

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



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

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

SPECIALITE: INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES

THEME

Contrôle non destructif par courants de Foucault
par capteur différentiel

Proposé et dirigé par :
Mr : ABDOU Abdelhak

Présenté par :
BENSALAH Oussama

Année Universitaire: 2011/2012

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DU L'OBTENTION
DU DIPLOME MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES**

PROPOSE ET DIRIGE PAR : Mr : ABDOU Abdelhak

PRESENTE PAR : BENSALAH Oussama

Thème :

**Contrôle non destructif par courants de Foucault
par capteur différentiel**

Résumé :

Le contrôle non destructif (CND) a pour but d'évaluer l'intégrité d'une pièce sans la détériorer. Cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées. Elle joue aussi un rôle économique non négligeable, dans le sens où elle permet une gestion optimisée de la maintenance. À ces deux titres, le contrôle non destructif est très important pour l'industrie et particulièrement utilisé, par exemple dans l'industrie automobile, pétrolière, navale, aéronautique et nucléaire.

L'objectif visé par ce travail, en premier lieu, est de présenter les principales méthodes de CND et en particulier celle des courants de Foucault, ensuite faire une description rapide des capteurs les plus utilisés dans ce cadre, les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par courants de Foucault (basé sur la variation d'impédance capteur-pièce), les conditions aux limites et les paramètres qui peuvent influer sur cette détection et en fin concrétiser l'étude théorique par un programme de simulation « sous MATLAB » et interprétation des résultats obtenus.

Mots clés :

Control non destructif (CND), courants de Foucault, capteur inductif, équations de Maxwell.

Résumé du rapport bibliographique du projet de MDM

Le contrôle non destructif (CND) a pour but d'évaluer l'intégrité d'une pièce sans la détériorer. Cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées. Elle joue aussi un rôle économique non négligeable, dans le sens où elle permet une gestion optimisée de la maintenance. À ces deux titres, le contrôle non destructif est très important pour l'industrie et particulièrement utilisé, par exemple dans l'industrie automobile, pétrolière, navale, aéronautique et nucléaire.

L'objectif visé par ce travail, en premier lieu, est de présenter les principales méthodes de CND et en particulier celle des courants de Foucault, ensuite faire une description rapide des capteurs les plus utilisés dans ce cadre, et en fin donner les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par courants de Foucault (basé sur la variation d'impédance capteur-pièce), les conditions aux limites et les paramètres qui peuvent influer sur cette détection.

Mots clés : Le contrôle non destructif (CND), courant de Foucault, capteur, équations de Maxwell

Abstract of bibliographic report of the MM project

This work relates to the study of the Non Destructive Testing (NDT) and her Mechanisms; its prominent role in the detection of surface errors. For the realization of this study we, initially, presented this technology, the various topologies of used, the pros and cons of each of them separately. and the equipments necessary to the installation, Areas and methods of use.

In a second place, a theoretical part of the non destructive testing (NDT) by eddy current as a fundamental principle in this study. Also did not fail to mention the pros and cons this method, and defining the sensors and include different types of this technology (sensors) in NDT by eddy current .

ملخص تقرير المراجع لمشروع مذكرة الماستر

المراقبة غير المهدمة اختبار يهدف لتقييم سلامة قطعة دون الإضرار بها. تم تصميم هذه المرحلة من العملية الصناعية لضمان الاستخدام الآمن للسلع الخاضعة للرقابة. كما أنها تلعب دورا اقتصاديا مهما، بمعنى أنه تسمح بالتسيير الجيد للصيانة. يعتبر الاختبار الغير تهديمي مهم جدا للصناعة ويستخدم في عدة مجالات نذكر منها على سبيل المثال في الفضاء السيارات البترول، وبناء السفن، والنووية.

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

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

Année 2011/2012



Dédicaces



Dédicaces

A mes parents qui m'ont toujours soutenu et m'ont permis d'arriver là où je suis aujourd'hui. Aucun mot n'est assez fort pour vous témoigner toute ma reconnaissance, alors simplement MERCI POUR TOUT, mais je suis sûr qu'au fond de vos cœurs vous savez combien je vous aime.

A mes sœurs, Meriem, Khaoïla, Hasna, Chaïma vous êtes la joie de notre famille, merci pour l'ensemble des moments que nous passons ensemble.

A ma grande famille : mes grands parents, mes oncles, mes tantes, mes cousins, mes cousines et leurs familles,

A mes amis, Ameer, Houssam, brahim, Hani, Ishak, Youcef, Manel, Dalel, Khadidja, Sarah, Amine, Halim, Riyadh, merci pour votre amitié précieuse. Aux étudiants du Génie Electrique et toute la promotion 2012.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches, amis et collègues, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire. A tous ceux que je ne puis citer ici mais qui savent combien d'avoir croisé leur route m'a apporté.

Oussama.

Remerciements

Je remercie Dieu, le tout puissant, je rende grâce pour m'avoir donné santé, patience, volonté et surtout raison.

*Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur, Mr **ABDOU ABDELHAK** pour avoir d'abord proposer ce thème, et lui exprime mon gratitude, pour la disponibilité et la patience dont elle a fait preuve et dont les précieux conseils et les remarques pertinentes et pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire dans les meilleures conditions.*

Je remercie également les membres du juré.

Je remercie aussi l'ensemble du personnel du MEI avec qui j'ai été amené à travailler, pour avoir fait preuve de disponibilité et d'attention à mon égard tout au long de mon stage.

Et enfin, un grand merci mes enseignants et aux membres de département de génie électrique qui ont contribué à ma formation par ailleurs.

Oussama BENSALAH

Tableau de matières

Sommaire

Tableau de matières	7
LISTE DES FIGURES	10
LISTE DES TABLEAUX	13
Préface	14
Préface	15
Introduction Générale	17
Chapitre	20
Concepts généraux sur les techniques	21
de contrôle non destructif "CND"	21
I.1.Introduction	21
I.1.1 Principes Généraux	21
Procédure de CND	22
I.2 Différentes méthodes de CND	22
I.2.1 Examen visuel.....	23
I.2.2 Ressuage	23
I.2.3 Magnétoscopie	25
I.2.4 Radiographie	26
I.2.5 Thermographie	28
I.2.6 Ultrasons	29
I.2.7 Contrôle par laser	31
I.2.8 Thermo-inductive	31
I.2.9 CND par courants de Foucault.....	33
I.3 Principes de détection des défauts.....	35
I.3.1 Hétérogénéités et défauts	35
I.3.2 Défauts de surface	36
I.3.3 Défauts internes.....	36
Conclusion	36
Chapitre	38
II.2 Les courants de Foucault	39

II.3 Définition d'un capteur	40
II.3.1 Paramètres du capteur.....	40
II.3.2 Domaines d'utilisation des capteurs.....	40
II.3.3 critères de choix d'un capteur	41
II.3.4 Capteurs plus utilisés en CND	41
II.4 Capteurs inductifs	42
II.4.2 Principe des capteurs inductif	44
II.4.3 Différentes formes de capteurs inductifs	44
II.4.4 Différents types des capteurs inductifs	45
II.6 Limites du CND par courants de Foucault	47
II.7 Les méthodes et techniques de mesures	47
II.9 Conclusion	49
Chapitre	50
Modélisation du problème électromagnétique	51
III.1 Introduction	51
III.2 Analyse des phénomènes électromagnétiques	52
2.1 Équations de Maxwell	52
2.2 Profondeur de pénétration	54
III.3 Condition de transmission et condition aux limites	54
3.1- conditions de transmission	54
3.2- conditions aux limites	55
3.3-diagramme de TONTI.....	56
III.4 Formulation électromagnétiques	56
4.1 Modèle magnétodynamique	56
III.5 Méthodes numériques, [7]	60
5.1 Méthode des intégrales de frontières.....	60
5.2 Méthode des différences finis.....	61
5.3 Méthode des volumes finis.....	61
5.6 Méthode des éléments finis	62
III.6 Calcul de l'impédance	63
III.7 Conclusion	67
Chapitre	68

Simulation et Analyse des Résultats	69
IV.1 Introduction.....	69
IV.2 Caractéristique du dispositif.....	70
IV.2.1 Caractéristique physique	70
IV-2-2 Caractéristique géométrique :.....	70
IV.3 Description du problème : défaut externe.....	70
IV.4 Présentation et structure du programme développé.....	71
A) Bloc d'entrée (Pré-processeur).....	71
B) Bloc de résolution (Processeur).....	71
C) Bloc de sortie (Poste processeur)	72
IV.5 Applications proposées.....	72
IV.5.1 Présentation et définition du modèle d'étude	72
IV.5.2 Maillage du domaine d'étude.....	73
IV.5.3 Simulation d'un (capteur – plaque amagnétique) sans défaut.....	74
IV.5.4 Simulation d'un (capteur-plaque amagnétique) avec défaut externe	76
IV.5.5 Simulation d'un (capteur-plaque magnétique) avec défaut externe	77
IV.5.6 Simulation d'un (capteur- plaque amagnétique) avec défaut externe avec déplacement du capteur	79
IV.5.7 Effet d'un défaut externe sur l'impédance	80
IV.5.8 Test des performances du capteur pour différents défauts	82
IV.5.9 Test des performances du capteur pour différents (lift off).....	83
IV.5.10 Conclusion.....	83
Conclusion Générale	86
Annexe	89
1. Principe physique de CND-CF et effet de peaux	89
2. Méthodologie de développement des systèmes de CND	90
Références bibliographiques	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 Schéma synoptique de CND, [2].....	22
Figure 1. 2 Examen visuel des traces de corps, [2].	23
Figure 1. 3 Principe du ressuage, [5].....	24
Figure 1. 4 Examen par ressuage, [18].	25
Figure 1. 5 Principe de magnétoscopie, [5].	26
Figure 1. 6 Examen de radiographie, [2].	27
Figure 1. 7 Examen par Thermographie, [2].	28
Figure 1. 8 Exemple d'examen par Thermographie, [2].	29
Figure 1. 9 Principe des ultrasons, [4].	30
Figure 1. 10 Distribution de champ magnétique et température, [13].	32
Figure 1. 11 inspection par thermo-inductive, [13].	32
Figure 1. 12 Principe du CND par courants de Foucault, [4].	33
Figure 1. 13 Examen par courants de Foucault d'un défaut transversal (méthode direct) , [2].	34
Figure 1. 14 Examen par courants de Foucault d'un défaut transversal (méthode indirect), [2].	34

Figure 2. 1 Principe d'un capteur, [2].	40
Figure 2. 2 Critères de choix d'un capteur, [2].	41
Figure 2. 3 1ere Bobine émettrice et	43
Figure 2. 4 Une seule Bobine émettrice et réceptrice.	43
Figure 2. 5 Exemple sur bobine ponctuelle.	43
Figure 2. 6 Exemple sur la sonde.	43
Figure 2. 7 Principe de capteur inductif par courants de Foucault, [2], [13].	44
Figure 2. 8 Modification des lignes de champ en fonction de la nature de la pièce, [2].	45
Figure 2. 9 Le capteur absolu, [13].	46
Figure 2. 10 le capteur double, [13].	46
Figure 2. 11 le capteur différentiel, [13].	46
Figure 2. 12 Exemple de capteur différentiel, [3].	48
Figure 2. 13 Réception par bobine simple fonction. [11].	48
Figure 2. 14 Réception par bobine double fonction avec signal référence a la masse, [11].	49

Figure 2. 15 Réception par bobine double fonction avec signal flottant, [11].	49
<hr/>	
Figure 3. 1 domaine d'étude	52
Figure 3. 2 Interface entre deux milieux.	55
Figure 3. 3 Diagramme de TONTI appliqué à l'électromagnétique	56
Figure 3. 4 Géométrie du dispositif en 3D	59
Figure 3. 5 Géométrie du dispositif en 2D	60
<hr/>	
Figure 4. 1 Organigramme de l'algorithme de différentes étapes de validation, [13.17]	70
Figure 4. 2 Description du problème en 2D.	70
Figure 4. 3 Modèle complet en coupe et en perspective	72
Figure 4. 4 Domaine de résolution.	73
Figure 4. 5 Maillage du domaine de résolution.	74
Figure 4. 6 Représentation du Potentiel	74
Figure 4. 7 Circulation des lignes.	74
Figure 4. 8 Distribution de la densité des	75
Figure 4. 9 Représentation de l'induction	75
Figure 4. 10 Représentation des vecteurs	75
Figure 4. 11 Zoom des vecteurs d'induction	75
Figure 4. 12 Géométrie du dispositif avec	76
Figure 4. 13 Maillage du dispositif avec	76
Figure 4. 14 Représentation des vecteurs	76
Figure 4. 15 Zoom des vecteurs induction	76
Figure 4. 16 Circulation des lignes de	77
Figure 4. 17 Distribution des courants	77
Figure 4. 18 Géométrie du dispositif avec	78
Figure 4. 19 Maillage du dispositif avec	78
Figure 4. 20 Représentation des vecteurs	78
Figure 4. 21 Zoom des vecteurs induction	78
Figure 4. 22 Circulation des lignes de	78
Figure 4. 23 Distribution des courants	78
Figure 4. 24 Circulation des lignes de champ	79
Figure 4. 25 Représentation des courants	79
Figure 4. 26 Circulation des lignes de	80
Figure 4. 27 Circulation des lignes.	80
Figure 4. 28 Allure de ΔZ pour $prf = 0.5mm$	81
Figure 4. 29 Allure de ΔZ pour $prf = 1mm$	81
Figure 4. 30 Allure de ΔZ pour $prf = 2mm$	81
Figure 4. 31 Allure de ΔZ pour $prf = 3mm$	81
Figure 4. 32 Allure de ΔZ pour $lg = 1mm$	82
Figure 4. 33 Allure de Z pour $lg = 2mm$	82
Figure 4. 34 Allure de Z pour $lg = 3mm$	82
Figure 4. 35 Allure de Z pour $lg = 4mm$	82

Figure 4. 36 Allure de ΔZ pour $l_{ff}=0.5$ mm.....	83
Figure 4. 37 Allure de Z pour $l_{ff}=0.2$ mm.....	83
Figure 4. 38 Allure de Z pour $l_{ff}=0.125$ mm.....	83
Figure 4. 39 Allure de Z pour $l_{ff}=0.1$ mm.....	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2. 1 Différents domaines d'application des capteurs, [2].	41
Tableau 2. 2 Capteurs plus utilisés en CND, [2].	42

Préface



Préface

De petits défauts, comme des cavités internes ou des microfissures dans une pièce métallique, peuvent avoir de graves conséquences sur la fiabilité d'une pièce, d'un élément de moteur ou, plus généralement, sur tout un système. Pour détecter et quantifier des défauts sans altérer des pièces, il faut avoir recours aux techniques de contrôles non destructifs afin de garantir la qualité des pièces utilisées ou assemblage de pièces. Les contrôles précoces peuvent faire la différence entre la vie et la mort, essentiellement dans les secteurs industriels tels que : automobile, pétrolière, navale, aéronautique et nucléaire.

Différentes techniques de contrôles sont envisageables parmi lesquelles on peut citer le contrôle par courants de Foucault. Le Contrôle Non Destructif (CND) est une technique industrielle largement utilisée pour inspecter les matériaux durant leur phase d'élaboration ou régulièrement tout au long de leur vie. Ce contrôle repose sur le phénomène d'induction électromagnétique, dont une particularité essentielle est de pouvoir injecter de l'énergie électromagnétique à l'aide d'un inducteur dans un matériau conducteur (induit), sans qu'il y ait contact entre eux. Sous l'effet de la variation du champ incident, des courants induits se développent dans l'induit. L'intensité et la répartition de ces courants dépendent des propriétés physiques et géométriques de l'induit, de la géométrie de l'inducteur, de sa disposition par rapport à l'induit, ainsi que de la fréquence du courant d'excitation.

L'évaluation de la réaction électromagnétique de l'induit va permettre, par l'intermédiaire de mesures adaptées, d'accéder à des informations concernant ses propriétés physiques (conductivité et perméabilité), ses propriétés géométriques (épaisseur), ou encore la présence d'un défaut qui modifie la répartition des courants induits et de la cartographie du champ électromagnétique.

Les courants de Foucault n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être étudiés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent, ou en utilisant des outils de modélisation, basés sur les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection de défauts par courant de Foucault.

La concrétisation du contrôle par courant de Foucault est possible grâce l'utilisation de capteurs inductifs, ces derniers peuvent être utilisés selon plusieurs techniques, parmi ces dernières on a peut citer la détection par capteur en mode différentiel permet d'accéder à toutes les grandeurs utiles et également perturbatrices, cette mesure fera l'objet de notre travail.

Introduction

Générale

Introduction Générale

Dans l'industrie, les exigences de fiabilité, de réduction des coûts et de sécurité deviennent de plus en plus contraignantes. Au niveau de la production, il faut dimensionner les pièces au plus juste tout en garantissant leurs disponibilités et leurs performances.

Durant l'exploitation d'un produit industriel, son maintien en état de marche dans de bonnes conditions de sécurité nécessite une bonne connaissance de l'évolution des pièces qui le constitue.

Cette connaissance implique en particulier de réaliser des contrôles ne portant pas atteinte à l'intégrité des pièces et en entravant le moins possible la disponibilité du produit. Ceci justifie l'importance croissante que prend le contrôle non destructif (CND).

Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité . . .), soit pour détecter 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 . . .

Les méthodes électromagnétiques sont fréquemment utilisées pour le contrôle des pièces électriquement conductrices et/ou magnétiques. Par exemple, le contrôle de pièces de fonderie (industrie automobile, industrie pétrolière) peut se faire par magnétoscopie.

Les tubes (nucléaire, industrie pétrolière . . .) peuvent être testés par courants de Foucault (CF), soit en cours de fabrication, soit lors des phases de maintenance. Le CND par capteurs à courants de Foucault est bien adapté à la détection de défauts dans les pièces métalliques. Cette technique est basée sur l'analyse des changements de l'impédance globale de la bobine dans les environs du défaut. La configuration du dispositif électromagnétique est constituée par capteur (bobine) absolue ou un capteur différentiel placé à l'extérieur ou à l'intérieur d'un tube conducteur.

L'analyse théorique de la relation entre les propriétés du défaut et le changement de l'impédance exige la résolution des équations de Maxwell pour déterminer le champ des courants de Foucault dans la matière. Pour la plupart des problèmes pratiques la géométrie est trop difficile pour les solutions analytiques, par conséquent, les solutions numériques sont sollicitées.

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

Cette méthode bénéficie d'un fondement théorique très solide, et de nombreuses techniques sont venues l'améliorer au fil des années. Cependant, sa mise en œuvre reste difficile et coûteuse dans certains cas, notamment dans le domaine de la modélisation de grandes déformations, [4].

- Objectifs du travail

Ce travail en l'étude le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault pour les défauts surfaciques. Les objectifs seront visés à travers ce travail:

- Une recherche bibliographique sur le CND tout en mettant l'accent sur les techniques utilisant les Courants de Foucault.
- Modélisation numérique de l'ensemble capteur-pièce ainsi qu'une étude des méthodes de résolution, conduisant au choix d'une approche.
- Élaboration d'un programme de calcul pour la simulation de différentes applications

- Présentation du mémoire

Ce mémoire est ainsi organisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre sera dévoué à une recherche bibliographique concernant les techniques du CND ainsi que leurs avantages, inconvénients et leurs domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, on présentera les notions de base concernant les capteurs inductifs à courants de Foucault, avec leurs principes, leurs différentes géométries existantes ainsi que leurs différents circuits magnétiques.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation du modèle analytique élaboré (capteur en plaque métallique), ainsi que les différentes méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles. La méthode des éléments finis sera exploitée pour la résolution des équations électromagnétiques. L'expression de l'impédance sera présentée à la fin de ce chapitre.

Le dernier chapitre sera dédié aux différentes applications et aux résultats de simulation d'un ensemble d'applications énumérées comme suit :

- La première application concernera une plaque amagnétique sans défaut ;
- La deuxième application représentera un exemple une plaque amagnétique avec défaut externe
- La troisième application traitera un exemple d'une plaque magnétique avec défaut externe ;
- La quatrième application examine une plaque amagnétique avec défaut externe, associé avec le déplacement du capteur.

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

Chapitre



Concepts généraux sur les
techniques de contrôle non
destructif "CND"

Concepts généraux sur les techniques de contrôle non destructif "CND"

I.1.Introduction

Le contrôle non destructif est très répandu en milieu industriel en particulier, l'industrie pétrolière, nucléaire, et automobile, car on vu la gravité des conséquences d'une rupture d'une tige en cours de forage, ou d'un tube de cuvelage ou de production.

Le contrôle non destructif (CND) a pour objectif de mettre en évidence les défauts, tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Cette définition est assez large. Pour être plus précis, le CND concerne exclusivement « la santé de la matière », en effet les techniques du CND sont utilisées en contrôle de qualité pour s'assurer de la qualité d'une production, puis de garantir la tenue en service des pièces et des ensembles fabriqués. Elles sont également très appréciées en maintenance. Elles permettent de vérifier la continuité de la matière, et donc de déceler le manque de matière, les fissures, etc.

Le système de contrôle par les courants de Foucault s'est développé très rapidement ces dernières années par l'avancement de la technologie apportée aux dispositifs des mesures. Le développement important de l'informatique une grande sur dans le domaine du CND, [1].

Les capteurs à courant de Foucault sont utilisés depuis plus d'un siècle pour le contrôle des pièces conductrices notamment métalliques.

Dans ce premier chapitre, on présentera en premier lieu un bref rappel sur les méthodes électromagnétiques du CND. Ensuite on passera en revue les différentes techniques de contrôle non destructif par courants de Foucault, au terminera par une conclusion.

I.1.1 Principes Généraux

Quelque soit la technique adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND selon le synoptique de la figure (1.1)

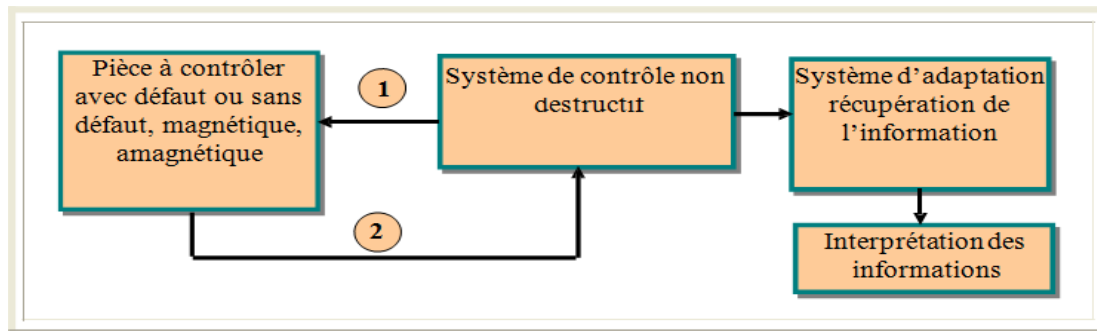


Figure 1. 1 Schéma synoptique de CND, [2], [13].

Quelle que soit la nature de la cible (pièce à tester), magnétique ou amagnétique, elle se caractérise par un ensemble de paramètres (μ , σ , ...), que l'on va chercher à estimer afin de formuler un diagnostic d'intégrité. Le système de contrôle non destructif représente la technique (ressuage, ultrason, magnétoscopie, contrôle par courants de Foucault.....) utilisée pour déterminer l'état de la cible, Le système d'adaptation et récupération de l'information est un système d'acquisition dont le rôle est de concrétiser les résultats du contrôle. Les moyens utilisés dans cette étape diffèrent suivant le type de procédé utilisé, on peut trouver un impédance mètre, un microscope, un caméscope ou l'œil nu, [2].

Procédure de CND

L'opération de contrôle non destructif d'un objet ne se borne généralement pas à la détection d'éventuels défauts. En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une procédure ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen.

Ce sont des opérations d'étalonnage, de calibrage, de balayage de la sonde, de traitement des données qui permettent d'atteindre ces objectifs désormais dans des bonnes conditions, grâce à l'apport intensif de l'informatique en temps réel.

La cible se caractérise par ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic d'intégrité. La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape « d'inversion », plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce, [13], [14].

I.2 Différentes méthodes de CND

Les techniques de CND utilisées sont diverses : la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, le bruit Barkhausen, les courants de Foucault... Elles dépendent de la nature

même du contrôle envisagé. Ces méthodes exploitent des phénomènes différents et sont le plus souvent complémentaires.

Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué. Pour la plupart de ces méthodes, les moyens d'acquisition ont été automatisés, permettant ainsi le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données. Ce premier chapitre est consacré à la présentation des principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les courants de Foucault qui sera l'objet d'étude de ce manuscrit, [4].

I.2.1 Examen visuel

Le contrôle visuel est le plus ancien des contrôles non destructifs. C'est la méthode la plus utilisée, car la plus économique à mettre en œuvre. Elle nécessite uniquement l'ingérence de l'opérateur.

✚ Avantages

- Examen simple, rapide et peu coûteux ;
- Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.

✚ Inconvénients

- Détection limitée aux défauts visibles ;
- La surface doit être propre, [2].

✚ Domaine d'application

- contrôle de pièces fabriquées ;



Figure 1. 2 Examen visuel des traces de corps, [2].

I.2.2 Ressuage

Cette méthode complète l'examen visuel en faisant apparaître des défauts de surface dans un contraste coloré ou fluorescent. Son principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes. La première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler.

Un liquide coloré ou fluorescent dit "pénétrant" est ensuite appliqué sur la surface à contrôler. Il va s'infiltrer à l'intérieur des anomalies (fissures, porosités...).

L'excès de pénétrant est ensuite éliminé par un lavage adapté. La surface est alors recouverte d'une fine couche de "révélateur" qui absorbe le pénétrant contenu dans les anomalies et donne une tache colorée en surface plus large que l'anomalie, permettant ainsi de la localiser. On dit alors que le révélateur fait "ressuer" le pénétrant (voir la figure 1.4).

Ces indications sont alors visibles à l'œil nu. Dans certaines industries, on utilise un pénétrant fluorescent qui est révélé par un éclairage sous UV.

Le champ d'application du ressuage est très vaste car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchants en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur d'autres matériaux, à condition toute fois qu'ils ne réagissent pas chimiquement avec le pénétrant.

Les limitations du contrôle par ressuage sont liées au matériau lui-même : trop forte rugosité de surface, impossibilité d'employer les produits classiques qui endommageraient sa surface.

Les défauts non débouchants ne peuvent être vus, de même que les fissures renfermant des corps susceptibles d'interdire l'entrée du pénétrant tels que peintures, oxydes.

Le procédé lui-même est relativement lent, coûteux en temps. Il faut enfin prendre en compte, dans le coût du contrôle, la consommation des produits de ressuage dont l'utilisation peut nuire à l'environnement, [4].

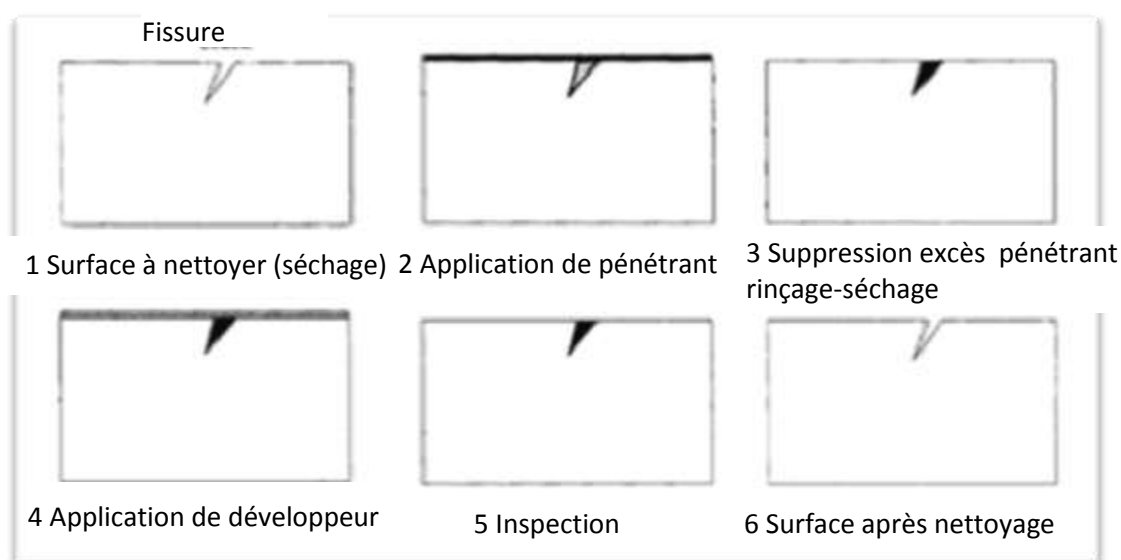


Figure 1. 3 Principe du ressuage, [5].

✚ Avantages

- Simple à mettre en œuvre et relativement sensible aux fissures ouvertes (et en surface) ;
- Elle n'est pas automatisable et les résultats restent à l'appréciation de l'opérateur. De plus, elle peut être effectuée sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux de géométrie et dimensions quelconques ;
- Facilité de mise en œuvre (pour pénétration pré émulsionnée), [2].

Inconvénients

- Il est nécessaire de faire un décapage et un dégraissage soigné avant l'inspection ;
- L'interprétation des résultats est subjective: Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts ;
- Nécessite l'utilisation de produits non récupérables, voire contaminés après utilisation (ex: centrale nucléaire où cette technique va être complètement abandonnée pour des raisons de normes de dépollution) ;
- Danger des solvants toxiques, corrosifs, inflammable.



Figure 1. 4 Examen par ressuage, [18].

Domaine d'application

Le domaine d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement avec le pénétrant.

A titre indicatif, sa sensibilité est très bonne, puisqu'on peut estimer et obtenir une détection fiable de défauts de 80 μm de largeur pour 200 μm de profondeur pour un ressuage coloré pratiqué en atelier sur une surface usinée, alors que le ressuage fluorescent conduit dans les mêmes conditions à une limite de détection de l'ordre de 1 μm en largeur pour 20 à 30 μm en profondeur.

I.2.3 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 (1.5), [4].

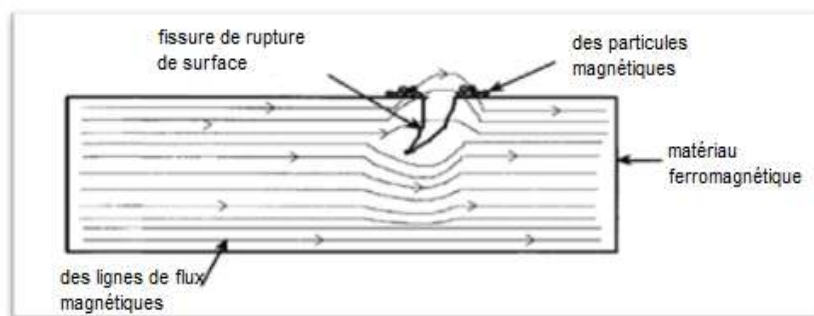


Figure 1. 5 Principe de magnétoscopie, [5].

✚ Avantages

- facilité à mettre en œuvre manuellement ;
- Economique ;
- résultats quasi immédiats ;
- détection des défauts débouchant et des défauts sous-jacents, [2].

✚ Inconvénients

Cette méthode à champ magnétique continu ne s'applique qu'à des matériaux ferromagnétiques, et ne détecte pas le défaut interne.

✚ Domaine d'application

La magnétoscopie est utilisée pour le contrôle:

- Des pièces moulées : criques situés entre le raccordement, réseaux de fissures superficielles.
- des pièces forgées : criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement.
- les fissures de fatigue peuvent si les conditions sont favorables être détectées. Les fissures de corrosion sous tension sont généralement bien décelées ainsi que les fissures d'origine thermique des soudures.

I.2.4 Radiographie

Le principe de la radiographie est le même que pour le domaine médical. La méthode met à profit l'absorption par la matière des rayonnements électromagnétiques ionisants. L'examen

de la structure ou de l'état interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon X, ou γ) et à recueillir le rayonnement résiduel non absorbé sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la figure (1.6).

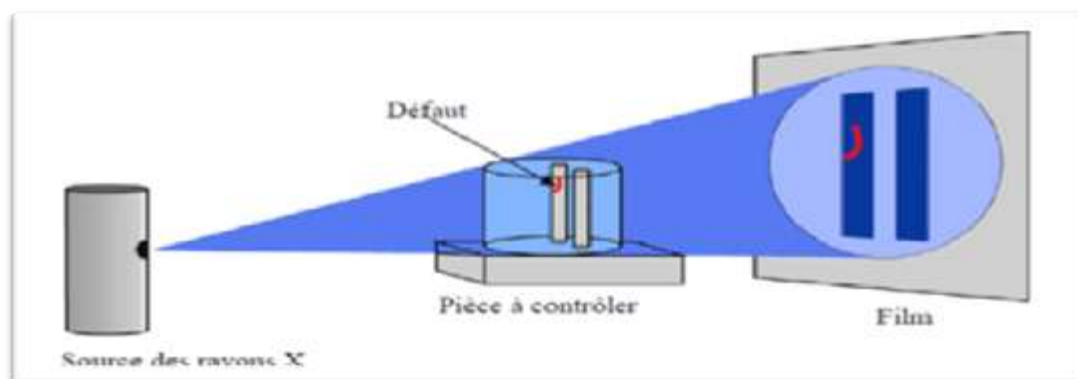


Figure 1. 6 Examen de radiographie, [2].

De par son principe, la radiographie ne permet pas d'avoir d'information sur la localisation du défaut en profondeur dans la pièce examinée. Il faut pour cela réaliser plusieurs clichés sous des angles de tir différents, ce qui n'est pas toujours possible.

Un autre moyen est la tomographie industrielle. Elle a le même principe que le scanner médical. Elle consiste à reconstruire une coupe de la pièce par des algorithmes complexes à partir d'une succession d'acquisitions suivant des angles différents. La répétition de ce processus selon différentes hauteurs de tir permet d'obtenir une image 3D virtuelle complète de l'objet (figure 1.6).

L'essor de cette méthode est essentiellement dû aux progrès de l'informatique et à l'augmentation des capacités de traitement, que ce soit dans le domaine médical ou industriel.

Le champ d'application de la radiographie est très vaste ; c'est en effet la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités à l'intérieur des objets de toute nature, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui des contrôles de maintenance, [4].

✚ Avantages :

Les avantages majeurs des techniques radiographiques X et γ sont :

- fournir une image constituant directement un document archivable du contrôle montrant l'absence présumée ou la présence d'un défaut dont on peut éventuellement apprécier la nature et la taille ;
- garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures, [2].

✚ Inconvénients :

• toutefois, l'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur. De plus, cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement qui rendent son utilisation en industrie complètement inadaptée :

- la nécessité de mettre en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel ;
- le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau ;
- la faible productivité allée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films.

✚ Domaine d'application :

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

I.2.5 Thermographie

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermogrammes) des surfaces observées.

Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple).

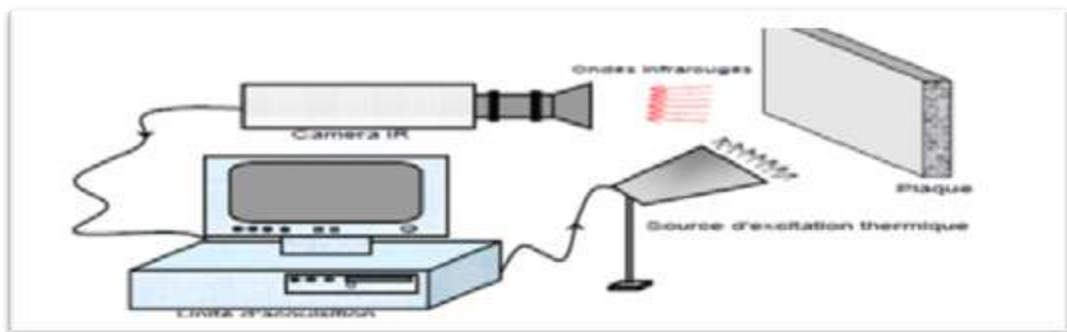


Figure 1. 7 Examen par Thermographie, [2].

Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique, [4].

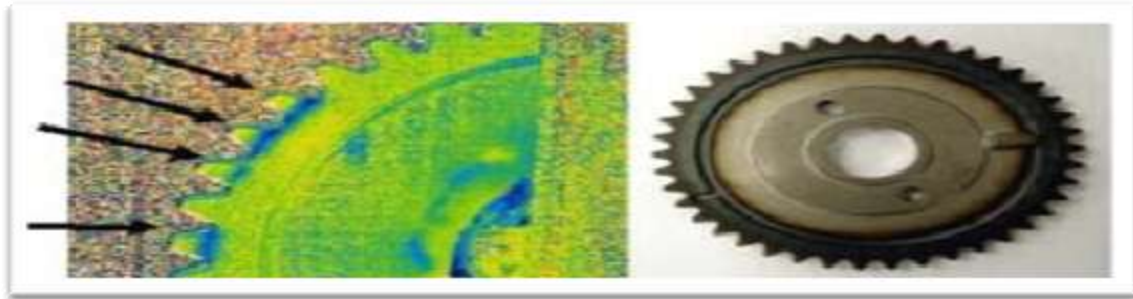


Figure 1. 8 Exemple d'examen par Thermographie, [2].

✚ Thermographie pulsionnelle

Elle consiste à déposer à un instant T_0 , une impulsion spatialement uniforme de chaleur sur la surface de la pièce à contrôler et à observer l'évolution de la température de surface au cours du transfert de chaleur par conduction dans l'épaisseur. La présence d'une discontinuité dans le matériau perturbe le flux thermique ce qui se traduit par un écart de température appelé contraste thermique. La mesure de ce contraste et de l'instant T pour lequel il est maximum renseigne sur la nature et la profondeur du défaut. [2]

✚ Thermographie modulée :

Dans ce cas l'apport de chaleur est périodique et la présence d'une discontinuité se traduit par un déphasage entre l'évolution de la température des surfaces du matériau sain et celle du matériau défectueux.

✚ Méthode surfacique:

L'apport de chaleur et l'observation se font sur un élément de surface de la pièce à contrôler. On enregistre une séquence d'images qui décrit l'évolution de la température de surface au cours du temps en chaque point de la zone contrôlée.

I.2.6 Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises (figure 1.9), [4].

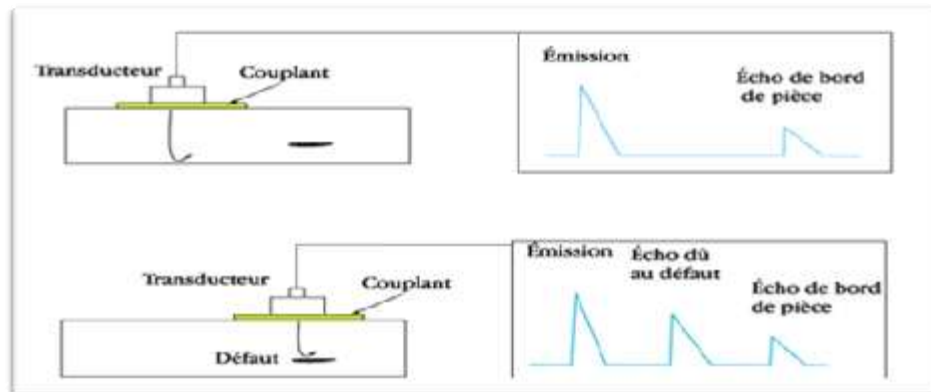


Figure 1. 9 Principe des ultrasons, [4].

Le contact entre le transducteur et la cible n'est jamais parfait ; il existe une couche d'air les séparant. La quasi-totalité de l'énergie émise par le transducteur à l'interface air-matériau ne pénètre pas à l'intérieur du matériau. Il y a ainsi nécessité de déposer un couplant (eau, huile par exemple) entre le transducteur et le matériau.

✚ Avantages

- grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge) ;
- haute sensibilité de détection des défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore) ;
- localisation et dimensionnement des défauts ;
- examen à partir d'une seule face souvent suffisant ;
- détection instantanée, se prête bien à l'automatisation, [2].

✚ Inconvénients

- pour les contrôles "manuels" une grande expérience des opérateurs est nécessaire ;
- méthode impliquant un très haut niveau de technicité ;
- sensible à la géométrie (forme, rugosité) ;
- sensible à la nature et à l'orientation des défauts ;
- technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle).

✚ Domaine d'application

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

Les ultrasons sont très employées pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les profondeurs de traitements thermo-chimiques superficiels sur les aciers,... etc.

I.2.7 Contrôle par laser

La méthode de contrôle par laser est parmi les méthodes optiques les plus répandues en contrôle non destructif. Comme elle est aussi sans contact, les objets irréguliers et les surfaces non planes peuvent être inspectés sans problèmes d'usure. Le mot laser est un acronyme pour amplification légère de la radiation de l'émission stimulée. Cette lumière est très intense, essentiellement monochromatique (longueur d'onde unique), plan polarisé (unidirectionnel) et très stable. Les méthodes de contrôle non destructif par laser sans contact sont populaires dans les industries aéronautique et automobiles, [13].

Avantages

- Inspection sans contact, ne nécessite pas la préparation de surface de la pièce à contrôler ;
- pas de constables : liquide de pénétration, martiaux de marquage ...etc. ;
- avec les capteurs électro-optiques comme les cameras CCD, des mesures en temps réel sont possibles.

Inconvénients

- Considération de sécurité particulières doivent être prises en compte ;
- une composante de chargement est nécessaire pour voir les résultats ;
- les résultats dépendent de la composante de cisaillement ;
- l'interprétation des résultats est subjective.

1.2.8 Thermo-inductive

Ce mode d'examen consiste, à chauffer la zone d'une pièce électriquement conductrice inspectée par induction magnétique. En cas de présence d'un défaut, l'anomalie dans la distribution de la densité de courants induits, crée une concentration de la densité de puissance autour du défaut qui se traduit par des surchauffes locales. L'inhomogénéité de la distribution de la température se propage à la surface du matériau, et peut être détecté par une caméra infrarouge (figure 1.10).

Donc un défaut sera relevé par la combinaison des phénomènes électromagnétique et thermique d'une façon complémentaire.

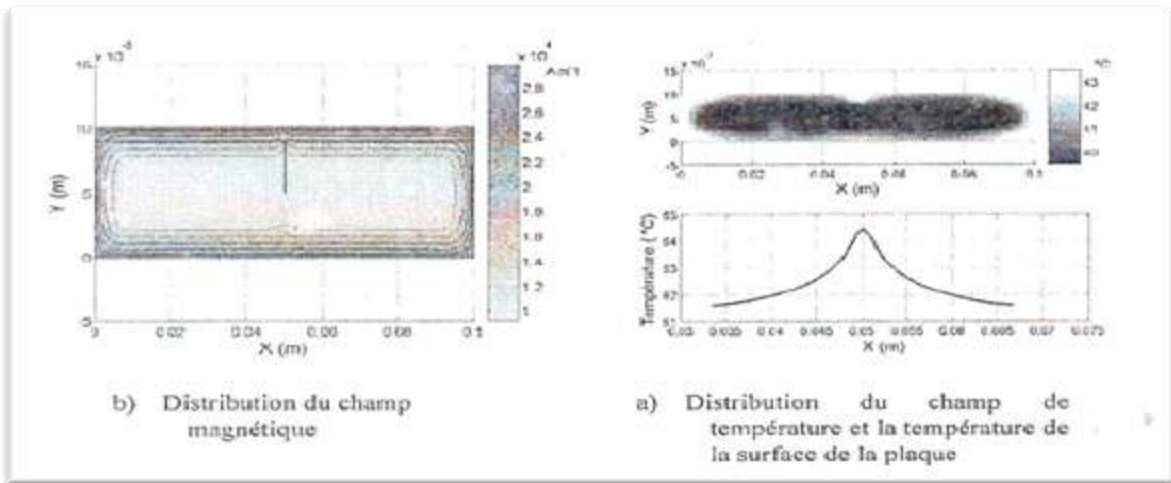


Figure 1. 10 Distribution de champ magnétique et température, [13].

L'intérêt de cette méthode est d'augmenter la probabilité de détection des défauts de surface et d'améliorer l'interprétation des données par une corrélation des résultats obtenus avec les deux méthodes du CND: par courant de Foucault et par thermographie infrarouge. Elle présente l'avantage de créer une perturbation supplémentaire due à la concentration des courants induits autour du défaut, ou une pièce de forme d'une plaque a été inspectée. La présence du défaut perturbe les lignes de courants induits et crée des surchauffes supplémentaires qui s'ajoutent au retour de l'onde thermique à la surface après la stimulation thermique. Cela engendre une élévation de température à la surface au-dessus du défaut. La technique thermo-inductive permet également de contrôler facilement la puissance induite, de chauffer à la surface ou au cœur et de s'adapter aux différentes géométries des pièces inspectées et des défauts rencontrés, [4,13].

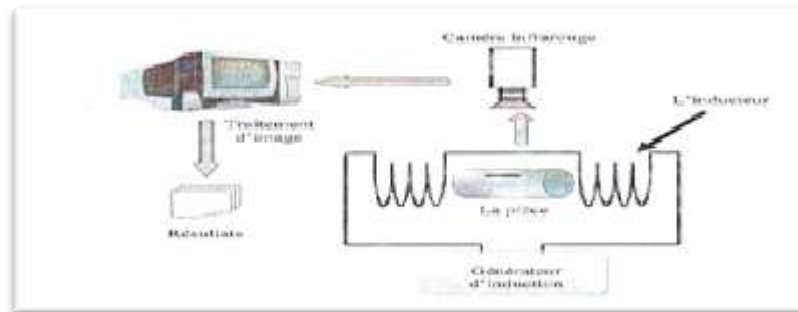


Figure 1. 11 inspection par thermo-inductive, [13].

✚ Avantages

- Méthode relativement rapide et sans contact ;
- La technique est globale et elle permet l'inspection de l'ensemble de la pièce à la fois ;
- toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée ;
- Grande sensibilité de détection de défauts ;

L'automatisation est possible pour des pièces de géométrie constantes.

✚ Inconvénients

- La technique s'applique seulement pour les matériaux électriquement conducteurs ;
- Sensible au chauffage non uniforme ;
- L'interprétation des mesures n'est pas toujours facile, surtout pour identifier la nature des défauts.

I.2.9 CND par courants de Foucault

Cette méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs de l'électricité. Elle consiste à placer une pièce conductrice dans un champ magnétique variable dans le temps. Celle-ci est alors parcourue par des courants induits, appelés "courants de Foucault" (physicien français 1819- 1868) Ainsi, une bobine placée à proximité d'une pièce conductrice et parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits dans la pièce. Ces courants créent eux-mêmes un flux magnétique induit qui s'oppose au flux d'excitation, modifiant par là-même la f.é.m de la bobine.

C'est l'analyse de cette variation de f.é.m. qui fournira les informations exploitables pour un contrôle, en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage). On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation de la f.é.m. induite dans la bobine ou de manière équivalente la variation d'impédance (cas harmonique) décelable au niveau de la bobine d'excitation.

Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault se développent principalement sur la surface des corps conducteurs (effet de peau) (voir figure 1.12). Si on considère une pièce, [4].

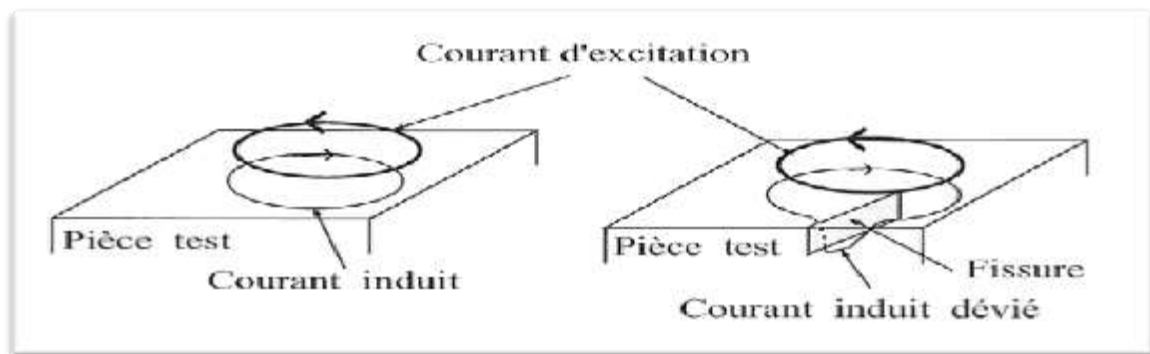


Figure 1. 12 Principe du CND par courants de Foucault, [4].

✚ Avantages

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 couplant. 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, [4].

✚ Inconvénients

- La profondeur d'inspection est dépend de la fréquence d'excitation ;
- La détection des défauts se fait d'une manière locale ;
- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs ;
- La position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts ;
- La compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection, [4, 13,14].

1.1 Méthode directe

Cette méthode consiste à passer un courant dans un tube figure (1.13 a) où dans une plaque figure (1.13 b). Lorsqu'un défaut orienté selon l'axe entre électrodes, perturbe la distribution du champ est donc détectée. Un défaut transversal par rapport à cet axe n'est pas détecté, [2].

1.2 Méthode indirecte

L'examen par cette méthode basé sur la génération d'une induction par un solénoïde ou un aimant permanent, applicable pour les tubes et plaques. La présence d'un défaut transversal par rapport aux lignes du champ dévie celle-ci est détecté. Contrairement à un défaut orienté parallèlement au lignes du champ.

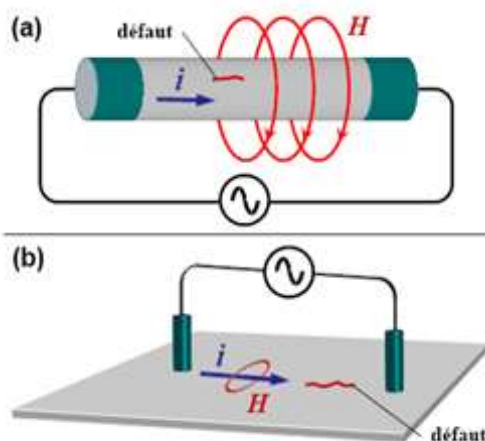


Figure 1.13 Examen par courants de Foucault d'un défaut transversal (méthode direct) , [2].

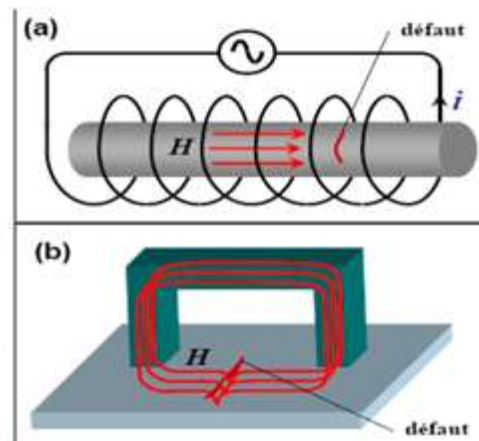


Figure 1.14 Examen par courants de Foucault d'un défaut transversal (méthode indirect), [2].

Pour la détection des défauts, on utilise deux types de courants de Foucault dans le C.N.D. :

- **Les courants de Foucault basse fréquence (ordre du Hz/kHz) :** Les courants de Foucault basse fréquence permettent de déterminer l'état global d'une pièce en la mettant au centre de la bobine.
- **Les courants de Foucault haute fréquence (50 kHz à 500 kHz) :** Les courants de Foucault à haute fréquence permettent de localiser en surface des bulles d'air dans le métal, en déplaçant une bobine au dessus du défaut. Il faut donc pouvoir mettre la pièce en rotation. Toutefois, il reste possible de créer une sonde rotative que l'on approche de la pièce mais le contrôle est plus complexe à réaliser (à cause de la variation d'entrefer plus importante).

Domaine d'application

Les techniques de contrôle utilisant les courants de Foucault sont utilisés pour effectuer les opérations suivantes :

- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe de composants aéronautiques ;
- Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau ;
- Mesure d'épaisseur de revêtements (conducteurs non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur...) ;
- Recherche de défauts sur produits en sortie de fabrication (tubes, rails, barres...) ;
- Suivi d'installations et de matériels en service ;
- Mesure d'épaisseur de matériaux amagnétiques ;
- Contrôles de soudures ne présentant pas de vagues de solidifications de soudage trop marquées.

I.3 Principes de détection des défauts.

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

I.3.1 Hétérogénéités et défauts

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

I.3.2 Défauts de surface

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

La première catégorie « défauts ponctuels » correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

La seconde catégorie correspond aux « défauts d'aspect », c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

I.3.3 Défauts internes

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

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

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

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif, les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un éventuel défaut et les bases physiques qui gouvernent les procédés de contrôle. Nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, le contrôle par laser, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la technique des courants de Foucault,

la thermographie et enfin le procédé thermo-inductive. Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients.

Il n'y a pas de technique de CND qui soit valable pour tous les matériaux et tous les défauts, le choix d'une technique dépend de plusieurs facteurs, nature (conducteur ou isolant), dimensions et état de surface du matériau à contrôler, type de défaut débouchant, sous cutané ou interne, but du « CND » recherche de défaut ou caractérisation des pièces à contrôlées, mesure d'épaisseur....

Comme la plus part des matériaux utilise en électrotechnique soit de type conducteur électrique au magnétique, Le CND par courants de Foucault s'adapte bien pour ces types de matériaux, nous avons jugés utile de lui consacré le chapitre suivant.

Chapitre



Capteurs Inductifs

Capteurs Inductifs

II.1 Introduction

Dans le secteur industriel. Les capteurs à courants de Foucault sont utilisés depuis plus d'un siècle pour le contrôle des pièces conductrices notamment métalliques. De nos jours, la théorie des capteurs à courants de Foucault est déjà largement développée. Ils trouvent leurs applications dans divers domaines industriels qui vont de la mesure des propriétés de la matière. Des mesures dimensionnelles jusqu'à la détection de défaut dans les pièces mécaniques. Dans ce chapitre, on donnera quelques notions sur les courants de Foucault et le principe des capteurs inductifs. Ensuite on passera en revue sur les différents types de capteurs à courants de Foucault, les différentes formes géométriques des circuits magnétiques, les modes d'excitations et on terminera par les principaux paramètres influents l'inspection.

II.2 Les courants de Foucault

Un champ magnétique variable dans le temps et passant à travers un contour conducteur fermé donne naissance à une force électromotrice qui joue le rôle de d'un générateur de tension qui engendre un courant dans ce contour. Ce courant apparaît aussi dans les corps conducteurs (acier, cuivre, aluminium,...etc.) en présence d'un champ magnétique variable. Ces courants se referment dans les circuits situés dans des plans perpendiculaires au champ magnétique. De tels courants sont appelés courants de Foucault (courants induits).

Ces courants créent, à leur tour, leurs propres champs magnétiques et peuvent avoir une action démagnétisant sur le champ principale (initial) d'une part ; d'autre part ces courants induits dans les corps métalliques entraînent un excès de consommation d'énergie électrique et réduisant le rendement des systèmes électromagnétiques. Ces pertes sont appelés pertes par courant de Foucault. Cependant, on peut les utiliser pour mettre en action certains mécanismes pour obtenir un régime de fonctionnement souhaité. Les courants induits sont très utilisés dans les fours à induction, les magnétomètres, les compteurs d'énergie électrique, le freinage et le diagnostic des objets métalliques (control non destructif par courant de Foucault, [13]).

II.3 Définition d'un capteur

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique (information entrante) une autre grandeur physique de nature différente (la plus part du temps, électrique). Cette grandeur, représentative de la grandeur prélevée, est utilisable à des fins de mesure ou de commande, [2].

Description : La figure 2.1 donne le principe d'un capteur



Figure 2. 1 Principe d'un capteur, [2].

II.3.1 Paramètres du capteur

Comme beaucoup de composants ou ensembles électroniques, il existe un certain nombre de paramètres électriques communs à tous les capteurs. Ils caractérisent les performances et donc leurs utilisations dans un environnement donné.

➤ **Précision :**

La précision d'un capteur est caractérisée par l'incertitude absolue obtenue sur la grandeur électrique obtenue à la sortie du capteur. Elle s'exprime en fonction de la grandeur physique mesurée.

➤ **Sensibilité :**

Ce paramètre caractérise l'aptitude du capteur à détecter la plus petite variation de la grandeur à mesurer.

➤ **Étendue de mesure :**

Cette caractéristique donne la plage de fonctionnement du capteur pour la grandeur à mesurer. Elle est souvent notée E.M.

➤ **Linéarité :**

Un capteur est dit linéaire s'il présente la même sensibilité sur toute l'étendue de sa plage d'emploi.

➤ **Fidélité :**

Un capteur est dit fidèle si le signal qu'il délivre ne varie pas pour une série de mesures concernant la même valeur de la grandeur d'entrée.

II.3.2 Domaines d'utilisation des capteurs

Le domaine d'utilisation des capteurs est très variés, très vaste car la nécessité de ce dispositif dans plusieurs domaines d'application ; (le tableau 2.1) donne les formes des capteurs utilisés dans le domaine mécanique, électrique, climatique.

MECANIQUE	ELECTRIQUE	CLIMATIQUE	DIVERS
indication de présence	tension	Température	rayonnement
déplacement linéaire	courant	Humidité	luminosité
déplacement angulaire	puissance	Vent	niveau acoustique
vitesse	fréquence	Pluviométrie	célérité acoustique
accélération	champ électrique	ensoleillement	champ magnétique
force	charge	durée d'insolation	débit
pression	/	durée de pluie	couleur
couple	/	/	salinité

Tableau 2. 1 Différents domaines d'application des capteurs, [2].

II.3.3 critères de choix d'un capteur

L'utilisation d'un capteur est liée a plusieurs critères, la figure 2.5 donne une idée ou bien en bref sur ces critères.

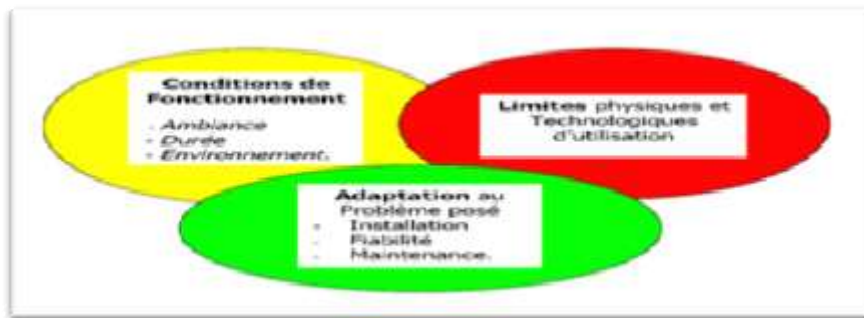


Figure 2. 2 Critères de choix d'un capteur, [2].

II.3.4 Capteurs plus utilisés en CND

Les capteurs les plus utilisés dans le Contrôle non Destructif sont résumés dans le tableau 2:

Capteurs	Domaines d'utilisation
Capteurs inductifs à courants de Foucault	C'est un capteur de structure simple, de poids léger. Consacré à: - Détection de défauts interne ou externe (fissure, corrosion, humidité ...). Basé sur la variation d'impédance. - Appliqué aux : Tube de gaz, d'eau, pièce plane, circulaire....
Capteurs à ultrasons	Le capteur permet de détecter tout type de matériau sauf les objets absorbant (fissure, défauts interne, surfacique). Dans un tube, cylindrique, torique, une tôle, ...
Capteurs Optiques	Structure simple, poids léger, haute précision, travail à haute température utilisé pour détecter les fissures dans les turbo-machine par exemple.
Capteurs de températures	Distribution de la température au niveau d'une pièce sous teste. Appliqué dans la technique de thermographie,

Capteurs capacitifs	Structure simple, poids lié, durable, la détection est faite à travers son constante diélectrique, utilisé pour la détection des fissures dans les matériaux conducteurs de l'électricité, les turbos-machines
---------------------	--

Tableau 2. 2 Capteurs plus utilisés en CND, [2].

II.4 Capteurs inductifs

Les capteurs utilisant des méthodes magnétiques sont capables de mesurer la position ou les déplacements de pièces qui sont : soit aimantées, soit ferromagnétiques, soit seulement conductrices. La mesure d'une distance est réalisée par :

La mesure de l'induction magnétique ou de ses variations, ou la mesure de l'impédance, ou le couplage de bobinages montés sur un circuit magnétique. La mesure de l'induction magnétique peut être faite à l'aide de Détecteurs à effet Hall, de magnétorésistances ou de circuits magnétiques saturables. Pour mesurer les variations de l'induction magnétique, un bobinage monté sur un circuit magnétique peut être utilisé.

Des capteurs inductifs sont réalisés en utilisant un ou deux bobinages alimentés par un courant alternatif. Ils permettent de mesurer la réluctance du circuit magnétique utilisé ou les pertes générées par les courants de Foucault.

• Capteurs mesurant l'induction magnétique

Ces capteurs sont utilisables pour mesurer les déplacements d'une pièce aimantée ou ferromagnétique.

• Mesure des déplacements d'une pièce aimantée

La pièce aimantée est souvent constituée d'un barreau ferromagnétique qui présente une forte rémanence. Les matériaux pour les réaliser sont très nombreux:

- • Des aciers durs.
- • Des ferrites durs.
- • Des terres rares, comme les aimants au néodyme fer bore pouvant présenter une rémanence de 1,1 Tesla.

Des capteurs à effet Hall ou des magnétorésistances classiques sont utilisés pour mesurer l'induction magnétique. Différentes configurations de mesure sont possibles en fonction des positions relatives de la pièce aimantée et du capteur :

• Mesure dans l'axe de l'aimant

L'induction magnétique décroît en fonction de la distance entre le capteur et l'aimant en suivant une loi approximativement hyperbolique. Et change de signe avec la position (x) du détecteur par rapport au centre de l'aimant. La loi de variation de l'induction magnétique

est fonction de la longueur de l'aimant et de la distance du capteur. Le gradient sera plus important pour un capteur court.

Et il y a Trois types connus ou bien très utilisé :

- **La bobine encerclante:** c'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Elle analyse un anneau de la pièce ayant une largeur égale à la largeur active de la bobine. La bobine encerclante exige que la pièce remplisse bien le volume intérieur du capteur, donc des sections droites de pièce et de bobine voisines, [11].

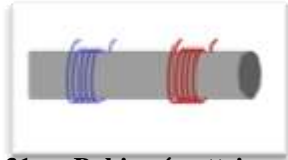


Figure 2. 3 1ere Bobine émettrice et 2eme bobine réceptrice, [11].



Figure 2. 4 Une seule Bobine émettrice et réceptrice.

- **Le palpeur ou la bobine ponctuelle:**

C'est un capteur destiné à l'examen local de la pièce à partir de Sa surface sur laquelle il peut se déplacer avec deux degrés de liberté. Il s'agit d'une petite bobine qui peut être placée sur, ou à proximité de la surface de la pièce. Elle analyse une zone quasiment égale à l'aire de Sa section transversale. Elle permet donc une inspection locale de la pièce et elle peut atteindre des régions d'accès réputées difficiles. Dans le cas d'examen d'une surface importante, elle nécessite un balayage méthodique de la surface de la pièce.

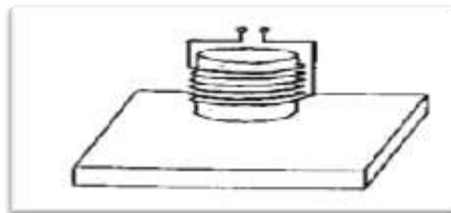


Figure 2. 5 Exemple sur bobine ponctuelle.

- **La sonde:** c'est un capteur destiné à l'examen d'un produit par l'intérieur, elle peut être déplacée à travers un tube ou une conduite.

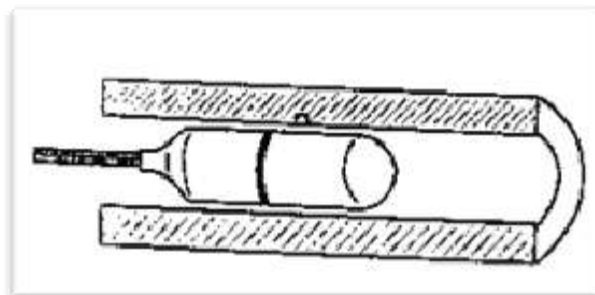


Figure 2. 6 Exemple sur la sonde.

II.4.2 Principe des capteurs inductif

Un capteur inductif est constitué d'une bobine parcourue par un courant variable dans le temps, génère des courants induits dans les objets métalliques apportés à proximité de ce capteur. Ces courants créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux du générateur modifiant ainsi l'impédance du capteur. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour le contrôle. En effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques des objets considérés, et bien entendu des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage). On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants induits, puisse engendrer une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation, comme l'illustre de la figure, [13].

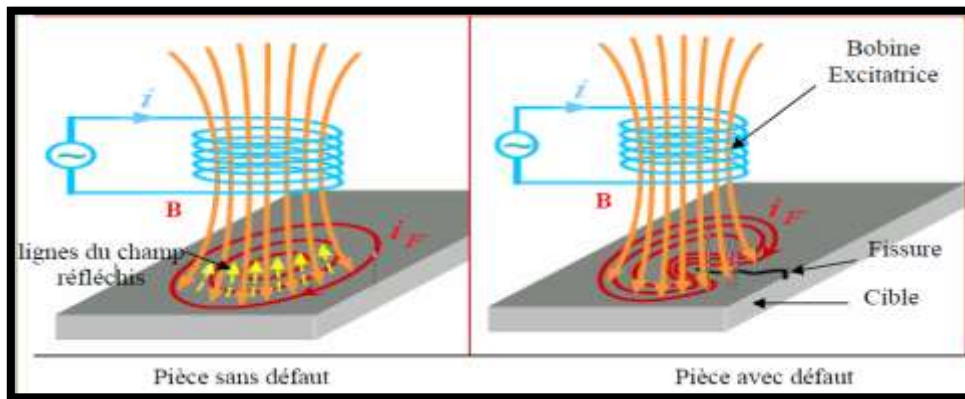


Figure 2. 7 Principe de capteur inductif par courants de Foucault, [2], [13].

II.4.3 Différentes formes de capteurs inductifs

En fonction de leur utilisation, les capteurs inductifs peuvent prendre des formes différentes pour optimiser l'une ou l'autre de leurs caractéristiques.

- **Capteurs avec ou sans blindage :**

Les deux capteurs ont la même étendue de mesure. Le capteur sans blindage a un diamètre plus petit mais il doit être plus éloigné d'un capteur semblable pour éviter leur influence mutuelle. Il ne doit pas être inclus dans une pièce conductrice trop proche de la bobine active. Le capteur avec blindage peut, quant à lui, être inséré dans une pièce conductrice.

- **Capteurs à noyaux demi-tore ou demi-pot**

Pour la même étendue de mesure, le capteur inductif dont le noyau est composé d'un demi-tore est deux fois plus petit que celui dont le noyau est composé d'un demi-pot.

À basse fréquence, ces capteurs peuvent mesurer des pièces ferromagnétiques. À haute fréquence, on les utilise pour mesurer des pièces amagnétiques, seulement conductrices.

Si sa largeur est adaptée au pas, le capteur dont le noyau est en forme de bobine peut être utilisé pour contrôler la présence d'un filetage ou son diamètre moyen. Le capteur composé d'un solénoïde placé dans un tube ferromagnétique est assez insensible au centrage du fil s'il est assez long, sa réponse est proportionnelle à la section du fil, c'est-à-dire au carré de son diamètre.

- **Capteur inductif le plus simple**

Le plus simple des capteurs inductifs est composé d'une simple bobine (figure 2.8 a). La proximité d'une pièce ferromagnétique favorisera le passage du flux magnétique (figure 2.8 b). En revanche une pièce conductrice s'opposera au flux magnétique par la génération de courants de Foucault (figure 2.8 c). Les lignes de champ sont canalisées par la pièce électromagnétique, la réluctance du circuit magnétique est alors diminuée. Elles sont repoussées par la pièce seulement conductrice, la réluctance est alors augmentée.

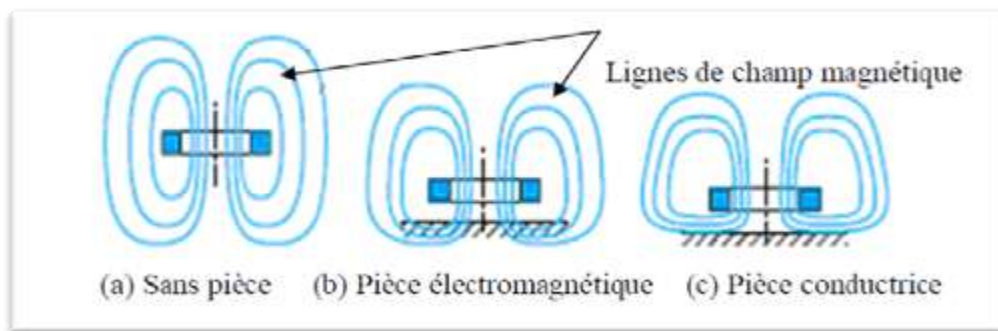


Figure 2. 8 Modification des lignes de champ en fonction de la nature de la pièce, [2].

II.4.4 Différents types des capteurs inductifs

Il existe un grand nombre de façons pour mettre en œuvre le bobinage afin de réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les configurations de base des capteurs.

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 sa signal de sortie (figure 2.9). [2, 4,13]

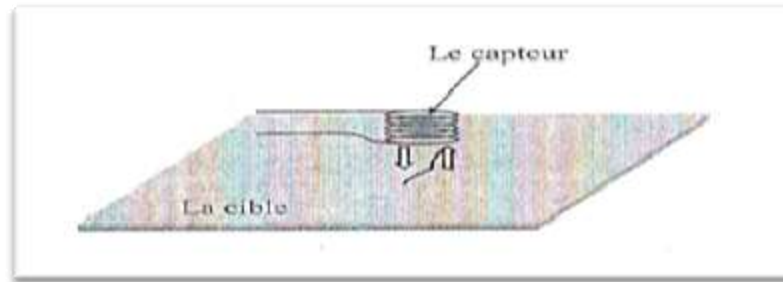


Figure 2. 9 Le capteur absolu, [13].

Capteur double

C'est un capteur a fonctions séparé, il est constitué de deux bobine une excitatrice pour créer le flux et l'autre réceptrice pour le recueillir.ces deux bobines sont moulées dans un même boîtier pour éviter toute modification fortuite de leur mutuelle. Ce type de capteur est très utilisé pour les contrôles a bases fréquences ($f < 1\text{kHz}$). (Figure 2.10)

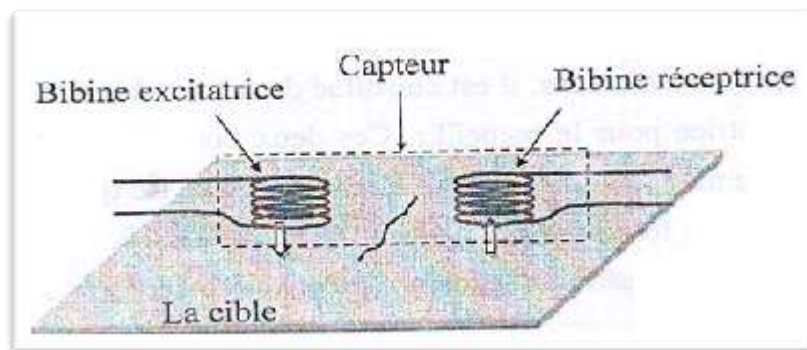


Figure 2. 10 le capteur double, [13].

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 2.11). Cette sonde est particulièrement utilisé pour détecter des discontinuité lors de son déplacement le long d'une pièce en s'affranchissant des perturbations induites telle que les variations de la distance sonde-pièce (lift-off) .

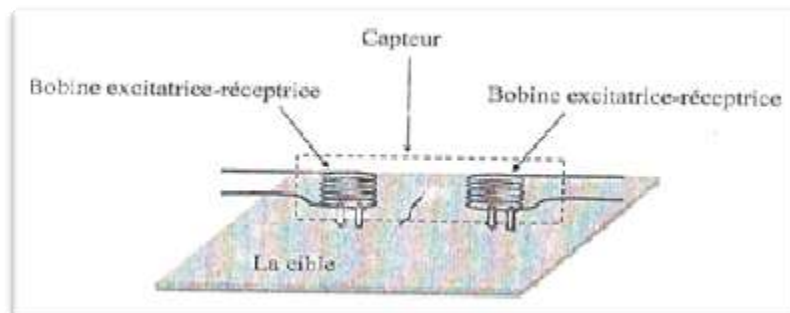


Figure 2. 11 le capteur différentiel, [13].

Capteur multiple

Le capteur multiple (capteur matriciel) peut être réalisé par assemblage d'un ensemble de bobines identiques qui fonctionnent d'une manière autonome. La constitution d'un capteur matriciel est nécessaire pour répondre à certains critères. Dans le cas d'un contrôle effectué selon deux axes, la procédure d'inspection avec un capteur unique peut s'avérer trop longue. Pour remédier ce problème, il est très intéressant d'associer en ligne plusieurs capteurs élémentaires fonctionnent en même temps. En multiplexant les informations issue de chacun d'eux, il est possible d'accéder plus rapidement aux propriétés de la cible. L'association en ligne de plusieurs capteurs judicieusement espacés en fonction de la taille des défauts à détecter permet de recueillir des signaux suffisamment riches en information, [2, 14,16]

II.6 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.

II.7 Les méthodes et techniques de mesures

- ✚ **Les techniques :** En plus de la mesure directe de la variation de l'impédance par l'utilisation d'un impédance-mètre, les techniques classiques de métrologie s'appliquent bien entendu à ces dispositifs. On distingue donc ;
 - des mesures absolues: on a un seul élément de mesure. Ce type de capteur est utilisé lorsque les variations de signal sont suffisamment importantes (mesure d'épaisseur de revêtement, de conductivité).
 - des mesures absolues compensées: elles consistent à utiliser deux capteurs absolus dont l'un sert de référence. La mesure compensée sert à éliminer une grandeur d'influence (température, conductivité, variation lente de l'entrefer, ...) et trouve des applications dans le tri de matériaux, la recherche de défauts débouchants importants,
 - des mesures différentielles (figure 2.12): elles nécessitent deux éléments de mesure rigidement liés dans le capteur. On recueille alors directement la différence entre les deux valeurs fournies par les capteurs. La mesure différentielle consiste à comparer deux mesures effectuées en deux emplacements voisins et à un même moment. Elle est utilisée particulièrement pour détecter des discontinuités lors d'un déplacement du capteur le long d'une pièce. Les deux dernières méthodes de mesure sont mises en œuvre en utilisant des structures de type pont de Wheatstone, [3].

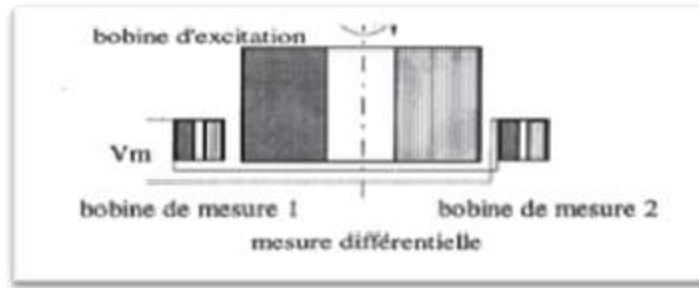


Figure 2. 12 Exemple de capteur différentiel, [3].

✚ Les méthodes de mesure

Lorsque l'on étudie la théorie des courants de Foucault, on s'intéresse en raison de sa simplicité à un enroulement à double fonction. Dans la pratique, toute mesure évoluée fait appel à un assemblage d'au moins deux enroulements à fonction réceptrice, de manière à compenser au maximum les dérives pouvant perturber la mesure. La sensibilité demandée aux Équipements à courants de Foucault est en variation relative de 10^{-6} , ce qui nécessite une mesure par différence, [11].

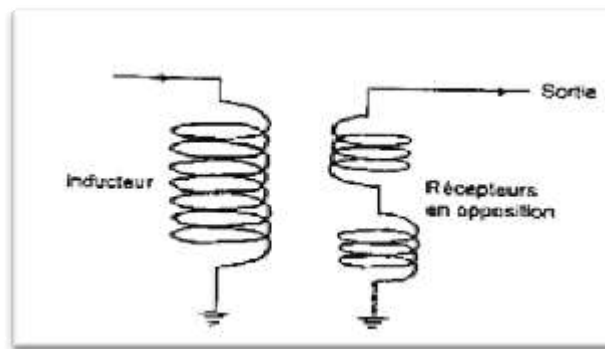


Figure 2. 13 Réception par bobine simple fonction. [11].

La fonction séparée est plus complexe à construire mais plus simple à alimenter puisque l'isolation galvanique bobine d'émission, bobine de réception permet une alimentation et une réception monopolaire par rapport à la masse comme le montre la figure (2.13).

- Dans le cas d'un capteur à double fonctions, deux montages sont possibles:
- soit par une alimentation flottante à travers un transformateur d'injection, permettant une réception monopolaire à partir d'un pont de Wheatstone en connectant le point commun des enroulements à la masse; voir figure (2.14).

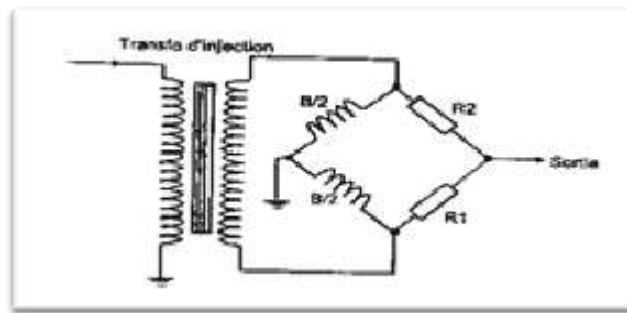


Figure 2. 14 Réception par bobine double fonction avec signal référence a la masse, [11].

- soit par une alimentation monopolaire nécessitant une réception différentielle sur le pont, figure (2.15).



Figure 2. 15 Réception par bobine double fonction avec signal flottant, [11].

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit quelque notion sur la création des courants de Foucault et le principe de capteur inductif. Ensuite on a passé en revue les différents types de capteurs à courants de Foucault, différentes formes géométriques des circuits magnétique.

Egalement sont décrit la forme et la profondeur de pénétration des courants induits. Dans le troisième chapitre, nous traiterons la modélisation du capteur inductif dans le cas 2D par la méthode des éléments finis « MEF ».

Chapitre

Modélisation du problème électromagnétique

Modélisation du problème électromagnétique

III.1 Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre précédent les techniques d'inspection par courants de Foucault. En effet, la procédure d'inspection nécessite un ensemble de connaissance sur les propriétés physiques des matériaux, sur les phénomènes électromagnétiques ainsi que sur les défauts et les pièces inspectées. Il est donc nécessaire de développer une modélisation qui aide à la compréhension du comportement de ces techniques afin d'optimiser et prédire la détectabilité des défauts. Une modélisation qui consiste à établir une structure mathématique qui décrit les phénomènes physiques, peut être obtenue par deux groupes de méthode :

- les méthodes analytiques : souvent utilisées pour l'étude des problèmes à géométrie simple, elles nécessitent des hypothèses simplificatrices. L'intérêt de ces méthodes réside dans la simplicité de calcul et la solution exacte du problème. Cette méthode devient rapidement impraticable si l'on étudie des problèmes présentant des formes complexes.
- les méthodes numériques : du fait que l'utilisation de la méthode analytique n'est pas concevable lorsque des structures complexes sont étudiées, il est donc nécessaire de recourir à des méthodes de résolution numérique. Elles sont basées sur une discrétisation du domaine d'étude (maillage) et l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque élément du maillage. On distingue par exemple la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis [13.2] et la méthode des éléments finis.

Ce chapitre sera consacré à la modélisation du problème électromagnétique en deux dimensions par la méthode des volumes finis d'un capteur inductif à courant de Foucault

III.2 Analyse des phénomènes électromagnétiques

Les problèmes liés au calcul des courants de Foucault peuvent être schématisés par un modèle type composé de l'air, du matériau conducteur et une source de courant. Ces trois objets forment le domaine de calcul de frontière.

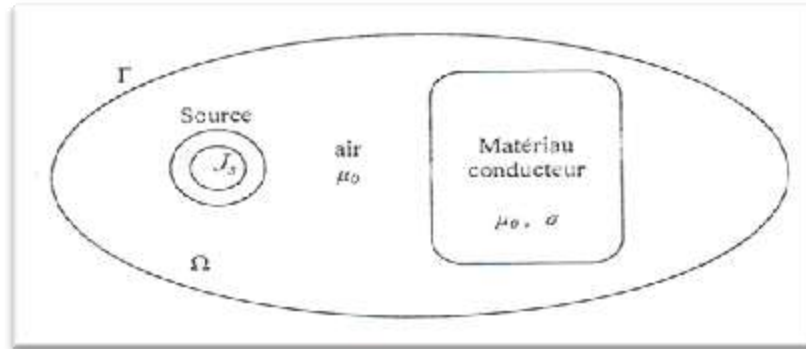


Figure 3. 1 domaine d'étude

2.1 Équations de Maxwell

L'étude d'un dispositif électromagnétique est basée essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et des équations de Maxwell, [6].

$$\operatorname{div}(\mathbf{B}) = 0 \quad \text{Equation de conservation du flux} \quad (\text{III.1})$$

$$\operatorname{rot}(\mathbf{E}) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Equation de Maxwell Faraday} \quad (\text{III.2})$$

$$\operatorname{div}(\mathbf{D}) = \rho \quad \text{Equation de Maxwell – Ampère} \quad (\text{III.3})$$

$$\operatorname{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Equation de Maxwell – Ampère} \quad (\text{III.4})$$

E : Champ électrique.

H : Champ magnétique.

D : Induction électrique.

J : Vecteur densité de courant.

ρ : Densité de charge électrique.

B : Induction magnétique.

Pour un milieu conducteur la densité de courant est donnée par la loi d'Ohm généralisée :

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{ind} + \mathbf{J}_s \quad (\text{III.5})$$

$$\mathbf{J}_{ind} = \sigma[\mathbf{E} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}] \quad (\text{III.6})$$

Où σ la conductivité électrique, (v) le vecteur vitesse, J_s la densité de courant imposé dans l'inducteur et J_{ind} la densité du courant induit. (σE) , représente le courant de conduction résultant du champ électrique E , et $\sigma [v \wedge B]$ exprime le courant résultant du mouvement à la vitesse v .

Si le système est composé de deux milieux différents, il faut ajouter des conditions aux limites lors du passage d'un milieu à un autre qui se résument comme suit :

On fait les hypothèses suivant :

matériau parfait

Le champ d'excitation «H» rend compte de l'influence du milieu magnétique sur les grandeurs. Il s'exprime en Ampères par mètre.

Dans le vide ou dans l'air : l'induction et l'excitation magnétique sont colinéaires :

$$B = \mu H \quad (III.7)$$

Au sein d'un matériau magnétique : il en est de même. Mais on fait intervenir la perméabilité relative du matériau μ_r :

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (III.8)$$

Et on a aussi

$$D = \varepsilon E \quad (III.9)$$

ε, μ, σ Constant au sein du matériau.

milieu conducteur

Le courant de déplacement $\frac{\delta D}{\delta t}$ est petit devant J . on a ; Donc $(rot H = J)$

ε, μ Permittivité et perméabilité

σ Conductivité

ρ Charge volumique

J densité du courant

On a :

$$rot B = \mu (rot H) \quad (III.10)$$

$$rot B = \mu J \quad (III.11)$$

$$rot B = \mu \sigma E \quad (III.12)$$

$$rot (rot B) = \mu \sigma (rot E) \quad (III.13)$$

Donc :

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot}B) = -\mu\sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{III.14})$$

L'analyse vectorielle nous donne :

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot}B) = \operatorname{grad}(\operatorname{div}B) - \Delta B \quad (\text{III.15})$$

Avec

$$\operatorname{div} B = 0 \quad (\text{III.16})$$

Finalement

$$\Delta B = \mu\sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{III.17})$$

Si le champ magnétique est une fonction sinusoïdale du temps :

$$B = B_0 e^{j(\omega t - \phi)} \quad (\text{III.18})$$

On obtient l'équation différentielle complexe

$$\Delta B - j\mu\sigma\omega B = 0 \quad (\text{III.19})$$

2.2 Profondeur de pénétration

On appelle profondeur de pénétration la profondeur δ pour la quelle l'amplitude du courant est égale à l'amplitude en surface de la cible divisée par

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \cdot \mu\sigma}} \quad (\text{III.20})$$

f est la fréquence d'excitation (Hz).

Il en résulte qu'environ 37% des courants induits passent entre la surface et cette profondeur δ , créant une zone de forte sensibilité et qui est très importante du point de vue de la sensibilité à la détection des défauts dans la technique de contrôle non destructif par courant de Foucault,[13].

III.3 Condition de transmission et condition aux limites

3.1- conditions de transmission

Les champs électromagnétiques subissent des discontinuités lors du passage entre deux milieux de propriétés différentes. Les conditions de transmission ou de passage s'écrivent alors à l'interface entre deux milieux (figure 3.2), [1.2.13].

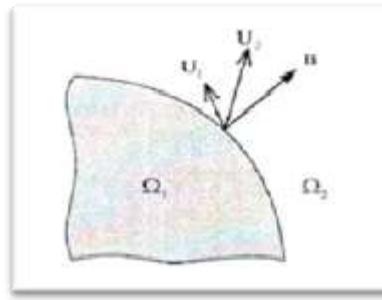


Figure 3. 2 Interface entre deux milieux.

- ✓ La continuité de la composante tangentielle de E.

$$(E_1 - E_2) \wedge n = 0 \quad \text{(III.21)}$$

- ✓ La continuité de la composante normale de B.

$$(B_1 - B_2) \cdot n = 0 \quad \text{(III.22)}$$

- ✓ La discontinuité de la composante normale de D, cette discontinuité est égale aux charges superficielles ρ_s .

$$(D_1 - D_2) \cdot n = \rho_s \quad \text{(III.23)}$$

- ✓ La discontinuité de la composante tangentielle de H, cette discontinuité est égale aux courants superficiels j_{sp} .

$$(H_1 - H_2) \wedge n = j_{sp} \quad \text{(III.24)}$$

3.2- conditions aux limites

La résolution du système composé par les équations de Maxwell et les lois de comportement admet une infinité de solutions. Pour assurer l'unicité de la solution, des conditions aux limites sont imposé.

$$H \wedge n |_{\tau} = 0 \quad \text{(III.25)}$$

D'après l'équation (III.4), on en déduit que :

$$J \cdot n |_{\tau} = 0 \quad \text{(III.26)}$$

$$E \wedge n |_{\tau} = 0 \quad \text{(III.27)}$$

$$B \cdot n |_{\tau} = 0 \quad \text{(III.28)}$$

Où

n est le vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux 1 et 2.

Avec les hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell à résoudre sont :

$$\begin{cases} \text{rot}(E) = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \text{rot}(H) = J \\ \text{Div}(B) = 0 \\ \text{Div}(D) = 0 \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

3.3-diagramme de TONTI

Tous les problèmes électromagnétiques peuvent être représentés par le diagramme de la figure (3.3) la combinaison par exemple du plan arrière avec le plan reliant la colonne de l'avant gauche et celle de l'arrière droite représente le problème magnétodynamique. A l'aide du diagramme de TONTI, nous allons détailler les principales formulations utilisées pour étudier les problèmes électromagnétiques.

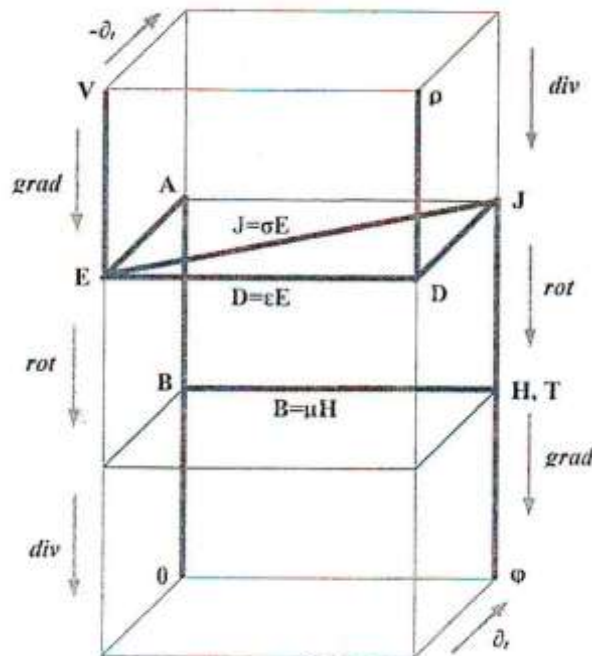


Figure 3. 3 Diagramme de TONTI appliqué à l'électromagnétique.

III.4 Formulation électromagnétiques

4.1 Modèle magnétodynamique

A partir l'équation (III.1), on définit le potentiel vecteur magnétique A par l'équation suivant :

$$B = \text{rot}(A) \quad (\text{III.30})$$

Dans le cas général, il existe une infinité de vecteur potentiel A pouvant satisfaire la relation (III.30). En effet, puisque le rotationnel du gradient de toute fonction scalaire f est nul, donc, tout vecteur $(A + \text{grad } V)$ satisfait la rotation (III.30), d'où la nécessité d'imposer

une condition de jauge afin d'assurer l'unicité de la solution. Nous proposons d'utiliser la jauge de coulomb :

$$\text{Div} (A) = 0 \quad (\text{III.31})$$

L'équation que nous avons établie s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels il y a présence de courants de Foucault provenant de la variation des champs dans le temps. En remplaçant B par $\text{rot}(A)$, l'équation (III.2).

$$\text{rot} \left\{ E + \frac{\partial A}{\partial t} \right\} = 0 \quad (\text{III.32})$$

A partir de cette équation, on peut définir un potentiel scalaire électrique V tel que :

$$E + \frac{\partial A}{\partial t} = \text{grad} (V) \quad (\text{III.33})$$

Les combinaisons des équations (III.6) et (III.33) donne :

$$\sigma E = J - J_s = \sigma \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad} (V) \right\} \quad (\text{III.34})$$

D'où

$$J = \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad} (V) \right\} + J_s \quad (\text{III.35})$$

En remplaçant J par son expression (III.35) dans le système d'équation (III.29), on abouti à l'expression vectorielle condensé de système d'équation (III.29) représentant ainsi l'équation électromagnétique en potentiel vecteur magnétique A, donné par le système d'équation suivant, [2].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} (A) \right) = -\sigma \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad} (V) \right\} + J_s \\ \text{div} (A) = 0 \end{array} \right\} \quad (\text{III.36})$$

L'équation (III.36) représente l'équation de la magnétodynamique transitoire en terme de potentiel vecteur magnétique A avec un terme source. On peut prendre différentes forme selon la région d'étude et les caractéristiques des différents milieux.

L'étude de cette équation en régime statique (indépendant du temps) constitue un régime magnétostatique. Mais si on prend en compte la dépendance au temps avec une alimentation

sinusoïdale (ce qui est notre cas d'étude) cela va constituer un modèle magnétodynamique

en régime harmonique avec $\frac{\partial}{\partial t} = j \cdot \omega$, et l'équation s'exprime par, [2,17] :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(A) \right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot A = J \quad (\text{III.37})$$

Dans la plupart des problèmes de modélisation, les phénomènes électromagnétiques dans le domaine du contrôle non destructif réalisés jusqu'à présent, considèrent une bobine inductrice ou le courant est imposé, une région ferromagnétique ou conductrice qui représente la cible à contrôler et la troisième région qui représentera l'air environnant.

L'adaptation de l'équation (III.37) aux différentes régions constituera le dispositif d'étude et nous permet d'écrire : [17]

Dans l'air :

La région qui entoure le dispositif est caractérisée par l'absence de source ainsi qu'une conductivité électrique nulle, l'équation qui lui sera associée s'écrira :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot}(A) \right) = 0 \quad (\text{III.38})$$

Dans l'inducteur :

Les inducteurs sont des fils fins de cuivre, l'équation (III.37) pourra alors s'écrire sur la forme suivante :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(A) \right) = J_s \quad (\text{III.39})$$

Dans la cible :

La pièce à contrôler est obligatoirement conductrice, l'équation électromagnétique dans cette région s'écrit alors :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(A) \right) + i \cdot \omega \cdot \sigma \cdot A = 0 \quad (\text{III.40})$$

4.2 Présentation du modèle d'étude « Cas d'un capteur différentiel »

4.2.1 Présentation du dispositif en 3D

Le dispositif considéré pour notre étude est une plaque de forme cube entouré par deux bobines série excitées avec un courant et dont les flux s'opposent. Sur la plaque se trouve un défaut symbolisé par une fissure uniformément répartie comme l'indique la figure (3.2)

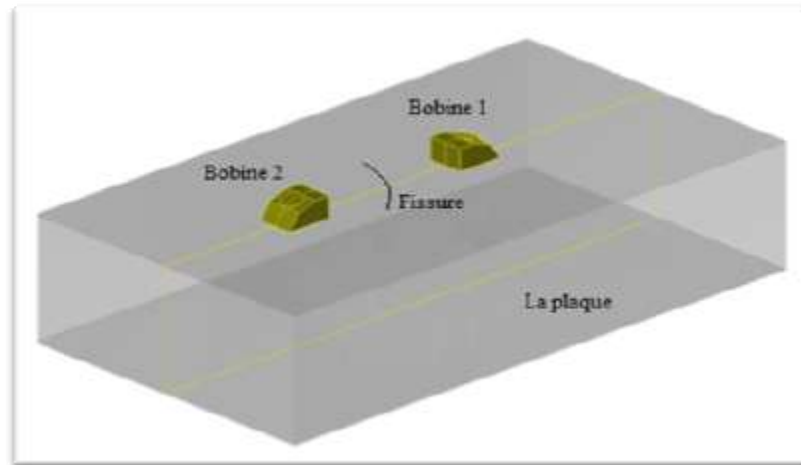


Figure 3. 4 Géométrie du dispositif en 3D

Le dispositif utilisé contient comme le montre la figure (3.4), un capteur (deux bobines), de l'air autour du capteur et la plaque qui à une épaisseur de (3mm), (le lift-off, distance entre le capteur et la plaque est de 1mm).

Le capteur est constitué de deux bobines de balayer la surface de la plaque. Concernant le défaut, il se situe soit sur la surface externe ou interne plus proche à l'extérieur de la plaque. Le défaut provoqué est géométriquement, ce dernier est caractérisé par une profondeur de 1mm.

Le modèle pas axisymétrique, il suffit donc de réaliser un modèle à deux dimensions, [2].

2.4.2 Présentation du modèle en 2D

Le modèle considéré en 2D est constitué par :

- La pièce conductrice,
- Défaut dans la pièce conductrice,
- L'air,
- Les deux bobines montées en série avec un bobinage inversé pour assurer deux flux de sens opposés. La géométrie en deux dimensions est donnée par le schéma de la figure (3.5).

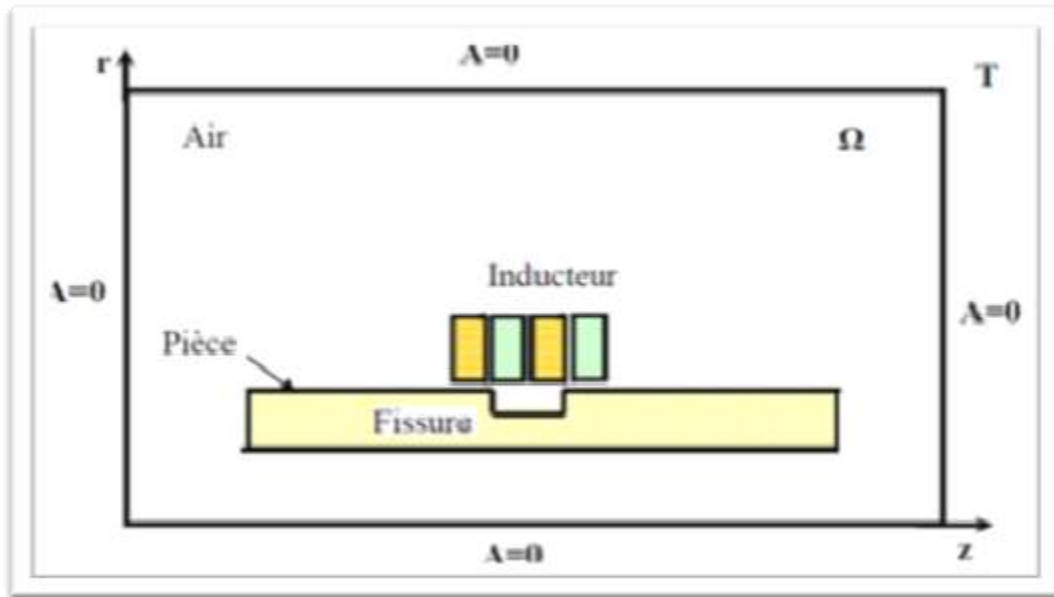


Figure 3. 5 Géométrie du dispositif en 2D

III.5 Méthodes numériques, [7].

La méthode des Eléments Finis (MEF), apparue dans les années 40 et utilisée pour la conception des avions dans les années 50, s'est rapidement imposée dans la majeure partie des domaines scientifiques.

En effet, les EF sont d'une utilisation très souple et s'appliquent aux cas les plus généraux. De plus, de nombreux outils théoriques ont été développés concernant l'estimation d'erreurs et la convergence des schémas numériques. Un peu plus tard, pour résoudre rigoureusement des problèmes numériques.

5.1 Méthode des intégrales de frontières

Cette méthode est basée sur une subdivision de nœuds distribués sur les frontières des différentes régions de dispositif. A partir des valeurs sur les frontières, il est possible dans certains cas de calculer les champs, si c'est nécessaire, à l'intérieur du domaine de résolution.

L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de prendre en considération la saturation, la nécessité d'un espace mémoire et d'un temps de calcul importants, car les matrices issues de cette méthode sont de rang élevé.

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, [2].

5.2 Méthode des différences finis

C'est une méthode numérique simple à mettre en œuvre, est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles, en particulier celles concernant les problèmes de champs électromagnétiques. Cette méthode en 2D, consiste à mailler le domaine de résolution en éléments rectangulaires. En discrétisant aux nœuds du maillage l'équation 3.26 et en tenant compte des conditions aux limites appropriées et des conditions de passages entre les différents milieux, on aboutit à un système algébrique. La méthode des différences finies s'adapte difficilement aux géométries complexes. En plus, elle n'aboutit qu'aux valeurs nodales du vecteur potentiel, ce qui exige une interpolation pour déterminer les valeurs de A en d'autres points du domaine de résolution si c'est nécessaire.

5.3 Méthode des volumes finis

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

Lors de l'assemblage des équations discrétisées, la matrice du système globale est construite par arrête contrairement aux matrices globales issues d'une discrétisation par éléments finis, pour la quelle la construction se fait par élément.

5.4 Méthode des circuits couplés

La base de méthode des circuits couplés, est de faire l'analogie entre les grandeurs électriques et thermiques par exemple, elle consiste à subdiviser le domaine d'étude en spires élémentaire. Par application des lois de Kirchhoff à ces circuits élémentaires, on peut calculer la distribution des variables en question.

5.5 Méthode sans maillage

Cette méthode est plus proche de la méthode des éléments finis. Elle se base sur la résolution de la forme faible des équations aux dérivées partielles par une méthode de Galerkin comme en éléments finis mais par contre l'approximation du champ de la fonction inconnue qui est construite pour être introduite dans la forme faible ne nécessite pas de maillage. Seul un ensemble de nœuds est réparti dans le domaine et l'approximation du champ

de l'inconnue en un point ne dépend que de la distance de ce point par rapport aux nœuds qui l'entourent et non de l'appartenance à un certain élément fini, [1].

5.6 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est apparue dans les années 1950 et n'a été introduite en électromagnétisme qu'en 1970 par M.V.K.Chari et P.P.Sylvester. Et elle a connu dès lors un développement considérable.

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation des solutions d'équations différentielles aux dérivées partielles qui est construite à partir d'une formulation équivalente du problème, elle peut être soit une « formulation variationnelle »*1 ou en « résidus pondéré »*2.

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions.

Cette méthode appliquée au début à des problèmes de mécanique de structure, a connu des développements importants dans différents domaines scientifiques et industriels durant les dernières décennies.

L'étude par éléments finis consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue recherchée pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques.

Cependant elle ne s'applique pas directement aux équations aux dérivées partielles mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre. Les méthodes couramment utilisées pour obtenir la formulation intégrale sont la mise sous forme variationnelle et la méthode des résidus pondérés.

La méthode variationnelle de Ritz consiste à rendre extrémale une fonctionnelle qui est un intégral qui dépend de la fonction inconnue et de ses dérivées. Souvent, cette fonctionnelle représente l'énergie du système. Par contre la méthode des résidus pondérés permet de traiter directement l'équation aux dérivées partielles sans avoir à passer par un principe variationnelle, elle consiste à projeter l'équation à résoudre sur une base de fonction, [2,17].

5.6.1 La discrétisation du domaine :

Le domaine de résolution est discrétisé en petits domaines appelés éléments finis, l'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément, grâce aux fonctions d'interpolation.

L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction des valeurs de l'inconnue aux nœuds de cet élément. On parle alors d'interpolation nodale, [17].

III.6 Calcul de l'impédance

Une fois les valeurs du potentiel vecteur magnétique tout nœud de la région maillé sont déterminées, l'impédance de la bobine qui est notre paramètre d'intérêt peut être calculée. Deux différentes approches couramment utilisées pour l'estimation de cette valeur, sont considérées : la méthode directe et la méthode l'énergie, [1].

6.1 Méthode directe

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

$$Z = \frac{V}{I_s} \quad (\text{III.41})$$

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

$$V = -\int_c E \, dl \quad (\text{III.42})$$

A partir de l'équation :

$$E = -\text{grad}(V) - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (\text{III.43})$$

En régime harmonique:

$$\frac{\partial}{\partial t} = j \cdot \omega \quad (\text{III.44})$$

Nous avons .:

$$E = -j \omega A - \text{grad}(V) \quad (\text{III.45})$$

De plus la tension induite est indépendante du potentiel scalaire ($\text{grad}(V)=0$), en remplaçant (III.45) dans (III.42), nous aurons:

$$V = j \omega \int_c A dl \quad (\text{III.46})$$

A partir de l'équation (III.41) l'impédance de la bobine est donnée par:

$$Z = \frac{j \omega}{I_s} \int_c A dl \quad (\text{III.47})$$

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

$$Z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot r \cdot A}{I_s} \quad (\text{III.48})$$

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

L'impédance de la bobine est toutefois calculée de façon approximative en utilisant la méthode des éléments finis. Considérons l'échantillon de la bobine, discrétisé par éléments triangulaires. Si les dimensions de ces éléments sont petits alors le potentiel vecteur magnétique de toutes les spires couvertes par l'élément (i) peut être approximé par la valeur centrale ci A et similaire les rayons de toutes les spires de l'élément, peuvent être approchés par la valeur centrale ci r . A partir de l'équation (III.48) l'impédance pour chaque spire à l'intérieur de l'élément i est donnée par :

$$Z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot r_{ci} \cdot A_{ci}}{I_s} \quad (\text{III.49})$$

Si N_s est le nombre total de spire de la bobine dans l'échantillon, N_t tours/m², est la densité de spire de l'élément, et a_i la surface de l'élément, l'impédance totale de l'ensemble des spires dans l'élément (i) est donnée par:

$$Z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot r_{ci} \cdot A_{ci} \cdot a_i \cdot N_t}{I_s} \quad (\text{III.50})$$

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

$$Z = j \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot N_t}{I_s} \sum_{i=1}^{N_c} a_i \cdot r_{ci} \cdot A_{ci} \quad (\text{III.51})$$

L'impédance de la bobine dans un problème 2D ou axisymétrique peut être calculée en utilisant de la méthode expliquée ici. Cette méthode prend la valeur du potentiel vecteur magnétique constante suivant la longueur du dispositif qui est parallèle à la source dans ce cas le plan d'étude est (xoy) ou dans la direction circonférentielle de la bobine (cas axisymétrique). Une autre méthode de calcul de l'impédance est basé sur le calcul des énergies stocké et dissipé est expliqué dans la section suivante.

6.2 Méthode de l'énergie

L'impédance d'une bobine peut être calculée à partir de l'énergie du système, puisque l'inductance et la résistance sont respectivement associées à l'énergie stockée et l'énergie dissipée dans le système. L'énergie stockée W dans le système peut être donnée par, [1]:

$$W = \frac{1}{2} \int_V B \cdot H \, dV \quad (\text{III.52})$$

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

$$W_i = \frac{1}{2} \nu (B_n^2 + B_z^2) V_i \quad (\text{III.53})$$

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

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \nu (B_n^2 + B_z^2) V_i \quad (\text{III.54})$$

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

$$L = 2 \frac{W}{I_s^2} \quad (\text{III.55})$$

Où I_s est le courant dans la bobine de la source.

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

$$P_i = \frac{J_i^2 V_i}{\sigma} \quad (\text{III.56})$$

Où J_i est la densité du courant induit définie par :

$$J_i = -j \omega \sigma A_{ci} \quad (\text{III.57})$$

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

Remplaçons l'équation (III.57) dans (III.56) et additionnons sur tous les éléments de la région du maillage, l'énergie dissipée total est donnée par:

$$P = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N V_i \cdot \omega^2 \cdot \sigma A_{ci}^2 \quad (\text{III.58})$$

La résistance de la bobine est donnée par:

$$R = \frac{P}{I_s^2} \quad (\text{III.59})$$

L'impédance de la bobine est défini par:

$$Z = R + j \omega L \quad (\text{III.60})$$

6.3 Calcul de l'impédance d'un capteur différentiel

L'impédance complexe différentielle liée au capteur par courants de Foucault peut être calculée par le potentiel vecteur magnétique à chaque centre du triangle.

L'impédance d'un capteur différentiel est donnée par,[1]:

$$Z_i = j \frac{2\pi \cdot \omega \cdot N_t}{I_s} \left[\sum_{i=1}^{N_a} a_i \cdot r_{ci} \cdot A_{ci} - \sum_{i=1}^{N_b} a_i \cdot r_{ci} \cdot A_{ci} \right] \quad (\text{III.61})$$

Avec : N_a et N_b sont respectivement le nombre de spires des bobines a et b du capteur différentiel.

III.7 Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la présentation de quelques méthodes numériques de discrétisation, la méthode des éléments finis (MEF) a été choisie pour la transformation des équations EDP en équations algébriques. Dans ce chapitre, sont mentionnées aussi méthodes de calcul de l'impédance (Z) du couple capteur-pièce et les principaux paramètres influant sur la valeur de cette dernière.

Le dernier chapitre sera dédié aux résultats de simulation et leurs interprétations.

Chapitre

Simulation et Analyse des Résultats

Simulation et Analyse des Résultats

IV.1 Introduction

Après avoir formulé les équations régissant notre modèle d'étude dans le chapitre précédant on présentera dans ce qui suit les résultats des simulations effectuées sous environnement MATLAB (utilisant la fonction de `m_file`). Pour un capteur à courant de Foucault type capteur différentiel.

Il est à noter que la pièce à étudier présente n'est pas axisymétrique , avec des conditions aux limites de Dirichlet sur sa frontière.

La figure (4.1) représente l'organigramme de l'algorithme de base des codes de calcul développés sous MATLAB.

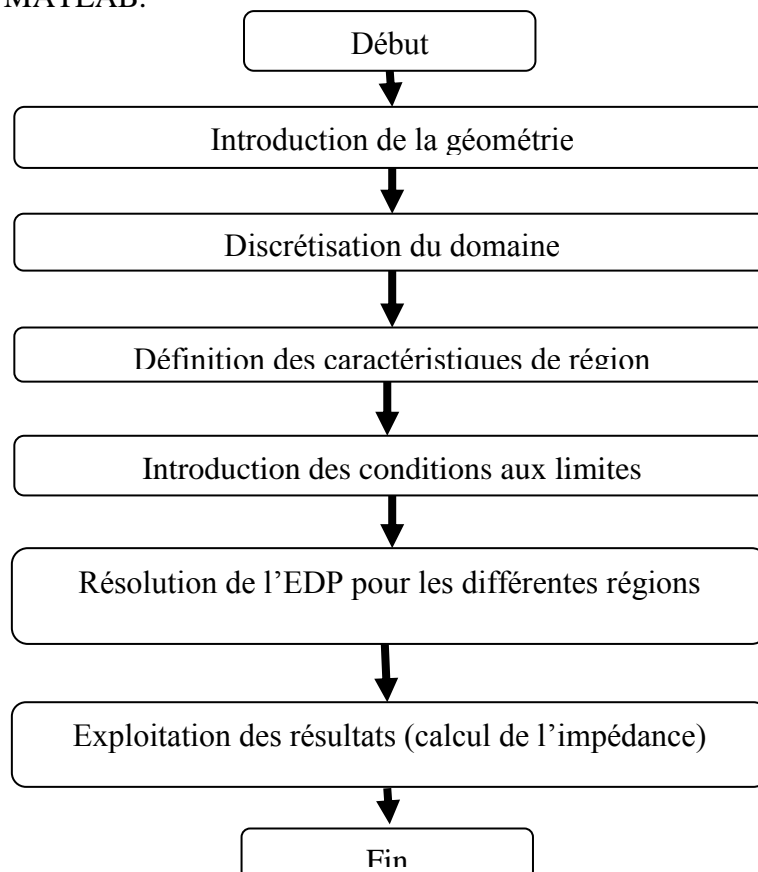


Figure 4. 1 Organigramme de l'algorithme de différentes étapes de validation, [13.17]

IV.2 Caractéristique du dispositif

IV.2.1 Caractéristique physique

- **Capteur :**

Courant injecté : 0.1629A

Perméabilité magnétique : $4 \pi \cdot 10^{-7}$ [H.m]

Fréquence d'alimentation : 50 et 100 KHz.

Nombre de spires : 100 spires.

- **Charge :**

Perméabilité magnétique : $4 \pi \cdot 10^{-7}$ [H.m]

Conductivité électrique : $33 \cdot 10^6$ [$\Omega \cdot m$]⁻¹

IV-2-2 Caractéristique géométrique :

- **Capteur :**

La longueur: 2 cm

L'épaisseur : 3 cm

Entre fer (lift-off): 1 mm

- **Charge:**

La longueur: 2 cm

L'épaisseur : 3 cm

IV.3 Description du problème : défaut externe

Le problème de cette application est constitué d'une plaque métallique de conductivité électrique $\sigma=33.106 \text{ S.m}^{-1}$, de forme rectangulaire la longueur 20 mm et l'épaisseur 3 mm avec un défaut externe. La profondeur et l'ouverture du défaut sont respectivement 1 mm et 1 mm. Le capteur placé à l'extérieur de la plaque avec lift-off =1 mm, est constitué d'une bobine de 100 spires d'épaisseur 1 mm et de largeur 3mm (figure 4.2)

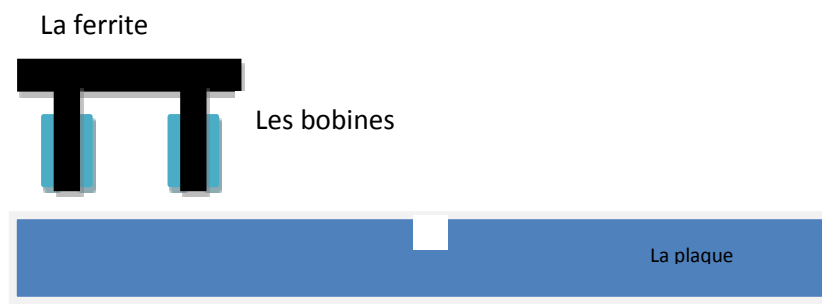


Figure 4. 2 Description du problème en 2D.

IV.4 Présentation et structure du programme développé

Le programme développé sous l'environnement MATLAB est constitué de trois blocs et structuré comme suit :

A) Bloc d'entrée (Pré-processeur)

Ce bloc est constitué de trois parties : partie base de données, partie de maillage et partie d'affectation. Dans ce bloc, on trouve les différentes données concernant la description de la géométrie du dispositif (capteur, pièce), la discrétisation, les différentes propriétés physiques, le calcul des coefficients des équations algébriques et les conditions aux limites. Ces trois parties sont décrites comme suit :

- **Partie base de donnée**

Cette partie est consacrée à la description de la géométrie du dispositif et englobe :

- Le nombre de régions du domaine d'étude.
- Les dimensions et la géométrie de chaque région.
- Le nombre de nœuds, triangles et éléments.
- **a) Partie de maillage**

Cette partie est dévoué à l'introduction des propriétés physiques et électromagnétiques (conductivité électrique, perméabilité magnétique) de chaque région selon le phénomène à étudier (thermique, magnétostatique, électrocinétique, magnétodynamique), en l'occurrence la fréquence d'excitation, la densité de courant source.

- **b) Partie d'affectation**

L'espace de cette partie est utilisé pour le calcul de coefficients des équations algébriques à résoudre à partir des propriétés physiques de la partie précédente.

B) Bloc de résolution (Processeur)

Ce bloc est caractérisé par les équations algébriques discrétisées des inconnues, par les méthodes de résolution tel que la méthode de Gauss, Gauss Seidel qui provient de la formulation éléments finis, les résultats du calcul permettent d'évaluer les composantes du vecteur potentiel magnétique, densité des courants induits, champ magnétique, etc. Après avoir calculé le potentiel vecteur magnétique A , on a évalué les pertes Joules ainsi que l'énergie électromagnétique afin de déterminer la résistance et la réactance à partir de ces grandeurs (pertes joules, énergie électromagnétique). On déduira ensuite l'impédance du capteur.

C) Bloc de sortie (Poste processeur)

Ce bloc est destiné à l'affichage et la visualisation de toutes les grandeurs électromagnétiques à savoir le potentiel vecteur magnétique les lignes de champ magnétique, la densité des courants induits et l'impédance du capteur sous forme des courbes ou des surfaces en 2D.

IV.5 Applications proposées

Pour tester le programme développé, nous avons choisi, quatre applications :

- La première application concerne une plaque amagnétique sans défaut ;
- La deuxième application représente un exemple une plaque amagnétique avec défaut externe ;
- La troisième application traite un exemple d'une plaque magnétique avec défaut externe ;
- La quatrième application examine une plaque amagnétique avec défaut externe, associé avec le déplacement du capteur.

Pour les trois premiers cas, on détermine la valeur de l'impédance pour une seule position, par contre pour le quatrième et le cinquième cas le capteur balaye tout le tube. Pour tester les performances du capteur une application pour la variation de la largeur du défaut sera illustrée.

IV.5.1 Présentation et définition du modèle d'étude

Théoriquement, le champ magnétique s'étend jusqu'à l'infini ($A = 0$), mais en vue d'une modélisation magnétique, il est nécessaire de ramener les limites théoriques à une distance finie qui peut être aussi grande que l'exigence de la précision. La figure (4.3) illustre le dispositif à étudier constitué d'une plaque métallique.

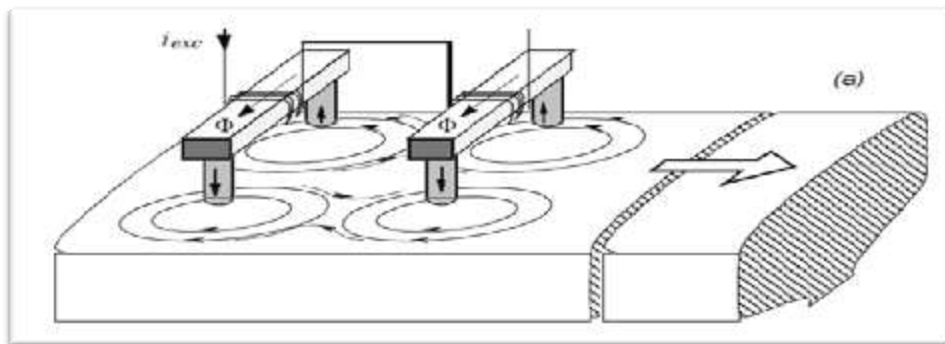


Figure 4. 3 Modèle complet en coupe et en perspective

La figure 4.4 montre le dispositif limité par le domaine de résolution, qui se compose d'un inducteur, pièce conductrice et l'air.

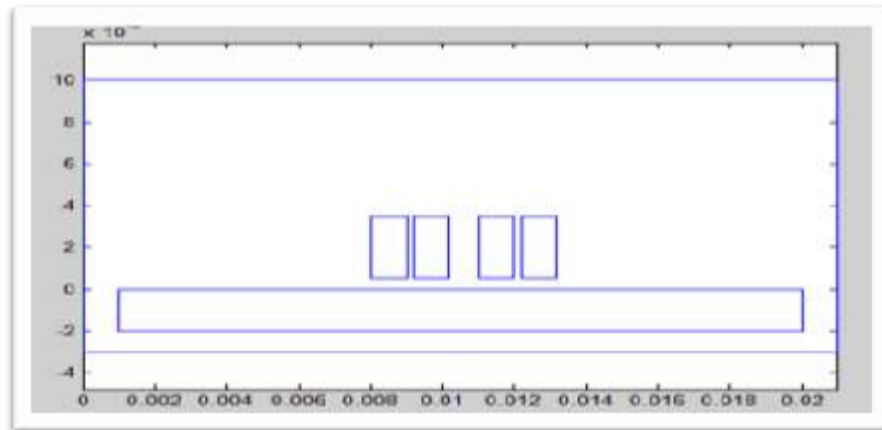


Figure 4. 4 Domaine de résolution.

Les conditions aux limites associées à l'équation électromagnétique (III.37) sont du type de Dirichlet ($A=0$). La figure (4.5) montre le maillage du domaine d'étude. Nous avons affiné ce maillage au niveau de la pièce et de l'inducteur pour avoir la meilleure précision possible.

IV.5.2 Maillage du domaine d'étude

On utilise le mailleur de MATLAB au domaine d'étude présenté par la figure (4.5), il en résulte trois matrices caractéristiques suivantes:

- La matrice "p", ou matrice des points (nœuds), comprend les coordonnées du maillage.
- La matrice "e", ou matrice des segments (arrêtes), englobe les indices et les sous domaines de chaque segment.
- La matrice "t", ou matrice des triangles (éléments), contient les indices des points et les sous domaines de chaque triangle.

Le maillage obtenu est présenté sur la figure, (4.5).

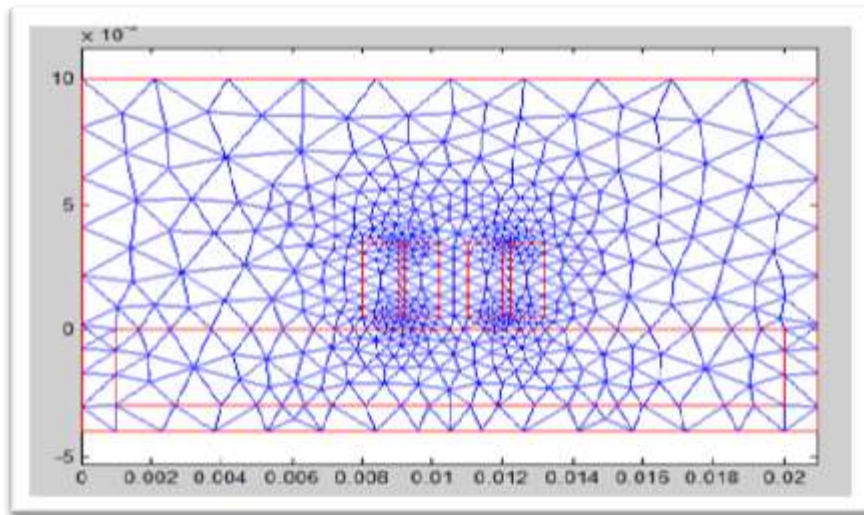


Figure 4. 5 Maillage du domaine de résolution.

IV.5.3 Simulation d'un (capteur – plaque amagnétique) sans défaut

Pour la première application, nous avons choisi de tester une plaque amagnétique en Aluminium sans défaut caractérisé par une perméabilité égale à l'unité, une conductivité élevée $33.3 \cdot 10^6$ MS, excité par un courant et de densité de courant $J = 3.14 \cdot 10^5$ A/m² et une fréquence de 10 kHz. Les résultats de simulation sont donnés ci-dessous.

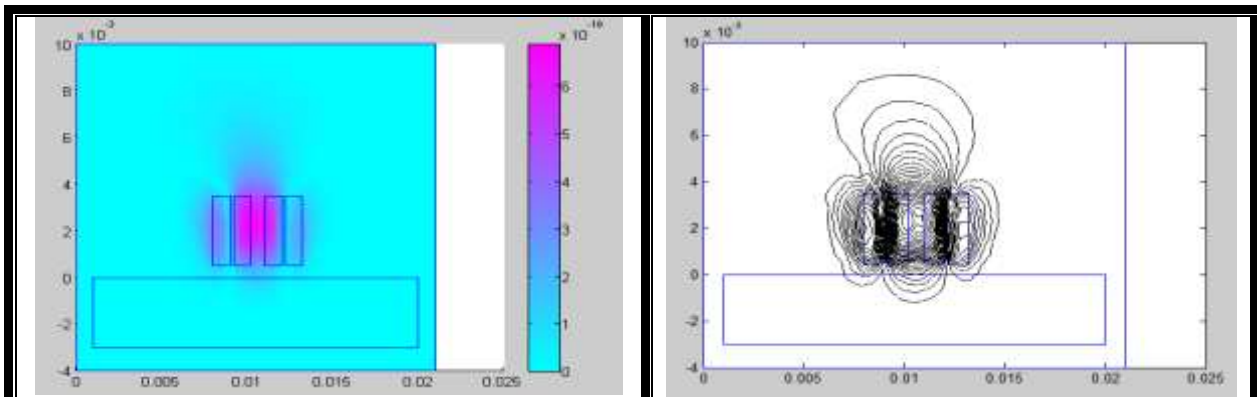
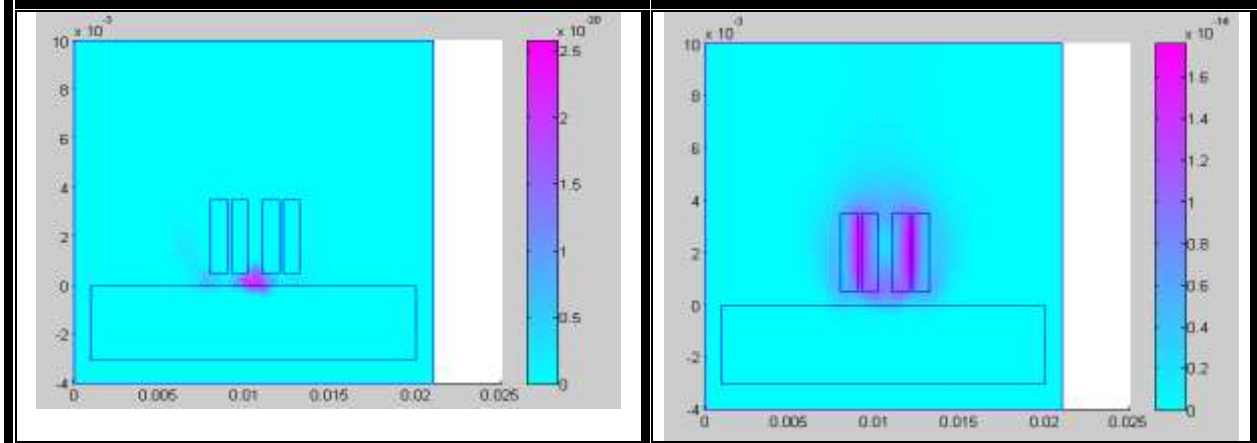
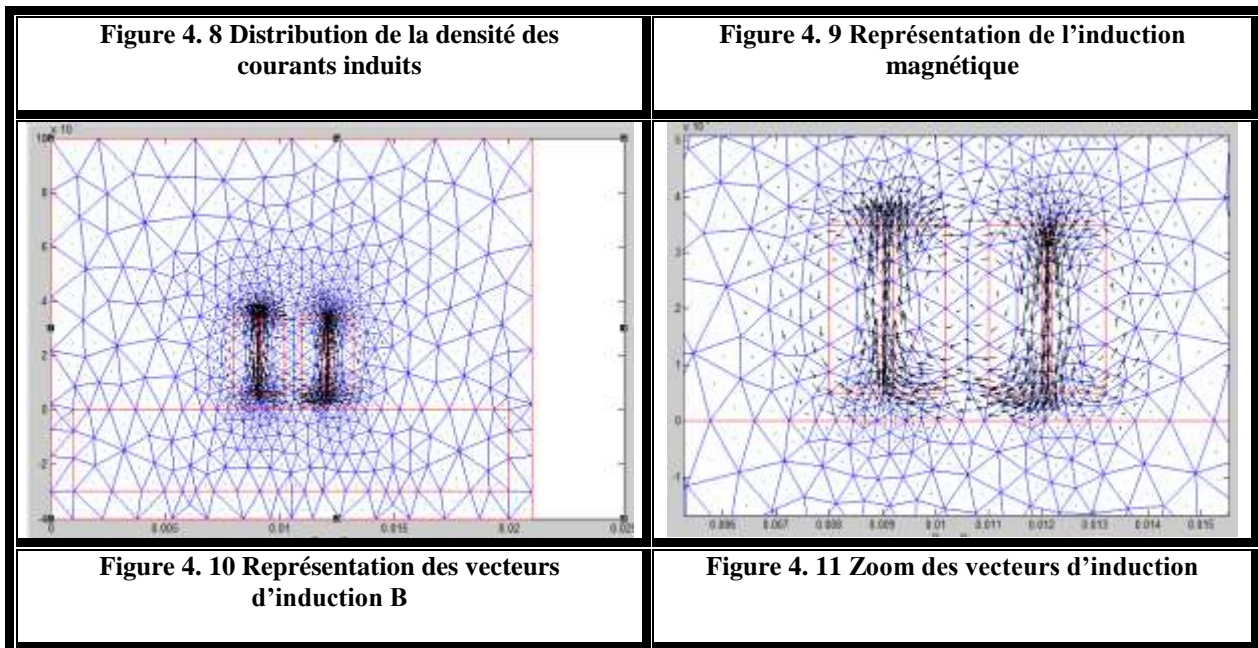


Figure 4. 6 Représentation du Potentiel vecteur

Figure 4. 7 Circulation des lignes du champ





IV.5.3.1 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation obtenus dans le cas d'une plaque amagnétique sans défaut sont illustrés par un ensemble de figures.

La figure (4.6) correspond à la distribution du potentiel vecteur A. Elle montre une forte concentration de ce dernier au niveau de l'inducteur avec des faibles valeurs, et cela est dû à l'utilisation d'une fréquence élevée.

La figure (4.7) montre la distribution des lignes de champ. Ces derniers restent au niveau du capteur et leur pénétration dans la pièce reste très minimale, cela traduit par l'effet de la profondeur de pénétration, ou en d'autres termes c'est l'effet de l'utilisation d'une fréquence élevée d'une part, et d'autre part la nature de la cible amagnétique jouant un rôle similaire.

La figure (4.8) montre la distribution des courants induits à la surface. On constate que leurs

valeurs sont élevées, car la conductivité de la cible amagnétique est importante ($j = \sigma \cdot 2\pi \cdot f \cdot A$) mais sont relativement faibles comparativement aux courants inducteurs.

La figure (4.9) montre la distribution des vecteurs d'induction magnétique. Ces derniers sont concentrés au niveau des bobines, sans possibilité de pénétrer à l'intérieur de la plaque à cause de nature du matériau et de l'effet de la fréquence.

La figure (4.11) montre le zoom des vecteurs d'induction magnétique qui tournent autour des deux bobines dans des sens opposés à cause de l'excitation inverse des deux bobines.

IV.5.4 Simulation d'un (capteur-plaque amagnétique) avec défaut externe

La deuxième application, s'appelante sur la même plaque amagnétique, mais cette fois ci ce dernier est endommagé par un défaut géométriquement uniforme sur la surface externe du plaque de profondeur 1 mm. Les résultats de simulations sont illustrés par :

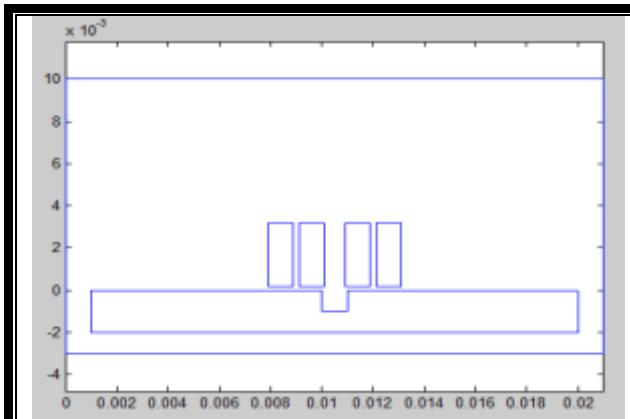


Figure 4.12 Géométrie du dispositif avec défaut

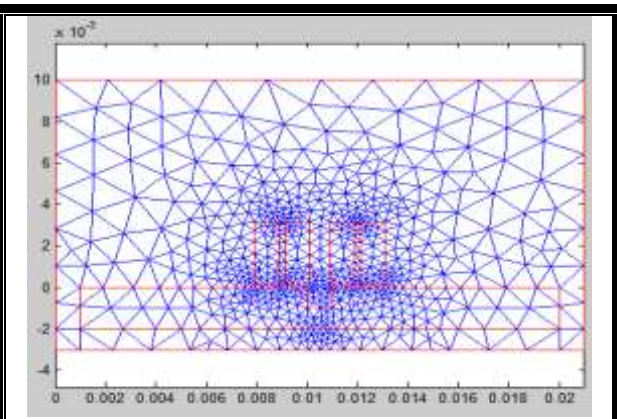


Figure 4.13 Maillage du dispositif avec défaut

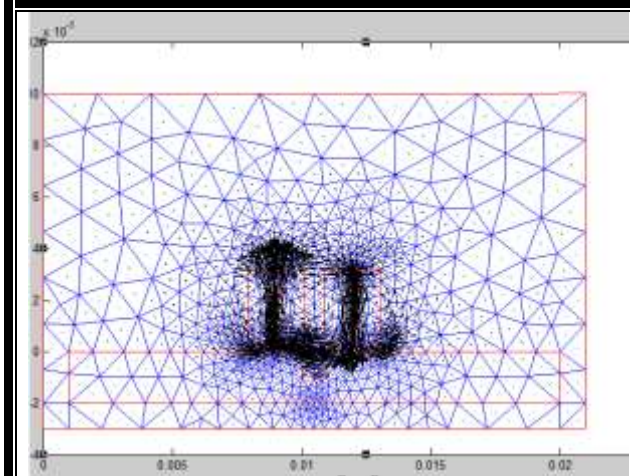


Figure 4.14 Représentation des vecteurs induction magnétique B

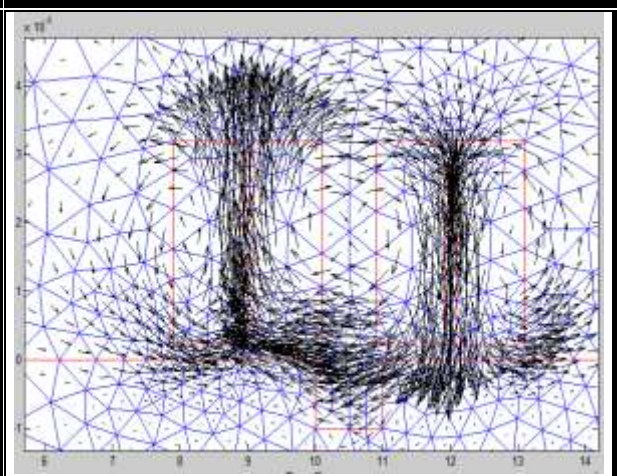


Figure 4.15 Zoom des vecteurs induction magnétique B

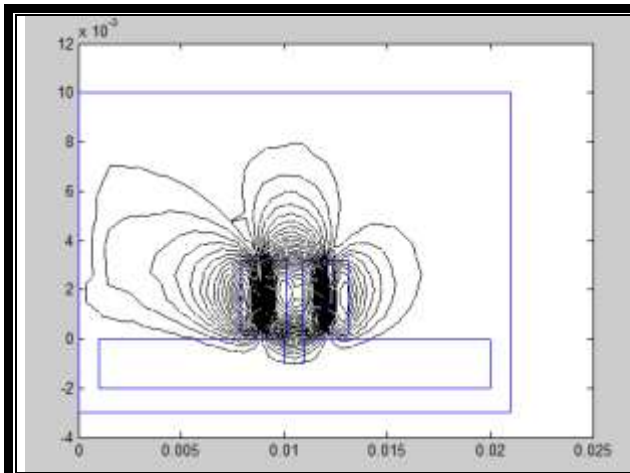


Figure 4. 16 Circulation des lignes de champ

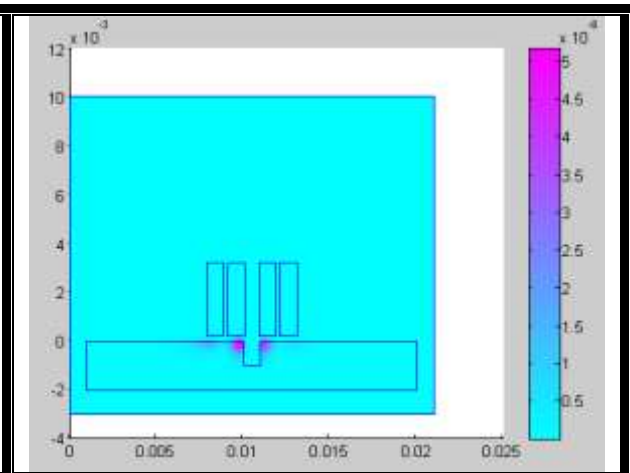


Figure 4. 17 Distribution des courants induits

IV.5.4.1 Interprétation des résultats de simulation

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

Les figures (4.14) et (4.16) montrent la distribution des vecteurs d'induction magnétique et du champ magnétique. On constate que ces derniers restent concentrés au niveau de l'inducteur et embrassent les surfaces internes du défaut, car ce dernier est caractérisé par une faible perméabilité.

La figure (4.17) montre nettement que :

Les densités de courant élevées apparaissent à proximité de la surface de la plaque (effet de peau). Les densités importantes sont à la verticale de la sonde, c'est-à-dire aux endroits les plus proches de la bobine.

Les densités de courant dans la plaque et dans la bobine sont de signe opposé, ce qui rappelle la loi de Lenz : le courant induit s'oppose par ses effets à la cause qui lui donne naissance. De plus, la densité de courant induit est en valeur absolue inférieure à la densité de courant dans la bobine, ce qui semble intuitivement logique.

IV.5.5 Simulation d'un (capteur-plaque magnétique) avec défaut externe

Les fissures doivent être présentées à des surfaces internes ou externes des matériaux amagnétiques comme sur les surfaces internes ou externes des matériaux magnétiques. La cause de ces derniers sont multiples (corrosion, humidités, longue durée d'entraînement...). Dans cette section on s'intéresse à la simulation d'une plaque magnétique endommagé par une fissure de profondeur 1mm. Les résultats obtenus sont illustrés par :

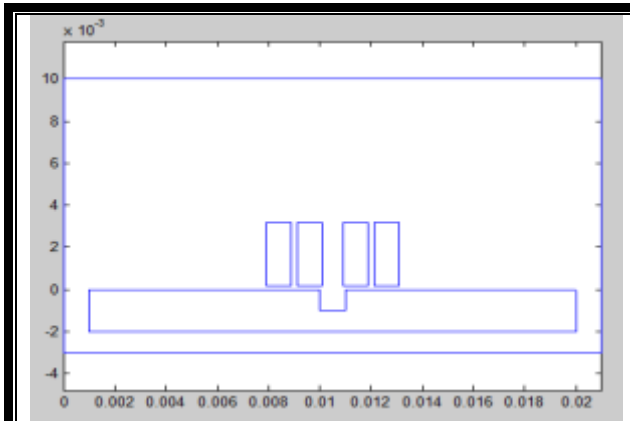


Figure 4. 18 Géométrie du dispositif avec défaut

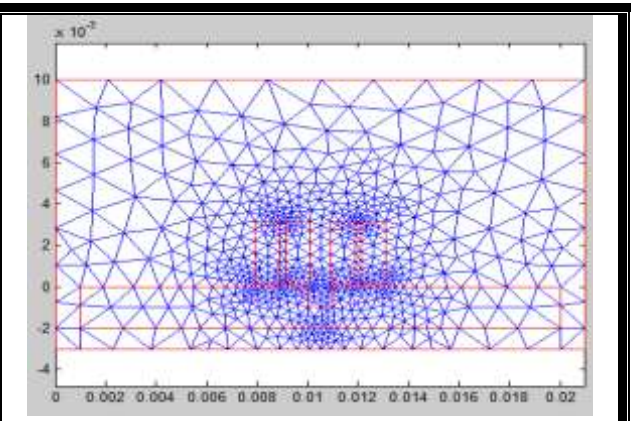


Figure 4. 19 Maillage du dispositif avec défaut

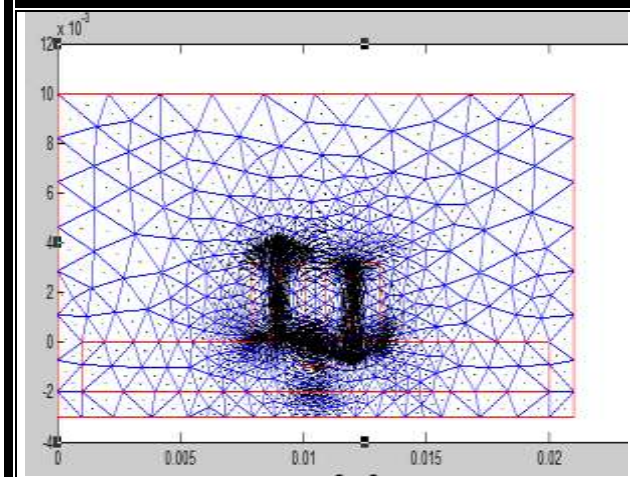


Figure 4. 20 Représentation des vecteurs induction magnétique B

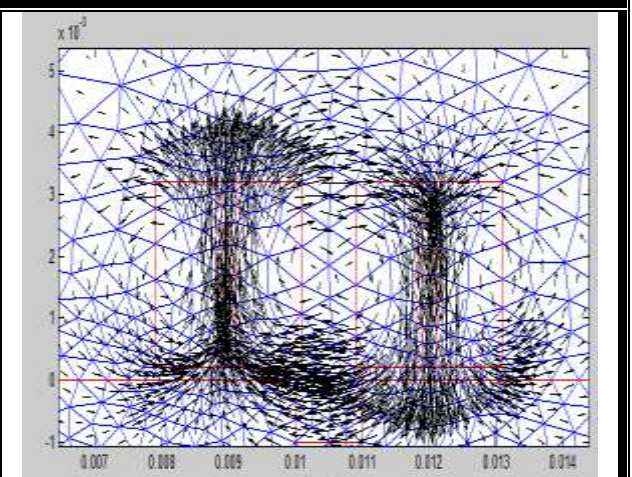


Figure 4. 21 Zoom des vecteurs induction magnétique B

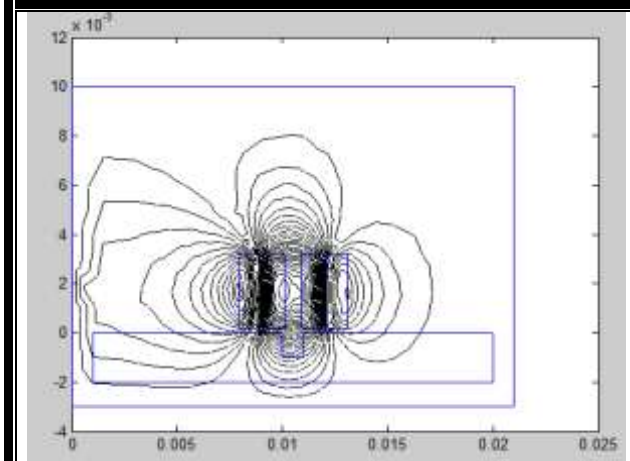


Figure 4. 22 Circulation des lignes de champ

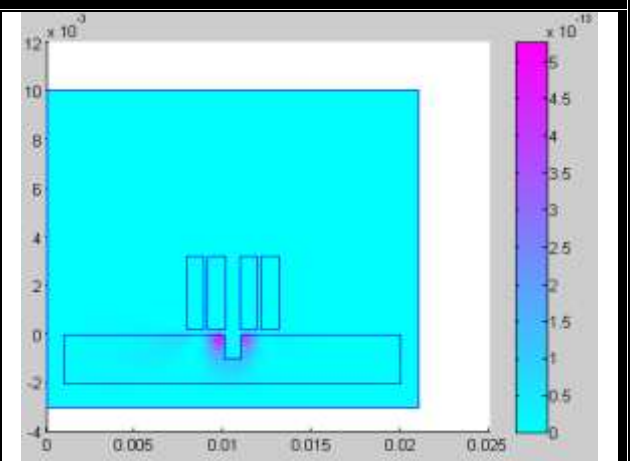


Figure 4. 23 Distribution des courants induits

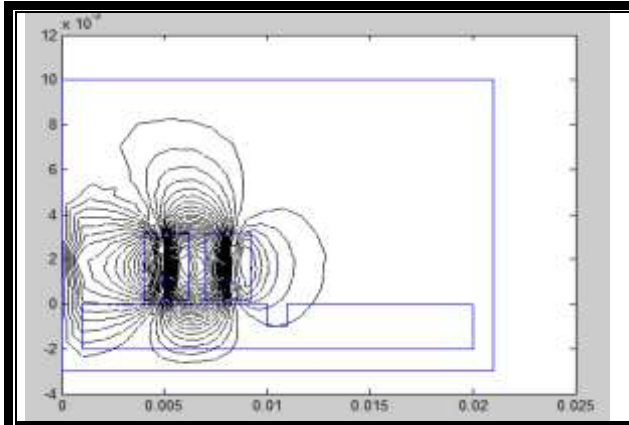


Figure 4. 24 Circulation des lignes de champ

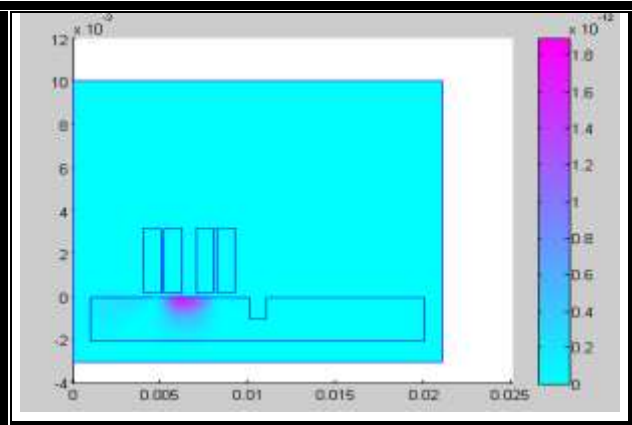


Figure 4. 25 Représentation des courants induits

IV.5.5.1 Interprétation des résultats

Les premières constatations, qu'on peut tirer de la deuxième partie de notre simulation sont : ■ L'effet de la nature de la cible (perméabilité élevée) sur les grandeurs magnétiques, à savoir les vecteurs d'induction magnétique et lignes du champ, est nettement supérieur par rapport au cas du tube amagnétique, cela est illustré par une forte pénétration des lignes du champ et les vecteurs d'induction magnétique dans la cible. Voir les figures (4.21) et (4.22).

Les densités du courant induit dépendent toujours de la loi de Lenz, elles sont fortement concentriques à l'axe vertical du capteur, ce qui est vrai, mais avec de faibles valeurs, à cause de la nature du matériau sous test (conductivité faible), figure (4.23).

La figure (4.22) montre clairement la circulation des lignes du champ, qui sont canalisés dans la cible sans traverser le défaut caractérisé par une faible perméabilité par rapport à la cible.

IV.5.6 Simulation d'un (capteur- plaque amagnétique) avec défaut externe avec déplacement du capteur

La détermination de l'impédance dans une seule position n'est pas suffisante pour détecter la présence ou l'absence du défaut. Pour cette raison qu'on n'est obligé de faire le déplacement du capteur, où ce déplacement se fait par plusieurs méthodes (méthode de bande, méthode de macro élément et la répétition du maillage qui sera utilisé dans notre travail). De la côté nature, le défaut se traduit soit par une absence de matière ou une anomalie non conductrice. Pour simuler la détection de ce défaut, le capteur est supposé en déplacement le long du tube amagnétique.

A chaque pas de déplacement, nous recueillons l'impédance du capteur, pour éviter les effets de coin causé par les extrémités du la plaque, nous faisons déplacer le capteur à partir

d'une position où se dernier voit la plaque comme sain et uniforme. La position choisie est ($x = 3$ à 12 mm).

Nous présentons dans cette section l'allure de l'impédance pour une valeur de la fréquence : 50kHz. Les résultats de simulation sont donnés ci-dessous :

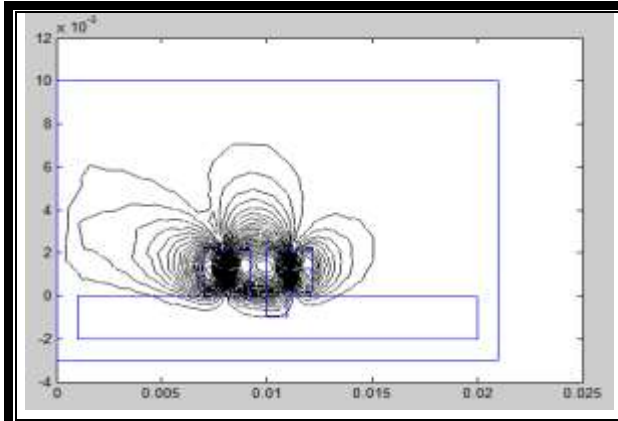


Figure 4. 26 Circulation des lignes de champ décalage du capteur à gauche

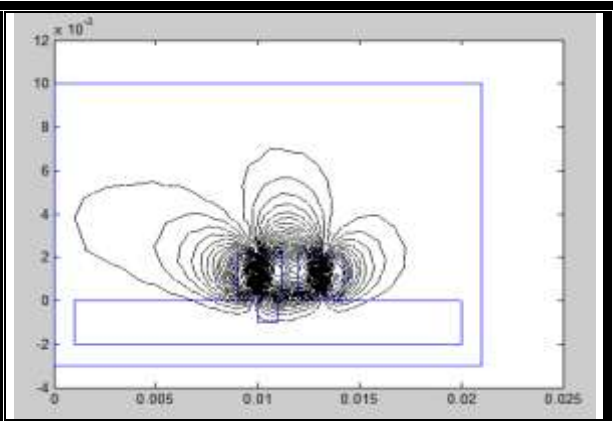
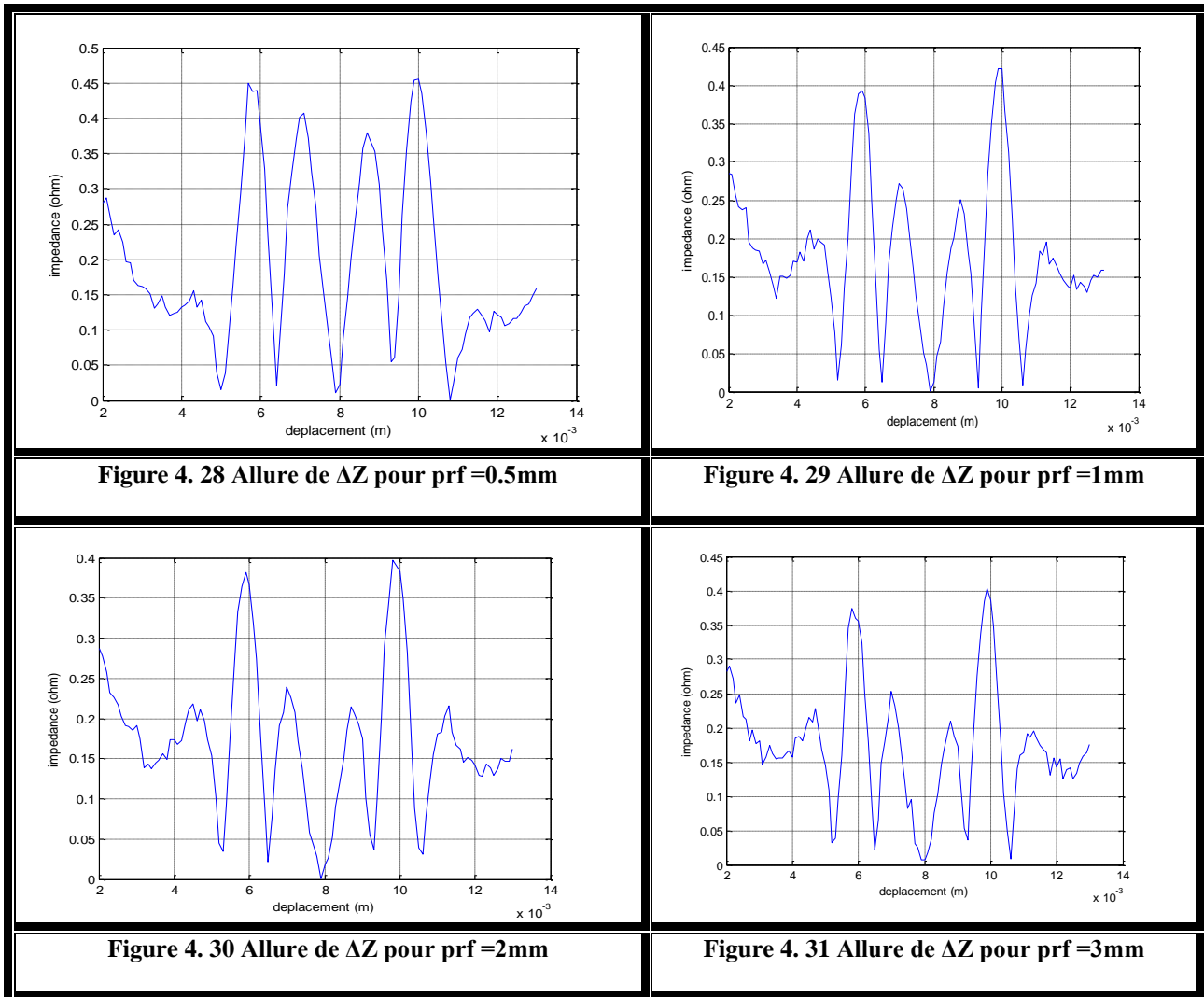


Figure 4. 27 Circulation des lignes de champ décalage du capteur à droite

Plus le capteur s'approche du défaut, plus l'impédance augmente, quant le capteur atteint la position indiquée par la figure (4.26), une variation de (lift off) distance capteur/cible traduit par l'apparition du premier pic de l'impédance, le deuxième pic apparaît lorsque le capteur sera positionné selon la figure (4.27), le minimum de l'impédance est atteint lorsque les deux bobines sont au milieu du défaut.

IV.5.7 Effet d'un défaut externe sur l'impédance

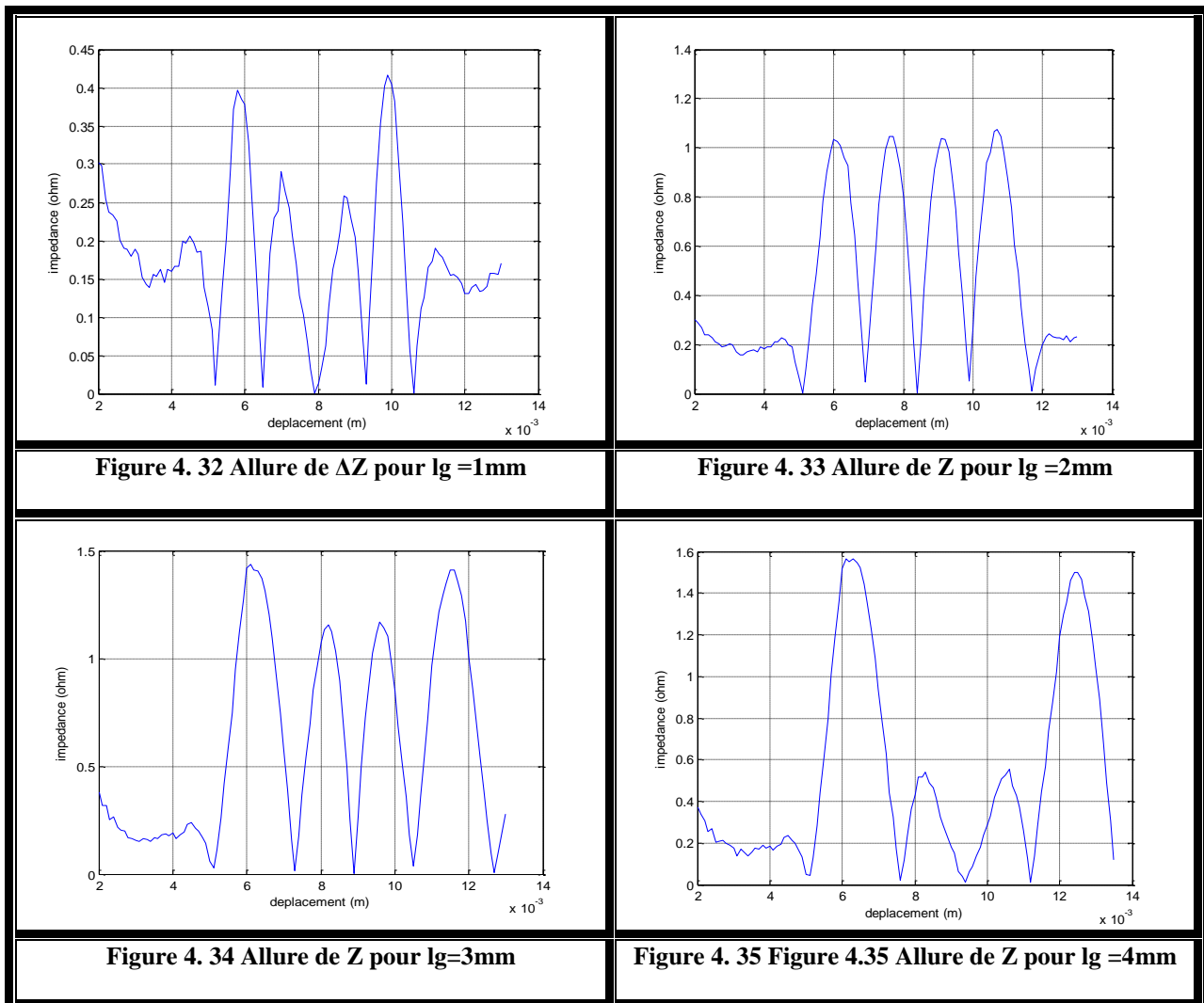
L'effet du défaut externe sur l'impédance Z dans le cas d'une plaque amagnétique pour quatre profondeurs 0.5, 1, 2 et 3 mm à une fréquence de 50 kHz est donné par les figures (4.28-4.31)



IV.5.7.1 Interprétation des résultats de simulation

La présence de défaut perturbe la trajectoire des lignes du champ ce qui est traduit par la variation de l'impédance du capteur. La faible valeur de l'impédance est constatée sur la figure (4.28) qui correspond à un défaut de profondeur de 0.5mm. Plus le défaut est profond (effet de bord) plus la variation de l'impédance est importante, comme l'illustré par les deux figures (4.42) et (4.43).

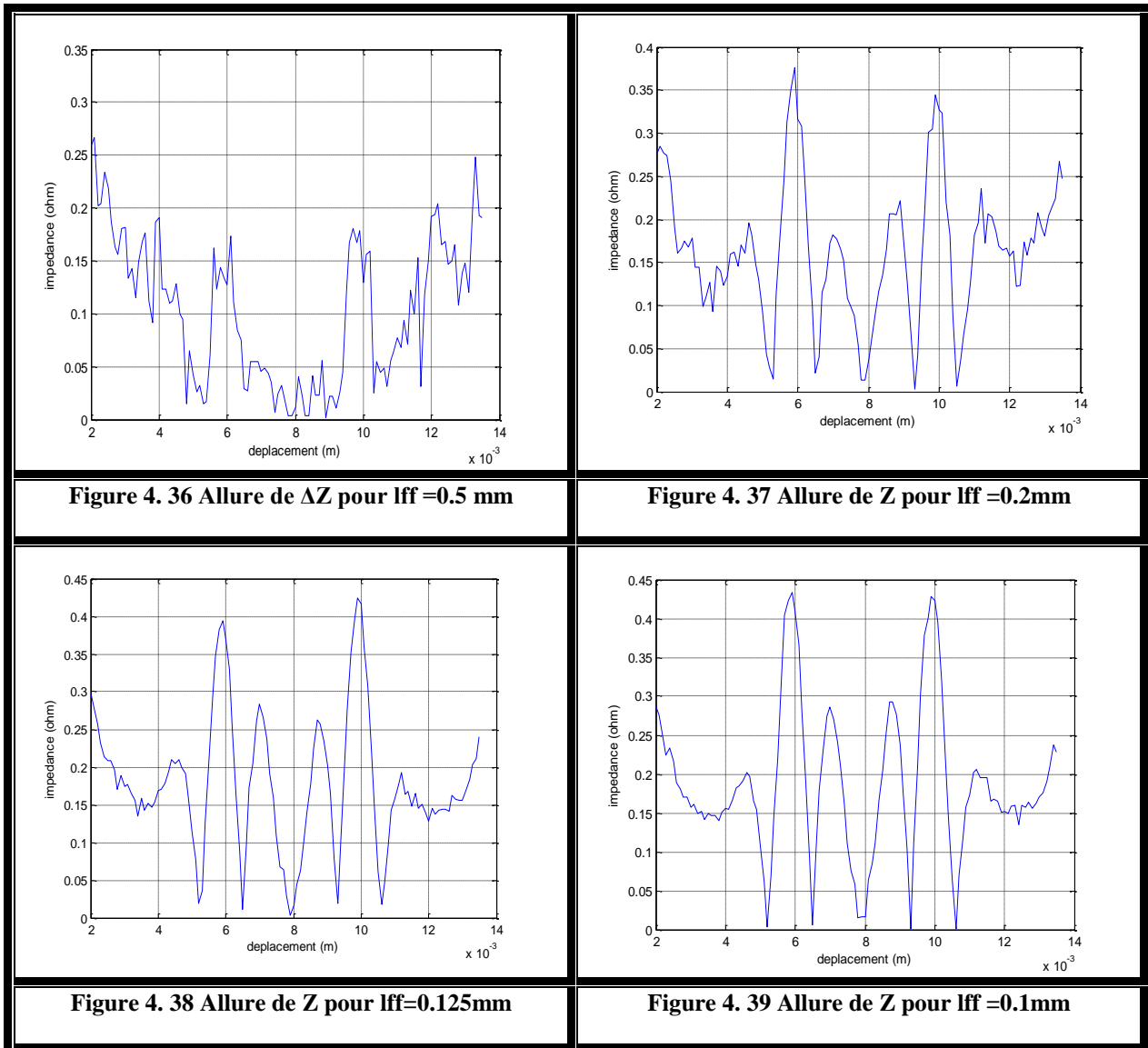
IV.5.8 Test des performances du capteur pour différents défauts



Pour tester les performances du capteur, on a simulé l'ensemble capteur/cible pour un défaut de largeur variable comme l'illustre les figures (4.32-4.35). Deux remarques peuvent être constatées :

- La largeur de défaut a impact sur l'amplitude de l'impédance.
- Les défauts de géométrie inférieure à la géométrie du capteur sont détectables mais avec une amplitude faible, donc pour résoudre ce problème, et détecter les défauts de cette taille il faudrait des capteurs de même dimensions.

IV.5.9 Test des performances du capteur pour différents (lift off)



IV.5.9.1 Interprétation des résultats de simulation

Pour tester les performances du capteur pour différents (lift off), on a simulé l'ensemble capteur/cible pour (*lift off*) variable comme l'illustre les figures (4.36-4.39).

Les résultats obtenus montrent que l'amplitude de l'impédance est proportionnelle au *lift off*.

IV.5.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des différents cas de simulation. Cette étude comprend cinq cas de simulation de l'ensemble capteur/cible et on peut conclure que :

■ Le calcul de l'impédance dans un seul point ne suffit pas de confirmer la présence ou l'absence d'un défaut pour les deux types de matériaux (amagnétique, magnétique), ce qui conduit au calcul de l'impédance le long de la cible.

■ La position de défaut (interne, au milieu ou externe) a un grand effet sur l'impédance.

Les résultats obtenus montrent la grande sensibilité du capteur différentiel à la détection des défauts surfaciques.

L'utilisation de ce capteur dans le domaine industriel est très répandue à cause de sa précision (erreur minimale) et son faible coût.

L'inconvénient majeur de ce type de capteur réside dans le fait qu'il est incapable de détecter un défaut situé à mi-chemin entre les deux bobines, et pour le détecter on aura besoin d'une modélisation du système en trois dimensions, nous espérons que les grandes axes ciblés pour ce thème sont touchés, les perspectives pour la continuité de ce travail sont résumées dans la conclusion générale.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Les exigences croissantes en termes de sûreté de fonctionnement d'un produit industriel ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces qui le constituent, conduisent à mettre en place des contrôles de qualité. L'utilisation des courants de Foucault permet un contrôle non destructif fiable, rapide et peu coûteux des matériaux conducteurs. La simplicité de ce contrôle et sa robustesse d'utilisation en font une technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies.

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent la modélisation par la méthode des éléments finis en de plusieurs problèmes de contrôle non destructif par courants de Foucault et en utilise un capteur différentielle. Des outils de calculs développés sous MATLAB, s'appuyant sur la discrétisation par la méthode des éléments finis en deux dimensions des modèles magnétodynamiques.

Dans ce travail, nous traitons des problèmes de CND_CF présentant des défauts de faible ouverture (fissures).

La détection des fissures permet de prévenir la destruction des pièces en fonctionnement et d'augmenter la fiabilité des produits industriels. C'est dans ce contexte qu'un modèle a été développé pour faciliter la modélisation de ce type de défauts. L'idée consiste à considérer la fissure comme une surface non conductrice.

Les programmes développés sous MATLAB ont été testés sur différents problèmes pour capteur différentiel de contrôle non destructif par courant de Foucault, le premier problème est constitué d'une plaque métallique amagnétique sans défaut. Le deuxième problème traité, est une application qui représente une plaque amagnétique avec défaut externe. La troisième application traite un exemple d'une plaque magnétique avec défaut externe. La quatrième application examine une plaque amagnétique avec défaut externe, associé avec le déplacement du capteur. Les résultats numériques obtenus sont très encourageants et montrent

l'efficacité des programmes pour la modélisation des capteurs inductifs. Le capteur différentiel est sensible à la détection des défauts de faibles dimensions. Les programmes de calcul développé peuvent être appliqués à d'autres types de problèmes de CND-CF.

Pour la continuité de ce travail et afin de valider les résultats, on propose la modélisation du phénomène traité par les nouveaux outils de simulation FLUX 2D, FLUX 3D, ANSYS, et plus particulièrement le logiciel CIVA conçu spécialement pour le CND, et comme on sait que toute modélisation n'est pas une fin en elle-même, la meilleure perspective comme solution et fin est de réaliser un banc d'essai avec système d'acquisition numérique

Annexes



Annexe

1. Principe physique de CND-CF et effet de peaux

L'alimentation de la bobine du capteur par un courant variable crée un champ d'excitation variable sous la loi de Maxwell Ampère. Toute pièce conductrice baignant dans ce champ sera le siège des courants induits appelés courants de Foucault (loi de Maxwell Faraday et loi d'Ohm). En vertu de la loi de Lenz, ces courants reproduisent à leur tour un champ magnétique opposant au champ qui leur a donné naissance. Le champ résultant (excitation et réaction) modifiera alors le courant dans la source et par conséquent l'impédance du capteur. Par ailleurs, les courants de Foucault sont importants à la surface de la pièce et s'affaiblissent en allant sur la profondeur. L'utilisation des faibles fréquences peut assurer la capture des défauts profonds. La figure (I.4) résume le principe de CND par courants de Foucault, [12].

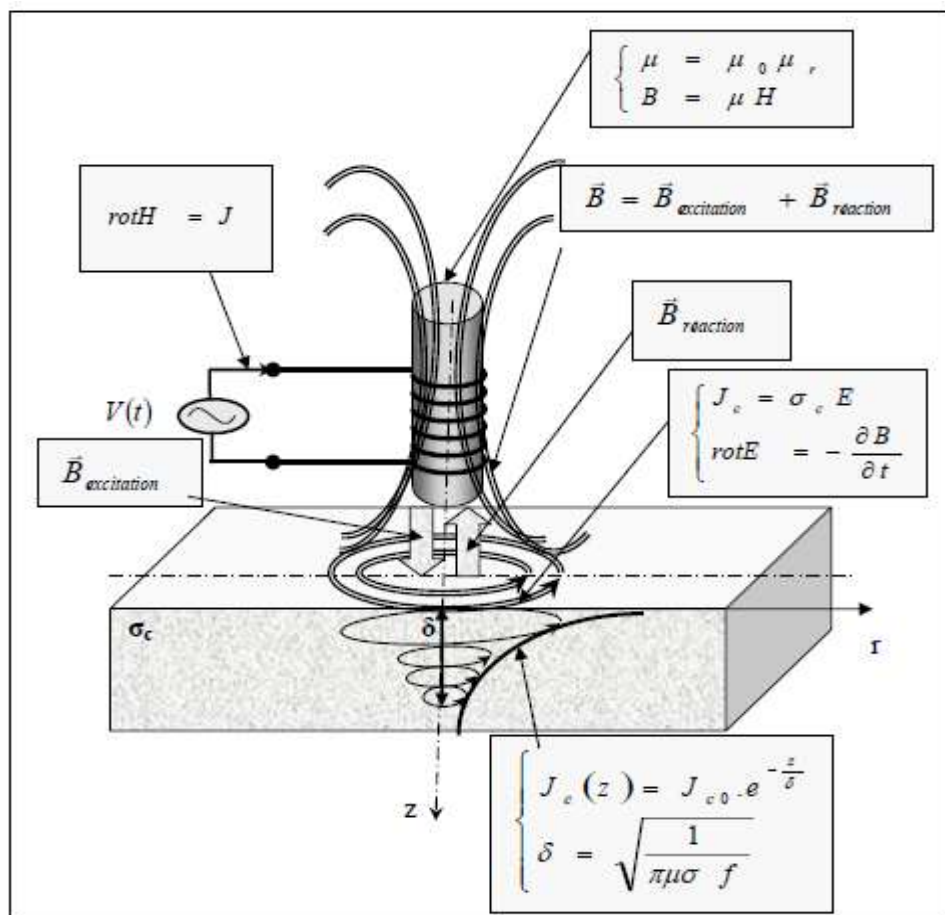


Figure Annexe. 1 Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault et effet de peaux. [12].

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

$$\delta = 1 / (\pi \mu \sigma f)^{1/2}$$

f : La fréquence d'excitation ;

μ : La perméabilité magnétique ;

σ : La conductivité électrique de la cible.

Dans le cas général, cette formule n'est pas rigoureuse. Néanmoins elle renseigne sur la profondeur au-delà de laquelle les courants induits sont trop faibles pour être influents, [12].

2. Méthodologie de développement des systèmes de CND

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

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

La première phase consiste à essayer de comprendre et d'analyser l'interaction entre le champ émis par le capteur et la pièce à contrôler. Ensuite, vient la traduction des phénomènes mis en jeu par des modèles analytiques, semi-analytiques ou numérique. Ces outils de simulation sont à la base de la conception et l'optimisation des capteurs. Ils permettent aussi d'inverser le rapport capteur/pièce, cela permet à partir de signaux recueillis de s'informer des caractéristiques de la pièce (ou du défaut), [12].

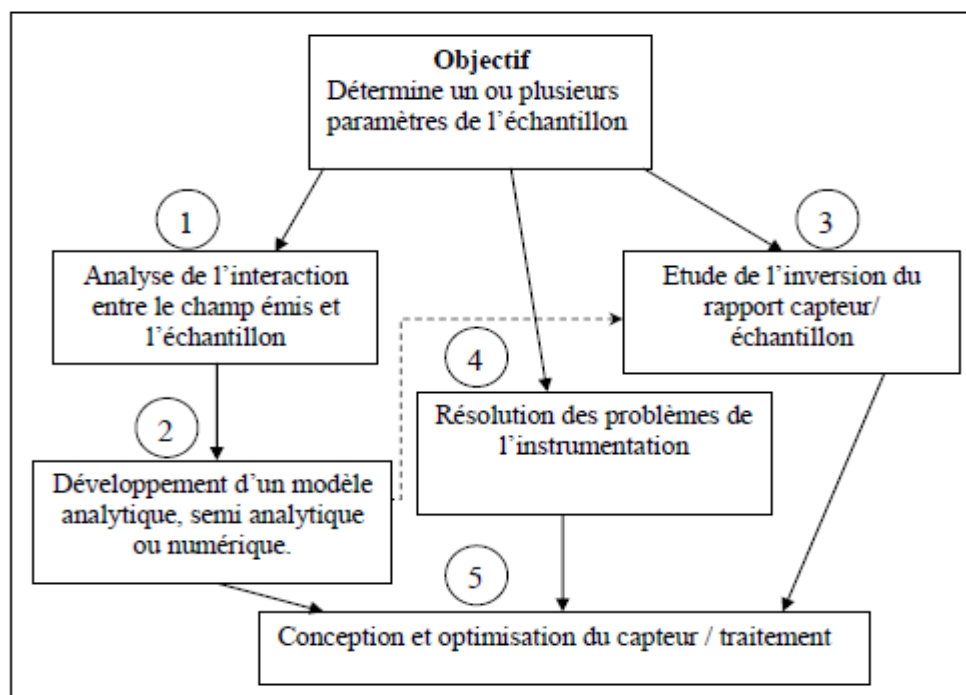


Figure Annexe. 2 Méthodologie usuelle pour l'étude et développement des systèmes de CND. [12].

*1 Principe de la formulation variationnelle :

La méthode variationnelle nécessite la connaissance à priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée par le principe de l'action Hamiltonnienne qui stipule l'existence d'un fonctionnel type intégral défini par [17] :

$$F(A) = \int L.d\Omega$$

L : est la fonction de la grange résultant de la coénergie du système de type cinétique et de son énergie potentiel.

$$L = W_c - W_p$$

Ω : est le domaine d'étude.

La résolution du problème variationnel défini par la fonction d'énergie F(A) revient à minimiser cette fonctionnelle.

La minimisation s'effectue en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_i} = 0$$

Ou

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_2} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_3} = \dots = \frac{\partial F(A)}{\partial A_n}$$

n : nombre de noeud dans le domaine d'étude.

A_i : inconnue au noeud i du domaine.

*2 Formulation résidus pondérés :

Le principe de la méthode des résidus pondérés est de remplacer la solution exacte par la solution approchée, ce qui va engendrer une erreur appelée résidus R.

$$R_i = L(A) - f$$

R : est le résidu de l'approximation.

L(A) : opérateur différentiel.

f : fonction définie sur le domaine d'étude Ω

A : l'inconnue à chercher.

A l'aide de fonction de pondération bien choisie, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en N points du domaine Ω .

$$\int_{\Phi} R_i \cdot \Phi_i d\Omega$$

i f : Fonction de pondération ou de projection.

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

Plusieurs méthodes peuvent être déduites de la formulation résidus pondérés, ces dernières sont essentiellement liées au choix des fonctions de pondérations, parmi elles on citera :

1- La méthode de collocation par points, ou les fonction de Dirac sont prises comme fonctions de pondérations ou on impose au résidu de s'annuler dans chaque pont ou on veut approcher la solution.

2- Méthode des moindres carrés qui est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites, [17].

