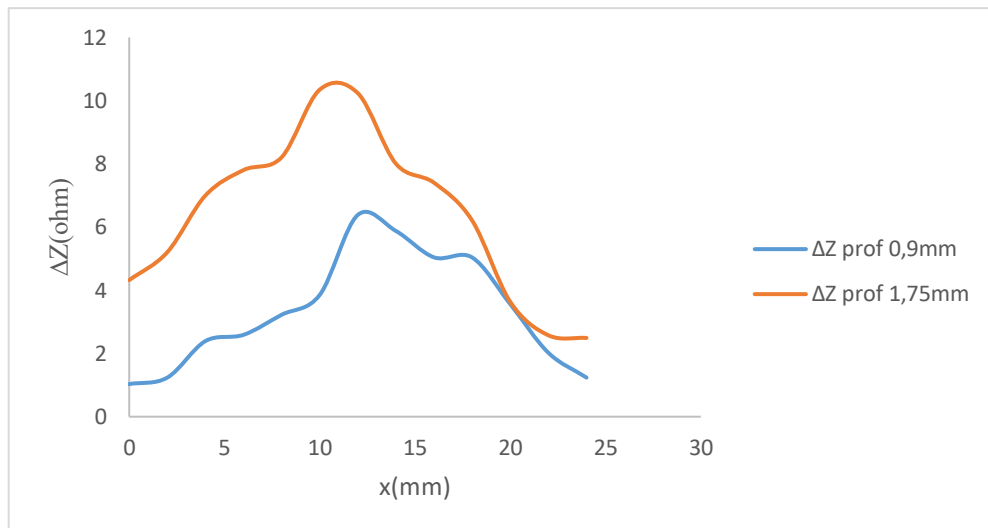


Figure IV.10. Variation absolue de l'impédance en fonction de la position du capteur pour deux valeurs de la profondeur du défaut : (0.9mm, 1.75mm).

II.3.3. Essai N° 03

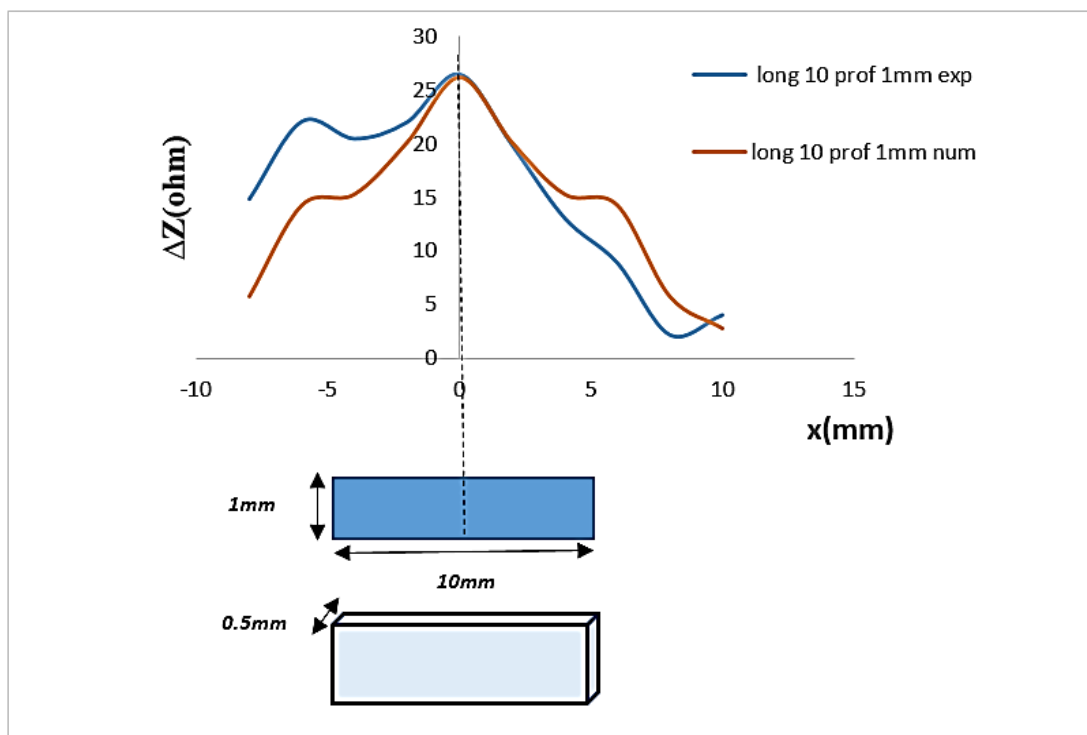


Figure IV.11. Variation absolue de l'impédance (fissure N° 03) en fonction de la position de bobine

II.3.4. Essai N° 04

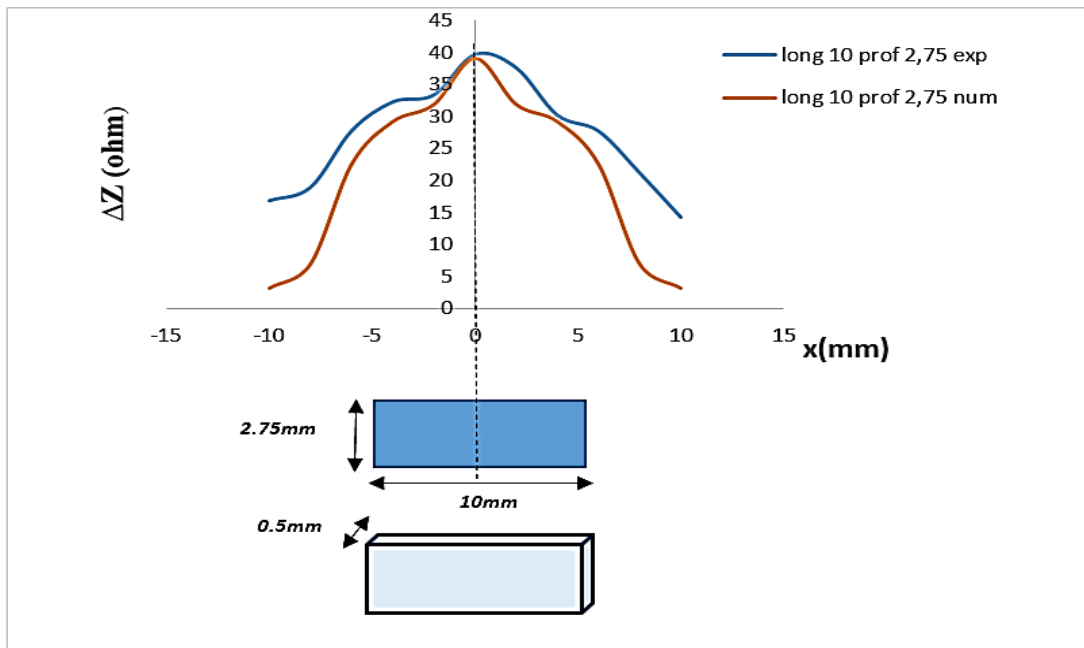


Figure IV.12. Variation absolue de l'impédance (fissure N° 04) en fonction de la position de bobine.

II.3.5. Essai N° 05

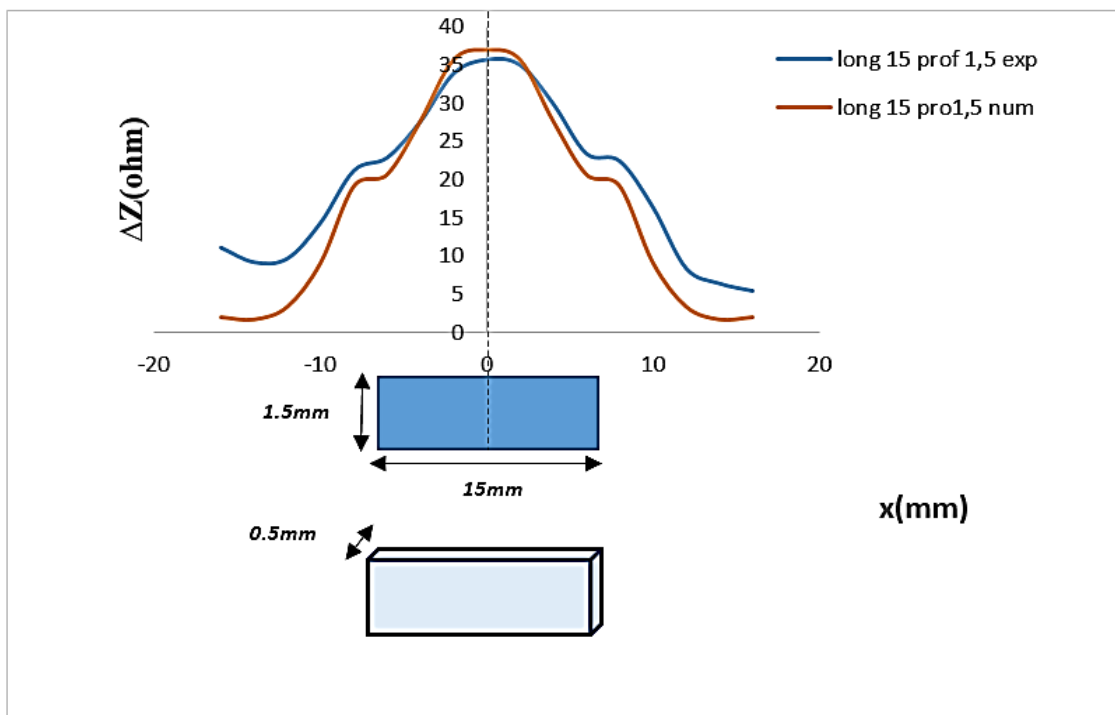


Figure IV.13. Variation absolue de l'impédance (fissure N° 05) en fonction de la position de bobine

En comparant les résultats de fissure N°3 et fissure N°4, on peut dire que nous pouvons voir l'effet de profondeur défaut (0.9mm, 1.75mm) sur le signal de Foucault.

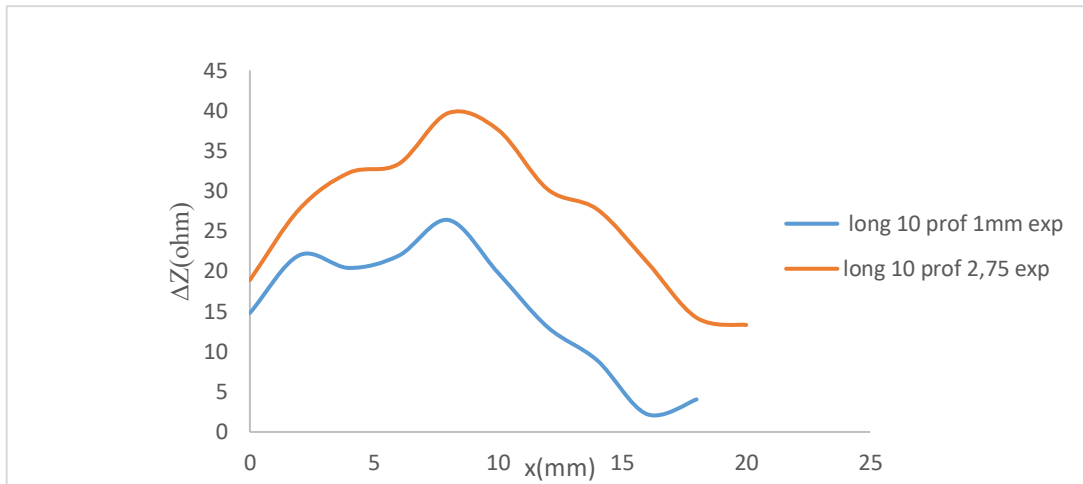


Figure IV.14. Variation absolue de l'impédance en fonction de la position du capteur pour deux valeurs de la profondeur du défaut : (1mm, 2.75mm).

II.3.6. Essai N° 06

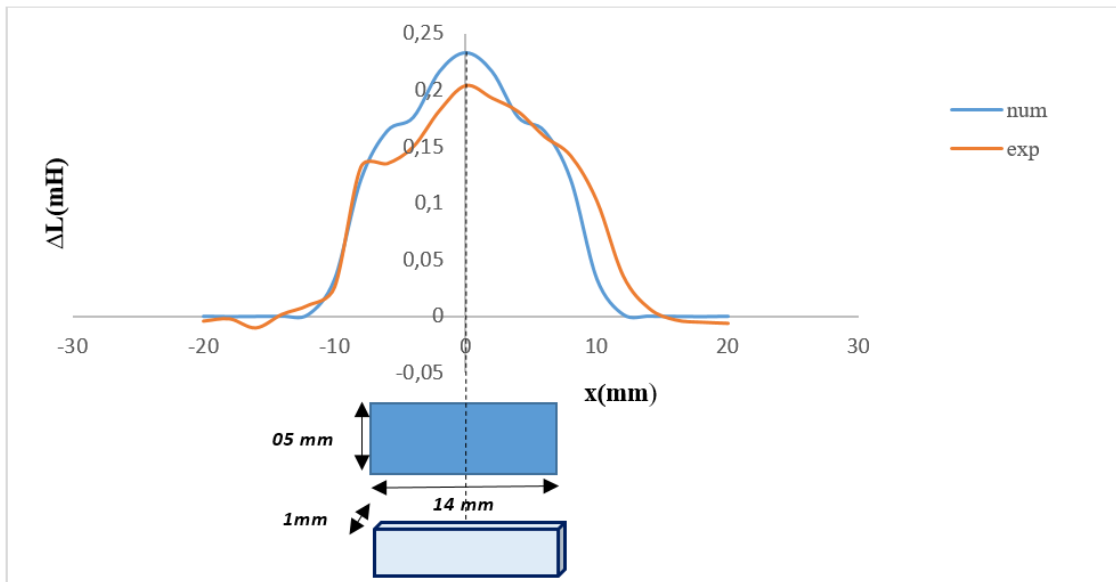


Figure IV.15. Variation de l'inductance en fonction de la position du capteur

Les résultats de nos calculs par COMSOL Multiphysics sont en très bonne concordance avec les données expérimentales. Cependant, un décalage des résultats est constaté, à notre avis, ceci est dû à une mauvaise estimation des dimensions du défaut qui n'a pas été pris en considération durant l'expérience due à la difficulté de ces mesures.

Après avoir validé le modèle élaboré sous le logiciel COMSOL Multiphysiques 5.3.a. 3D, nous étudions l'effet du lift-off et de la fréquence sur les signaux courants de Foucault expérimentalement avant de passer aux simulations, nous avons appliqué le contrôle sur la plaque N° 03 (Fissure N° 06). Les résultats sont illustrés ci-dessous :

II.3.6.1. Effet de lift_off

La fréquence d’excitation étant fixée à 100kHz. La figure III.24 et III.25, représente la variation de la résistance, la réactance et la variation absolue de l’impédance du capteur pour différentes valeurs de la distance entre la pièce à contrôler et le capteur (lift off), soient 0.14mm, 0.28mm, 0.56mm 0.7mm et 0.84mm.

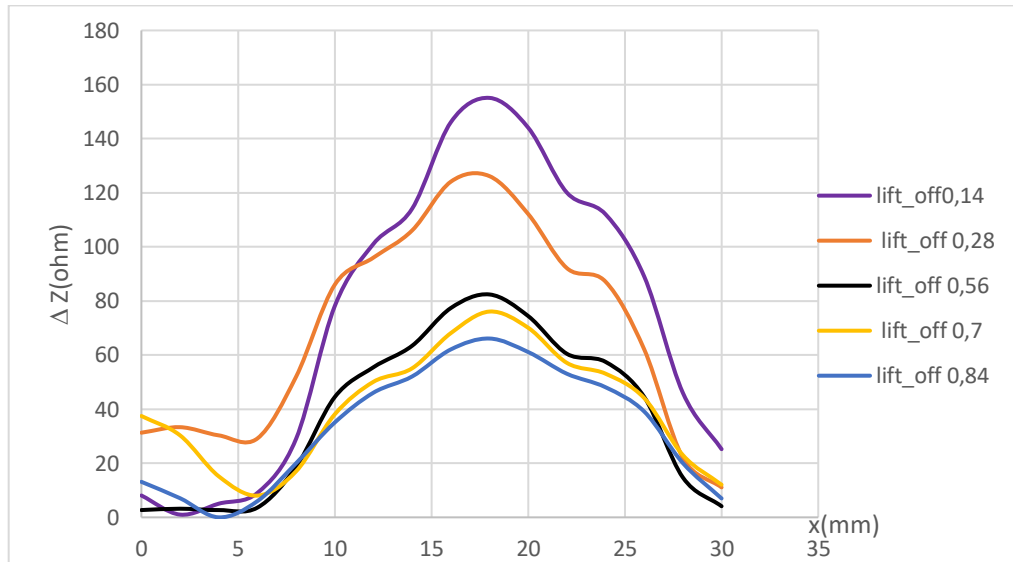


Figure IV.16. Variation de l’impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différents lift_off.

II.3.6.2. Effet de la fréquence

Dans la figure suivante est présentée les variations de l’impédance du capteur en fonction de déplacement pour différentes fréquences d’excitations (10khz, 20khz, 35khz, 50khz,100khz) enregistrées avec le dispositif expérimental.

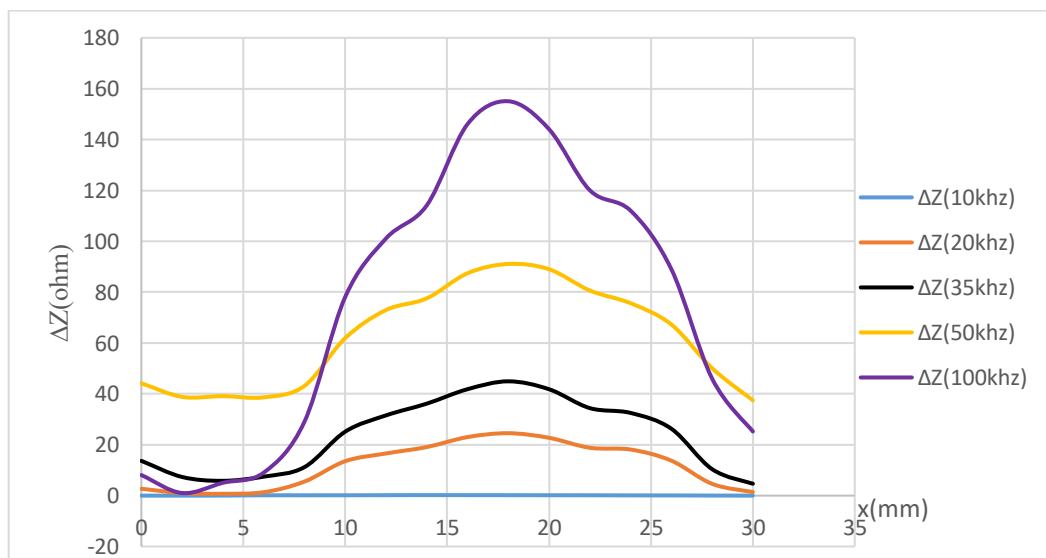


Figure IV.17. Variation de l’impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences.

III. Résultats et discussions

Les résultats qui seront expliqués ci-dessous sont ceux de la simulation du modèle tridimensionnelle élaboré sous le logiciel COMSOL Multiphasiques 5.3.a. Tout d'abord, nous allons commencer par la première étape qui précède la phase d'essai qui consiste à identifier les principaux paramètres influant le contrôle, l'objectif réel de cette étape est d'optimiser les paramètres opératoires du contrôle pour aboutir à des résultats fiables. Ensuite, nous interprétons et discutons certains résultats obtenus pour étudier l'influence de changement des dimensions d'une fissure dans une plaque conductrice, amagnétique et homogène sur le signal de courants de Foucault.

Les caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système sont listées dans le tableau suivant :

Tableau IV.6. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système

Capteur	<i>Nombre de spires : 800</i>
	<i>Rayon intérieur : 4.5mm</i>
	<i>Rayon extérieur : 1mm</i>
	<i>Hauteur : 1.5mm</i>
	<i>Conductivité électrique de fil celle de cuivre : 5.81×10^7</i>
	<i>Perméabilité magnétique : $4\pi \times 10^{-7}$</i>
Charge	<i>Longueur : 120mm</i>
	<i>Largeur : 103mm</i>
	<i>Epaisseur : 20mm</i>
	<i>Conductivité électrique(plaque Aluminium) : 3.85×10^7</i>
	<i>Perméabilité magnétique : $4\pi \times 10^{-7}$</i>
Défauts	<i>Longueur : 14mm</i>
	<i>Largeur : 1mm</i>
	<i>Profondeur : 5mm</i>

III.1. Principaux paramètres influant le contrôle

La procédure d'inspection nécessite un ensemble de connaissances sur les propriétés physiques des matériaux, sur les phénomènes électromagnétiques ainsi que sur les défauts et les pièces inspectées.

Les principaux paramètres influant le contrôle peuvent se répartir en pratique en trois catégories :

III.1.1. Effet de la conductivité du matériau

Pour une profondeur du défaut égale à 0.14 mm et une fréquence de 10 kHz, la figure III.18, III.19 et III.20 illustre la variation de la résistance, la réactance, l'impédance et la variation absolue de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : AISI 304L ($\sigma = 1.41 \cdot 10^6$), Aluminium ($\sigma = 3.85 \cdot 10^7$) et le Cuivre ($\sigma = 5.9 \cdot 10^7$).

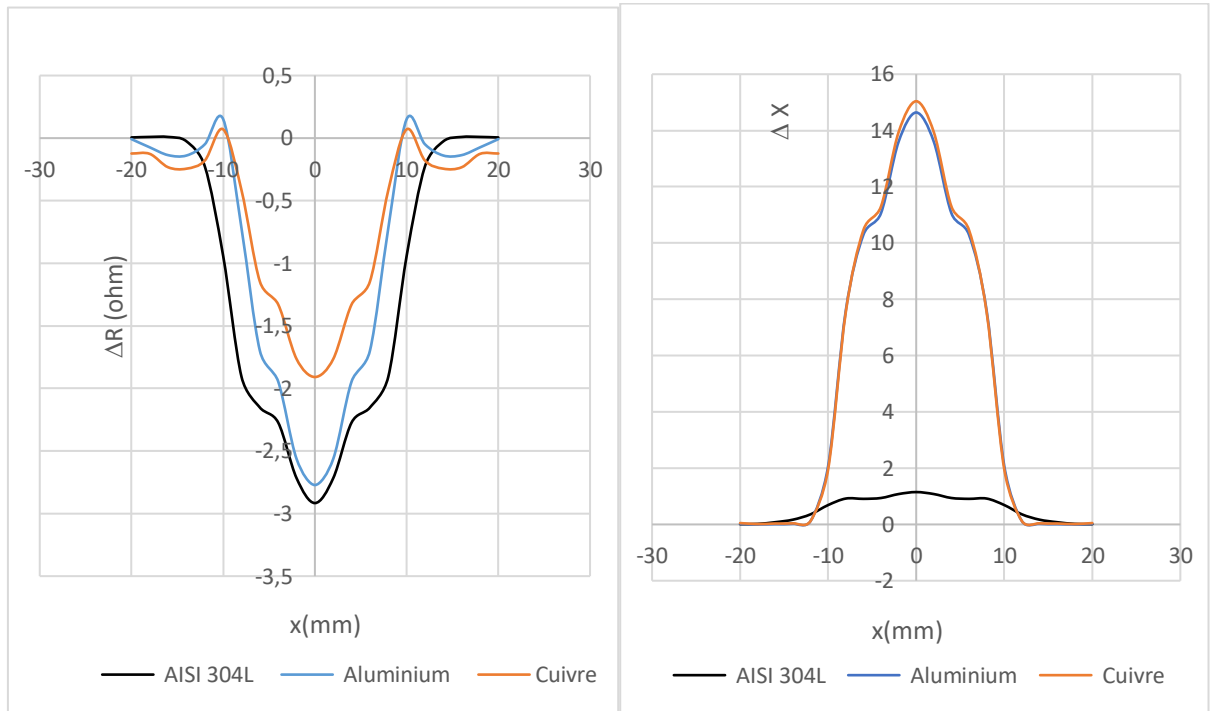


Figure IV.18. Variation de la résistance et de la réactance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux

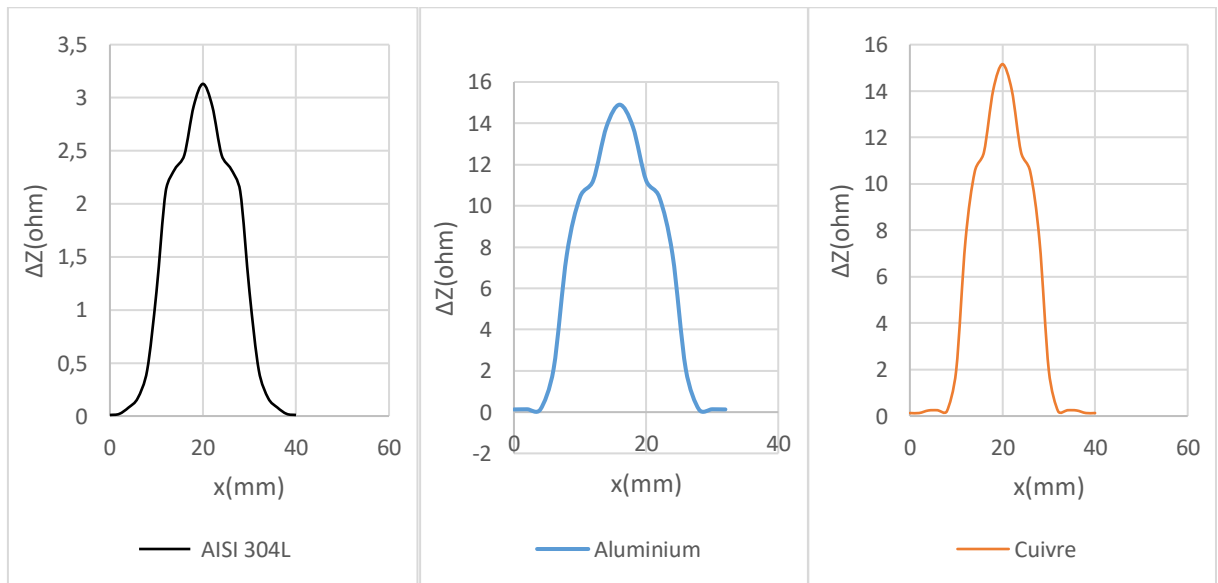


Figure IV.19. Variation absolue de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux

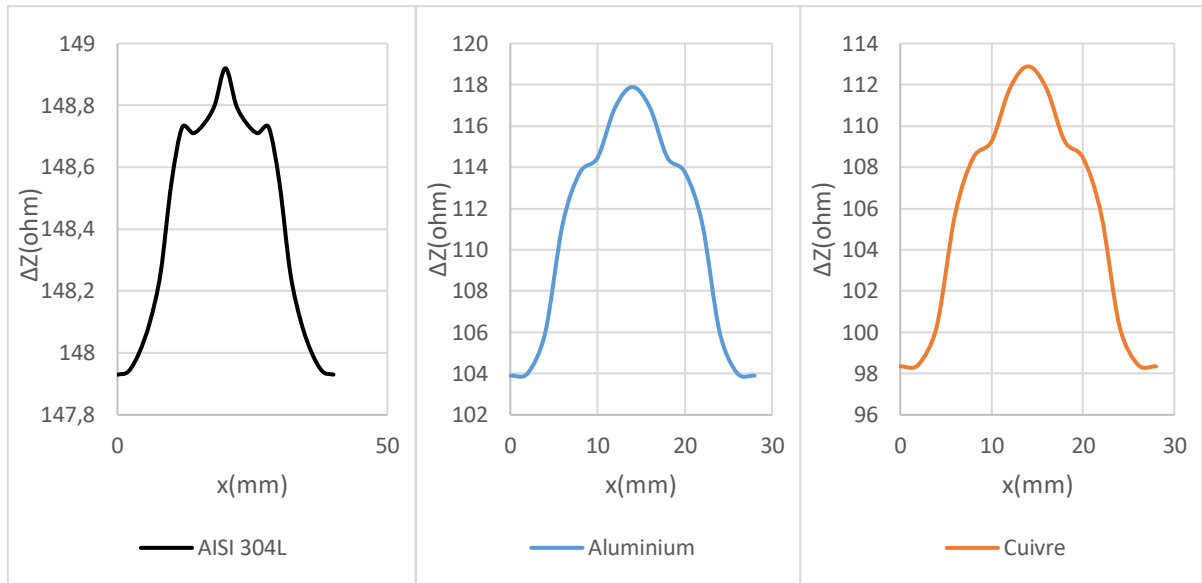


Figure IV.20. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux.

En comparant les courbes, nous constatons que la variation de l'impédance est importante pour une cible en AISI 304L ($\sigma = 1.41 \cdot 10^6$), elle diminue avec l'augmentation de la conductivité. Donc l'impédance du capteur est inversement proportionnelle à la conductivité du matériau. Mais on remarque aussi que la variation de l'impédance absolue augmente avec l'augmentation de la conductivité, alors la variation absolue de l'impédance est importante pour une cible en Cuivre ($\sigma = 5.9 \cdot 10^7$).

L'impédance du capteur change avec la variation du flux magnétique réfléchi, ce flux émanant des courants de Foucault induits dans la pièce à contrôler en fonction de ses propriétés géométriques, électromagnétiques et de sa position par rapport au capteur.

III.1.2. Paramètres liés au montage

Ils gouvernent le couplage entre le capteur et le matériau : il s'agit de la position du capteur par rapport à la surface de la pièce (lift-off).

Les figures IV.9, IV.10 et IV.11, représentent la variation de la résistance, de la réactance et de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents lift_off (0.14mm, 0.28mm, 0.5mm, 0.7mm, 0.84mm, 1mm). La fréquence d'excitation est 10 kHz.

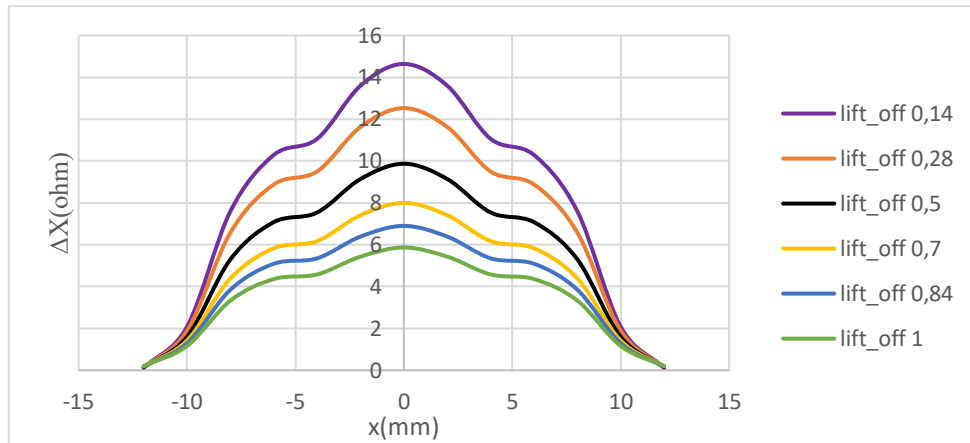


Figure IV.21. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différentes lift_off.

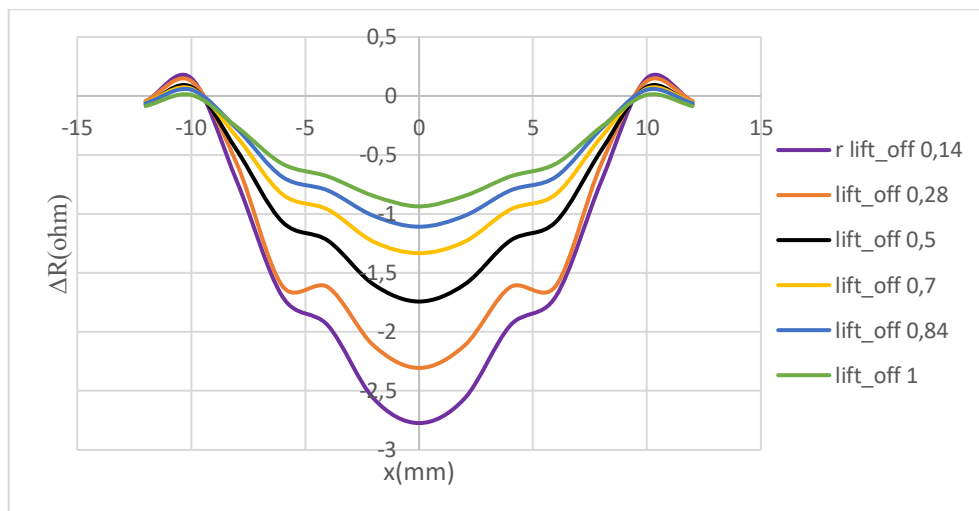


Figure IV.22. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différentes lift_off.

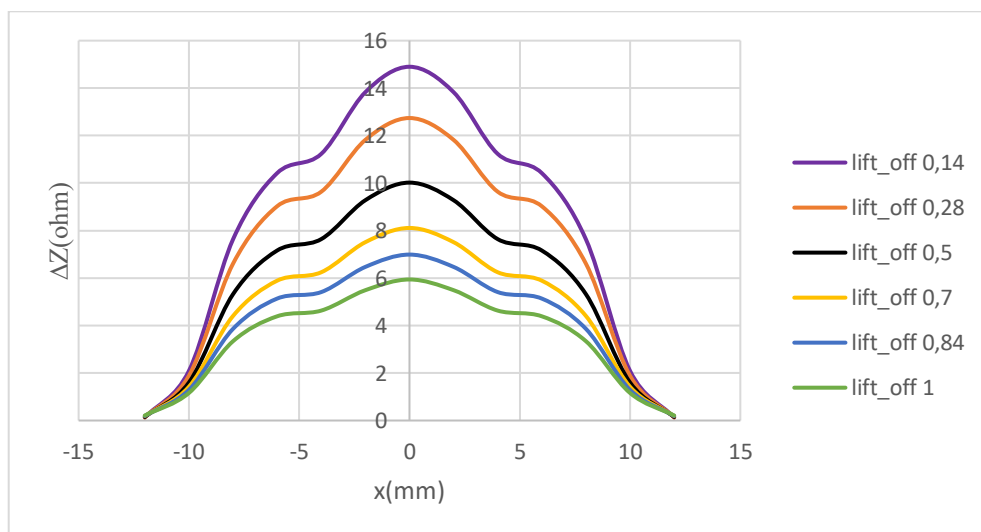


Figure IV.23. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes lift_off

La distance entre la plaque et le capteur influe sur la qualité du signal, plus le capteur s'approche de la plaque, plus l'intensité des courants de Foucault est importante et plus la variation de l'impédance est importante.

Le lift off décrit la distance séparant la plaque à inspecté du capteur et qui réalise le couplage magnétique entre eux. L'augmentation du lift off engendre une diminution de l'influence de la plaque sur le capteur, par conséquent l'impédance du capteur tend vers son impédance à vide (en absence de la cible).

Les variations du lift-off provoquent des fluctuations de l'impédance qui peuvent prendre une amplitude telle qu'elles masqueront les indications caractéristiques du défaut.

III.1.3. Paramètres électriques

C'est principalement la fréquence d'excitation du capteur qui sera choisie en fonction d'un ensemble de considérations. Le plus important est d'obtenir l'effet de peau approprié en ce qui concerne la profondeur des défauts.

Pour montrer l'effet de la fréquence sur la distribution des courants induits, nous traçons les figures suivantes pour des fréquences de : 10kHz, 20kHz, 35kHz, 50 kHz et 100 kHz. La figure IV.7 et IV.8, représente la variation de la résistance, la réactance et l'impédance en fonction de la position du capteur. Le lift_off=0.14mm.

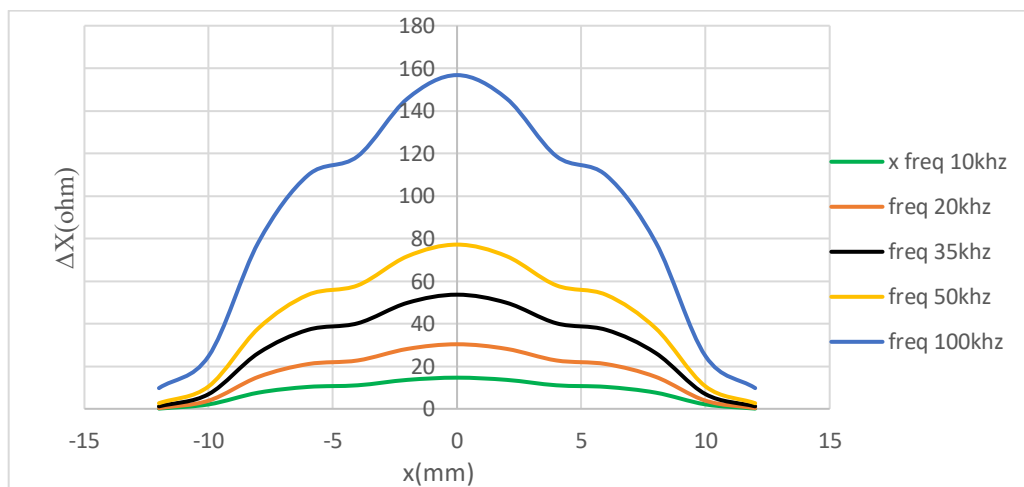


Figure IV.24. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences.

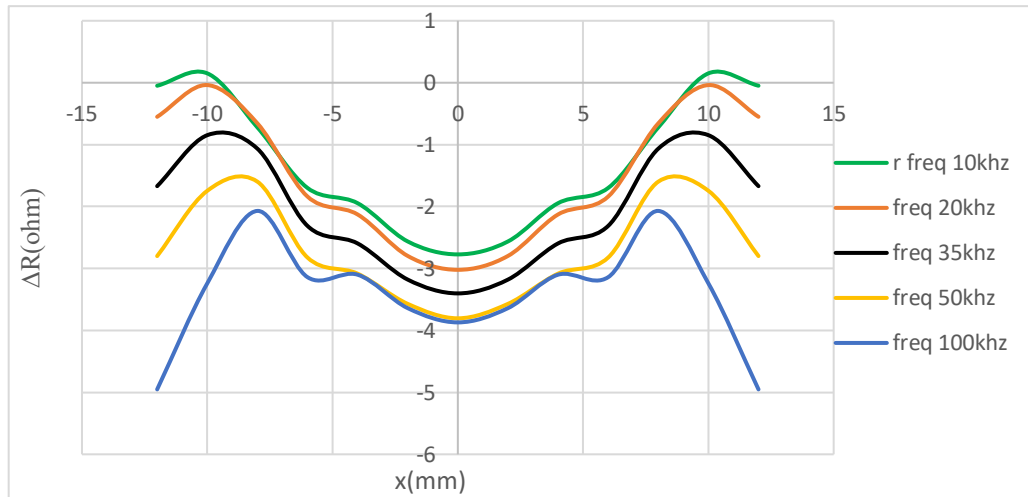


Figure IV.25. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences.

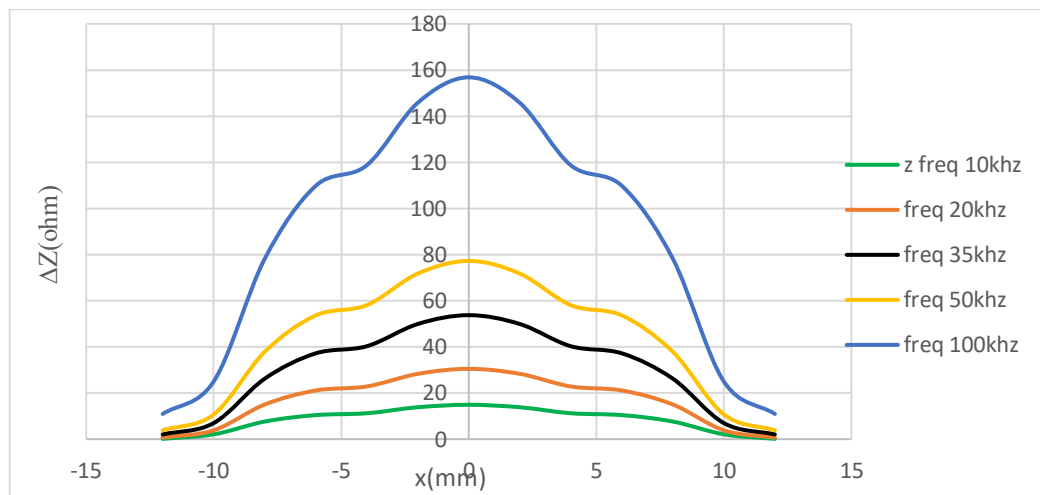


Figure IV.26. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences.

L'analyse de figure IV-25 montre que la variation de l'impédance augmente en augmentant la fréquence, elle atteint son maximum au milieu du défaut et diminue considérablement jusqu'à ce qu'elle s'annule en s'approchant de la zone saine. Nous pouvons donc dire que la détection est meilleure en montant en fréquence pour une fissure débouchante.

Dans les systèmes de CND-CF, la fréquence de travail du capteur influence fortement la densité et la répartition des courants induits dans le dispositif à tester. De plus, les courants induits sont à l'origine de la variation de l'impédance aux bornes du capteur; ainsi, plus la fréquence est élevée, plus le changement d'impédance de la sonde est important. Par conséquent, la sensibilité des capteurs est fortement liée à la fréquence et doit être soigneusement étudiée.

III.2. Effet des dimensions de la fissure sur le signal CF

Dans cette section, nous allons étudier l'effet du changement de dimensions de la fissure sur le signal des courants de Foucault (la résistance, la réactance et l'impédance d'un capteur).

III.2.1. Effet de la longueur du défaut

Nous présentons sur les figures IV.13, 14 et 15 les variations de la résistance, la réactance et la variation absolue de l'impédance en fonction du déplacement (x) du capteur sur une plaque conductrice amagnétique homogène (Nous avons choisi une plaque d'Aluminium) avec des fissures parallélépipédiques de mêmes épaisseurs (1 mm) et de même profondeurs (5 mm) et ayant différentes longueurs :6mm, 8mm, 10mm. La fréquence d'excitation est (100kHz) le lift-off (0.14mm)

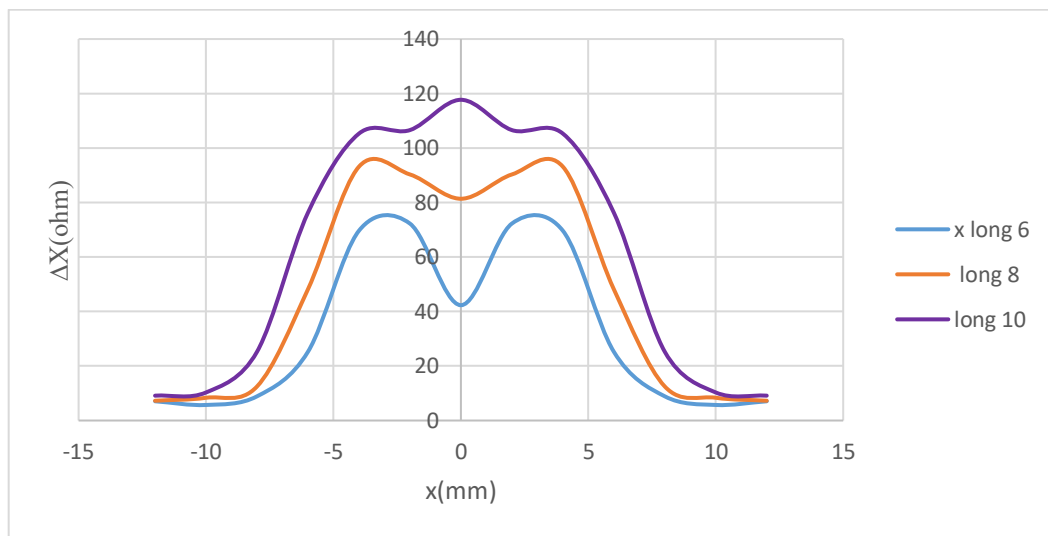


Figure IV.27. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs.

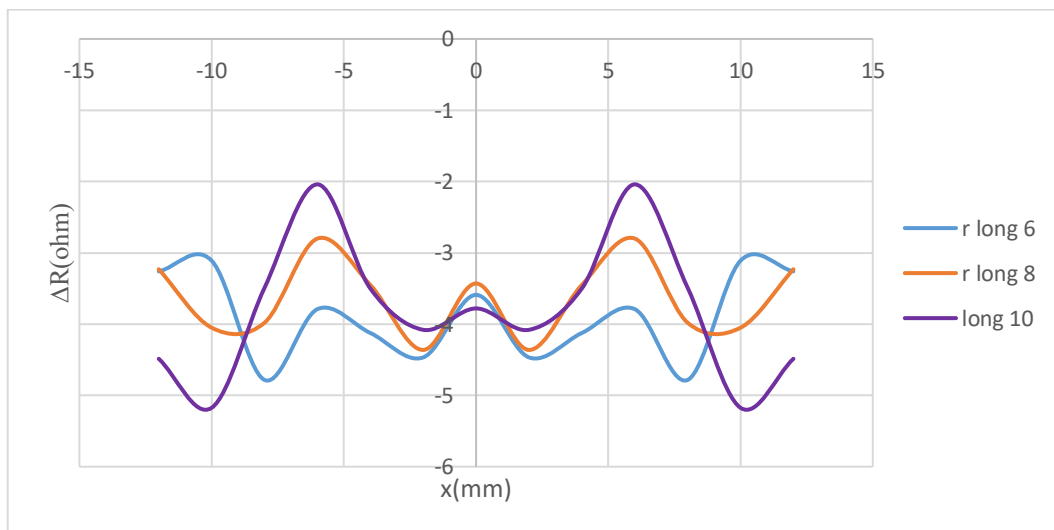


Figure IV.28. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs.

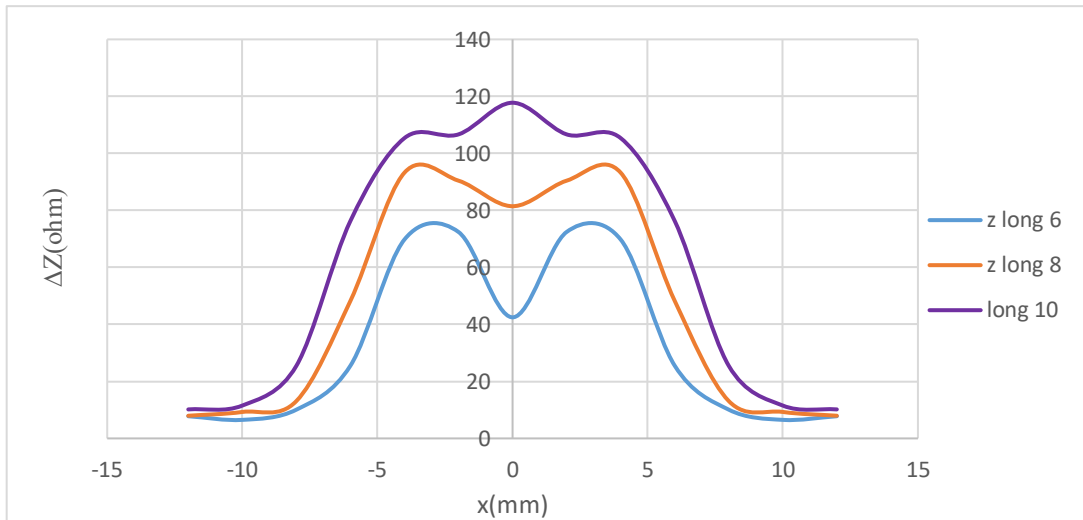


Figure IV.29. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs.

D'après les résultats de mesures, l'effet de la longueur de fissure est nettement apparent. On peut remarquer que pour des fissures débouchantes, le signal CF dépend fortement de la longueur de la fissure, et que le signal correspondant aux variations de la réactance est plus intense que celui correspondant aux variations de la résistance

III.2.2. Effet de l'épaisseur du défaut

Pour illustrer l'influence de l'épaisseur du défaut sur le signal de courant de Foucault, des simulations ont été faites sur différentes valeurs d'épaisseur : 0.5mm, 1mm, 1.2mm et 1.5mm. Les résultats de simulation obtenus pour une fréquence d'excitation 100khz et un lift_off 0.14mm, sont représentés sur les figures ci-dessous.

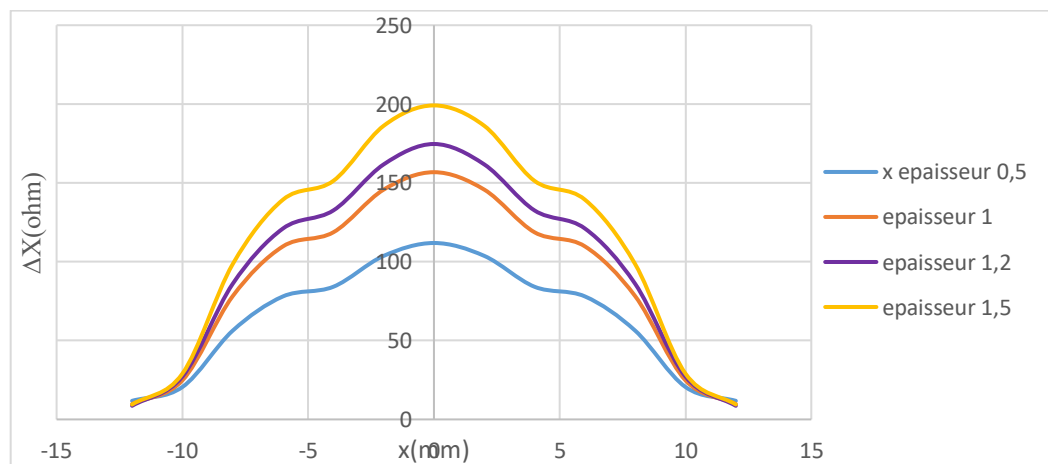


Figure IV.30. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différentes l'épaisseurs.

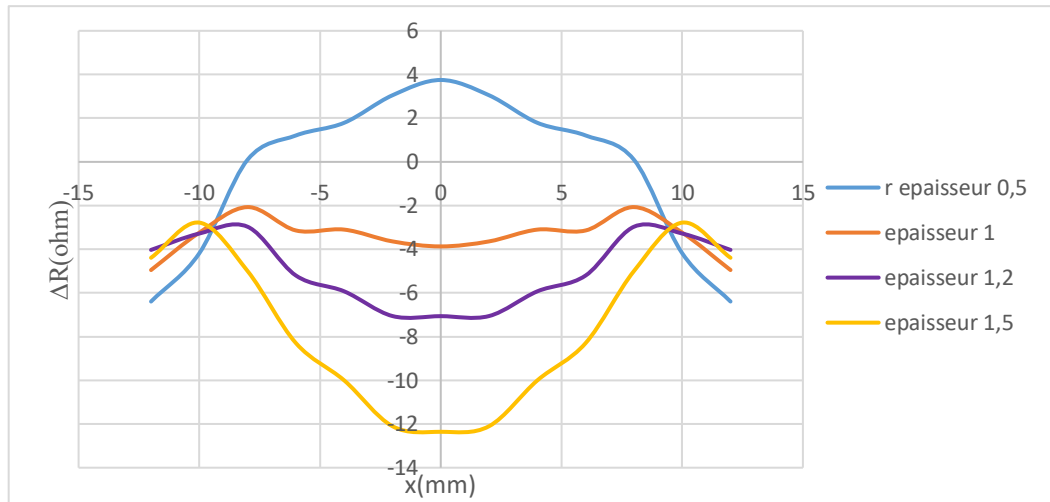


Figure IV.31. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différentes épaisseurs.

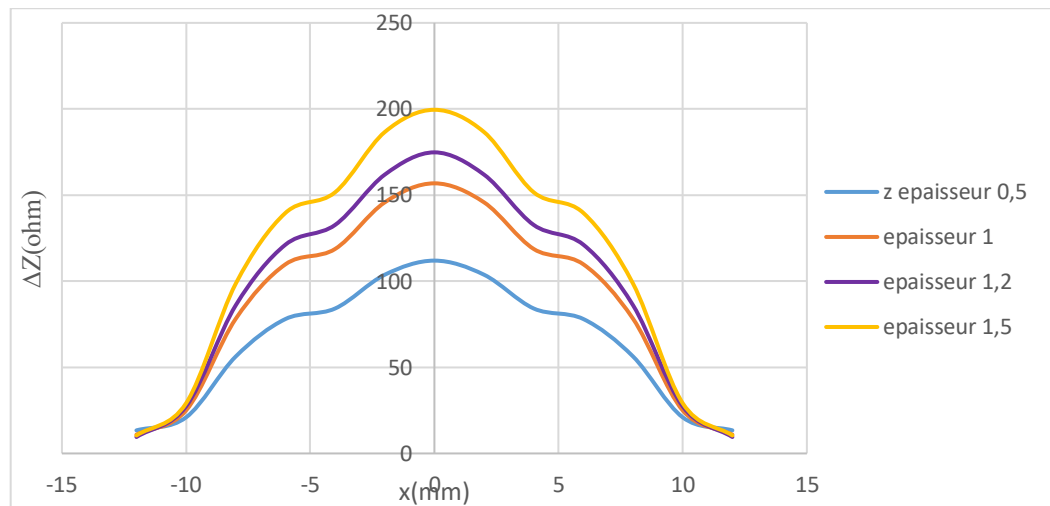


Figure IV.32. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes épaisseurs.

Les résultats montrent bien la sensibilité du signal courants de Foucault aux variations de l'épaisseur du défaut.

III.2.3. Effet de la profondeur du défaut

Pour une fréquence d'excitation de 100kHz et un lift-off de 0.14mm, on fait varier la valeur de la profondeur du défaut comme suit : 2mm, 3mm, 4mm, 5mm. Les figures IV.9, 10 et 11 montrent respectivement la variation de l'impédance, la réactance et la résistance en fonction de la position du capteur pour les différentes valeurs de la profondeur du défaut.

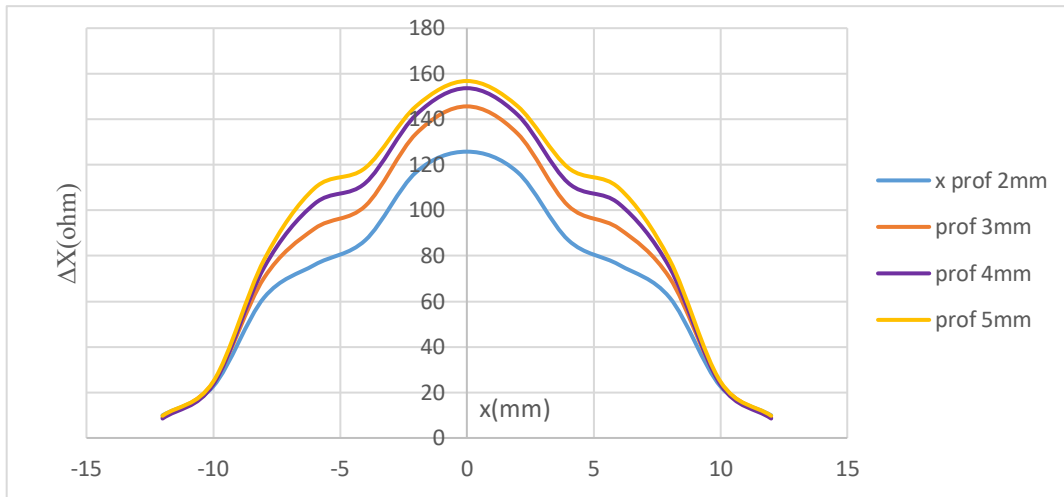


Figure IV.33. Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut.

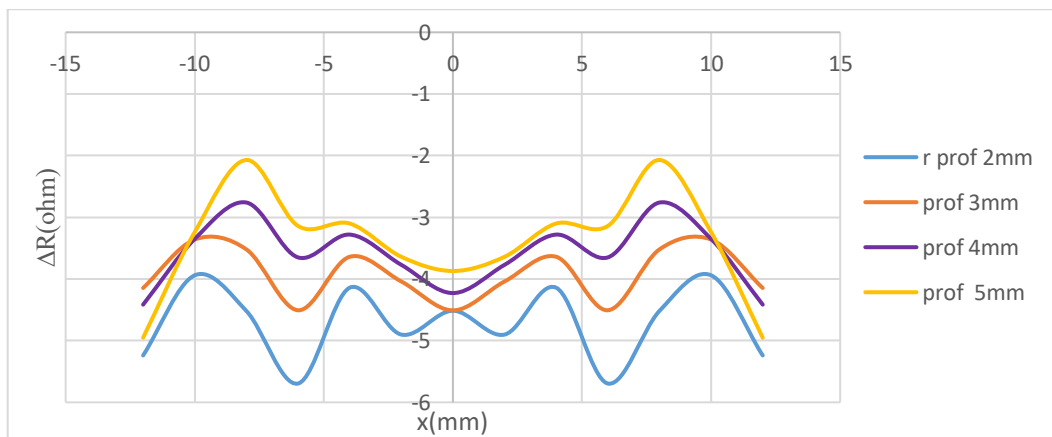


Figure IV.34. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut.

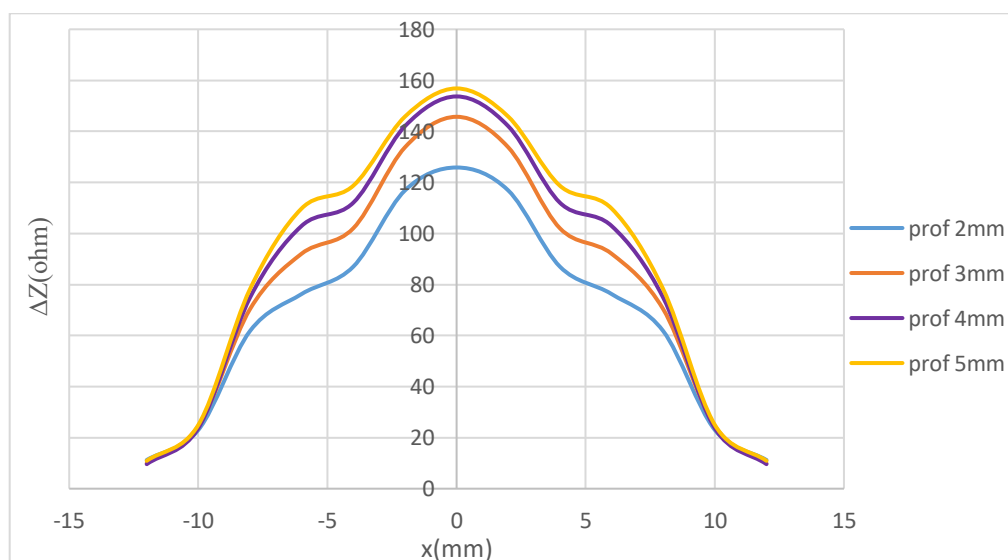


Figure IV.35. Variation de l'impédance absolue en fonction de la position du capteur pour différentes épaisseurs.

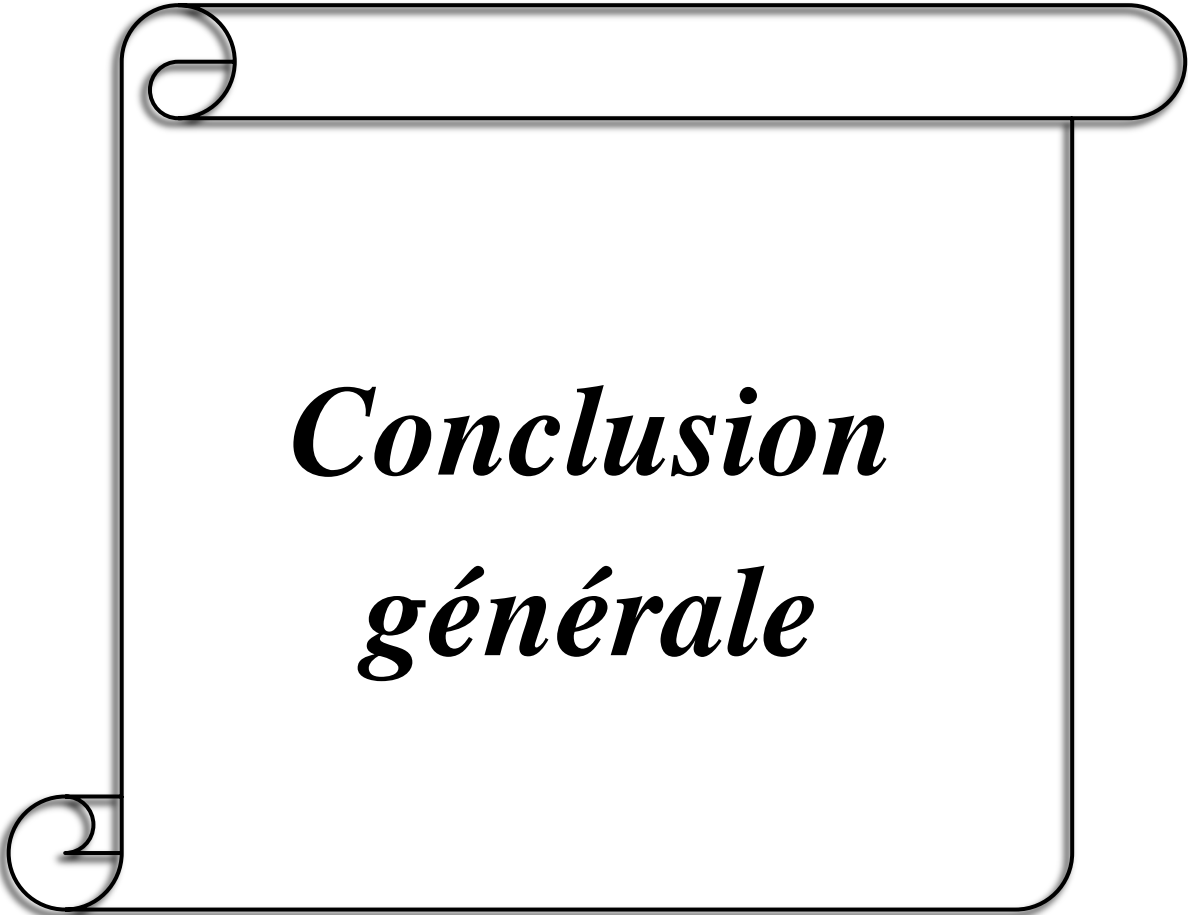
D'après l'allure de la figure IV- 26, nous constatons que la détection est meilleure d'autant plus que le défaut est profond.

Les résultats montrent bien la sensibilité du signal courants de Foucault aux variations de la profondeur du défaut.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La validation d'un problème de contrôle par courants de Foucault en 3D effectué sur le logiciel COMSOL Multiphysics 5.3.a. Nous avons choisi trois problèmes de contrôle non destructif par courants de Foucault pour cette validation.
- Une fois le modèle validé, nous avons passé aux simulations afin d'étudier l'influence des différents paramètres du contrôle par courants de Foucault.
- L'étude de l'effet des dimensions d'une fissure sur la variation de l'impédance de la sonde. Les résultats montrent que l'impédance dépend de différents paramètres à savoir les propriétés géométriques et physiques de la plaque (la longueur, l'épaisseur, la profondeur de défaut et la conductivité électrique de la plaque) ainsi que le lift_off et la fréquence d'excitation.
- L'impédance du système capteur-pièce est fortement liée aux dimensions du défaut.



***Conclusion
générale***

Conclusion générale

Ce mémoire est consacré au contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF) dans le but de déterminer les dimensions d'un défaut dans un matériau amagnétique homogène.

Notre travail comporte deux volets, un premier volet concerne la modélisation du système de CND CF constitué (d'une plaque conductrice non magnétique contenant une fente parallélépipédique + capteur inductif), dans le deuxième volet nous avons abordé l'aspect expérimental dans le but de valider notre modèle

Dans ce travail, nous avons voulu au départ traiter notre problématique par une modélisation par éléments finis d'arêtes en 2D en utilisant la formulation en champ magnétique \vec{H} et en se basant sur des défauts axisymétriques, toutefois on s'est confronté à des problèmes numériques lors de l'implémentation de cette méthode sur Matlab, ce qui nous a contraint à basculer vers la modélisation sous le logiciel COMSOL Multiphysics mais en faisant une modélisation plus complète en 3D

En ce qui concerne l'aspect pratique de ce travail, nous avons utilisé un banc d'essai du laboratoire constitué d'une table robotisée avec un bras portant le capteur qui est guidé par deux moteurs pas à pas et piloté grâce à une carte Arduino. L'excitation du capteur ainsi que toutes les mesures sont réalisées grâce au *Lock in Amplifier* qui est piloté par ordinateur. Ainsi l'ensemble des signatures des fissures de différentes dimensions obtenues lors des essais pratiques sont enregistrées.

La modélisation nous a permis d'une part d'identifier les principaux paramètres influant le contrôle dans le but d'optimiser les paramètres opératoires du contrôle afin d'aboutir à des résultats fiables. Et d'autre part, d'étudier la sensibilité du modèle concernant les différentes grandeurs de la fissure, en l'occurrence la longueur, la profondeur et l'épaisseur, sur le signal issu du capteur CF.

Les conclusions qu'on peut tirer de cette étude sont :

- ✓ La validation d'un problème de contrôle par courants de Foucault en 3D sous le logiciel COMSOL Multiphysics 5.3.a a été effectuée.
- ✓ Les résultats montrent que l'impédance dépend de différents paramètres à savoir les propriétés géométriques et physiques de la plaque (la longueur, l'épaisseur, la profondeur de défaut et la conductivité électrique de la plaque) ainsi que le *lift_off* et la fréquence d'excitation.
- ✓ L'impédance du système capteur-pièce est fortement liée aux dimensions du défaut.
- ✓ Le signal CF dépend fortement de la fréquence d'excitation.
- ✓ Dans notre cas (défauts débouchants), la détection est meilleure lorsque les fréquences sont élevées.

Conclusion générale

- ✓ La distance entre la plaque et le capteur (lift_off) influe sur la qualité du signal, plus le capteur s'approche de la plaque, plus l'intensité des courants de Foucault est importante et plus la variation de l'impédance est importante.
- ✓ Les défauts sont mieux détectés lorsqu'ils sont volumineux.

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

En termes des perspectives, ce modèle peut être exploité pour:

- ✓ Etudier d'autres formes de défauts.
- ✓ Etudier l'effet de position du défaut par rapport au capteur.
- ✓ Etudier l'effet des paramètres géométriques du capteur.
- ✓ Traiter les problèmes inverses dont la résolution est basée sur le modèle direct déjà développé afin de reconstituer la forme géométrique du défaut.



Bibliographie

Bibliographie

[ABB 15] Abderrahmane ABBASSI, "*Application des réseaux de neurones pour la caractérisation géométrique et physique d'une plaque conductrice*", Mémoire master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 08/06/2015.

[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, 30 Septembre 2014.

[AND 01] Ulf ANDERSSON, "*Time-Domain methods for the maxwell equations*", ISBN 91-7283-043-3, Kungl tekniska hogskolan, 2001.

[BEN 15] BENHADDA Nabil, "*Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND)*", Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, 16 Mai 2015.

[BUI 11] M. BUI Anh Tuan, "*Caractérisation et modélisation du comportement des matériaux magnétiques doux sous contrainte thermique*", Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, 19 Avril 2011.

[CHO 09] CHOUA Yahya, "*Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault*", Thèse de doctorat, Université Paris-sud11. 2009.

[CAR 17] Cardoso José Roberto, "*Electromagnetics through the finite element method*", ISBN 9781498783576, Taylor & Francis Group, 2017.

[CHE 18] Ben sahad CHETOUH, "*Identification des formes des fissures débouchant en surface dans les matériaux conducteurs en CND par courants de Foucault*", Mémoire de magister, Ecole Normale Supérieur De Laghouat, 2018.

[CHR 14] Alexandra CHRESTOPHE, "*Méthode des éléments finis avec joints en recouvrement non-conforme maillages : Application au contrôle non destructif par courant de Foucault*", These de doctorat, Université Paris-sud, 2014.

[CUL 09] B. D. CULLITY and C. D. GRAHAM, "*Introduction to magnetic materials*, 2^{ed}, ISBN 978-0-471-47741-9, John Wiley & Sons, 2009.

Bibliographie

[DAH 14] Abba DAHIA, "*Contribution à la caractérisation non destructive de matériaux magnétiques sous contraintes par méthode électromagnétique* ", Thèse de doctorat, Université Paris-sud, 19/12/2014.

[DEL 16] Benjamin DELABRE, *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*, 15 Décembre 2016.

[DJE 13] Hakim DJELOUAH, *Electromagnétisme*, Cours et exercices, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, 2012/2013.

[DUL 96] Patrick DULAR, *Modélisation du champ magnétique et des courants induits dans des systèmes tridimensionnels non linéaires*, Thèse pour l'obtention du grade scientifique de Docteur en Sciences appliquées, l'Université de Liège, 1996.

[EIG 16] El Ghoul Islam Nacereddine, *Réalisation D'un Banc D'essais Pour L'inversion Des Signaux En Contrôle Non Destructif Par Courants De Foucault*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016.

[GOL 97] Cristian GOLOVANOV, "*développement de formulations éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique: application à la simulation de dispositifs électromagnétiques en mouvement* ", These de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 27 octobre 1997.

[HAM 12] HAMEL Meziane, *Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques*, Mémoire de Magister, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 18 Octobre 2012.

[HEL 12] Bachir HELIFA, "*Contribution à la simulation du CND par courants de foucault en en vue de la caractérisation des fissures débouchant* ", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2012.

[HIB 18] Ibrahim HIBA, " Mémoire de magister, Ecole Normale Supérieur De Laghouat, 2018.

[ISS 17] Fatma ISSAOUI, *Etude des propriétés magnétiques des matériaux à bases des métaux de transition sous forme de poudre (A_2BO_4) et monocristaux (RMX_5)*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 30 Octobre 2012.

Bibliographie

- [JIA 02] Jianming Jin, "*The Finite Element Method in Electromagnetics*", 2^{ed}, ISBN: 0-471-43818-9, John Wiley & Sons, 2002.
- [KHE 07] KHEBBAB Mohamed, *Etude et modélisation de capteur a courant de foucault pour le contrôle non destructif (CND)*, Thèse de magister, Université Mentouri de Constantine, 1 Février 2007.
- [KUH 13] Éric KUHN, *contrôle non destructif d'un matériau excité par une onde acoustique ou thermique. Observation par thermographie*, Thèse de doctorat, Université Paris Ouest Nanterre la défense. 6 Décembre 2013.
- [LAB 16] LABBI Yacine et MAAMRI Cherif, *Etude de la Détection de Défauts de Rail par Courants de Foucault Non Destructifs*, Mémoire master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 01 Juin 2016.
- [LAK 11] Ala-Eddine LAKHDARI, *Etude de modélisation de capteurs en CND par Courant de Foucault : Application à la détection des fissures*, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra. 22 Mai 2011.
- [LOH 14] Stephanie LOHRENGEL, *Contributions aux méthodes numériques en électromagnétisme*, Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Reims Champagne-Ardenne, 17 Juin 2014.
- [MON 03] Peter MONK, *Finite Element Methods for Maxwell's Equations*, ISBN 0 19 850888 3, Oxford University Press, New York, 2003.
- [NAÏ 12] Mohammed NAÏDJATE, "*Développement d'un Code de Calcul pour l'Etude du Rayonnement Electromagnétique des Panneaux Solaires en Champ Proche*", Mémoire de magister, Université Amar Telidji de Laghouat, 2012.
- [PAI 07] Séverine PAILLARD, *Développement d'un modèle pour le contrôle non destructif par courants de Foucault de structures rivetées en aéronautique*, Thèse de doctorat, Université Paris-sud11. 6 décembre 2007.
- [RAM 09] Brahim RAMDANE, *Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de*

Bibliographie

conception, d'analyse et d'aide à la décision, Thèse de Doctorat, l'Université de Nantes. 16 Novembre 2009.

[RAV 08] Cyril RAVAT, *Conception de multicateurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif*, Thèse de doctorat, Université Paris-sud11, 2008.

[SOU 18] Namarik SOURDI, " *Evaluation des propriétés électriques d'un matériau par méthode électromagnétique* ", Mémoire de master, Université Amar Telidji de Laghouat, 2018.

[TAL 13] TALEB M'hammed Mustapha-GHEDAMSI Elhachmi, *Modélisation semi-analytique d'un système de CND-CF pour la caractérisation d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur*, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 26 Juin 2013.

[TRE 00] Michel CYROT- Michel DECORPS- Bernard DIENY Olivier GEOFFROY- Damien GIGNOUX Claudine LACROIX- Jean LAFOREST Philippe LETHUILLIER - Pierre MOLHO Jean- Claude PEUZIN- Jacques PIERRE Jean- Louis PORTESEIL- Pierre ROCHETTE Michel- François ROSSIGNOL- Michel SCHLENKER Christoph SEGEBARTH- Yves SOUCHE Etienne du TREMOLET de LACHEISSERIE Jean- Paul YONNET, *Magnétisme-I-Fondements*, ISBN 2.86883.463.9, EDP Sciences, 2000.

[ZAI 12] Houda ZAIDI, *Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples*, Thèse de doctorat, Université Paris-sud, 10 Décembre 2012.

[ZEM 16] ZEMOURI Nassima, *Etude et Réalisation d'un Système Multicateurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs*, Mémoire de Magister, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 21 Juillet 2016.

[ZOR 12] Chiara ZORNI. *Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction*, Thèse de Doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2012. Français.

المخلص

يتدرج عملنا ضمن مجال الفحص غير المتلف بواسطة تيارات فوكو في جانبية: التجريبي والنموذجي، ويهدف الى تحديد ابعاد شق موجود في صفيحة لا مغناطيسية متجانسة باستعمال طريقة عناصر الحواف المحدودة. قمنا بتصميم نموذجنا المتكون من (صفيحة لا مغناطيسية ناقلة للكهرباء وبها عيب على شكل متوازي المستطيلات+ جهاز استشعار) وذلك باستعمال طريقة عناصر الحواف المحدودة ثلاثية الابعاد بالاستعانة ببرنامج كومسول ميلتيفيزكس. سمحت لنا النمذجة من ناحية بتحديد المؤثرات الرئيسية على المراقبة وذلك من أجل تهيئة الظروف الملائمة التي تضمن الى حد ما دراسة سليمة ونتائج واضحة. ومن ناحية أخرى، لدراسة حساسية النموذج فيما يتعلق بأحجام مختلفة من العيب، في هذه الحالة الطول والعمق والسمك، على الإشارة القادمة من مستشعر تيارات فوكو. انتقلنا في الأخير الى التحقق من صحة البرنامج عن طريق المقارنة بين النتائج التجريبية والنتائج المتحصل عليها بالمحاكاة. أعطت نتائج حسابنا بواسطة الكومسول توافق كبير جدا مع نتائجنا التجريبية، مما أتاح لنا الفرصة لدراسة لحالات كثيرة بدون اجراء تجارب و بطريقة مثالية وفي وقت قياسي وأيضا المساهمة في انشاء قاعدة بيانات سليمة جاهزة لدراسة المشكل العكسي.

الكلمات المفتاحية: طرق الفحص الغير متلف، تيارات فوكو، الشق، صفيحة لا مغناطيسية متجانسة، جهاز استشعار، طريقة عناصر الحواف المحدودة، برنامج الكومسول.

Résumé

Ce travail est consacré au contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF) dans ses aspects de modélisation et expérimental dans le but de déterminer les dimensions d'un défaut dans un matériau amagnétique homogène. Nous avons modélisé notre système constitué d'une (plaque conductrice non magnétique contenant une fente parallélépipédique + capteur inductif) par un modèle éléments finis d'arêtes en 3D par la formulation en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique $\vec{A}V-\vec{A}$ implémenté sous le logiciel COMSOL Multiphysics. La modélisation nous a permis d'une part d'identifier les principaux paramètres influant le contrôle dans le but d'optimiser les paramètres opératoires du contrôle et d'autre part, d'étudier la sensibilité du modèle concernant les différentes grandeurs de la fissure, en l'occurrence la longueur, la profondeur et l'épaisseur, sur le signal issu du capteur CF. Le deuxième volet de cette étude concerne l'aspect expérimental dans le but de valider notre modèle. Les résultats de nos calculs par COMSOL Multiphysics sont en très bonne concordance avec les données expérimentales, ce qui nous permettra d'examiner de nombreux cas de manière optimale afin de créer une base de données prête pour une étude de problème inverse.

Mots clés : Contrôle non destructif, courants de Foucault, méthode des éléments finis d'arêtes 3D, matériaux amagnétiques, défaut, COMSOL Multiphysics.

Abstract

The present work aims at identifying the Non-destructive Control (NDC) by eddy currents (FC) in its various modeling as well as experimental aspects, in order to recognize the various dimensions of a fault in a homogenous magnetic material. The researcher has modeled the system that is composed of (a non-magnetic conductive plate including "parallelepipedic" slot + inductive sensor) through 3D model edge elements by formulating magnetic vector potentials and electrical scalar $\vec{A}V-\vec{A}$ implemented by the COMSOL Multiphysics software. On the one hand, such a modeling process allows us to identify the basic parameters affecting the control process, the aim of which is to optimize the operating parameters of the control itself. However, on the other hand, the target is to explore the sensibility of the model, as far as the several grandeurs of the fissure are concerned at the level of length, depth and thickness on the sensor issue signal CF. The second part of this study involves the experimental aspect, the objective of which is to validate our model. Our calculations' findings using COMSOL Multiphysics software are highly reliable and in harmony with the experimental data, this definitely permits us to examine numerous other cases in a perfect way, so as to create a database ready for a study pertinent to inverse problems.

Key Words: Non-destructive Control, eddy current, edge element method 3D, Non-magnetic materials, fault, COMSOL Multiphysics.