

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installations Energétique et Turbomachines

Par :

Miri Imad

Bounab Riadh

Thème

Etude d'un système de détection par courant de foucault multiélément alimenté en mode harmonique multiplexé. Application aux structures aéronautiques

Soutenu le 28/10/2021 devant le jury composé de:

| | |
|-----------------|------------|
| Mr. LAGGOUNE R. | Président |
| Mr. BOUZIDI A. | Rapporteur |
| Mr. YAYA K. | Examineur |

Année Universitaire 2020-2021

Dédicaces



*Au modèle de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral
et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié
pour me voir réussir, à toi ma mère.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous
frères et sœurs, je dédie ce travail dont le grand plaisir
leurs revient en premier lieu pour leur conseils
aides, et encouragement*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient
Toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant
mon chemin d'études supérieur.*

Remerciements

*Tout d'abord, Nous tenons à remercier **DIEU LE TOUT PUISSANT** de nous 'avoir guidés dans la réalisation de ce travail*

*On profite aussi de cette occasion pour adresser nos sincères remerciements à notre **Dr. BOUZIDI** et **Dr. BOUCHALA** qui nous ont fait bénéficier de leurs conseils et de leurs compétences, soulignant ainsi l'intérêt constant qu'ils portent à nos travaux. On les remercie pour leurs confiances qu'ils nous ont témoignées, leurs pédagogies, patiences, disponibilités et leurs dévouements.*

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury pour avoir accepté de participer au jury.

*On tient à remercier l'ensemble du cadre administratif de **Génie Mécanique** .Notre pensée va aussi à toutes les personnes que nous avons rencontrées durant ces derniers mois, pour leur sympathie et leur aide.*

*On tient à remercier tous les enseignants qui ont accepté de juger ce travail. On tient à remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, ainsi que toute la promotion **IET 2020/***

Sommaire

| | |
|--|----------|
| Dédicaces..... | i |
| Remerciements | i |
| Sommaire..... | i |
| Liste des Figures | iii |
| Nomenclature..... | v |
| Abréviation..... | vi |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I. Généralités sur les techniques de (CND)..... | 4 |
| I.1. Introduction :..... | 4 |
| I.2. Types de défaut à détecter par le contrôle non destructif :..... | 5 |
| I.2.2. Principe de détection des défauts :..... | 5 |
| I.3. Méthodologie de développement des systèmes de CND :..... | 5 |
| I.4. Différentes méthodes de CND :..... | 6 |
| I.4.1. Examen visuel..... | 6 |
| I.4.2. Le ressuage | 7 |
| I.4.3. La magnétoscopie :..... | 8 |
| I.4.4. Radiographie :..... | 9 |
| I.4.5. Thermographie..... | 10 |
| I.4.6. La mesure du bruit Barkhausen :..... | 11 |
| I.4.7. Ultrasons :..... | 12 |
| I.5. Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault :..... | 13 |
| I.5.1. Principe :..... | 13 |
| I.5.2. Effet de peau :..... | 13 |
| I.5.3. Objectifs du CND-CF :..... | 15 |
| I.5.4. Classification des capteurs :..... | 15 |
| I.6. Selon la position :..... | 16 |
| I.6.1. Sonde interne :..... | 16 |
| I.6.2. Sonde encerclant :..... | 17 |
| I.6.3. Bobine ponctuelle (Palpeur) | 17 |
| I.6.4. Bobine plate :..... | 17 |
| I.6.5. Sonde interne tournante..... | 18 |
| I.6.6. Selon la Fonction du capteur | 18 |
| I.6.7. Capteur double fonction | 19 |
| I.6.7. Capteurs à fonctions séparées | 19 |
| I.7. Selon le mode :..... | 20 |
| I.7.1. Mode absolu :..... | 20 |
| I.7.2. Mode différentiel | 20 |
| I.7.3. Capteurs multiéléments | 21 |
| I.8. Paramètres définissant un capteur multiélément | 22 |
| I.8.1. La couverture..... | 22 |
| I.8.2. La résolution..... | 22 |
| I.8.3. L'uniformité du signal..... | 23 |
| I.9. Différents types de mesures :..... | 23 |
| I.9.1. Capteur à mesure absolue :..... | 23 |

| | |
|---|-----------|
| I.9.2. Capteur à mesure différentielle : | 23 |
| I.10. Différents types de bobines : | 24 |
| I.10.1. Bobines classiques : | 24 |
| I.10.2. Bobines gravées : | 24 |
| I.10.3. Bobines souples : | 25 |
| I.11. Avantages et limites du CND par courant de Foucault : | 25 |
| I.11.1. Avantages : | 25 |
| I.11.2. Limites : | 26 |
| I.12. Conclusion..... | 26 |
| Chapitre II. Capteur et Modélisation pour le CND par Courants de Foucault..... | 28 |
| II.1. Introduction | 28 |
| II.2. Principe des capteurs inductifs : | 28 |
| II.3. Equations régissant le phénomène EM : | 29 |
| II.3.1. Equations de Maxwell : | 29 |
| II.3.2. Lois constitutives du milieu : | 30 |
| II.3.3. hypothèses simplificatrices : | 31 |
| II.3.4. conditions de passage entre deux milieux de propriétés différentes : | 32 |
| II.4. Formulation en potentiel vecteur A-V : | 29 |
| II.5. Équation magnétodynamique bidimensionnelle : | |
| Error! Bookmark not defined. | |
| II.6. Conditions aux limites : | 37 |
| II.7. Conclusion : | 38 |
| Chapitre III. Résultats de simulation | 40 |
| III.1. Introduction | 40 |
| III.2. Matériaux des Structures aéronautiques : | 40 |
| III.3. Défaut apparaissant dans la structure aéronautique | 42 |
| III.4. Origine des défauts : | 43 |
| III.4.1. Défaut d'origine mécanique | 43 |
| III.4.2. Défaut d'origine Thermique | 44 |
| III.5. Présentation des étapes de simulation sous COMSOL..... | 45 |
| III.5.1 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5 | 45 |
| III.5.2 Création du modèle de simulation..... | 46 |
| III.6. L'implémentation sous COMSOL Multiphysics et simulation..... | 47 |
| III.6.1. Modèle développé..... | 47 |
| III.6.1.2. Maillage..... | 48 |
| III.7. Validation du modèle proposé par les résultats des courants induit | 50 |
| III.8. Validation du modèle proposé par les résultats des courants induit..... | 50 |
| III.8.1. Effet de la fréquence sur la variation de la résistance | 50 |
| III.8.2. Effet de la variation de la Lift-off sur la variation de résistance | 51 |
| III.8.3. Effet de la variation de pas de déplacement..... | 52 |
| III.9. Conclusion : | 54 |
| Conclusion générale | 56 |
| Références bibliographiques..... | 58 |
| Résumé..... | 61 |

Liste des Figures

Chapitre I. Généralités sur les techniques de (CND)

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : L'examen visuel. | 7 |
| Figure I.2 : Principe du ressuage | 7 |
| Figure I.3 : Principe de la magnétoscopie | 9 |
| Figure I.4 : Principe de la radiographie..... | 10 |
| Figure I.5 : Détection par thermographie IR | 11 |
| Figure I.6 : Influence des sollicitations mécaniques sur le bruit Barkhausen | 12 |
| Figure I.7 : Principe du CND par Ultrason. | 12 |
| Figure I.8 : Principe du CND par courant de Foucault | 13 |
| Figure I.9 : Répartition des courants de Foucault sous une surface plane | 14 |
| Figure I. 10 : Objectif du CND par CF. | 15 |
| Figure I.11 : Critères de classification des capteurs. | 16 |
| Figure I.12 : Sonde interne | 16 |
| Figure I.13 : Sonde encerclant | 17 |
| Figure I.14 : Bobine ponctuelle (Palpeur) | 17 |
| Figure I.15 : Bobine plate..... | 18 |
| Figure I.16 : Sonde interne tournante..... | 18 |
| Figure I.17 : Capteur à double fonction | 19 |
| Figure I.18 : Capteur à fonctions séparées | 19 |
| Figure I.19 : Capteur absolue en mode compensé | 20 |
| Figure I.20 : Capteur en mode différentiel | 20 |
| Figure I.21 : Perturbation du signal d'alimentation..... | 21 |
| Figure I.22 : Représentation schématisé de balayage en peigne et linéaire obtenu respectivement avec un élément simple et un capteur multiélément. | 21 |
| Figure I.23 : Schématisation d'un capteur CFM définissant la couverture et la résolution ... | 22 |
| Figure I.24 : Uniformité de signal CF sur un montage multiélément | 23 |
| Figure I.25 : Etapes de réalisation des bobines micro moulées | 24 |
| Figure I.26 : Capteur constitué de quatre couples de bobines sur un film de kapton souple. Chaque couple est constitué d'une bobine émettrice et d'une bobine réceptrice | 25 |

Chapitre II Capteurs et modélisation pou le CND-CF

| | |
|---|----|
| Figure II.1 : Capteur Magnétique ou CM | 29 |
| Figure II.2 : Capteur a courant de Foucault ou CCF..... | 29 |
| Figure II.3 : Illustre les équations du vecteur potentiel dans des déférentes régions | 35 |

Chapitre III. Résultats de simulation

| | |
|---|----|
| Figure III.1 : Matériaux de construction aéronautique | 42 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Figure III.2 : Interface utilisateur de COMSOL 5.5 | 42 |
| Figure III.3 : Création du modèle géométrique. | 46 |
| Figure III.4 : Dessin de la géométrie tridimensionnelle du domaine d'étude | 47 |
| Figure III.5 : Système de détection de défaut dans les bacs en 3D. | 47 |
| Figure III.6 : Maillage | 48 |
| Figure III.7 : Zoom du Maillage | 48 |
| Figure III.8 : Variation des courants induits en fonction de la position de la bobine | 49 |
| Figure III.9 : Image 3D et 2D de la variation résistance .pour différent fréquence (lift-off=0.5 et pas=1mm | 51 |
| Figure III.10 : Image 3D et 2D de la variation résistance .pour différents fréquences (lift-off=0.5 et pas=1mm | 52 |
| Figure III.11 : Image 3D et 2D de la variation de résistance pour différent Pas. Lift-off = 1mm et la fréquence=60KHz | 53 |

NOMENCLATURE

| | |
|---------------------------------|---|
| \vec{B} : | Induction magnétique . |
| \vec{H} : | Champ magnétique. |
| \vec{E} : | Champ électrique. |
| \vec{D} : | Induction électrique. |
| \vec{A} : | Potentiel vecteur magnétique. |
| V : | Potentiel électrique scalaire. |
| f : | Fréquence d'alimentation. |
| μ_r : | Perméabilité magnétique relative du matériau. |
| μ_0 : | Perméabilité magnétique du vide. |
| Z : | Profondeur considérée à l'intérieur de la cible. |
| J(z) : | Module de la densité de courant en fonction de la profondeur. |
| δ : | Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau. |
| \vec{J} : | Densité de courant. |
| ρ : | Densité volumique des charges électriques. |
| μ : | Perméabilité magnétique. |
| σ : | Conductivité électrique. |
| ε : | Permittivité électrique. |
| \vec{B}_r : | Induction magnétique rémanente. |
| \vec{T} : | Potentiel vecteur électrique. |
| ϕ : | Potentiel scalaire magnétique. |
| \vec{J}_{exi} : | Densité de courant d'excitation. |
| \vec{E} [v/m] : | Champ électrique. |
| \vec{j} [A/m ²] : | Densité du courant. |
| ρ [C/m ³]: | Charge volumique. |

μ [H/m]: Perméabilité magnétique.

Abreviation

CND : Contrôle Non Destructif.

CF : Courants de Foucault.

CND-CF : Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.

MEF: Méthode des Eléments Finis.

MDF : Méthode des différences finis.

3D : Tridimensionnel.

2D : Bidimensionnel.

Introduction générale

Introduction générale

Les techniques de contrôle non destructif (CND) consistent à établir l'état d'intégrité d'une structure, appelée structure " cible ", sans la dégrader ou modifier ses caractéristiques physiques et géométriques. Cette problématique répond néanmoins à des enjeux majeurs de la société, tels que la sécurité des systèmes industriels et des personnes [1].

Ces techniques vont du simple examen visuel à des méthodes complexes faisant appel à différents domaines de la physique (optique, électromagnétisme, thermique, ultrasonores, rayons ionisants...). Elles sont exploitées dans de très nombreux secteurs industriels, dont les secteurs nucléaires et aéronautiques, pour des raisons de sécurité évidentes, mais également pour des raisons économiques [2-3].

Dans ce contexte, des systèmes d'imagerie à courants de Foucault ont été récemment développés afin de produire des images à Courants de Foucault avec de bonnes performances en termes de caractérisation de défauts [1]. Elle est obtenue par des procédures de balayage mécanique d'un ensemble de bobines individuelles, regroupées dans une seule sonde et formant le système de bobines multiéléments [4]. L'utilisation d'un système de capteurs multiéléments permet de contrôler une surface importante et de ce fait réduire le nombre de balayages particulièrement coûteux en temps d'une part, d'autre part pour minimiser l'effet de mutualité entre les bobines adjacentes, on procède à une alimentation en multiplexage des éléments constituant le capteur multiéléments (c-a-d les bobines sont excitées séquentiellement) [5].

L'objectif visé par ce travail est de réaliser une étude d'un système de détection par courants de Foucault multiéléments alimenté en mode harmonique multiplexé appliqué pour la détection de fissures et défauts de corrosion dans les tôles utilisées dans les Structures aéronautiques.

Ce mémoire est organisé comme suit :

- Au premier chapitre on présentera des généralités sur le CND, les principales méthodes de CND seront rappelées.
- Le second chapitre sera consacré à la formulation et la modélisation du problème de CND par CF et aux équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électriques et magnétiques dans le domaine d'étude.
- Le troisième chapitre sera réservé pour sa première partie à l'imagerie par CF, quant à la deuxième partie elle sera dédiée à l'étude de l'effet de certains paramètres électriques et

géométriques (fréquence, Lift-off et pas de déplacement) sur les performances de la détection.

-En effet, les résultats obtenus ont montré la possibilité de détecter le défaut, de reconstituer sa forme, sa taille et son orientation avec une précision qui dépend de plusieurs paramètres tels que la fréquence, le pas de déplacement ainsi que le Lift-off.

Généralités sur les techniques de (CND)

Chapitre I. Généralités sur les techniques de (CND)

I.1 Introduction

Le Contrôle non destructif (CND) est l'utilisation des méthodes physiques qui testeront les matériaux, les composants et les assemblages pour détecter les défauts de leur structure sans nuire à leur utilité future. Le CND se préoccupe de révéler des défauts dans la structure d'un produit. Les méthodes de CND vont du simple au compliqué. L'inspection visuelle est la plus simple de toutes. L'imperfection de surface invisible à l'œil peut être révélée par des méthodes pénétrantes ou magnétiques. Si des défauts de surface vraiment graves sont détectés, il est souvent inutile de procéder à des examens plus compliqués de l'intérieur par ultrasons ou radiographie. Les méthodes CND qui sont couramment utilisées comprennent l'inspection visuelle ou optique. Les tests de pénétration de liquide, les tests de particules magnétiques, les tests par courants de Foucault, les tests radiographiques et les tests ultrasoniques. Les méthodes CND sont celles utilisées uniquement pour des applications spécialisées et sont par conséquent limitées dans leur utilisation, comprennent la radiographie neutronique, l'émission acoustique, les tests thermiques et infrarouges, la détection des contraintes, les techniques micro-ondes, les tests d'étanchéité, l'holographie, etc. Il faut également se rappeler qu'aucune de ces méthodes ne peut nous apporter de solutions à tous les problèmes possibles, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas des alternatives optionnelles mais plutôt complémentaires les unes des autres [8] [9] .

Les techniques de CND sont nombreuses. Citons, [6] :

- Le ressuage
- La magnétoscopie
- Les courants de Foucault
- Les ultrasons
- La radiographie

Auxquelles il faut ajouter l'émission acoustique (en plein développement), la tomographie et la neutronographie. Certains classent également la thermographie,

l'holographie, le contrôle d'étanchéité et l'analyse de signature mécanique parmi les techniques de CND [7].

I.2 Types de défaut à détecter par le contrôle non destructif :

Différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe,) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service). Les défauts recherchés peuvent être classés en deux grandes catégories. les défauts surfaciques et les défauts internes

- Les défauts surfaciques sont les plus problématiques sur le plan technologique. Ils incluent les criques, les fissures, les piqures, les craquelures pouvant provoquer à terme la rupture de la pièce, ou d'aspect, c'est-à-dire la variation de paramètres géométriques et/ou physiques de la pièce tels que sa rugosité, son épaisseur, l'homogénéité de la surface, qui rendent la pièce inutilisable.
- Les défauts internes sont des hétérogénéités de nature, forme et dimensions variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Ils sont susceptibles d'affecter la santé de la pièce et peuvent se présenter sous la forme d'une crique interne, des porosités, des soufflures, d'inclusions diverses [9].

I.2.1. Principe de détection des défauts :

Exciter celui-ci et recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée, [4] [8] :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts ;
- Détection de ces modifications par un capteur approprié ;
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée, [8].

I.3 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, [2] [11] :

- 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), [10].

I.4 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, [2] [10] [7].

I.4.1. 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 les "bons yeux" d'un opérateur, [2] [11] [10] [12].

Les procédures d'Examen visuel comprennent :

- Vérification de l'état de surface de l'échantillon ;
- Vérification de l'alignement des surfaces de contact ;
- Vérification de la forme du composant ;
- Vérification des signes de fuite ;

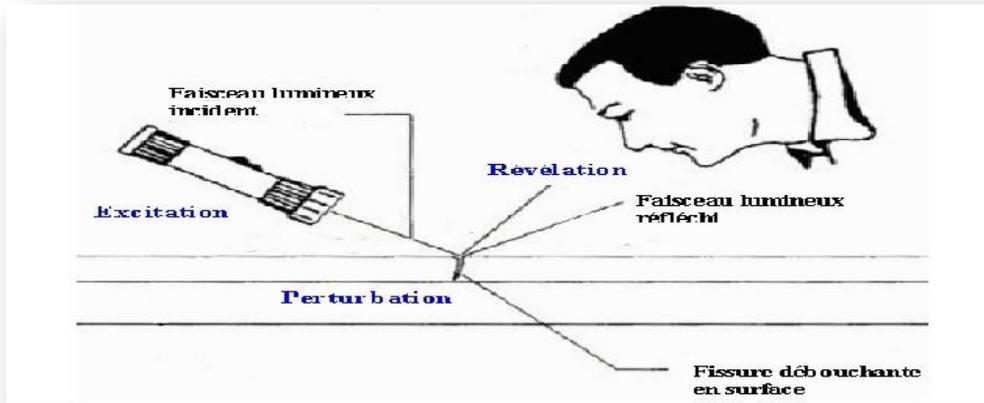


Figure I. 1 : L'examen visuel.

I.4.2. Le ressuage

Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchant, un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...) ; la pièce étant ensuite examinée visuellement, [2] [10] [7].

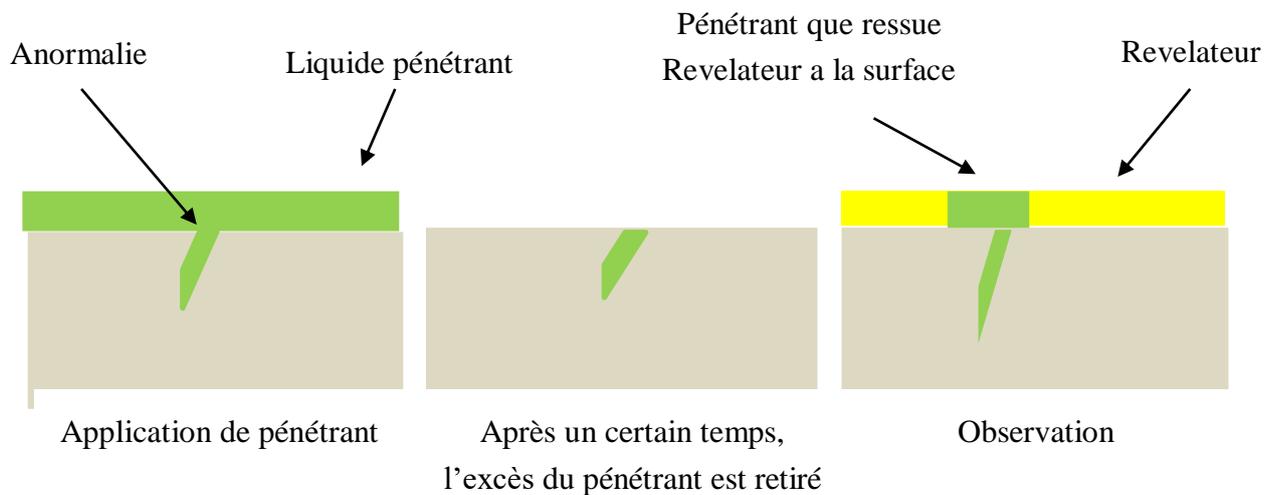


Figure I. 2 : Principe du ressuage [1].

Par ordre décroissant de sensibilité et de coût, les processus de pénétration des liquides peuvent être classés comme :

1. Colorant fluorescent post-émulsionnable ;
2. Pénétrant fluorescent amovible au solvant ;
3. Pénétrant fluorescent lavable à l'eau ;

4. Colorant visible post-émulsionnable.
5. Pénétrant de colorant visible amovible au solvant ;
6. Colorant visible lavable à l'eau.

Certains des avantages des tests de ressuage sont les suivants :

- Coût relativement faible ;
- Méthode CND hautement portable ;
- Très sensible aux discontinuités fines et serrées ;
- Méthode assez simple ;
- Peut être utilisé sur une variété de matériaux ;
- Toutes les discontinuités de surface sont détectées en une seule opération, quelle que soit l'orientation.

Certaines des limites des tests de ressuage sont les suivantes :

- La surface d'essai doit être exempte de tout contaminant (saleté, huile, graisse, peinture, rouille, etc.) ;
- Détecte uniquement les discontinuités de surface ;
- Ne peut pas être utilisé sur des échantillons poreux et est difficile à utiliser sur des surfaces très rugueuses ;
- L'enlèvement de tous les matériaux pénétrants, après le test, est souvent nécessaire ;
- Il n'y a pas de méthode simple pour produire un enregistrement permanent.

I.4.3. La magnétoscopie :

La magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructive pour la détection des défauts débouchant ou sous-jacents (de 1 à 2 mm de la surface) dans les matériaux ferromagnétiques. Elle consiste à créer un flux magnétique intense dans les structures, des flux de fuite. Ces flux sont mis en évidence par des révélateurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux ou, de façon plus marginale, par une mesure directe avec des capteurs. Il s'agit, dans la majorité des cas, d'une inspection visuelle réalisée par un opérateur. La sensibilité de détection est liée en partie à la granulométrie des poudres magnétiques utilisées, qui doivent être très homogènes. Le contrôle peut se faire de façon

automatisée sur des pièces de forme simple, en particulier toutes les pièces axisymétriques du type barres et tubes, à l'aide de capteurs électriques sensibles aux champs magnétiques, [13] [5].

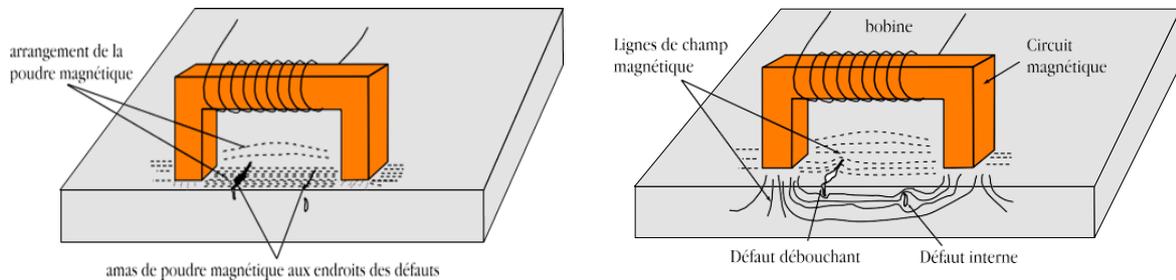


Figure I. 3 : Principe de la magnétoscopie [13].

I.4.4. Radiographie :

Le contrôle par radiographie consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement ionisant (rayons X ou γ) et à recueillir le signal atténué sur un récepteur (film photographique ou capteur électronique) qui convertit ce rayonnement en une image visible. Les rayonnements subissent une absorption proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé Comme l'illustre la figure 1.3. Ce contrôle peut s'appliquer à de très nombreux types de matériaux pour mettre en évidence et dimensionner des hétérogénéités telles que des porosités, des soufflures, des amas d'inclusions, des criques, des fissures, des manques de pénétration en soudure..., au stade de la production ou en maintenance. Les défauts se présentant perpendiculairement à la direction du faisceau sont plus difficilement détectables, [4] [7] [8].

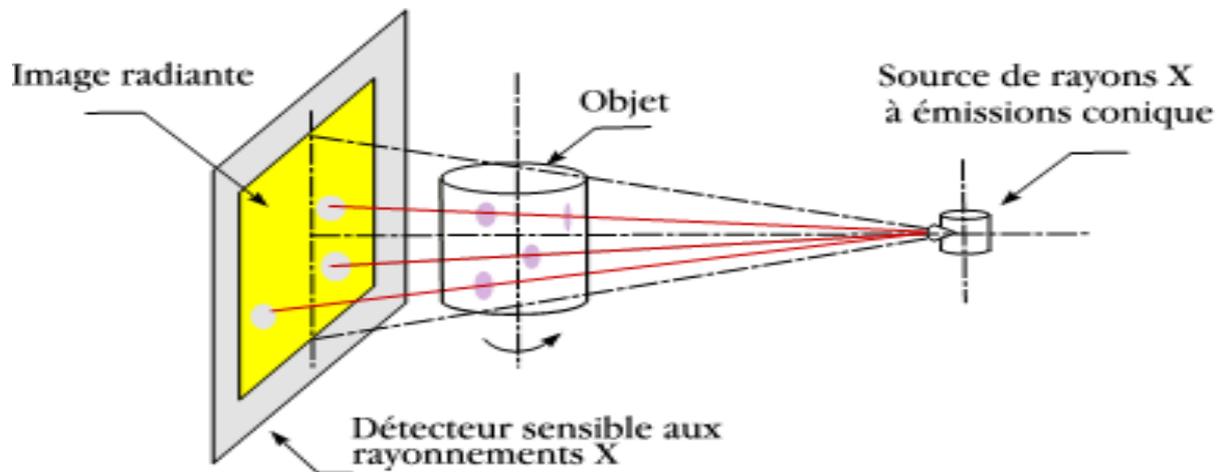


Figure I. 4 :Principe de la radiographie [3].

I.4.5. Thermographie

Cette technologie est applicable pour le contrôle de défauts volumiques et de défauts de surface. Le contrôle par thermographie consiste à produire dans la structure à tester un échauffement local homogène et à observer l'évolution de la température après un certain temps de latence. Les défauts présents constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques pouvant être détectées par une caméra infrarouge. L'observation et la stimulation peuvent s'effectuer sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages) et pour le contrôle de matériaux céramiques, qui sont des conducteurs de chaleur relativement médiocres, [4] [7] [8].

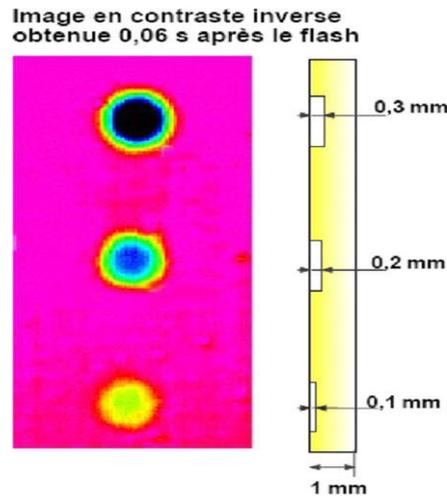


Figure I. 5 : Détection par thermographie IR [1].

I.4.6. La mesure du bruit Barkhausen :

L'effet Barkhausen est dû à une émission locale d'ondes électromagnétiques qui se créent au cœur même des cristaux d'un matériau sous l'effet d'un champ magnétique. Basée sur la microstructure magnétique et sa réorganisation, la technique Barkhausen permet ainsi d'avoir des informations précises sur son état métallurgique et son niveau de contraintes résiduelles. Les émissions Barkhausen peuvent être mesurées par l'intermédiaire de sondes encerclantes ou de sondes de côté constituées de bobines plates posées à la surface de l'échantillon. Le bruit Barkhausen est généralement représenté par sa courbe enveloppe, tracée en fonction du champ appliqué, et qui a la forme d'un pic, [7] [11].

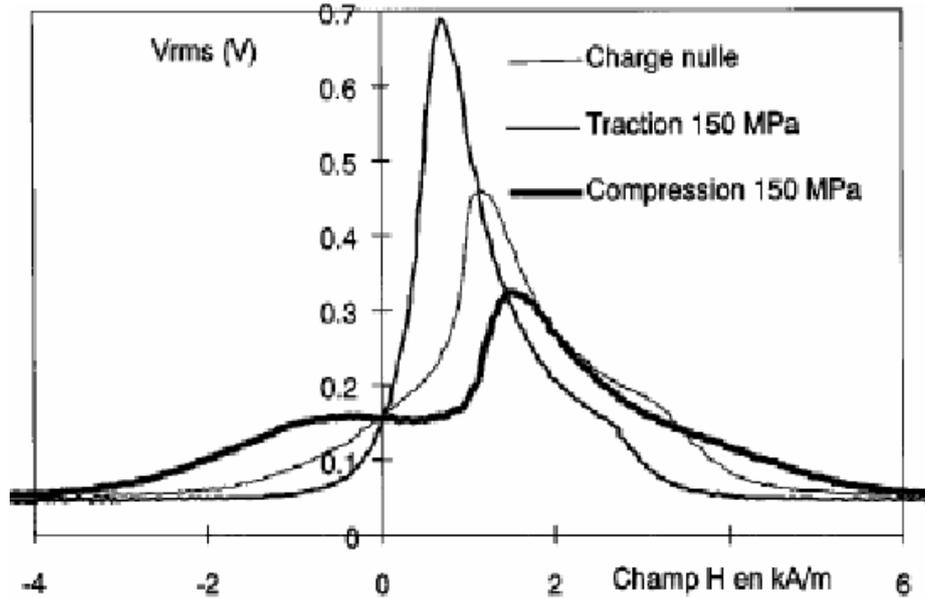


Figure I. 6 : Influence des sollicitations mécaniques sur le bruit Barkhausen [4].

I.4.7. 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) [6].

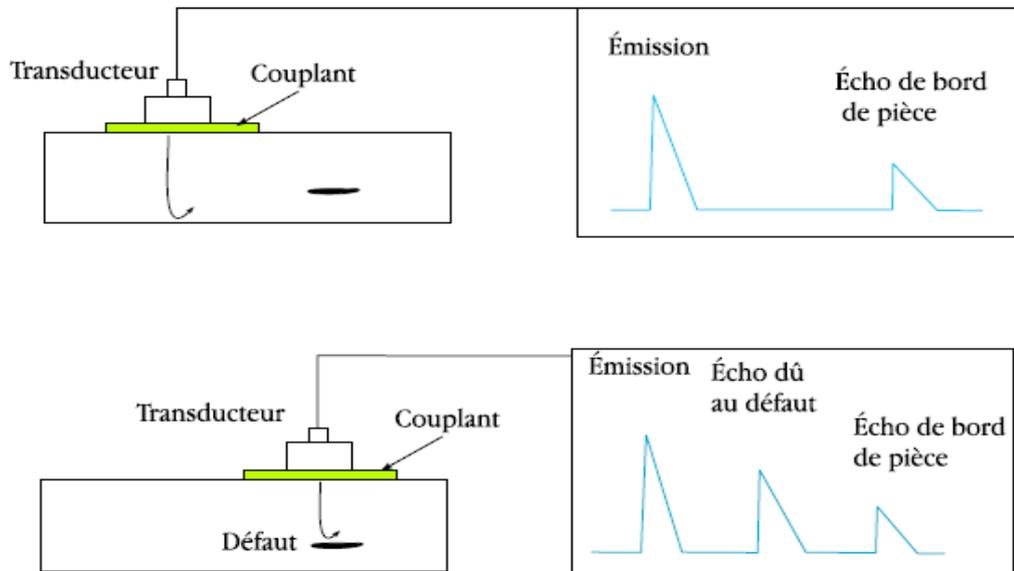


Figure I. 7 : Principe du CND par Ultrason.

Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises.

I.5 Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault :

I.5.1. Principe :

Le contrôle par courant de Foucault est l'une des méthodes les plus privilégiées parmi les méthodes électromagnétiques de CND. Cette méthode ne s'applique qu'aux pièces électriquement conductrices et s'adapte très bien aux pièces cylindriques (barres, tubes,) pour mettre en évidence les défauts superficiels ou sous-cutanés ou une quelconque variation des paramètres physiques du matériau à contrôler (σ , μ), [8]. Pour appliquer la technique de CND par CF, une bobine (appelée émetteur ou exciteur) parcourue par un courant alternatif est placée au voisinage de la pièce conductrice testée. Des courants de Foucault se développent dans la pièce en formant des boucles. Ces courants ont la même fréquence que le courant émetteur, [1] [13] [14].

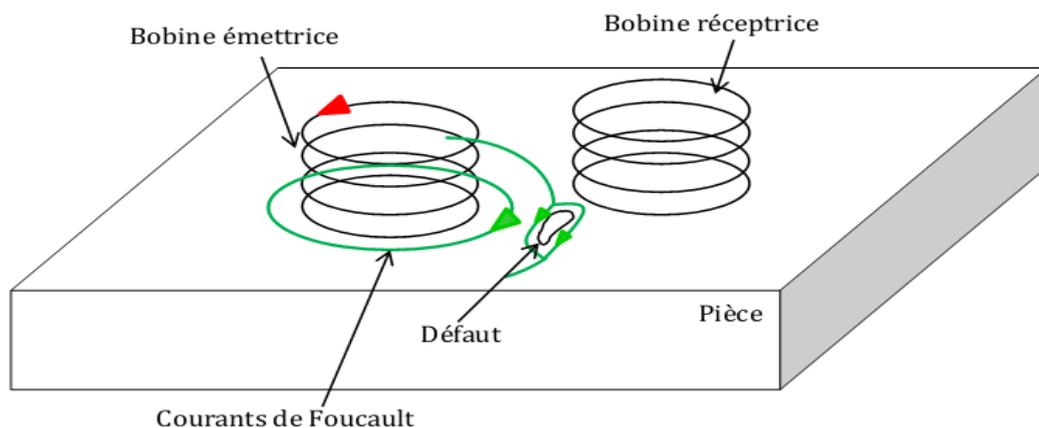


Figure I. 8 : Principe du CND par courant de Foucault[6].

En CND par CF, on utilise des fréquences généralement faibles (au plus quelques dizaines de MHz), ce qui implique que la longueur d'onde est grande par rapport aux dimensions de la pièce. Ceci permet de négliger l'effet de propagation de l'onde, [13] [14].

I.5.2. Effet de peau :

Ce phénomène existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant quand on s'enfonce dans un conducteur. Le module de la densité de courant, dans une pièce d'épaisseur infinie excitée par une nappe de courants extérieure et parallèle à son plan, est représenté dans la figure 1.9

L'équation de l'effet de peau est exprimée par la relation suivante :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (\text{I.1})$$

- f : Fréquence d'alimentation.
- μ_r : Perméabilité magnétique relative du matériau.
- μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.
- σ : Conductivité électrique.

La profondeur de pénétration est (σ et μ) donc inversement proportionnelle à la fréquence f du champ et à la nature du matériau. Si on considère une cible plane semi infinie excitée par une nappe de courants extérieurs parallèles au plan, dans ce cas le module de la densité de courant est régi par la relation suivante :

$$J(z) = J_0 \cdot e^{-z\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} = J_0 \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (\text{I.2})$$

- Z : Profondeur considérée à l'intérieur de la cible[m].
- $J(z)$: Module de la densité de courant en fonction de la profondeur [A/m*m].
- σ : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau[m].

On constate que la densité du courant décroît d'une manière exponentielle en profondeur.

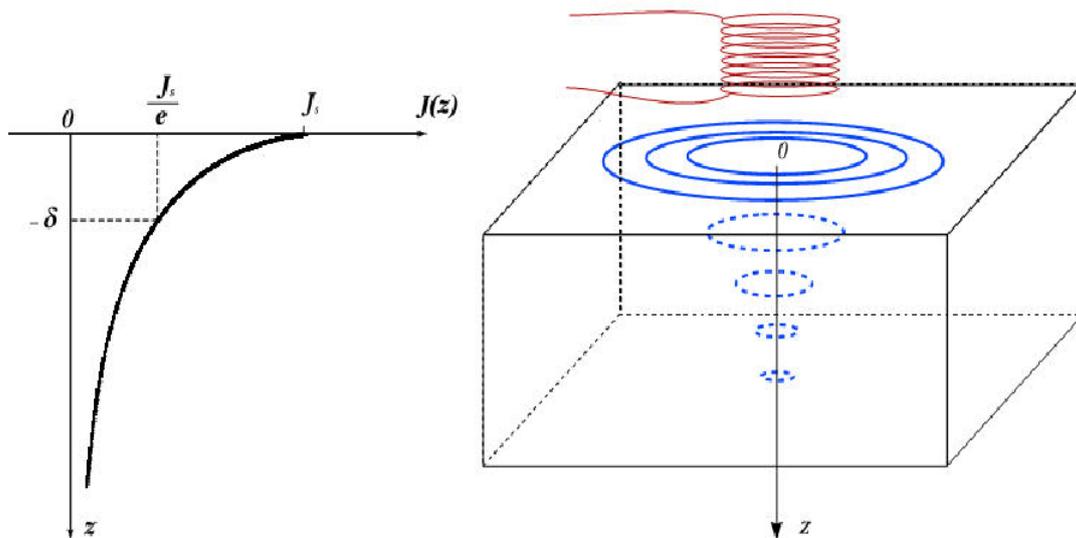


Figure I. 9 : Répartition des courants de Foucault sous une surface plane [10].

La réponse d'une cible à une excitation est recueillie par un élément sensible à une grandeur électromagnétique. Dans la majorité des cas il s'agit de mesurer une impédance ou une différence de potentiel (d.d.p) représentative de la variation d'un flux.

Cette mesure s'effectue souvent par l'intermédiaire d'une bobine [3][6].

I.5.3. Objectifs du CND-CF :

La figure suivante montre les différents objectifs visés par le CND-CF.

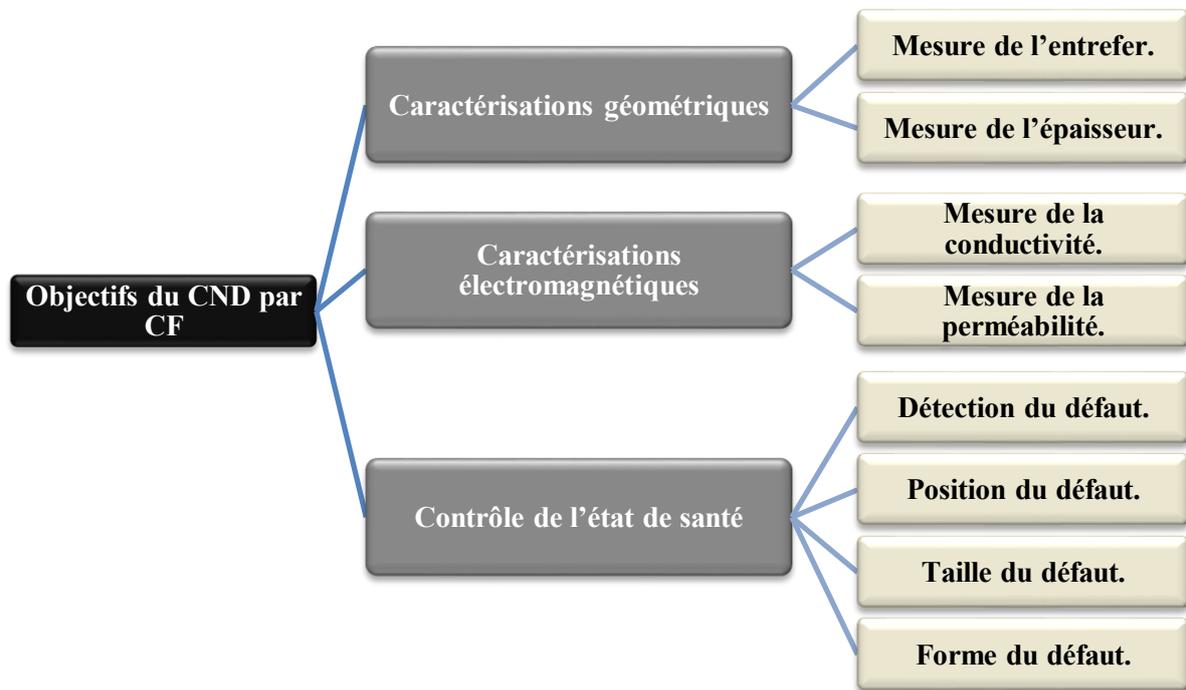


Figure I. 10 : Objectif du CND par CF.

I.5.4 Classification des capteurs :

Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs. La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle, [2] [4] [7].

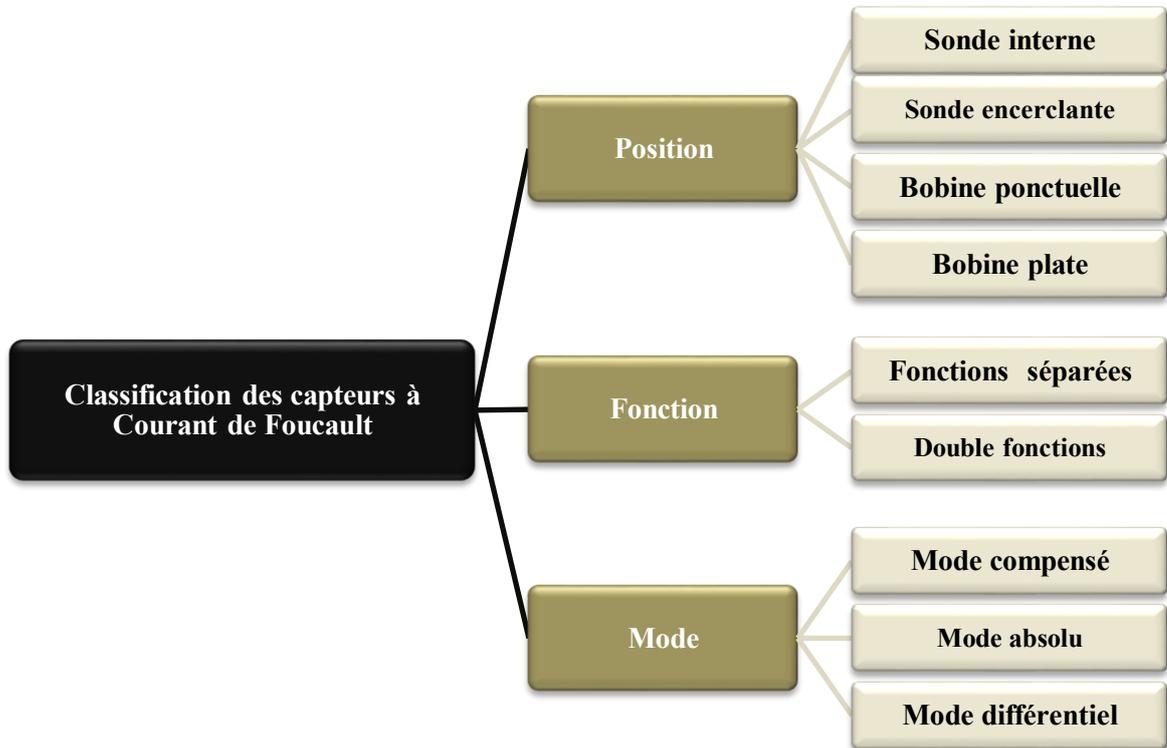


Figure I. 11 : Critères de classification des capteurs.

I.6 Selon la position :

I.6.1. Sonde interne :

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau [1]

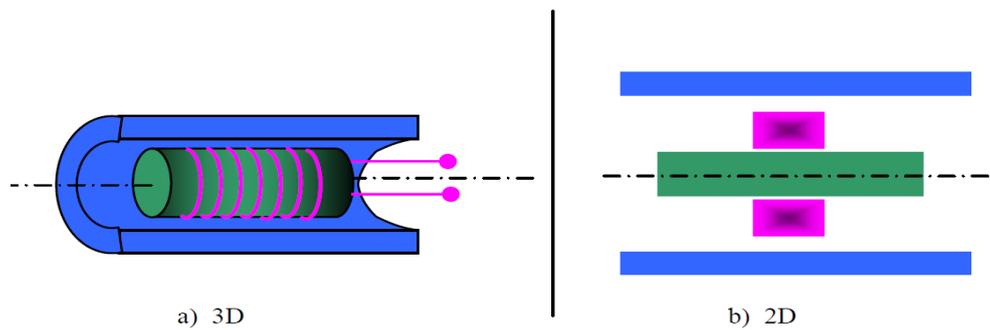


Figure I. 12 : Sonde interne [9].

I.6.2. Sonde encerclant :

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Dans la majorité des cas, il s'agit de bobines à section circulaire. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, les barres. [9]

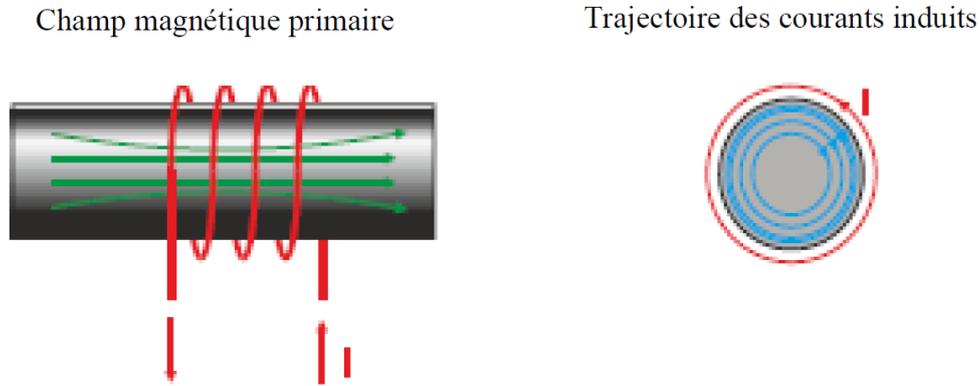


Figure I. 13 : Sonde encerclant [9].

I.6.3. Bobine ponctuelle (Palpeur)

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube [1].

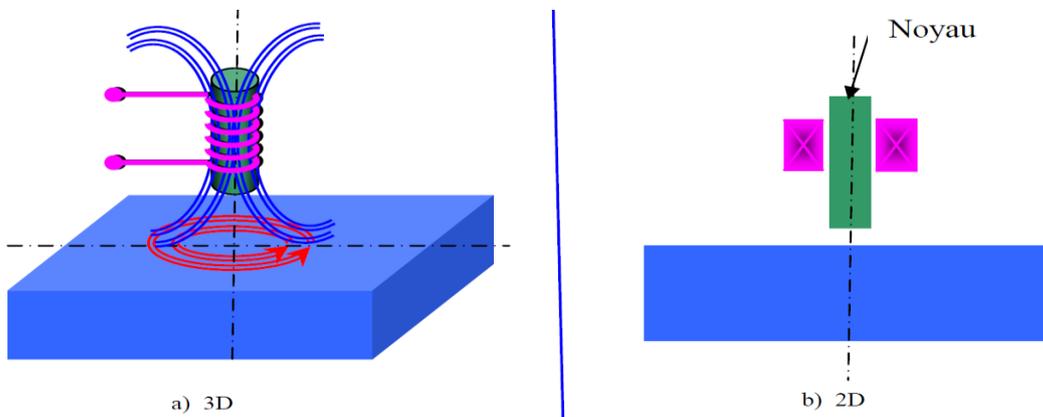


Figure I. 14 : Bobine ponctuelle (Palpeur) [9].

I.6.4. Bobine plate :

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large [10].

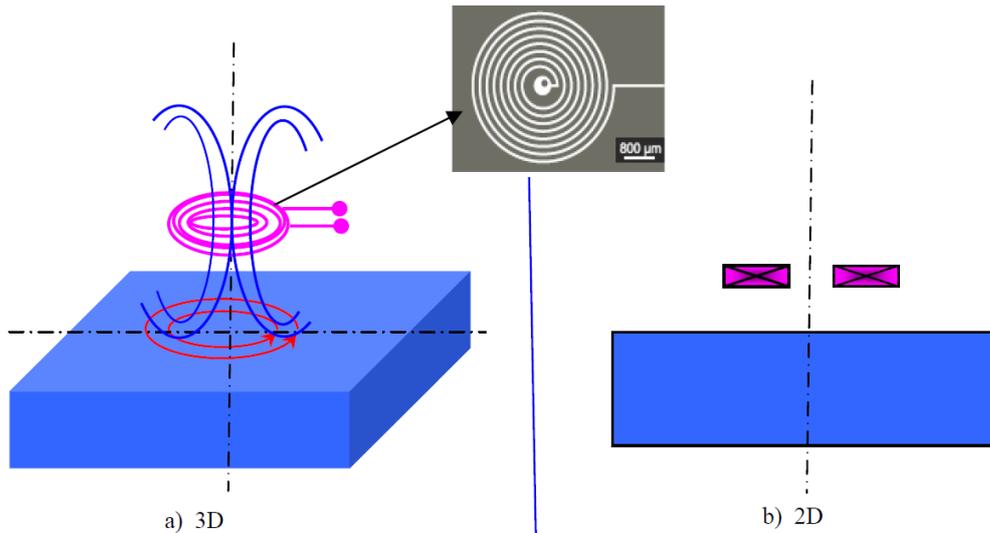


Figure I. 15 : Bobine plate [5].

I.6.5. Sonde interne tournante

Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube [1].

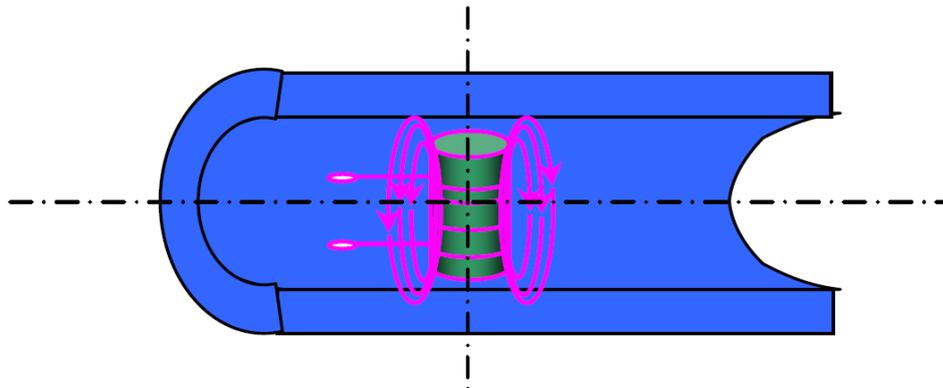


Figure I. 16– Sonde interne tournante [9].

I.6.6. Selon la Fonction du capteur

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les configurations de base à partir desquelles d'autres montages peuvent être envisagés [8].

I.6.7. Capteur double fonction

Le montage le plus simple est celui de la sonde à double fonctions constituée d'une seule bobine. Les fonctions d'émission et de réception sont assurées par la même bobine. L'exploitation se fait, en régime sinusoïdal, par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine dans son environnement [8].

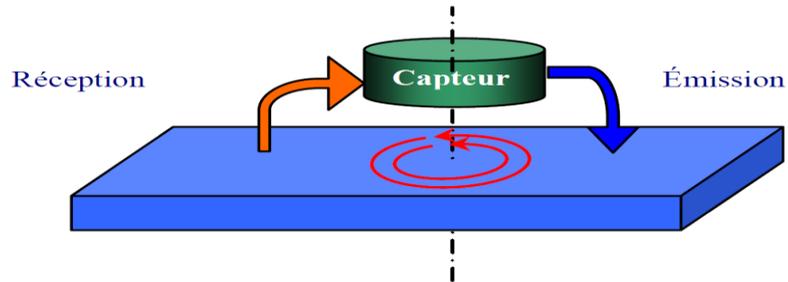


Figure I. 17 : Capteur à double fonction [9].

I.6.7. Capteurs à fonctions séparées

Dans ce cas, le capteur contient au moins deux éléments, une bobine pour l'émission d'un champ alternatif et une autre bobine ou un capteur de champ magnétique pour la réception de la réponse de la pièce examinée. Dans le cas où le récepteur est une bobine la grandeur mesurée est la force électromotrice (f.e.m) induite aux bornes de celle-ci

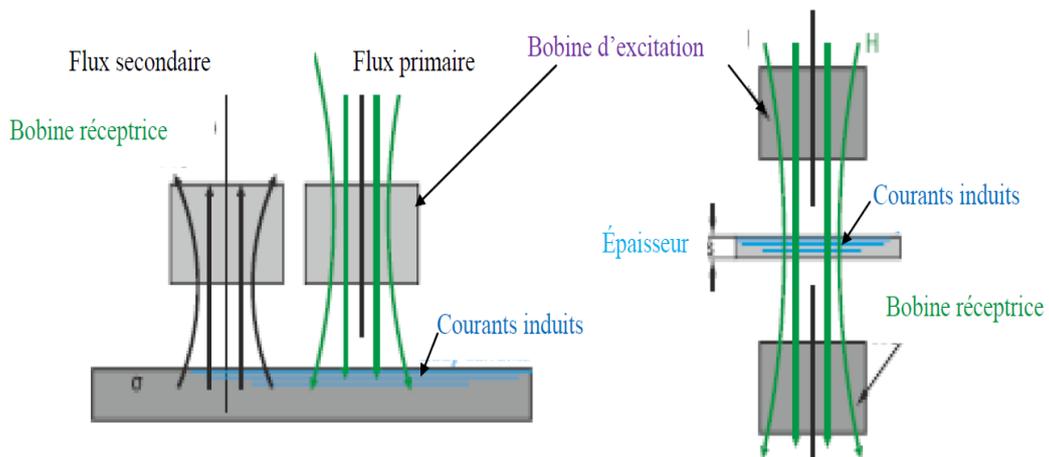


Figure I. 18 : Capteur à fonctions séparées [9].

I.7 Selon le mode :

I.7.1. Mode absolu :

Ce type de capteur est sensible à tous les paramètres géométriques et électromagnétiques de l'environnement. Typiquement le récepteur est constitué d'un seul élément. Avant le contrôle d'une pièce un étalonnage peut être effectué sur une pièce de référence (maquette)[8].

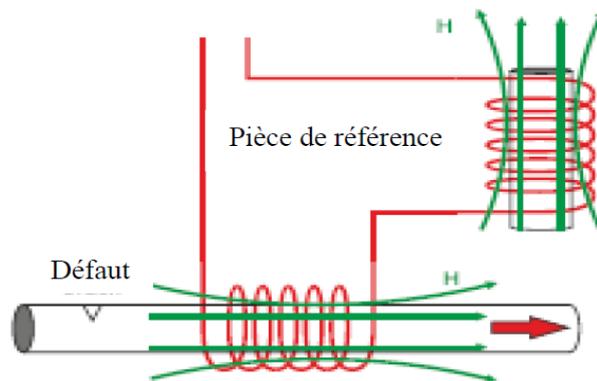


Figure I. 19 : Capteur absolue en mode compensé [9].

I.7.2. Mode différentiel

La mesure différentielle est une comparaison de deux mesures effectuées simultanément d'impédances de deux capteurs absolus dont les flux sont opposés

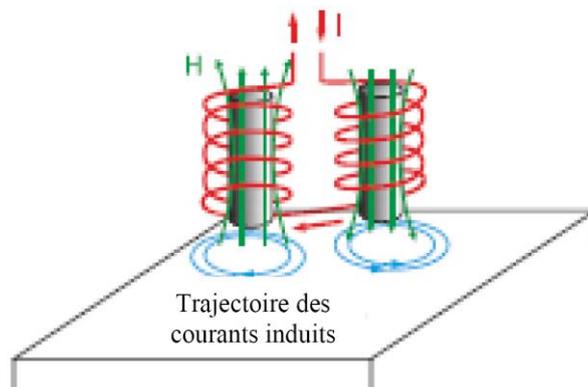


Figure I. 20 : Capteur en mode différentiel [9].

En effet, dans le cas d'une pièce saine, l'impédance différentielle est nulle. Par contre, si la pièce présente une anomalie l'amplitude de la grandeur d'alimentation est modifiée [9].

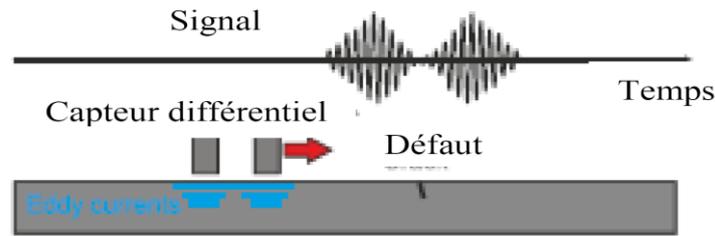


Figure I. 21 : Perturbation du signal d'alimentation [9].

I.7.3. Capteurs multiéléments

La technique de capteur multiélément à courant de Foucault consiste à générer un champ magnétique dans un conducteur induisant des courants qui permettent d'obtenir des informations sur la santé de la pièce inspectée. Toutefois, la génération du champ et la mesure sont faites à l'aide d'une ou plusieurs bobines électroniquement activées dans un motif donné et répété sur l'ensemble des éléments / bobines composant le capteur. C'est ce que l'on appelle le séquençement (i.e. la chronologie de l'activation de chaque motif).

I.7.3.1. Déplacement

Pour produire des capteurs multiéléments, plusieurs bobines placées de manière spécifique (ex. côte à côte, avec un motif particulier) dans un même assemblage, sont électroniquement activées selon un séquençement dédié. Ceci permet d'obtenir une zone active plus large et donc de diminuer efficacement le nombre de balayage nécessaire à l'inspection d'un composant donnée comparé au capteur conventionnel. Par exemple, un balayage mono-élément en peigne est maintenant remplacé par un balayage linéaire de capteur multiéléments (Figure I.21). A noter qu'il est aussi possible d'effectuer des balayages en peigne avec des capteurs multiéléments, augmentant encore plus la zone d'inspection et donc la rapidité du contrôle[12].

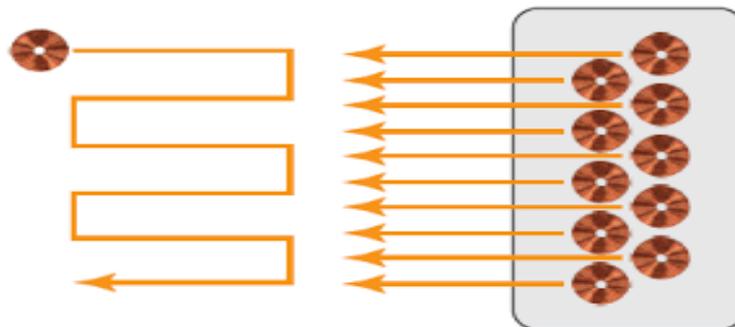


Figure I. 22 : Représentation schématisé de balayage en peigne et linéaire obtenu respectivement avec un élément simple et un capteur multiélément.

I.7.3.2. Motif

Le motif (aussi appelé topologie) correspond au montage physique des bobines dans un même capteur ainsi qu'à l'activation électronique unitaire de celles-ci. Les motifs du capteur Multiélément sont en principe établis sur des montages de base développés pour les capteurs mono élément tels que les montages absolus, différentiels, et en transmission. De manière générale, les motifs utilisés sont principalement de type absolu ou émission/ réception (E-R). Le motif absolu permet la détection de défaut dans toutes les orientations quel que soit le déplacement du capteur [12].

Un capteur multiélément a la même sensibilité et limites de ses éléments, veut dire que si un de ces éléments ne peut pas détecter les défauts la solution finale est de même.

I.8 Paramètres définissant un capteur multiélément

Les paramètres qui permettent de définir le capteur multiélément liés au motif sont la couverture, la résolution du capteur et l'uniformité des signaux.

I.8.1. La couverture

Correspond à la zone dite active du capteur. Selon le motif, le capteur doit donc contenir suffisamment de bobines pour fournir une couverture qui s'étend au-delà de la zone d'intérêt pour une inspection par passe unique. Des scans multiples peuvent être nécessaires pour couvrir une surface complète [12].

I.8.2. La résolution

Est la distance entre les deux centres de deux bobines adjacentes, elle est définie par le plus petit défaut recherché.

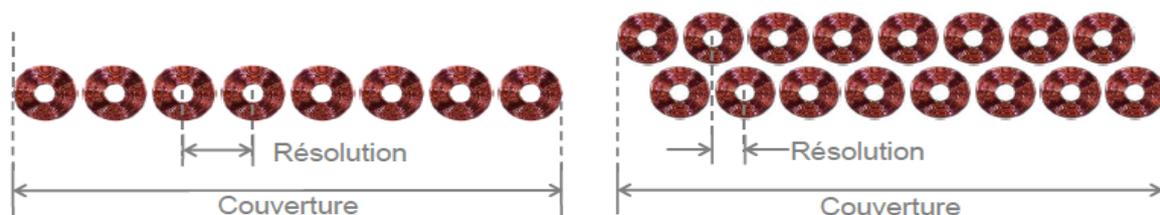


Figure I. 23 : Schématisation d'un capteur CFM définissant la couverture et la résolution [12].

I.8.3. L'uniformité du signal

L'uniformité d'un capteur est sa capacité à obtenir la même signature CF pour un défaut donné quel que soit l'élément du capteur le détectant. Ce paramètre est primordial pour maximiser la probabilité de détection du défaut recherché. Il est affecté par le design physique des éléments et le motif du capteur. De manière générale, les éléments d'un capteur CFM sont agencés de manière à atteindre un niveau de sensibilité adéquat et uniforme [12].

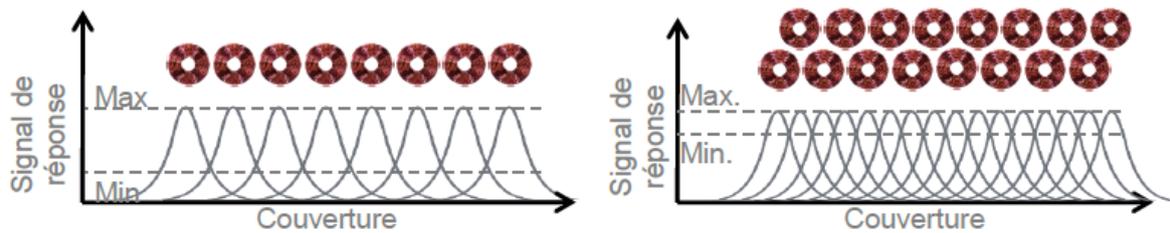


Figure I. 24 : Uniformité de signal CF sur un montage multiélément [12].

Dans les capteurs multiéléments, le multiplexage permet une optimisation de la réponse des éléments et donc d'accroître la résolution du capteur, la sensibilité des éléments (grâce à la réduction de l'inductance mutuelle) et de réduire le niveau de bruit.

I.9 Différents types de mesures :

I.9.1. Capteur à mesure absolue :

Ce type de capteur est sensible à tous les paramètres géométriques et électromagnétiques de l'environnement. Typiquement le récepteur est constitué d'un seul élément. Avant le contrôle d'une pièce un étalonnage peut être effectué sur une pièce de référence (maquette), [5].

I.9.2. Capteur à mesure différentielle :

Ce mode de mesure est, par opposition à un capteur à mesure absolue, sensible uniquement à des variations locales de l'objet à inspecter. Il permet de détecter les changements dus aux discontinuités lors du déplacement du capteur le long du produit examiné en se débarrassant des perturbations lentes telles que la variation du lift-off, conductivité... Typiquement, le récepteur est constitué d'au moins deux éléments voisins. Cette approche revient à effectuer la différence de mesures réalisées conjointement sur les deux éléments. Le signal fourni par un capteur différentiel est idéalement nul lorsque la pièce est saine, [2] [5].

I.10 Différents types de bobines :

La bobine est un élément qui peut réaliser l'émission et/ou la réception. Il existe deux principales classes de bobine, [5] [6].

I.10.1. Bobines classiques :

La bobine est fabriquée par l'enroulement hélicoïdal d'un conducteur (cuivre) émaillé autour d'un noyau. Le noyau est généralement diélectrique (isolant) ou magnétique (ferrite...). L'utilisation d'un noyau magnétique permet de focaliser le champ magnétique autour de la bobine, [5] [6].

I.10.2. Bobines gravées :

Il existe deux types de bobines gravées :

- Bobines réalisées sur circuit imprimé en utilisant les technologies PCB standards,
- Micro bobines (taille de l'ordre du mm) réalisées en salle blanche par des moyens de micro technologies. La fabrication fait appel à différentes étapes de dépôts et de gravure telles que montrées dans la figure I. 25, [5] [6].

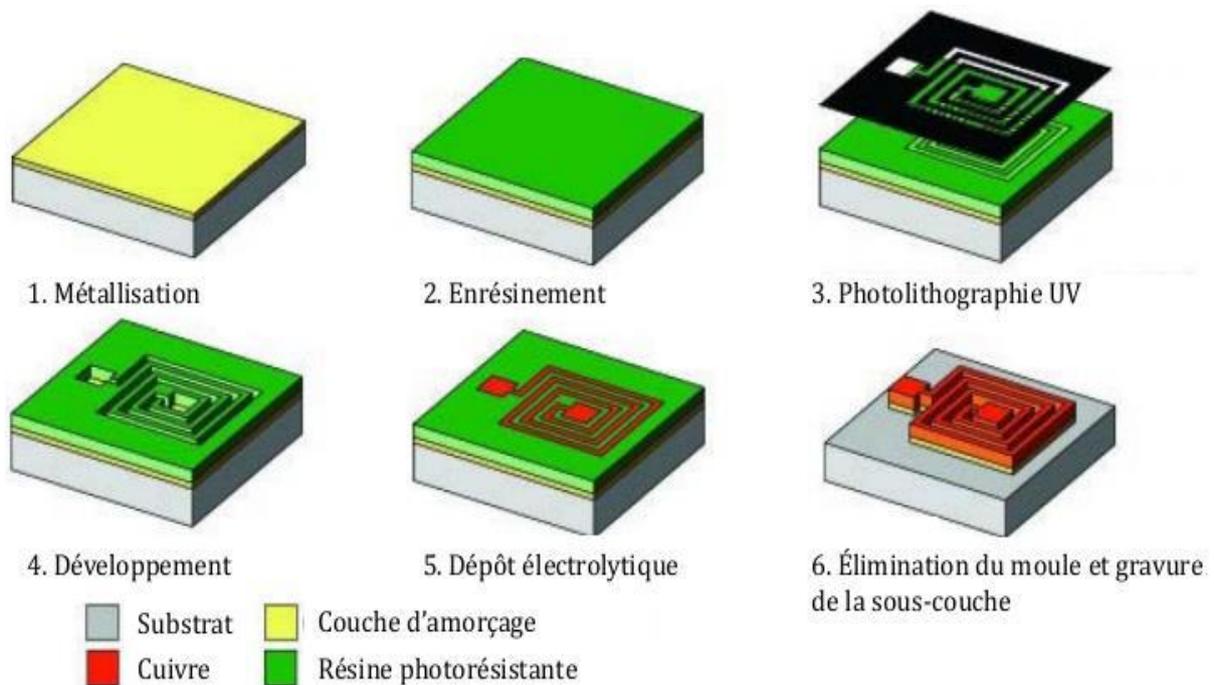


Figure I. 25 : Etapes de réalisation des bobines micro moulées [5].

I.10.3. Bobines souples :

L'utilisation de capteurs traditionnels dans une application de CND par CF est mal adaptée pour l'examen d'objets dont la surface est de forme complexe (comme la variation du rayon de courbure). Le capteur n'épousera pas la forme de la pièce et son couplage magnétique avec celle-ci sera mauvais. Des études spécifiques sont alors nécessaires, ce qui alourdit les coûts de développement. Pour pallier à ces obstacles et apporter aux utilisateurs des solutions efficaces, un recours à un capteur flexible apparaît comme une solution adéquate. En déplaçant le capteur sur la surface irrégulière, sa flexibilité lui permet d'épouser la surface de la pièce testée en minimisant la variation du lift-off durant le scan des surfaces complexes, [5].

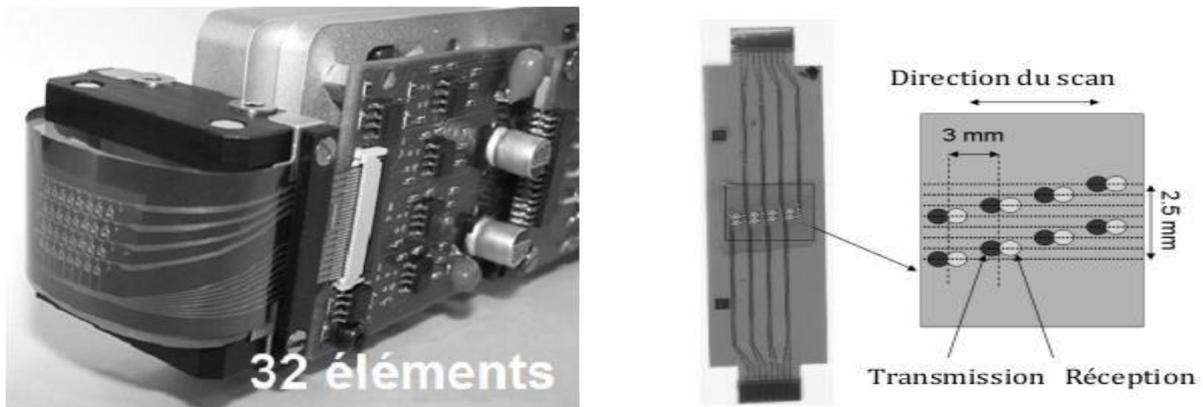


Figure I. 26 : Capteur constitué de quatre couples de bobines sur un film de kapton souple. Chaque couple est constitué d'une bobine émettrice et d'une bobine réceptrice [5].

La conception de capteurs souples fait l'objet de développements récents. On voit ainsi apparaître des capteurs mettant en œuvre des petites bobines montées sur un support souple ou encore de grandes bobines souples. La figure I. 26 montre un exemple de capteur développé au CEA constitué de plusieurs bobines gravées sur support flexible, [5].

I.11 Avantages et limites du CND par courant de Foucault :

I.11.1. Avantages :

Le CND par courant de Foucault a plusieurs avantages tel que :

- Simplicité de mise en œuvre ;
- Rapidité de balayage et de détection ;

- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement en fois (quelques mm) dans tout matériau conducteur ;
- Aucune nuisance ou pollution ;
- Traitement informatique avec stockage des données de modélisation.

I.11.2. Limites :

Malgré tous les avantages du CND par CF par rapport aux autres techniques, elle reste limitée par certain limitation et inconvénients :

- Il ne s'applique qu'aux matériaux électriquement conducteurs ;
- Il n'est pas adapté a détecté des défauts à forte profondeur;
- L'interprétation des signaux est souvent complexe ;
- Probabilité d'instabilité de lift-off du capteur CF durant la procédure du scan;
- Conduit à des perturbations au niveau de la détection de la variation d'impédance.

I.12 Conclusion

Le CND consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant la caractérisation des paramètres physiques ou géométriques ou la détection des défauts apparaissant dans des structures industrielles diverses, ce qui est un enjeu dont dépend notamment la sécurité, [7]. Parmi les différentes méthodes de CND, celle des courants de Foucault est très employée pour le contrôle de milieux conducteurs. Ce premier chapitre a été consacré à la présentation des différentes techniques du contrôle non destructif en générale et plus particulièrement le contrôle par capteurs à courants de Foucault et les différentes sondes utilisées pour ce type de contrôle.

La modélisation d'un contrôle par courants de Foucault requière la connaissance des lois qui le régissent, ce qui fera l'objet du chapitre suivant, [2] [3].

Capteurs et Modélisation pour le CND par Courants de Foucault

Chapitre II Capteurs et Modélisation pour le CND par Courants de Foucault

II.1 Introduction

Le contrôle non destructif par les courants de Foucault est fondé sur les phénomènes d'électromagnétisme. La compréhension de ces phénomènes est très importante pour développer des modèles mathématiques précis afin de faire des simulations et des améliorations dans la conception des capteurs efficaces et minimiser les problèmes rencontrés dans le contrôle non destructifs, [4,5].

La mise en évidence des différentes technologies des capteurs inductifs et des signaux qui sont indispensable au CND par courant de Foucault est présenté au début de ce chapitre. Cela est suivi les définitions des équations de maxwell régit sont le phénomène E.M.de notre système et de l'équation de la magnétodynamique en régime quasi stationnaire pour une formulation en potentiel vecteur magnétique et le potentiel électrique scalaire $\vec{A} - V$.

En suite la résolution de cette équation qui est une le système d'équations aux dérivées partielles obtenus à partir de la formulation $\vec{A} - V$ est résolut par des méthodes numériques en l'occurrence la méthode des éléments finis.

II.2 Principe des capteurs inductifs

Un capteur inductif est principalement constitué d'un circuit magnétique ouvert de grande perméabilité μ , sur lequel sont bobinés un ou plusieurs enroulements parcourus par un courant alternatif. L'approche d'une cible conductrice et / ou magnétique dans l'entrefer du circuit modifie la répartition des lignes de champ et se traduit par une variation de réluctance et de pertes électromagnétiques dues à la pénétration du champ à l'intérieur de la cible [6],[24].

Lorsque la cible est purement conductrice, le champ incident induit des courants surfaciques dénommés courants de Foucault, qui à leur tour génèrent un champ magnétique

opposant au champ exciteur. On parle dans ce cas de "Capteurs à courants de Foucault" (CCF).

L'effet produit par l'approche d'une cible magnétique non conductrice se traduit par une modification des lignes de champ, qui se trouvent attirées par le matériau en regard. Le dispositif fonctionne alors en "Capteur Magnétique" ou "CM".

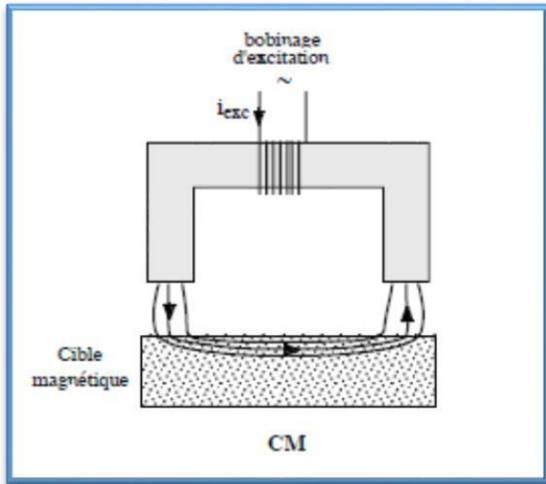


Figure II.1 : Capteur Magnétique ou CM

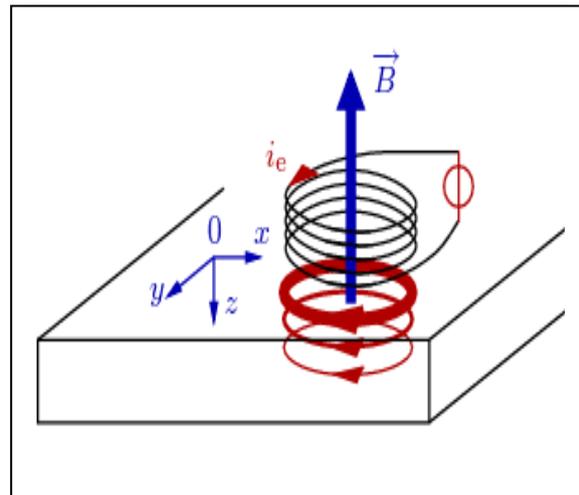


Figure II.2 : Capteur à courant de Foucault ou CCF

II.3 Equations regissant le phénomène EM

Il existe deux familles de formulations pour la résolution des équations de Maxwell. L'une repose sur le calcul du champ électrique et l'autre sur le calcul du champ magnétique [11].

II.3.1 . équations de maxwell

Tous les phénomènes d'électromagnétisme variables dans le temps et dans l'espace dans les dispositifs électrotechniques sont régis par les quatre équations de Maxwell suivantes, [14] [15] :

- Loi de Maxwell Faraday (induction) :

$$\text{rot}(\vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

- Loi de Maxwell Gauss (électrique) :

$$\mathbf{div}(\vec{D}) = \rho \quad (\text{II.2})$$

- Loi de Maxwell Ampère :

$$\mathbf{rot}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

- Loi de Maxwell Gauss (magnétique) :

$$\mathbf{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II.4})$$

\vec{E} [V/m] Et \vec{H} [A/m]: Champ électrique et magnétique.

\vec{D} [A · s/m] Et \vec{B} [T]: Induction électrique et magnétique.

\vec{j} [A/m²] Et ρ [C/m³]: Densité du courant et la charge volumique.

Tel que :

$$\vec{J} = \vec{J}_{ind} + \vec{J}_{exi} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- \vec{J}_{ind} : La densité de courant induit.
- \vec{J}_{exi} : La densité de courant d'excitation.

II.3.2. Lois constitutives du milieu

Ces équations sont liées entre eux par les lois constitutives qui traduisent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considéré sont, [14] [16] [17] :

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

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

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

- ϵ [F/m]: Permittivité diélectrique.
- $\epsilon_0 = 8.85.10^{-12}$ [F/m]: Constante diélectrique du vide.
- ϵ_r : Permittivité électrique relative du milieu.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.8})$$

Où :

- σ [S.m⁻¹]: Conductivité électrique.

II.3.3. hypothèses simplificatrices

Suivant les dispositifs que l'on étudie certains phénomènes deviennent négligeables (régimes quasi-stationnaires), ce qui va nous donner des équations découplées plus simples à résoudre, ajouté aussi que certaines hypothèses simplificatrices sont introduites, dans notre cas d'étude nous allons considérer que, [14] [15] [16] :

Dans un milieu conducteur σ est de l'ordre de 10^6 S.m⁻¹, et ϵ_0 de l'ordre de $8.85.10^{-32}$ F/m jusqu'à des fréquences qui avoisinent les MHz nous avons $\omega. \epsilon_0 \ll \sigma$ ce qui nous permet d'avoir :

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \mathbf{0}$$

La densité volumique de charge est considérée comme nulle ($\rho = \mathbf{0}$) Les paramètres σ, μ, ϵ , sont considérés linéaires, donc ils ne dépendent pas de la solution du système. le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale.

Toutes ces hypothèses considérées, le système d'équation devient, [12][14][16] :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{div}(\vec{D}) = 0 \quad (\text{II.10})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{j} \quad (\text{II.11})$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II.12})$$

II.3.4. Conditions de passage entre deux milieux de propriétés différentes

La méthode des éléments finis, lorsque l'inconnue recherchée aux nœuds est le potentiel vecteur magnétique, impose la continuité à l'interface de deux milieux de nature différente. Si $A1$ et $A2$ sont respectivement les potentiels du milieu 1 et 2 à l'interface alors, [2] [3] :

$$A1 = A2$$

La continuité du potentiel assure la continuité de la composante normale de l'induction magnétique à l'interface. Compte tenu des équations de passage qu'on rappelle ci-après, [2] [3] [18] :

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (\text{II.13})$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \quad (\text{II.14})$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s \quad (\text{II.15})$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K} \quad (\text{II.16})$$

- \vec{n} : Le vecteur normal à la surface.
- \vec{K} : Représente la composante de la densité de courant perpendiculaire à l'axe du plan.

De plus les vecteurs ont généralement trois composantes augmentant de ce fait le nombre d'inconnues, et par la même le temps de calcul, [7].

Pour pallier à ces problèmes, cités précédemment on fait appel à une entité purement mathématique connue sous le nom de potentiel, si ce potentiel n'a aucun sens physique, sa variation, elle, est très significative, [3].

La divergence du champs magnétique est nulle exprimé par la relation (II.12), nous renseigne sur l'existence d'un vecteur \vec{A} et nous permet d'écrire [19] :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II.17})$$

II.4 Formulation en potentiel vecteur A-V :

Cependant du fait des fortes discontinuités de certaines variables aux interfaces entre deux régions de propriété différentes, la résolution directe des équations de Maxwell est délicate. Pour faciliter la résolution, ces équations sont transformées en équations de potentiels. Ceci conduit à la définition des formulations duales en potentiels combinés. La formulation la plus connue est la formulation en $\vec{A} - V$.

Cette formulation utilise le potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique V uniquement dans les régions conductrices [9].

Pour assurer l'unicité de la solution nous allons imposer une condition de jauge (condition de coulomb) de telle sorte que :

$$\text{div}(\vec{A}) = 0 \quad (\text{II.18})$$

En remplaçant (II.17) dans (II.9), on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad (\text{II.19})$$

Le rotationnel étant associatif on aura alors

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{II.20})$$

On remarque que la quantité $\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$ est conservée, elle dérive donc d'un potentiel scalaire \vec{A} , on peut écrire alors :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (\text{II.21})$$

Ainsi la loi d'ohm (II.8) devient :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V)\right) \quad (\text{II.22})$$

Ce qui permet de définir les deux densités de courant cité précédemment dans l'éq (II.5) comme suit :

$$\vec{j}_{ind} = -\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (II.23)$$

$$\vec{j}_{ext} = -\sigma \cdot \overrightarrow{grad}(V) \quad (II.24)$$

La combinaison entre l'équation (II. 6) et (II.17) donne :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \quad (II.25)$$

En remplaçant (II.19) dans (II.20), en tenant compte que l'alimentation est sinusoïdale $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$ on obtient :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = \vec{j}_s \quad (II.26)$$

ω : La pulsation d'alimentation.

$j^2 = -1$: Nombre complexe.

Avec :

$$\vec{j}_s = -\sigma \cdot \overrightarrow{grad}(V) \quad (II.27)$$

L'équation (II.21) représente l'équation de la magnétodynamique transitoire en termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A} avec un terme source.

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, [2] [3]

L'adaptation de l'équation (II.21) aux différentes régions constituera le dispositif d'étude et nous permet d'écrire :

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 :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\mathbf{1}}{\mu_0} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \mathbf{0} \quad (\text{II.28})$$

Dans l'inducteur :

Les inducteurs sont des fils fins de cuivre, l'équation (II.21) pourra alors s'écrire sur la forme suivante :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\mathbf{1}}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \vec{j}_s \quad (\text{II.29})$$

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

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\mathbf{1}}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = \mathbf{0} \quad (\text{II.30})$$

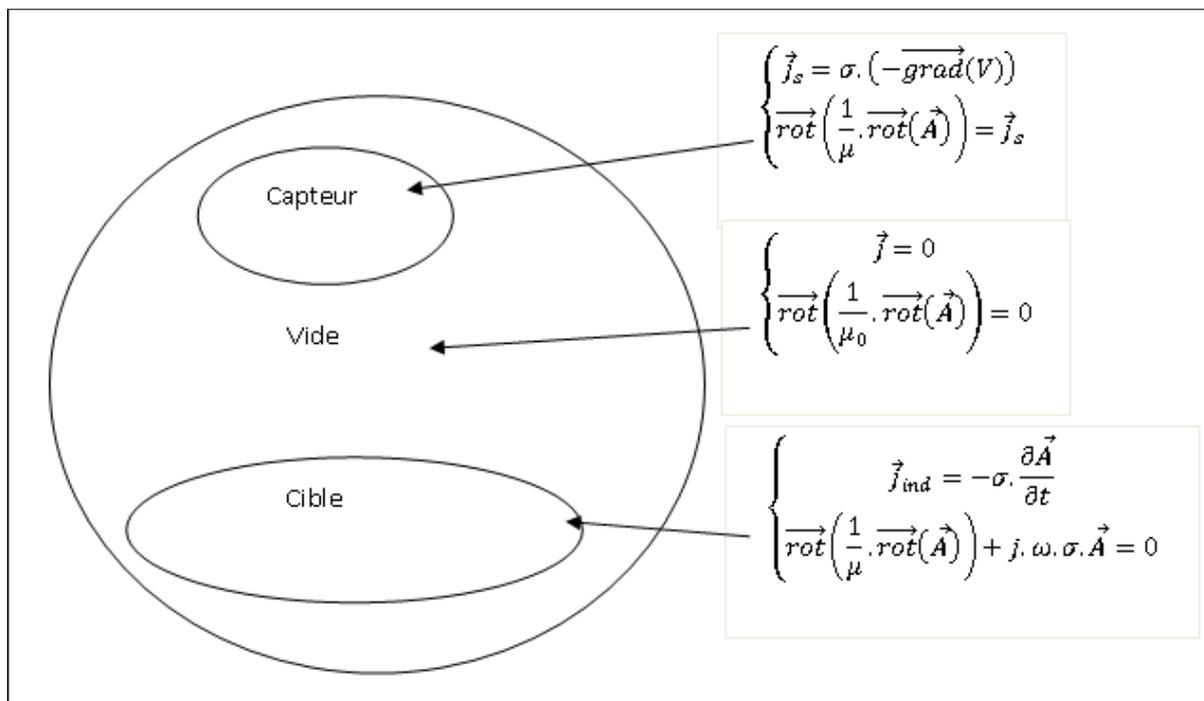


Figure II. 3– Illustre les équations du vecteur potentiel dans des différentes régions

II.5 Équation magnétodynamique bidimensionnelle :

Dans les problèmes bidimensionnels on peut avoir deux types :

Le premier concerne les systèmes à symétrie, ou aucune variation n'est enregistrée sur l'une des trois directions d'un plan cartésien. On choisit généralement l'axe (oz), [3] [12].

Dans l'autre cas on trouve les systèmes axisymétriques, ou aucune variation n'a lieu le long de la direction ortho radiale ($\boldsymbol{\varphi}$), dans un plan cylindrique ($\mathbf{r}, \boldsymbol{\varphi}, \mathbf{z}$)

Le potentiel vecteur dans ce cas n'a qu'une seule composante parallèle à (oz). A partir (II.8) et (II.16) il vient que \vec{A} et \vec{E} doivent être dans la même direction : $\vec{A}(\mathbf{0}, \mathbf{0}, A_z)$ et $\vec{j}(\mathbf{0}, \mathbf{0}, j_z)$.

En coordonnée cylindrique le potentiel vecteur magnétique ne présente que la composante ortho radiale, d'où : $\vec{A}(0, A_\varphi, 0)$ et $\vec{j}(0, j_\varphi, 0)$.

D'où l'équation du rotationnel peut s'écrire en coordonner cartésiennes :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\mathbf{1}}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] \cdot \vec{k} \quad (\text{II.31})$$

Avec \vec{k} le vecteur unitaire selon Oz Et en coordonner cylindriques :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\mathbf{1}}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mathbf{1}}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] \cdot \vec{u}_\varphi \quad (\text{II.32})$$

Avec \vec{u}_φ le vecteur unitaire selon la direction orthogonale.

a) Dans l'air :

En coordonnée cartésienne :

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] = j_z \quad (\text{II.33})$$

En coordonnée cylindrique :

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mathbf{1}}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] = 0 \quad (\text{II.34})$$

b) Dans l'inducteur :

En coordonnée cartésienne :

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] = j_z \quad (\text{II.35})$$

En coordonnée cylindrique :

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] = j_{s\varphi} \quad (\text{II.36})$$

c) Dans la charge :

En coordonnée cartésienne :

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] - \sigma \cdot \frac{\partial A_z}{\partial t} = -j_z \quad (\text{II.37})$$

En coordonnée cylindrique :

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] - \sigma \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.38})$$

Ces équations étant posées, leur solution dépend entièrement des conditions aux limites qui lui sont associées on peut distinguer trois sortes de conditions aux limites qu'on peut généralement rencontrer.

II.6 Conditions aux limites :

- Condition de Dirichlet (ou condition du premier problème aux limites) : on cherche une solution de l'équation qui prend des valeurs données sur le bord du domaine, on cherche donc à résoudre le système d'équation, [9] [17] :

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ A = A_0 & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

- Condition de Neumann (ou condition du deuxième problème aux limites): on cherche la solution de l'équation différentielle dont on connaît la valeur du

gradient sur le bord du domaine de résolution, notant que \vec{n} la normal unitaire dirigée vers l'extérieur de $\partial\Omega$, on cherche donc à résoudre le problème,[2][4][12]:

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ \frac{\partial A}{\partial n} = A_n & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

- Condition de mixte (ou condition de Dirichlet Neumann) :

on cherche une solution qui vérifie la troisième condition de bord qui est, [12] [17] :

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ a \cdot A + b \cdot \frac{\partial A}{\partial n} = c & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Ou a, b sont des constantes et A et 1 'inconnus du problème.

On note que :

- Δ : L'opérateur Laplacien
- f : Terme source.
- Ω : Le domaine d'étude.
- $\partial\Omega$: Le bord du domaine d'étude.

II.7 Conclusion :

Ce chapitre a été essentiellement consacré au rappel des équations de l'électromagnétisme régissant le phénomène EM, et à leurs formulations en termes de potentiel vecteur magnétique dans le repère cartésien pour ensuite faciliter le passage aux coordonnées cylindriques. On obtient ainsi l'équation de la magnétodynamique transitoire pour l'adapter finalement à notre dispositif d'étude, [2] [3].

Les résultats de simulation pour des défauts dus soient aux contraintes mécaniques (arrachement de matières) ou aux contraintes chimiques (corrosion) sur des pièces conductrices utilisées en aéronautiques seront développés au dernier chapitre .

Résultats de Simulation

Chapitre III. Résultats de simulation

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous établissons deux principales tâches. La première consiste à appliquer le modèle de plaque corrosion pour simuler le comportement du système de contrôle non destructif composé d'un capteur multiéléments opérant sur une tôle conductrice. Par contre la deuxième sera réservée l'obtention de l'imagerie à courants de Foucault avec un système de capteurs multiéléments avec une alimentation multiplexé.

Dans un premier temps nous décrivons le système à étudier, puis nous étudions l'effet des paramètres électriques et géométrique sur l'imagerie de la variation de résistance du capteur multiéléments.

III.2 Matériaux des Structures aéronautiques :

Les alliages qui forment la coque d'un avion sont en majorité des alliages d'aluminium et ils appartiennent à deux séries d'alliages, la série 2000 et la série 7000 qui sont respectivement des alliages d'aluminium avec du cuivre et du zinc. L'aluminium est très utilisé en général car sa masse volumique est très faible, ce qui présente un grand intérêt en aéronautique. En effet, plus l'avion est léger, moins il consommera de carburant. L'aluminium est aussi très apprécié pour sa bonne résistance à la corrosion qui est dû à la formation au préalable d'une couche d'alumine qui va ensuite empêcher la corrosion d'atteindre l'aluminium. L'un des problèmes majeurs des alliages d'aluminium vient de là, la résistance à la corrosion est en effet diminuée dès lors que l'on réalise des alliages avec des métaux plus électropositifs (comme le cuivre ou le zinc) car cela va détruire la couche d'alumine qui ne va donc plus protéger l'aluminium. L'aluminium est aussi assez facilement malléable ce qui rend la construction des parties un peu plus élaborées de l'avion plus facile.

En dehors des points précédemment cités, l'aluminium a des propriétés assez réduites surtout dans le cadre de l'aéronautique, un de ses principaux défauts vient notamment du fait que ses propriétés mécaniques sont très faibles. C'est pourquoi on l'utilise quasiment toujours dans des alliages.

- Dans l'aéronautique, on utilise plusieurs types de composites pour la structure d'un avion et non un même matériau composite pour toutes les différentes parties qui constituent un avion. En effet, du fait que ceux-ci soient un assemblage de plusieurs matériaux, on peut créer toutes sortes de matériaux différents qui peuvent être utilisés dans des applications bien différentes.
- En général les matériaux composites présentent certains avantages par rapport aux autres matériaux. Ils présentent une rigidité plus élevée, d'excellentes caractéristiques mécaniques, et d'excellentes résistances à la fatigue et à la corrosion. Un autre avantage des matériaux composites est qu'ils ne favorisent pas la propagation des dommages lors de choc par exemple. Ce type de matériaux apporte aussi une grande souplesse au niveau de la conception. (Figure III.1).
- Le Titane est aujourd'hui l'un des éléments phares de la construction aéronautique et spatiale puisque son usage est justifié par ses caractéristiques : tenue incomparable à la corrosion et à l'oxydation, tendance amagnétique, résistance thermique et mécanique élevée, ductilité, biocompatibilité, faible densité... Avec de telles propriétés, les alliages à base de titane constituent un atout majeur pour la performance des avions,
- L'inox est un alliage peu sensible à la corrosion. Cet alliage est le matériau idéal pour l'usinage de pièce dans des applications dans des milieux très exigeants, tels que **Inox304L** : Résistance à la corrosion correcte. Il est soudable en aéronautique. Pour être classé dans la catégorie inoxydable, un acier doit contenir au moins 10,5 % de chrome. Pour l'usinage de pièces inox, les nuances les plus courantes sont l'AISI 304L et l'AISI316L, toute fois nous sommes capables d'usiner tous les Inox.[11],

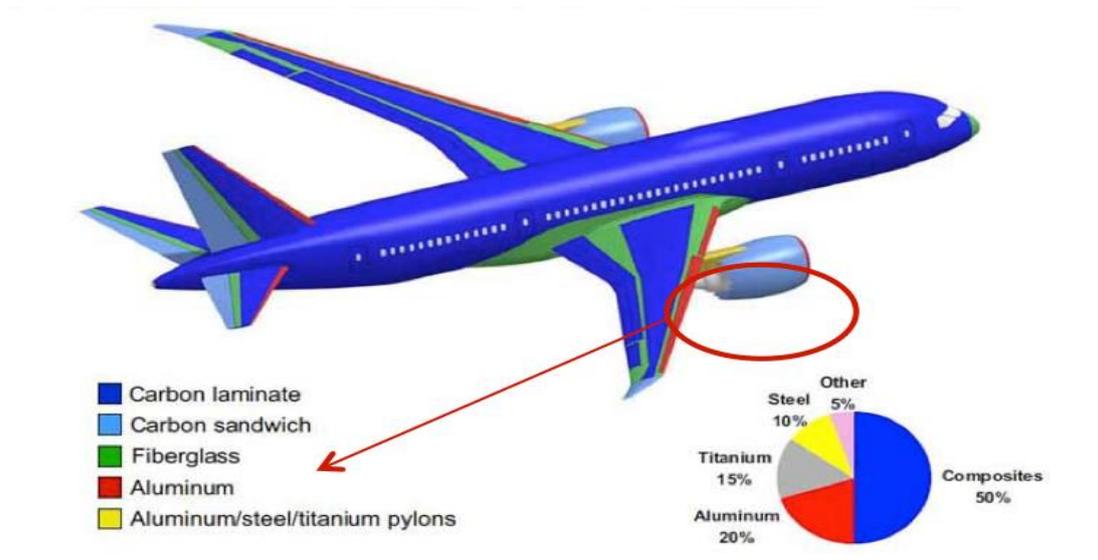


Figure III 1 : Matériaux de construction aéronautique

III.3 Défaut apparaissant dans la structure aéronautique

Des fissures de corrosion et de fatigue sont toujours attendues dans la structure des avions vieillissants. La corrosion est un problème critique de la structure des aéronefs, qui affecte directement la navigabilité d'un aéronef. La corrosion provoque un amincissement des peaux de la structure des aéronefs et une dégradation de l'intégrité structurelle. Des fissures de fatigue se produisent également dans les joints rivetés multicouches, en particulier dans les structures en alliage d'aluminium. Les inspections dans les zones critiques et l'entretien de sa structure sont essentiels pour maintenir un haut degré de qualité et de fiabilité. Pour assurer l'intégrité structurelle et la sécurité des aéronefs, tous les exploitants maintiennent efficacement un programme d'inspection. Dans ce programme d'inspection, l'inspection par essais non destructifs joue un rôle essentiel. L'inspection non destructive [NDI] est fréquemment utilisée à un certain intervalle dans différentes zones critiques de la structure de l'aéronef pour détecter les petits dommages cachés et pour clarifier l'état réel de la structure de l'aéronef en vue d'une réparation et d'une action correctives appropriées.

Défaut et estimation de la perte de corrosion sur la surface arrière en aluminium. Cette procédure d'inspection est conçue pour détecter et estimer l'amincissement du matériau causé par la corrosion sur la surface arrière ou l'interface de la surface arrière des structures en aluminium, où une surface est accessible pour le réglage de la sonde d'inspection. Cette méthode utilise l'effet de conductivité variable du courant de Foucault par la réduction de la

section transversale de la couche conductrice causée par la corrosion Mais ce procédé ne peut pas être utilisé pour mesurer précisément la profondeur de corrosion ou pour estimer la diminution de l'épaisseur du matériau de moins de 10 pour cent. Les éléments suivants sont utilisés pour effectuer cette inspection. Détecteur de défauts à courants de Foucault avec affichage du plan d'impédance et contrôle de fréquence entre 3khz et 50khz.[20]

III.4 Origine des défauts :

III.4.1. Défaut d'origine mécanique

Les pièces à assembler sont sujettes à des défauts de forme qui peuvent être importants. C'est le cas des pièces métalliques mises en forme par formage (pliage, emboutissage ...) et des pièces composites notamment lorsqu'elles sont polymérisées à chaud. Lorsque les pièces sont mises en position pour l'assemblage, les surfaces de recouvrement ne sont alors pas confondues. L'objectif est d'assembler les pièces tout en maîtrisant la forme et la position relative finale ainsi que l'état de contrainte résiduel éventuellement introduit. Deux solutions sont envisageables : soit on conforme les pièces lors de l'assemblage, soit on réalise un calage liquide (mastique ou résine) ou solide (usinage d'une pièce à la dimension du jeu engendré par les défauts de forme). [21]

La première solution génère un état de contrainte résiduel dans les pièces. Le choix entre ces deux solutions est essentiellement piloté par la raideur des pièces dans la direction de conformation. Si la raideur d'une des deux pièces est faible, la précontrainte sera faible et donc sans conséquence. Si les deux pièces sont rigides, les contraintes résiduelles seront importantes. Par ailleurs, sans outillage dédié, la conformation des pièces est réalisée au moment de la pose des fixations, engendrant une incertitude sur la précharge effective installée (Dols et al., 2015). Cette problématique sera abordée dans la section suivante. La conformation des pièces peut aussi être réalisée par des outillages dédiés réglables afin d'ajuster la position et la déformation de la pièce en fonction des mesures réalisées sur la chaîne d'assemblage (Breteau, 2009). Concernant le calage, il engendre des pertes de productivité importantes qu'il soit liquide (préparation de surface, dépose, nettoyage, nécessité d'attendre la prise) ou solide (mesure des jeux, usinage au cas par cas, multiplication des manipulations de pièces). Il est donc réservé aux petites séries et aux produits à forte valeur ajoutée (lanceurs spatiaux, avions de chasse). De manière assez similaire au point précédent, la problématique réside dans la formalisation de l'interaction entre la gamme d'assemblage retenue, les défauts de forme des pièces, la rigidité des pièces,

la forme et la position relative finale des pièces et la tenue mécanique globale induite par l'état de contrainte résiduel post-assemblage.[22][23]

III.4.2 Défaut d'origine thermique

Les matériaux composites sont sujets à des déformations d'origines thermique et hydrique. Ces déformations ont des effets à l'échelle des fibres, des plis et du stratifié. Un composite stratifié à fibre de carbone aura par exemple un coefficient de dilatation thermique apparent faible (inférieur à ceux des métaux) dans les directions où il est renforcé (dans le plan) et élevé dans la direction hors-plan (supérieur à ceux des métaux). Ces phénomènes peuvent avoir deux conséquences. La première est la génération de désalignements entre les alésages de matériaux dissimilaires (composite et alliage d'aluminium par exemple) si les perçages sont réalisés à une température ou un degré d'hydrométrie différent de celui du montage des fixations. La seconde est la création de contraintes d'origine thermique dans les pièces dès que la température de service sera différente de celle d'assemblage. On observera notamment une perte de précharge si la température de service est plus faible que celle d'assemblage. Si les conditions environnementales ne sont pas contrôlées lors de l'assemblage, ces phénomènes génèrent des variabilités supplémentaires sur le comportement mécanique. Ces phénomènes peuvent toutefois se modéliser assez facilement à condition de connaître les conditions environnementales dans lesquelles sont réalisées les opérations d'assemblage. Ainsi, à titre d'exemple, l'assemblage des voilures du Rafale, constituées de pièces en carbone époxy et en métal, sont assemblées dans une salle où la température et l'hydrométrie sont contrôlées. Ces éléments mettent en évidence les interactions entre les procédés de mise en œuvre (fabrication des pièces et assemblage) et le comportement en service des structures. Les paramètres « procédé » influants sont nombreux et les interactions fortement couplées. Le manque de formalisation de l'interaction entre les défauts et les variabilités de mise en œuvre d'un côté et la tenue mécanique globale de l'autre conduit à mettre en place des procédures de fabrication conservatives. Pourtant, le choix des méthodes de fabrication et d'assemblage et le tolérancement des paramètres qui les définissent conditionnent les coûts et les délais et donc la productivité industrielle. La complexité du problème explique en grande partie ce manque de formalisation. La section 1.5 vise à identifier les verrous technologiques et scientifiques qui une fois levés permettraient de mettre en place des démarches globales répondant à la fois aux objectifs de conception et d'industrialisation,[22][23].

III.5. Présentation des étapes de simulation sous COMSOL

Une simulation électromagnétique sous COMSOL-Multiphysics se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. La simulation se décompose ainsi en trois étapes principales: le prétraitement, le calcul et le post-traitement. L'étape de prétraitement inclut l'implantation du modèle géométrique et affectation des propriétés physiques des différentes parties du travail, la détermination des conditions aux limites et la discrétisation du domaine sur un maillage. Lorsque le problème est complètement défini, l'étape du calcul est consacrée à la résolution numérique en utilisant les différents solveurs proposés par COMSOL. Enfin, le post-traitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement pour exploitation (Excel, Matlab...). [25]

III.5.1 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5

L'interface de COMSOL peut être séparée en quatre parties. A gauche, on retrouve le Model où il est possible de définir des variables et d'autres paramètres du problème (Parameters), le modèle (Model) où se retrouvent la géométrie (Geometry), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles physiques s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh). Le modèle comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur (Study) et les options d'affichage et de post traitement des données (Results). La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans le modèle: par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans Geometry. C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. En haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer l'agrandissement de l'affichage (zoomer), l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc... Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières.

de cette fenêtre. Finalement, au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, les progressions des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée. Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 5.5 sont présentés sur la figure III.1, [26]

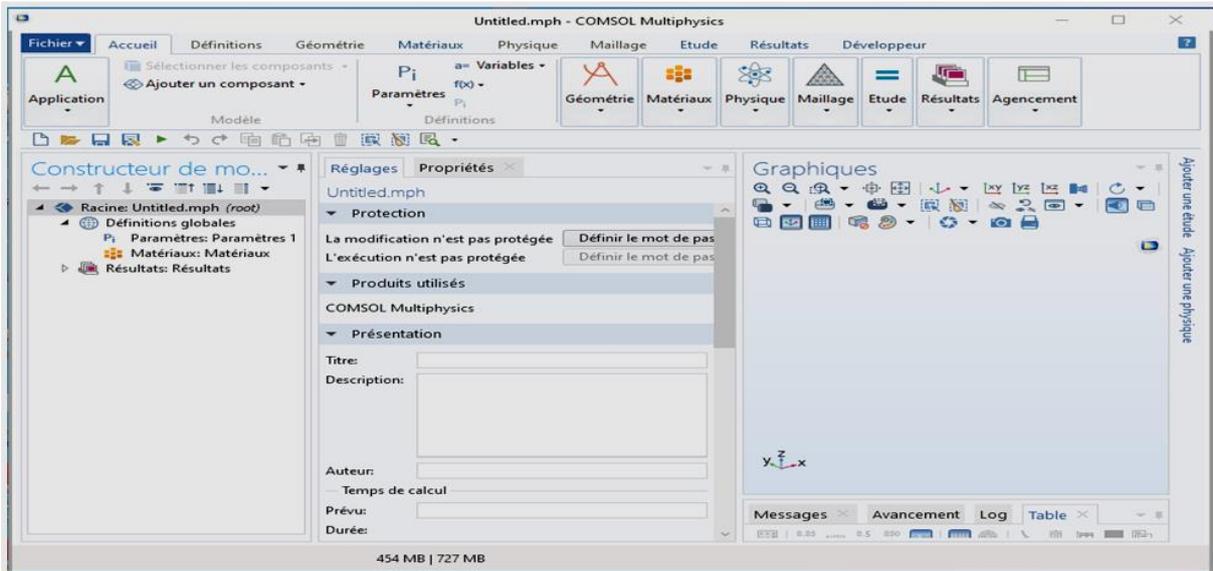


Figure III.2 : Interface utilisateur de COMSOL 5.5

III.5.2 Création du modèle de simulation

Les étapes de création et simulation d'un modèle sous COMSOL-Multiphysics sont :

- choix du modèle spatial en 2D, 3D,
- choix du domaine physique de travail (domaine magnétique (mf) sous AC/DC),
- choix du domaine d'étude, le domaine fréquentiel,
- implantation de la géométrie du modèle,
- affectation des propriétés physiques de chaque domaine,
- maillage des différentes parties du modèle,
- simulation et exploitation des résultats.

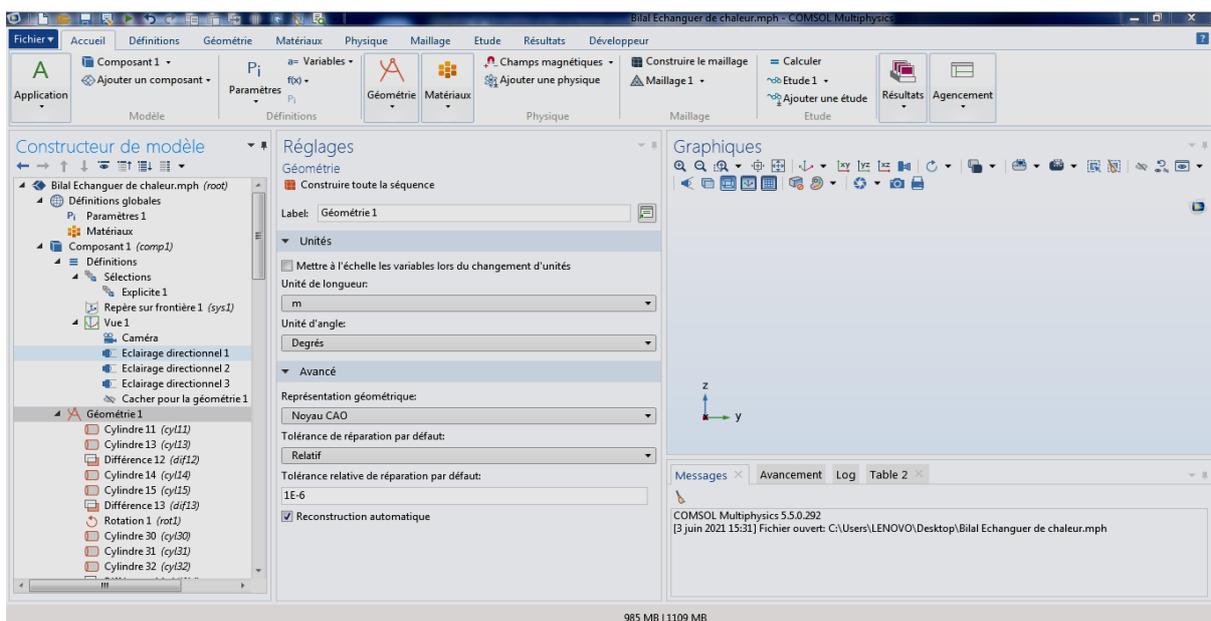


Figure III. 3 : Création du modèle géométrique.

III.6. L'implémentation sous COMSOL Multiphysics et simulation

III.6.1 Modèle développé

Le domaine d'étude ainsi que la vue 3D du modèle développé sont donnés par les figures (III.2-3), il est constitué de 3 domaines :

- l'air
- la plaque
- la bobine3

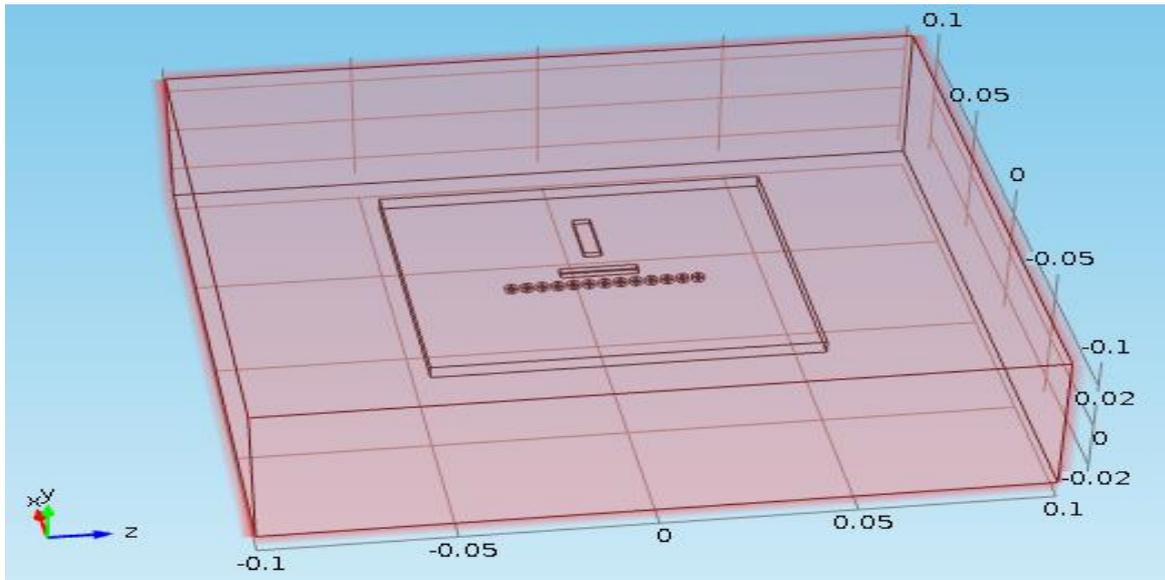


Figure III. 4 : Dessin de la géométrie tridimensionnelle du domaine d'étude

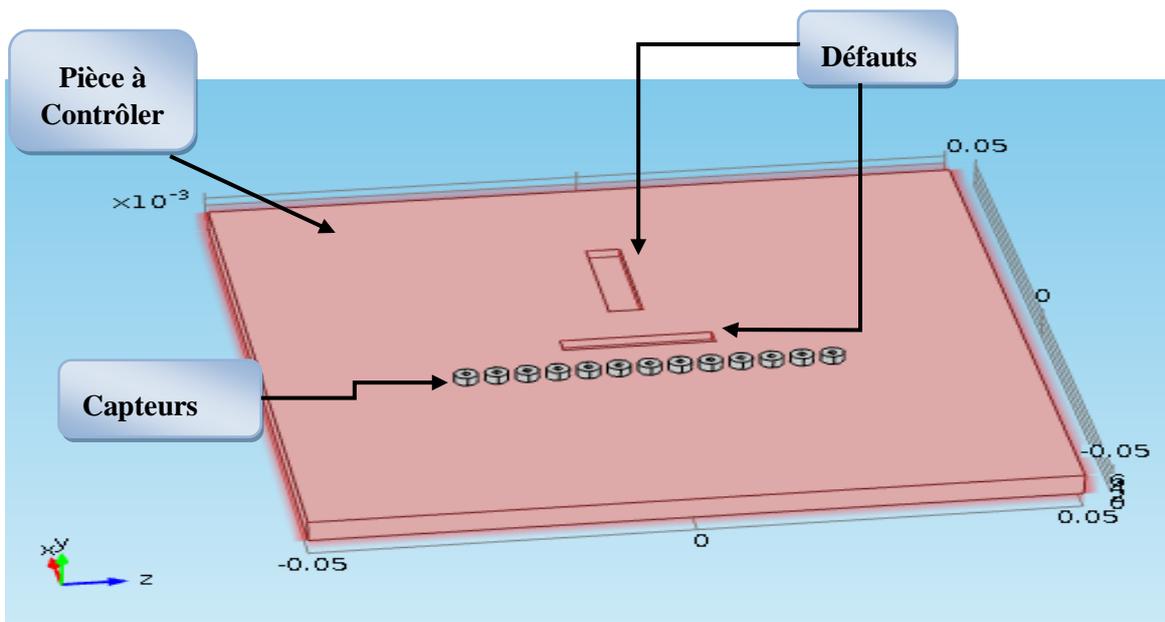


Figure III. 5: Système de détection de défaut dans les bacs en 3D.

III.6.1.2. Maillage

Chaque volume constituant le domaine d'étude doit être discrétisé avec des éléments géométriques qui forment un maillage sur les nœuds desquels les grandeurs physiques vont être déterminées numériquement. Plusieurs types d'éléments de discrétisation (tétraédrique, hexaédrique ou prisme,) sont proposées par COMSOL-Multiphysics. Le type d'élément utilisé conditionne en partie le nombre de degrés de liberté nécessaire au final pour la résolution numérique du problème. Dans notre cas, nous avons adopté un maillage avec des éléments tétraédriques car ce choix permet de mailler automatiquement des géométries différentes.

Le choix de la taille des éléments conditionne fortement la précision de la solution numérique obtenue. Afin de décrire correctement les évolutions des grandeurs d'intérêt, il est nécessaire d'adapter la taille des mailles au problème que nous avons à résoudre. La difficulté de cette étape consiste à harmoniser les maillages entre les différents domaines afin d'optimiser le temps de calcul et la précision de la résolution. Comme la montre (figure III.5), le maillage est très affiné au niveau de la plaque (Figure III.6), tandis qu'il est grossier dans le reste du domaine d'étude.

La géométrie finalisée à 15 domaines, 152 frontières, 360 arêtes et 240 points.

Le maillage complet consiste en 283806 éléments de domaine, 21510 éléments de frontière et 2065 éléments d'arête.

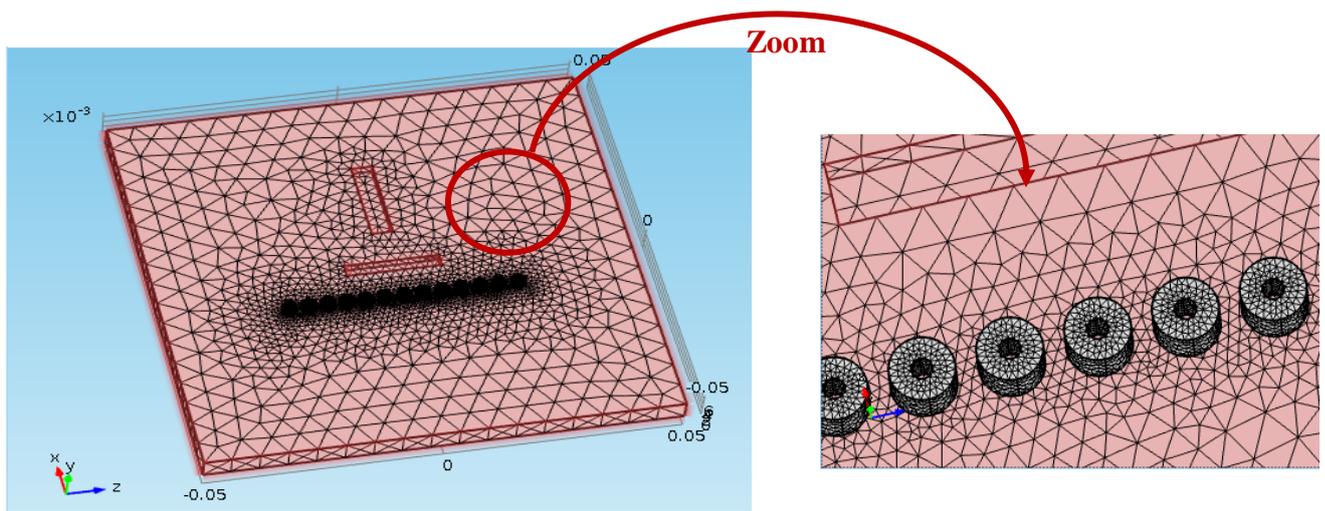


Figure III.6 : Maillage

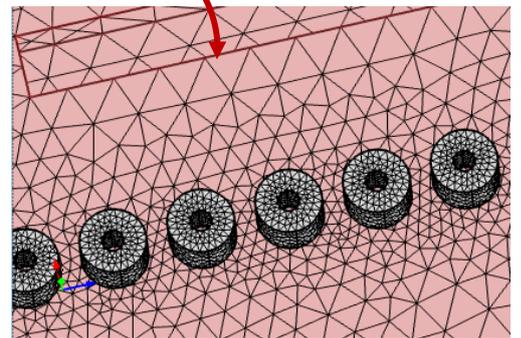
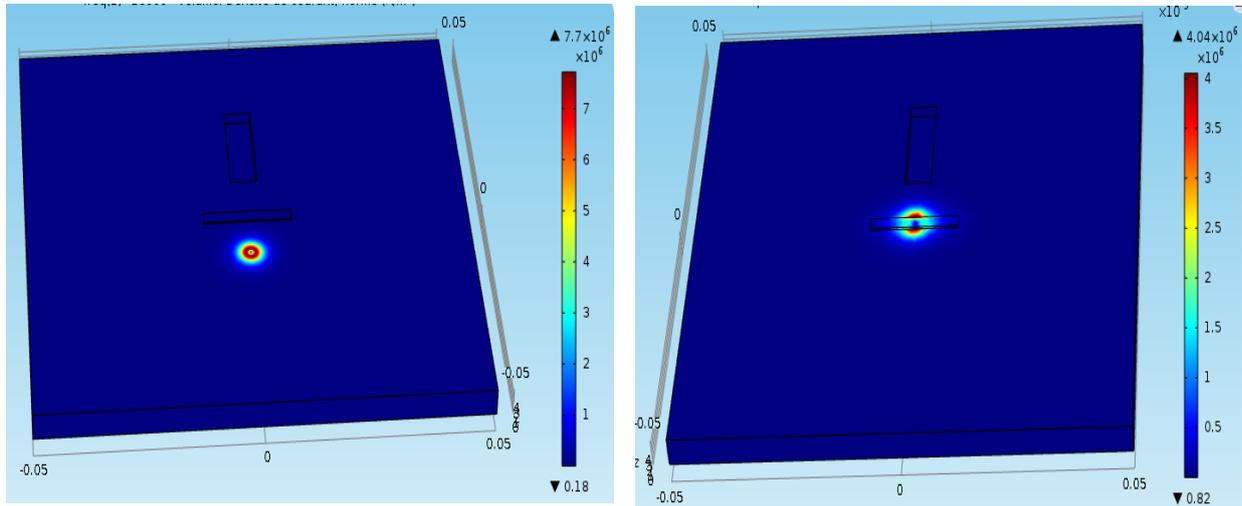


Figure III.7 : Zoom du Maillage

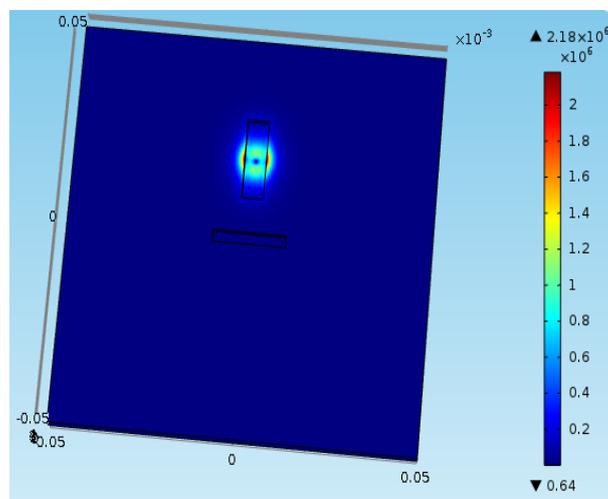
III.7. Validation du modèle proposé par les résultats des courants induit

La vérification du modèle de simulation proposé se fait, en premier pour une seule bobine, en comparant les résultats obtenus des courants induit dans la plaque d'aluminium pour différentes positions du capteur, loin du premier défaut, puis près du défaut1 et enfin sur le défaut2 plus large que le premier (Figure III. 6).



a. Position 1 . Loin des défauts

b. Position 2 . Sur le défaut1 (moins large)



b. Position 3 . Sur le défaut2 (plus large)

Figure III. 8 : Variation des courants induits en fonction de la position de la bobine

On peut constater que le maximum des courants induits diminue lors de la présence du défaut, il passe de $J_{ind} = 7,7 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ sans défaut à $J_{ind2} = 4,04 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ avec défaut1 dont la largeur est inférieure à la largeur du défaut2, et il est de $J_{ind3} = 2,18 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ pour la position 3, c'est dire le défaut2 plus large. Ces résultats sont justifiés par l'existence du défaut qui provoque l'augmentation de la trajectoire d'où diminution de l'intensité de ces derniers. On peut conclure que le modèle proposé est très acceptable ce qui permet d'utiliser ce dernier pour l'obtention des imageries voulues d'un système multiéléments et multiplexés.

III.8. Paramètres influents sur la variation de la résistance

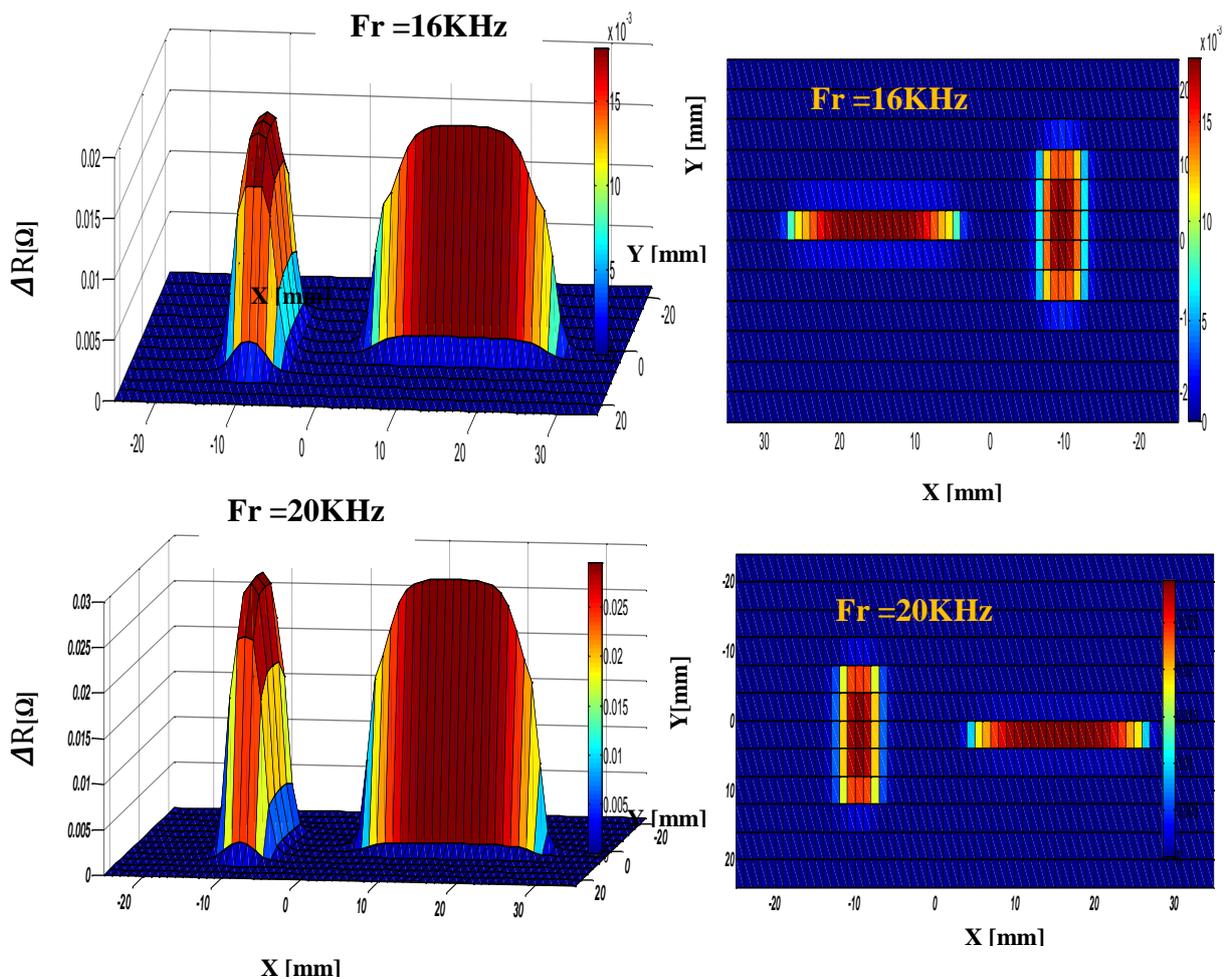
Les paramètres influents sur la variation de la partie réelle de l'impédance capteur-pièce sont :

- la fréquence.
- le pas de déplacement.
- le lift-off.

III.8.1. Effet de la fréquence sur la variation de la résistance

La figure ci-dessous montre l'effet de la variation de la fréquence (16KHz, 20KHz, 60KHz), sur des images en 3D et 2D des variations de résistance. Les valeurs des autres paramètres sont données comme suit :

- Pas = 1mm.
- Lift-off = 0.5mm.



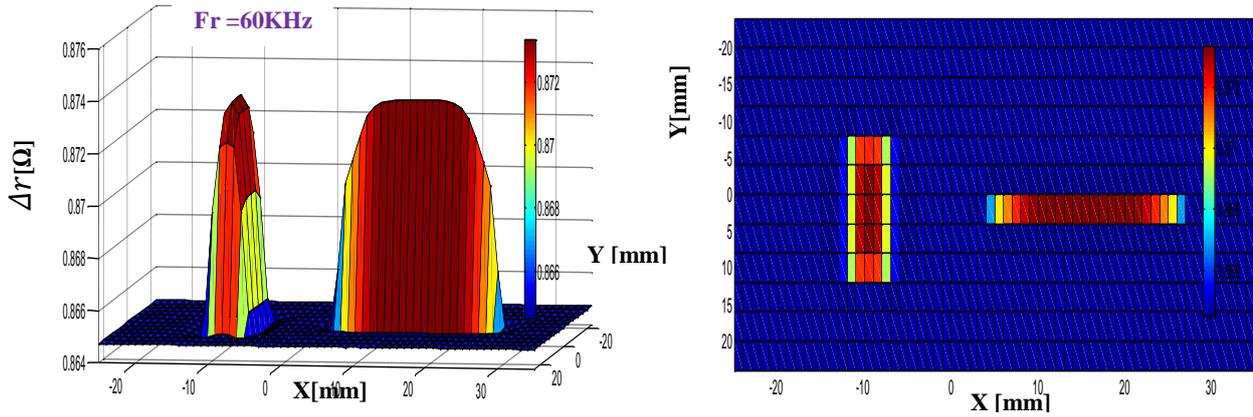


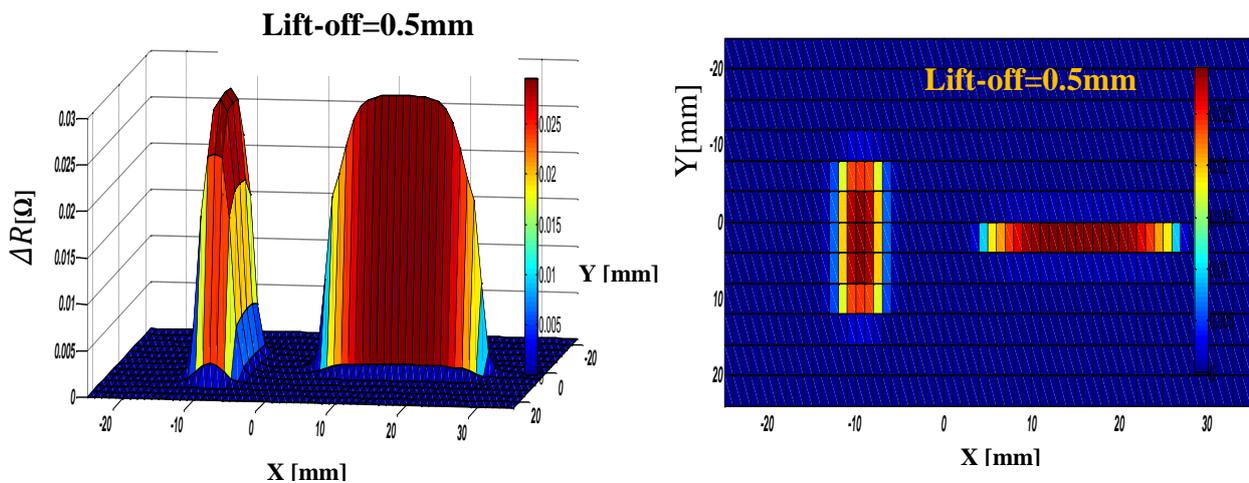
Figure III.9 : Image 3D et 2D de la variation de résistance pour différentes fréquences (lift-off=0.5 et pas=1mm)

| La fréquence | 1 er cas | 2eme cas | 3eme cas |
|------------------|----------|----------|----------|
| ΔR_{max} | 0.02 | 0.03 | 0.012 |

La figure (III.7) montre des images en 3D et 2D de l'effet de la variation de fréquence sur les valeurs $\Delta r[\Omega]$ avec les paramètres pas et Lift-off fixes, on remarque que plus la fréquence est élevée, plus la qualité, la lisibilité et courants de Foucault est meilleure.

III.8.2. Effet de la variation de la Lift-off sur la variation de résistance

La figure (III.8) montre l'effet de la variation de Lift-off sur des images en 3D et 2D des variations de résistance pour trois valeurs de ce dernier (Lift-off : 0.5, 1.0 et 1.5 mm). Par contre les valeurs du pas et de la fréquence sont fixes : Pas = 1mm et fréquence= 60KHz.



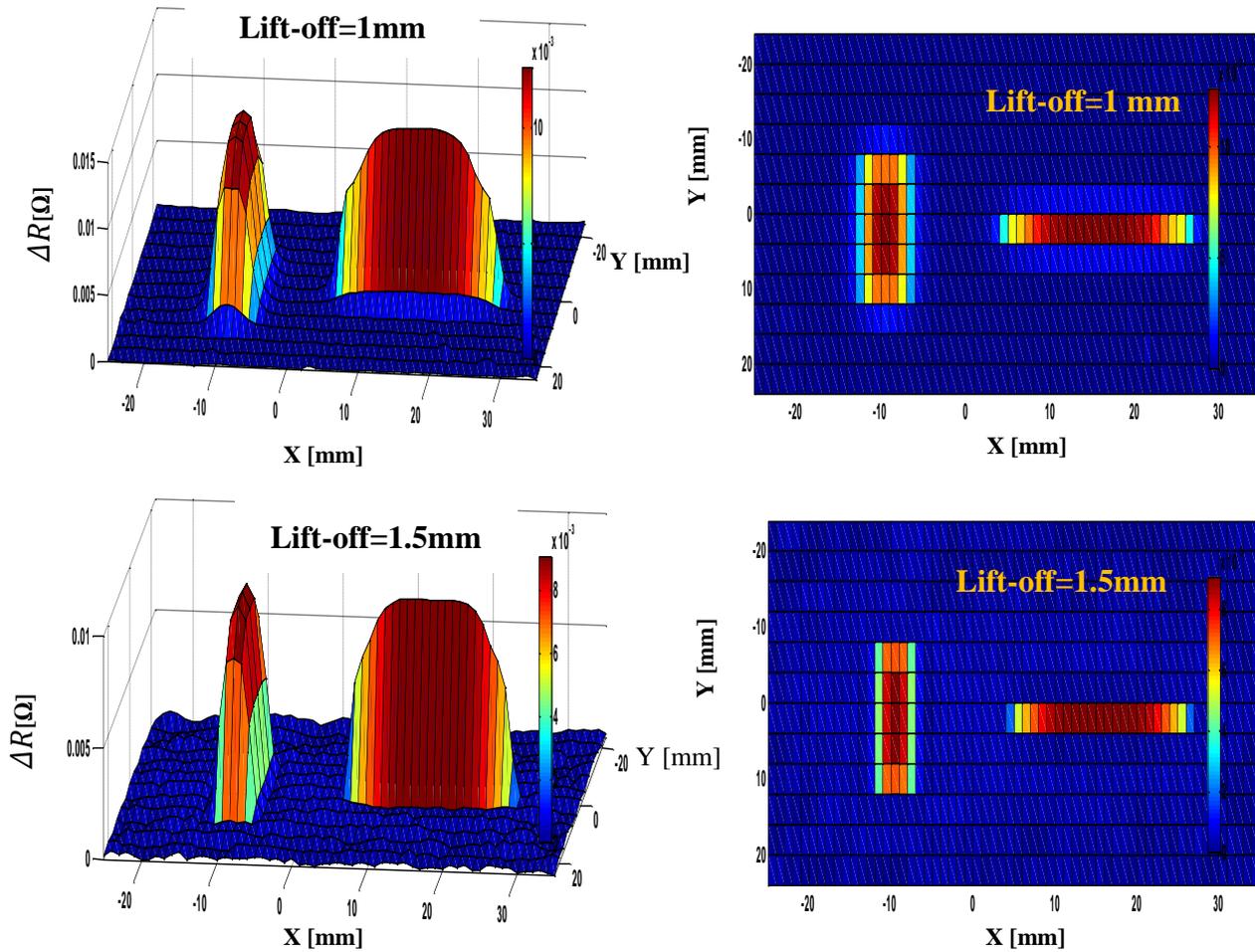


Figure III.10 : Image 3D et 2D de la variation résistance ,pour différents fréquences (lift-off=0.5 et pas=1mm

| Lift-off | 1 er cas | 2eme cas | 3eme cas |
|------------------|----------|----------|----------|
| ΔR_{max} | 0.03 | 0.015 | 0.01 |

D’après les résultats de la figure (III.8) les valeurs ΔR sont inversement proportionnelles à variation de lift-off , ce qui est juste , car plus le capteur est proche de la plaque, plus la détection visible, par contre , si l’on s’éloigne de cette dernière la sensibilité de la détection sera très faible, voir nulle si le lift-off est trop important.

III.8.3. Effet de la variation de pas de déplacement

L’effet de la variation du pas est donné par la Figure (III.9) .

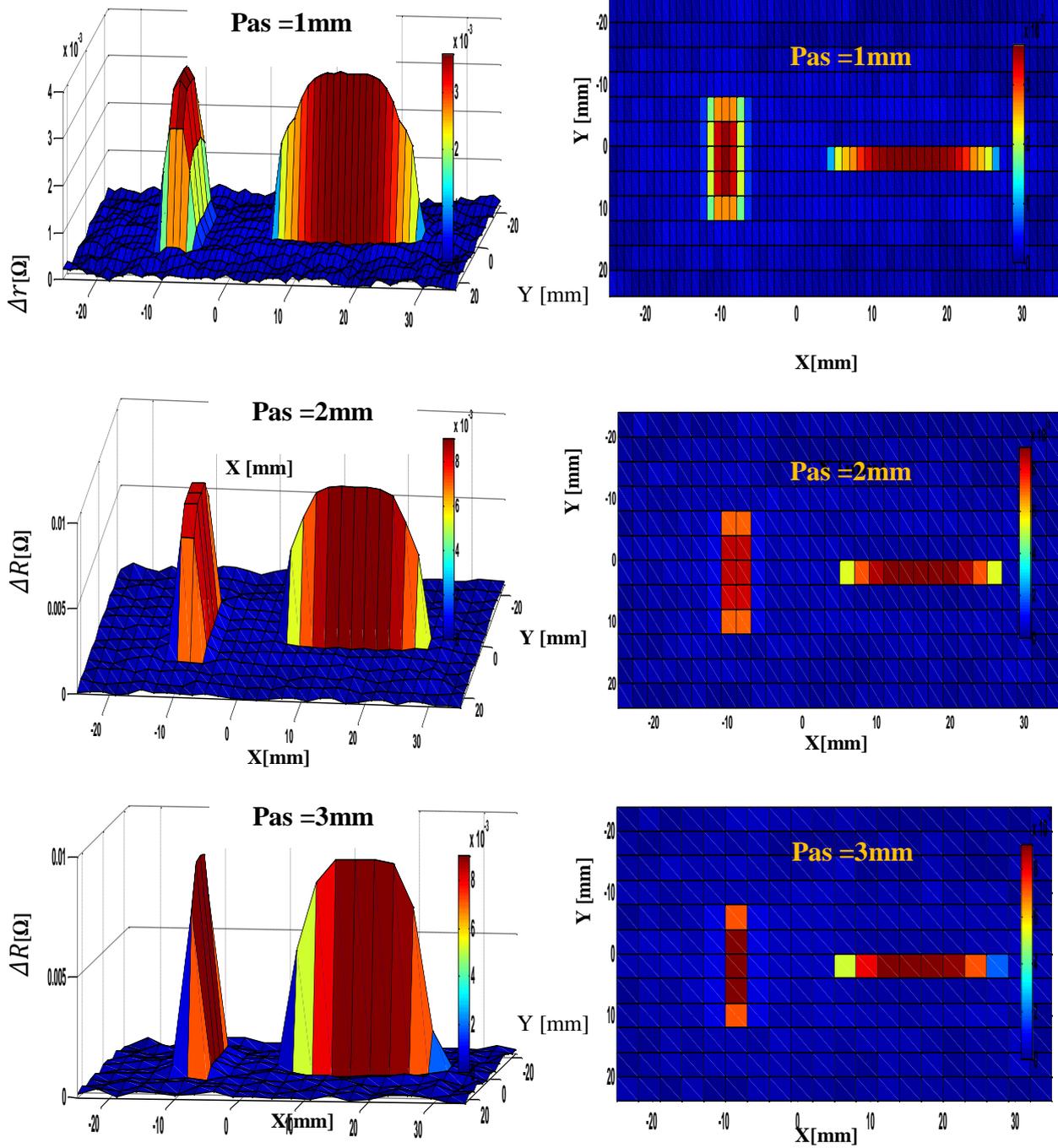


Figure III. 11 : Image 3D et 2D de la variation de résistance pour différent Pas. Lift-off = 1mm et la fréquence=60KHz

| Le pas | 1 er cas | 2eme cas | 3eme cas |
|------------------|----------|----------|----------|
| ΔR_{max} | 0.04 | 0.01 | 0.04 |

On remarque que plus le pas est réduit, plus la qualité, la lisibilité et courants de Foucault est meilleure.

III.9. Conclusion :

Après avoir décrit les différents matériaux utilisés en aéronautique, les défauts qui apparaissent, leurs origines, nous avons exploité le modèle pour étudier l'effet de certain paramètre électrique, et mécanique sur l'imagerie des variations de la résistance du capteur.

En effet les résultats sont montré que :

- Au fur et à mesure que la fréquence augmente, les signaux des défauts sont importants car le défaut est surfacique
- D'autre part, lorsque le pas de déplacement est réduit le défaut apparent sur l'image avec précision
- De même, lorsque le lift-off est réduit le capteur devient plus sensible et l'amplitude de signal est maximale.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif l'étude et l'analyse des performances des systèmes de CND par CF par imagerie issue des capteurs multiéléments. En premier lieu, nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif (CND), 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 ultrasonores, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie, et enfin le procédé de la technique des courants de Foucault. Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients.

Quant à la deuxième partie, nous avons rappelés la modélisation du CND-CF par la méthode des éléments finis (MEF).

Dans le dernier chapitre, nous avons implémenté le modèle du CND-CF a capteur multiplexe d'une plaque métallique sous COMSOL-Multiphysics. Ensuite, nous avons effectué une série de simulation à fin tester la sensibilité et les performances du capteur proposé. En effet, les résultats obtenus ont montré la possibilité de détecter le défaut, de reconstituer sa forme, sa taille et son orientation avec une précision qui dépend de plusieurs paramètres tels que la fréquence, le pas de déplacement ainsi que le Lift-off. Car:

- Le défaut surfacique est détecté avec une meilleure précision pour les hautes fréquences.
- Au fur et à mesure que le pas de déplacement est réduit la résolution de l'image devient élevée.
- Toute en prenant en compte les conditions d'un test réel le Lift-off doit être réduit afin d'augmenter la sensibilité des capteurs.

Comme perspectives de ce travail, on peut citer :

- L'utilisation de défauts de formes aléatoires,
- Etudier l'effet des paramètres géométriques du capteur,
- Utilisation de CND-CF pulsé pour la détection des défauts interne,
- Elaborer un modèle inverse permettant d'estimer les caractéristiques du défaut en connaissant les grandeurs mesurables,
- Réalisation d'un banc d'essai pratique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Bilal Hannouf, Ammar Zeddou, " Utilisation des techniques du soft computing dans un procédé de contrôle non destructif " , mémoire de mastère, Université de Jijel, Juin 2018.
- [2] I. Dufour, M. Busawon, D. Premel, "General analysis of inductive sensor based systems ". France : J, phy. III., 1994..
- [3] A. Benhalima Et A. Saoudi, " Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques), " Mémoire de master, Université de M'sila, 2018
- [4] A. Abdou, " Contrôle non Destructif (CND) , Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif à Courant de Foucault, " , Thèse de doctorat, Université de Batna 2 , Batna, 2018.
- [5] Adib, Safer Omar, " Etude et Modélisation de Capteur à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND) ", Mémoire master en génie électrique Université de M'sila , 2014.
- [6] Helifa, Bachir, " Contribution à La Simulation du Cnd par Courants de Foucault en vue de la Caractérisation des Fissures Debouchantes. ", . Thèse de Doctorat, université de NANTES école doctorale, Nantes 2012.
- [7] Salma, CHRIF, " modélisation électromagnétique de systèmes multicapteurs-pièce à défauts complexe pour le CND par CF ", Mémoire de magister, université de TIZI-OUZOU :, 2011
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), Eddy Current Testing at Level 2: Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques, 2011.
- [9] BENSALAH. Oussama, " Contrôle non destructif par courants de Foucault, " Mémoire de Master, Université de Msila, 2012
- [10] MOHAMED, KHEBBAB, " Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) " , Mémoire de Master, CONSTANTINE : , 2007.
- [11] BOUCHALA, TAREK, " Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault ", Mémoire de Magister, Université de Batna , 2008.

- [12] ZAIDI, Houda, " Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples ", Thèse de Doctorat, Université paris-sud, 2012.
- [13] Yahya, CHOUA, " Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault ", Thèse de Doctorat Université paris-sud11, 2009.
- [14] Salvatore Baglio, Senior Member, IEEE, Salvatore Castorina, and Nicolò Savalli, " Integrated Inductive Sensors for the Detection ", IEEE SENSORS JOURNAL Barcelona:, Volume. 5, Issue 3. , 2005.
- [15] HOANG, Dung, " Détermination simultanée de la résistivité et l'épaisseur des tôles métalliques et d'alliages non magnétiques par méthode électromagnétique sans contact ", Thèse de Doctorat, Ecole centrale de LYON :, 2002.
- [16] Georges Asch, " Les capteurs en instrumentation industrielle ", Paris : Maison d'édition DUNOD, 1982.
- [17] DUMONT-FILLON, Jacques, " Contrôle non destructif (CND) " , Techniques de l'ingénieur (R 1400–1), 1996..
- [18] WANIN, Maurice, " Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 2). Techniques de l'ingénieur (M 4 131) , 2002.
- [19] M'hemed Rachek, Mouloud Féliachi, " modélisation par Eléments Finis Tridimensionnelle des Phénomènes Magnétodynamiques Harmonique avec la Formulation AV-V " , 1st International Symposium on Electromagnetism, Satellites and Cryptography, ISESC05, Jijel, 2005.
- [20] Abdelhak Abdou, Omar adib safer, Tarik Bouchala, Abdelmalik Bendaikha, Bachir Abdelhadi, Amor guettafi, Azzedine benoudjit, " An Eddy Current Nondestructive Method for Crack Detection in Multilayer Riveted Structures " , Instrumentation Mesure Métrologie Vol.18, No.5, October, 2019
- [21] Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala, Bachir Abdelhadi, Amor Guettafi, Azzedine Benoudjit, " Nondestructive Eddy Current Measurement of Coating Thickness of Aeronautical Construction Materials" , Instrumentation Mesure Métrologie". Vol. 18, No. 5, October, 2019, pp. 451-457

- [22] A Abdou, T Bouchala, N Benhadda, B Abdelhadi, A Benoudjit, " Influence of Conductive Pollution on Eddy Current Sensor Signals" , Russian Journal of Nondestructive Testing , Springer, 2018.
- [23] Anouaressadate Aouf , Tarik Bouchala , Abdelhak Abdou, Bachir Abdelhadi , "Eddy Current Probe Configuration for Full Rail Top Surface Inspection " , Instrumentation Mesure Métrologie, 2021.
- [24] Abbassi, A., Bouchala, T., Abdou, A., & Abdelhadi, B, " Eddy current characterization of 3D crack by analyzing probe signal and using a fast algorithm search ", Russian Journal of Nondestructive Testing, 2020.
- [25] KHEBAL, DALI, "Contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques", Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf. M'sila, 2019.
- [26] BAKAI, LAYACHI, " contrôle Non Destructif par Courants de Foucault. (Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Muni d'un Alésage) ", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.

Résumé

La technologie d'imagerie à courants de Foucault dans le domaine de contrôle non destructif (CND) est basée sur des capteurs multiéléments constitués de plusieurs sondes à courants de Foucault placées côte à côte pour l'acquisition de données. L'assemblage des sondes est possible grâce au multiplexage, qui évite l'inductance mutuelle entre les sondes individuelles. Cette technique conduit à un gain important de temps lors du contrôle de pièces conductrice avec un nombre de balayage très réduit.

Nous avons utilisé cette méthode pour la caractérisation des défauts de type arrachement de matière ou de corrosion qui peuvent survenir sur des pièces utilisées en aéronautiques.

Mots clés : *Contrôle non destructif, imagerie à courants de Foucault, capteur multiéléments, multiplexage*

Abstract

Eddy current imaging technology in the field of non-destructive testing (NDT) is based on phased array sensors consisting of multiple eddy current probes placed side by side for data acquisition. The assembly of the probes is possible through multiplexing, which avoids mutual inductance between the individual probes. This technique leads to a significant saving of time during the inspection of conductive parts with a very small number of scans. We have used this method for the characterization of material tearing or corrosion type defects which can occur on parts used in aeronautics.

Keywords: *Non-destructive testing, eddy current imaging, phased array sensor, multiplexing.*

ملخص:

تعتمد تقنية التصوير بالتيار فوكو في مجال الاختبار غير المدمر على مجموعة من ملتقطات فوكو موضوعة جنباً إلى جنب للحصول على البيانات.

من الممكن بفضل التغذية الموجهة للوشائع ، ان نتجنب الحث المتبادل بين الملتقطات الفردية . تؤدي هذه التقنية إلى توفير كبير للوقت عند فحص الأجزاء الناقلة للتيار و ذلك لان المساحة المفحوصة تعتبر نسبياً كبيرة خلال تنقل واحد فقط . لقد استخدمنا هذه الطريقة لمراقبة الأجزاء المستخدمة في صناعة الطيران عند حدوث خلل من الصنف سحب المواد أو التأكسد الذي يمكن أن يحدث على الاختبار ،

الكلمات الدالة: *تصوير التيار فوكو مصفوفة من ملتقطات فوكو ، التغذية الموجهة للوشائع*