

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département D'Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par :

**Mlle. OUAMOUR ASMA**

**Mlle. ZAMOUM AMINA**

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

---

## **Application de la méthode des éléments finis pour la simulation 3D d'un dispositif de détection de défauts dans les matériaux conducteurs**

---

**Soutenu le 17 juillet 2019 devant le jury :**

Mme. MZIOU	Nassima	Professeur	UMBB	Président
Mr. HAMEL	Meziane	MCB	UMBB	Encadreur
Mr. ZAOUIA	Mustapha	MCA	UMMTO	Examineur
Mlle. LARABI	Zina	MAA	UMBB	Examineur



# **Remerciements**

## Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Département d'Ingénierie des Systèmes Electriques (ISE) de l'université M'Hamed BOUGARA de Boumerdès (UMBB).

Nous tenons en tout premier lieu à remercier notre promoteur, Monsieur Meziane HAMEL, MCB à l'UMBB, d'avoir accepté l'encadrement de ce travail. Nous lui exprimons notre profonde gratitude et nous lui sommes très reconnaissantes de nous avoir permis de profiter de ses connaissances et encadrer avec une très bonne dose de patience. Nous le remercions très sincèrement de tout notre cœur.

Nous tenons à remercier et à témoigner toute notre reconnaissance au personnel de l'entreprise E.R.M.A, pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'il nous a fait vivre durant nos deux mois de stage de fin d'études au sein de l'entreprise.

Nous remercions particulièrement Madame Kenza BACHA BACHIR, Ingénieur à l'E.R.M.A, notre tutrice de stage pour sa patience, sa compréhension et sa disponibilité pour répondre à toutes nos questions. Nous la remercions également pour le temps qu'elle nous a consacré tout au long de cette période.

Nous tenons aussi à remercier Monsieur Hilal KESRI, Chef de formation à l'E.R.M.A, pour nous avoir bien accueillis et la confiance qu'il nous a accordé dès notre arrivée à l'E.R.M.A. Sans oublier Monsieur Abd Almounaim HAMDANI, Ingénieur à l'E.R.M.A, pour ses qualités humaines et son aide précieuse.

Nous remercions Madame Nassima MZIOU, Professeur à l'UMBB, de nous avoir fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.

Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur Mustapha ZAOUIA, MCA à l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, pour avoir fait le déplacement et accepté de participer à ce jury.

Nous remercions également Mademoiselle Zina LARABI, MAA à l'UMBB, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## **Dédicaces**

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents qui ont sacrifié leurs vies pour que je réussisse, qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir que Dieu vous protège et vous garde très chers parents.

À mes frères MOHAMED AMINE, ABDERRAHMANE, de m'avoir encouragé, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès.

À tous mes ami(e)s

À tout le groupe MME

**ASMA**

## **Dédicaces**

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents qui ont sacrifié leurs vies pour que je réussisse, qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir que Dieu vous protège et vous garde très chers parents.

À ma sœur SERINE et mes frères ABDELLAH, MAHDI de m'avoir encouragé, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès.

À tous mes ami(e)s

À tout le groupe MME

**AMINA**

# Dédicaces

# Sommaire

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

## Chapitre I : Présentation de l'entreprise E.R.MA

I.1. Présentation générale de l'entreprise.....	3
I.1.1. Mission de l'entreprise.....	4
I.1.2. Les tâches de l'E.R.M.A.....	4
I.1.3. Fonctionnement de l'entreprise.....	4
I.1.4. Organisation de L'E.R.M.A.....	5
I.2. Description générale de l'hélicoptère MI-24.....	7
I.3. Description de la poutre de dérive.....	8
I.4. La transmission.....	9
I.5. Type de défauts.....	10
I.6. Le contrôle non destructif par courants de Foucault.....	11
I.7. Règles de sécurités.....	11
I.8. Conclusion.....	11

## Chapitre II : Généralités sur le CND

II.1. Introduction.....	12
II.2. Historique.....	12
II.3. Le contrôle non destructif.....	12
II.3.1. Principe.....	12
II.3.2. Les défauts.....	13
II.3.3. Les techniques du CND.....	14
II.3.3.1. Le contrôle visuel.....	14
II.3.3.2. Le contrôle par ressuage.....	15
II.3.3.3. Le contrôle par magnétoscopie.....	15
II.3.3.4. Le contrôle par radiographie, RX et $\gamma$ .....	16
II.3.3.5. Le contrôle par ultrason.....	17
II.4. Le contrôle par courant de Foucault.....	18
II.4.1. Principe de fonctionnement.....	18
II.4.2. Profondeur de pénétration / effet de peau.....	19
II.4.3. Signaux d'excitation et exploitation.....	20



II.4.3.1. L'alimentation mono fréquence.....	20
II.4.3.2. L'alimentation multifréquences.....	20
II.4.3.3. L'alimentation par des courants pulsés.....	21
II.4.4. Domaine d'application.....	21
II.4.5. Les capteurs.....	21
II.4.5.1. Types de capteurs.....	22
II.4.5.2. Fonction du capteur.....	23
II.4.5.3. Mode de contrôle.....	24
II.4.6. Impédance normalisée.....	26
II.4.7. Les paramètres perturbateurs.....	27
II.4.7.1. Température.....	27
II.4.7.2. Lift-off.....	27
II.4.8. Avantages et inconvénients du CND-CF.....	27
II.5. Conclusion.....	28

### Chapitre III : Modélisation numérique des structures CND-CF

III.1. Introduction.....	29
III.2. Equations de Maxwell.....	29
III.2.1. Première équation de Maxwell.....	30
III.2.2. Deuxième équation de maxwell.....	30
III.2.3. Troisième équation de Maxwell.....	31
III.2.4. Quatrième équation de Maxwell.....	31
III.3. Hypothèses simplificatrices.....	32
III.4. Relations du milieu.....	33
III.5. Loi d'Ohm.....	33
III.6. Equation de continuité.....	34
III.6.1. Modèle magnétodynamique.....	34
III.6.2. Formulations magnétodynamiques.....	34
III.6.3. Formulation en termes de potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$ .....	34
III.6.4. Formulation $\vec{T} - \psi$ .....	35
III.7. Résolution des équations aux dérivées partielles (EDP).....	36
III.7.1. Résolution analytique.....	36

III.7.2. Méthodes numériques.....	37
III.7.2.1. Méthode des différences finies (MDF).....	37
III.7.2.2. Méthode des éléments finis (MEF).....	37
III.7.2.3. Discrétisation du domaine.....	38
III.8. Approximation par la MEF.....	40
III.9. Calcul de la variation d'impédance.....	41
III.9.1. Impédance à travers les énergies électromagnétiques.....	41
III.10. Conclusion.....	42

## Chapitre IV : Application et résultats

IV.1. Introduction.....	43
IV.2. Description de la pièce contrôlée.....	43
Partie I : Simulation par la méthode des éléments finis.....	44
IV.I.1. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell.....	44
IV.I.2. Description de la configuration simulée.....	46
IV.I.3. Défaut radial.....	48
IV.I.3.1. Variation de la profondeur de défaut.....	48
IV.I.3.2. Variation de la longueur.....	49
IV.I.3.3. Variation de la largeur.....	49
IV.I.3.4. Variation de lift-off.....	50
IV.I.3.5. Variation de la fréquence.....	50
IV.I.3.6. Défaut enfoui.....	51
IV.I.3.7. Densité des courants induits.....	52
IV.I.4. Défaut transversal.....	54
IV.I.5. Comparaison entre défaut radial et le défaut transversal.....	58
Partie II : Partie expérimentale.....	59
IV.II.1. Système expérimental.....	59
IV.II.2. L'appareil de détection de défauts NORTEC 500.....	59
IV.II.3. Sonde à balayage rotatif.....	60
IV.II.4. La sonde pour détection de fissures.....	60
IV.II.5. Etalonnage.....	61
IV.II.6. Résultats de scan avec Nortec 500.....	62

IV.II.7. Conclusion.....63

Conclusion générale.....64

Bibliographie.....65

# Liste des figures

## Liste des figures

Fig.I.1 : Situation de l'entreprise de satellite.....	3
Fig.I.2 : Quelques types des avions de chasse et des hélicoptères.....	4
Fig.I.3 : Organigramme de l'entreprise ERMA.....	6
Fig.I.4 : Hélicoptère MI-24.....	7
Fig.I.5 : Structure de l'hélicoptère MI-24.....	8
Fig.I.6. Poutre de dérive.....	8
Fig.I.7. Transmission de l'hélicoptère.....	9
Fig.II.1 : Contrôle visuel.....	14
Fig.II.2 : Recherche de défaut par ressuage.....	15
Fig.II.3 : Inspection par magnétoscopie.....	16
Fig.II.4 : Contrôle par radiographie.....	16
Fig.II.5 : Contrôle par ultrason des pièces industrielles.....	17
Fig.II.6 : Schéma de principe de contrôle par courants de Foucault.....	18
Fig.II.7. Principe de la détection par courants de Foucault.....	19
Fig.II.8 : Profondeur de pénétration.....	19
Fig.II.9 : Bobine encerclante.....	22
Fig.II.10 : Sonde à courant de Foucault.....	22
Fig.II.11 : Bobine simple avec noyau.....	23
Fig.II.12 : Capteur à double fonction.....	23
Fig.II.13 : Capteur à fonction séparée.....	24
Fig.II.14 : Exemple de mode absolu compensé.....	25
Fig.II.15 : Exemple de capteur différentiel.....	25
Fig.II.16 : (a) Plan d'impédance non-normalisée ; (b) Plan d'impédance normalisée.....	26
Fig.III.1 : Discrétisation des éléments à une dimension.....	38
Fig.III.2 : Discrétisation des éléments triangulaires.....	39
Fig.III.3 : Discrétisation des éléments carrés.....	39
Fig.III.4 : Discrétisation des éléments à trois dimensions.....	40
Fig.IV.1 : Support de la boîte de transmission arrière.....	43
Fig.IV.2 : Fissure longitudinale.....	44
Fig.IV.3 : Déroulement d'une simulation.....	45
Fig.IV.4 : Capteur/pièce sous l'environnement Ansys-Maxwell.....	46

## Liste des figures

Fig.IV.5. Maillage du domaine.....	46
Fig.IV.6 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut.....	48
Fig.IV.7 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs du défaut.....	49
Fig.IV.8 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut.....	49
Fig.IV.9 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents lift-off.....	50
Fig.IV.10 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences d'alimentation du capteur.....	51
Fig.IV.11. Variation de l'impédance pour une profondeur d'enfouissement 0.25 mm en fonction de différentes fréquences .....	51
Fig.IV.12. Variation de l'impédance pour une profondeur d'enfouissement 0.5 mm en fonction de différentes fréquences .....	52
Fig.IV.13 : Densité de courant au début de défaut.....	52
Fig.IV.14 : Densité de courant au milieu de défaut.....	53
Fig.IV.15 : Densité de courant dans la zone saine.....	53
Fig.IV.16 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut.....	54
Fig.IV.17 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs du défaut.....	54
Fig.IV.18 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut.....	55
Fig.IV.19 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents lift-off.....	55
Fig.IV.20 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences d'alimentation du capteur.....	56
Fig.IV.21 : Densité de courant au début de défaut.....	56
Fig.IV.22 : Densité de courant au milieu de défaut.....	57
Fig.IV.23 : Densité de courant dans la zone saine.....	57
Fig.IV.24 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes positions de défaut.....	58
Fig.IV.25 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes positions de défaut.....	58

## Liste des figures

Fig.IV.26: NORTEC 500D (OLYMPUS).....	59
Fig.IV.27 : Sonde à balayage rotatif.....	60
Fig.IV.28 : Sonde pour détection de fissures.....	60
Fig. IV.29: Etalonnage dans la zone saine.....	61
Fig. IV.30 : Etalonnage d'une zone avec défaut.....	61
Fig.IV.31 : Signal dans la zone sans défaut.....	62
Fig.IV.32 : Signal dans la zone de défaut.....	63

# Liste des tableaux



## Liste des tableaux

Tab.I.1. Types de défauts.....	10
Tab.II.1. Tableau des techniques de CND.....	17
Tab.IV.1. Tableau des dimensions.....	47

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'objectif du contrôle non destructif (CND) est de détecter des dégradations ou inhomogénéités dans les matériaux sans les altérer. Le CND est par conséquent un enjeu crucial dans le milieu industriel et notamment lors des opérations de maintenance. Parmi le panel de procédés (optique, électromagnétique, thermique, chimique, ultra-sonores, etc...), ceux basés sur les courants de Foucault (CF) se distinguent dès lors que l'on a affaire à des matériaux électriquement conducteurs. Leur robustesse et leur simplicité de mise en œuvre en font une des méthodes les plus utilisées [1].

Le vieillissement du parc aéronautique impose aux techniques de maintenance des exigences de contrôles en termes de fiabilité et rapidité accrues. Les principaux enjeux sont la détection et la caractérisation, au plus tôt dans le cycle de vie d'un produit, de fissures dans les pièces sensibles. Les pièces les plus souvent concernées sont les structures rivetées de fuselage ou, des pièces d'attache de voilure ou comme dans notre cas la poutre de dérive [2].

Le CND par CF consiste à générer des courants induits par l'intermédiaire d'un capteur du champ électromagnétique dans une pièce conductrice, ces courants doivent nous donner des informations sur les matériaux testés et leur géométrie, il n'est cependant pas possible d'y avoir accès expérimentalement. On passe donc par une grandeur annexe qui est la mesure de l'impédance du capteur [3].

Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier les interactions sonde-pièce et jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances. La modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction sonde-pièce testée et de définir une structure de sonde adaptée à un problème donné. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix de matériaux...) tout en limitant le nombre de prototype à réaliser. Dans le domaine du CND par CF, la modélisation est ainsi devenue, grâce à la performance du matériel informatique, une actrice importante dans la conception de sondes [4].

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

La technique numérique la plus prometteuse pour le calcul du champ est la méthode des éléments finis (MEF). Elle est encore aujourd'hui la méthode la plus utilisée pour résoudre les systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) issus de problèmes de modélisation électromagnétique et physique [5].

L'objectif de ce travail, est de simuler par la MEF 3D, un système de détection de défaut dans les matériaux conducteurs. L'application choisie traite avec la détection des fissures dans la poutre de dérive d'un hélicoptère.

Ce mémoire est ainsi organisé comme suit :

Le premier chapitre est une présentation de l'entreprise et le laboratoire de recherche où nous avons effectué notre stage de fin d'études, en l'occurrence l'entreprise de rénovations des matériels aéronautiques E.R.M.A.

Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les méthodes de CND. Les principales méthodes de CND sont rappelées. Le contrôle basé sur les CF est particulièrement détaillé.

Le troisième chapitre développe la position d'un problème de CND par CF et les équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électriques et magnétiques dans le domaine d'étude. Une structure mathématique regroupant l'ensemble des équations de Maxwell est établie. Les formulations en potentiels permettant de résoudre les problèmes de CF sont introduits avec la MEF.

Le quatrième chapitre est dédié aux applications et aux résultats. Il est scindé en deux parties : Une première consacrée aux résultats de simulation par éléments finis. Tandis que la deuxième partie est une partie expérimentale qui concerne les résultats obtenus à l'aide d'un appareillage de détection de défauts par CF.

Et nous terminons par une conclusion générale et les perspectives de ce travail.

# **Chapitre I**

## **Présentation de l'entreprise E.R.M.A**

## I.1. Présentation générale de l'entreprise

Située à Dar El Beida et mitoyenne de l'aéroport international de Houari Boumediene, l'entreprise de rénovation des matériels aéronautiques (E.R.M.A) est l'une des plus importantes unités stratégiques de l'armée algérienne. Créée par le colonialisme français en 1939 sous le nom de l'atelier industriel aéronautique (A.I.A), elle a été récupérée par l'état algérien à l'indépendance et rebaptisée en 1972 : entreprise de contrôle et de rénovation des matériels aéronautiques (E.C.R.M.A).

A ses débuts, l'entreprise dépendait des forces de l'armée de l'air ; son budget, et son commandement étaient liés directement au plan de gestion des forces aériennes. Cet état de fonctionnement présentait un grand handicap pour la gestion de ses ressources, avec un budget qui devenait de plus en plus conséquent. En 1992, et dans le cadre du développement de l'armée nationale populaire, le ministère de la défense a procédé à la création par un décret présidentiel 92-34 / PR du 06/01/92 de l'E.R.M.A qui est devenue une entreprise complètement autonome qui a pour mission la rénovation des aéronefs militaires algériens. Cette autonomie lui a permis de se développer, de participer dans l'économie nationale, et lui a ouvert les portes du marché national et même international.



Fig.I.1. Situation de l'entreprise de satellite

### I.1.1. Mission de l'entreprise

L'E.R.M.A a pour mission principale la révision, et la réparation des aéronefs militaires, tels que les avions de chasse (Mig-21, Mig-23 MF/BN, L-39 ZA/C et prochainement le Sou-24 MK et Mig-29) et les hélicoptères (Mi-2, Mi-8, Mi-17, Mi-171 Mi-24/25) ; Ces aéronefs sont opérationnels au sein de nos forces Aériennes.



Mig-21

L-39 ZA/C

Mi-17

Mi-171

Fig.I.2. Quelques types des avions de chasse et des hélicoptères

### I.1.2. Les tâches de l'E.R.M.A

l'E.R.M.A a pour vocation de :

- Réviser les appareils aéronautiques après un certain nombre d'heures de vol, en général supérieur à 1000 h. Aussi, et après une durée de vie bien précise (calendaire), l'aéronef doit être révisé, cette opération consiste à démonter complètement l'avion, le réparer, le monter et contrôler le fonctionnement de tous les systèmes.
- Fabriquer les pièces (joints, flexibles, vis...) outils et composantes nécessaires au fonctionnement des aéronefs.
- Mener toutes études en relation avec ses objectifs.
- Approcher toute contribution jugée utile par l'autorité de la tutelle pour la modernisation de l'industrie aéronautique nationale.

### I.1.3. Fonctionnement de l'entreprise

L'E.R.M.A est spécialisée dans la maintenance et la rénovation des matériels aéronautiques, elle dispose des moyens très importants sur le plan des ressources humaines qu'en matériels et équipements. En général, toutes les activités de l'entreprise sont mises en œuvre pour soutenir la réparation/rénovation des aéronefs militaires [6].

L'opération de la rénovation se fait selon la chronologie suivante :

- Réception : réception des fuselages des aéronefs endommagés ou qui sont objet des opérations d'entretien.
- Démontage : enlèvement des pièces ou des accessoires endommagés (défectueuses) ou les pièces critiques nécessitant un contrôle périodique.
- Inspection : les différentes pièces subissent différents contrôles pour la vérification de leur état de santé.
- Réparation : elle consiste à restaurer ou rénover les pièces endommagées ou en état de panne.
- Montage : remise en place des éléments réparés ou les pièces de rechange.
- Mise au point : action d'améliorer et d'augmenter l'efficacité.
- Essais en sol et en vol : mise en marche des machines début au sol puis en vol.
- Livraison : la mise sur site pour l'exploitation.

#### **I.1.4. Organisation de L'E.R.M.A**

En aéronautique tout aéronef, qu'il soit avion de chasse, de transport ou hélicoptère doit subir une révision générale après un certain nombre d'heures de vol ou après une certaine durée de vie.

L'entreprise de rénovation des matériels aéronautiques a pour mission de prendre en charge ces différents appareils dans le but de les rénover. Cette dernière se compose de plusieurs direction et services.



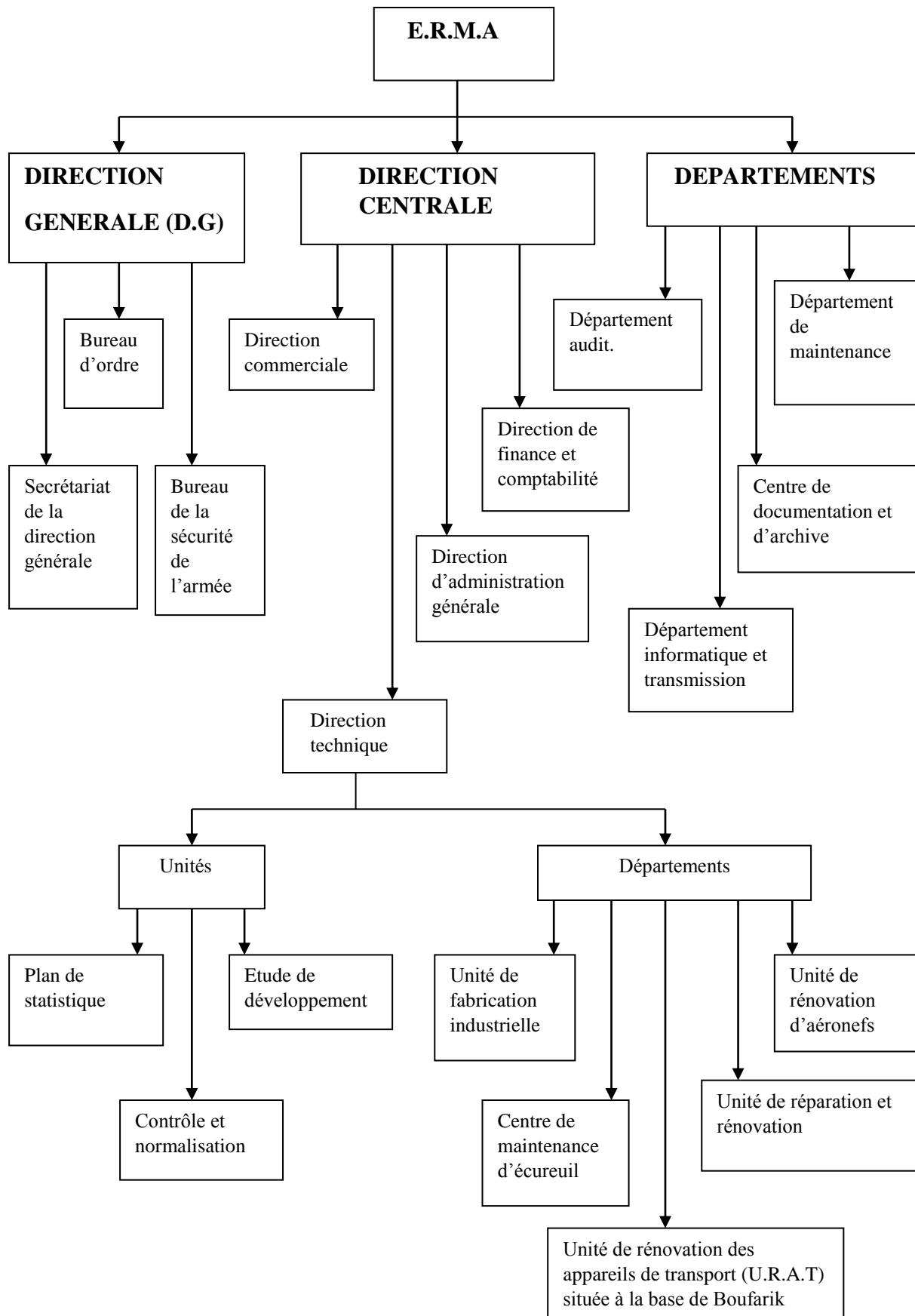


Fig.I.3. Organigramme de l'entreprise ERMA

## I.2. Description générale de l'hélicoptère MI-24

Le Mi-24 (Hind – code OTAN) est un hélicoptère d'attaque russe. Il est développé en Union soviétique dans les années 1960 par le bureau de construction Mil. Le premier vol a eu lieu le 19 septembre 1969. Le Mi-24 est entré en service en 1972.

Le Mi-24 est très largement diffusé dans le monde. Près de soixante pays l'emploient au sein de leurs forces armées. Plus de 3 500 exemplaires ont été produits, tous modèles confondus.



Fig.I.4. Hélicoptère MI-24

La structure générale de l'hélicoptère MI-24 est composée de :

1. Fuselage se compose d'une partie avant, une partie centrale, une poutre arrière et une poutre de dérive.
  - La partie avant comprend la cabine d'équipage.
  - La partie centrale contient une soute à fret et un compartiment d'équipement radio.
  - Poutre arrière ou poutre de queue qui présente une section transversale ovale.
  - Poutre de dérive ou poutre finale se composant d'une partie horizontale et une partie inclinée, c'est une structure assemblée par collage et soudage.
2. L'empennage de queue de l'hélicoptère se compose d'un stabilisateur et la poutre de dérive.
3. Deux aillent entièrement métalliques.
4. Deux turbomoteurs qui sont montés au-dessus du plafond de la partie centrale du fuselage.

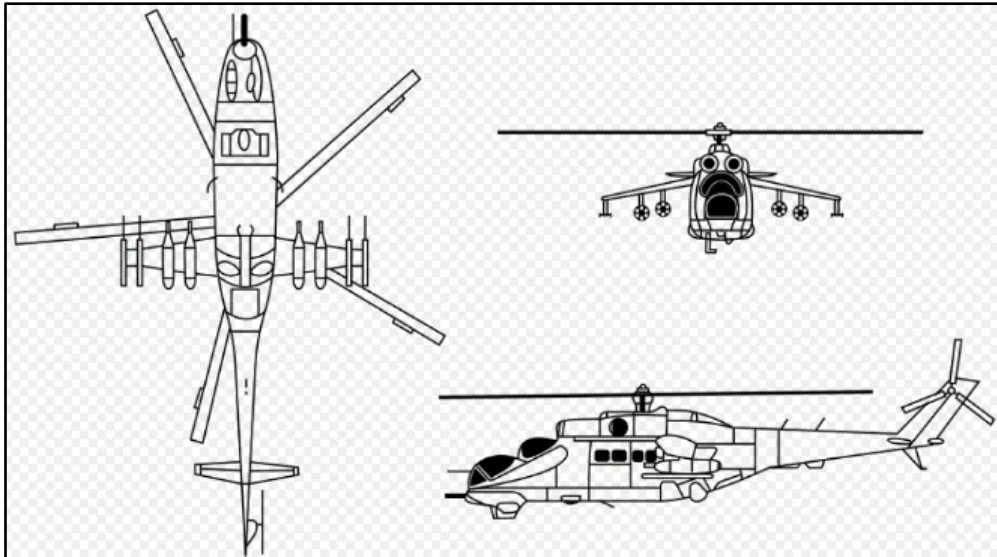


Fig.I.5. Structure de l'hélicoptère MI-24

### I.3. Description de la poutre de dérive

La poutre de queue est la partie allongée de la structure d'un hélicoptère à l'extrémité de laquelle est disposé le rotor anti couple. Elle contient un arbre de transmission et soutient le rotor arrière, la dérive et les stabilisateurs.

La poutre de dérive se compose des raidisseurs transversaux et longitudinaux et d'un revêtement porteur.

L'ensemble des raidisseurs transversaux comprend des cadres ovales N°=1,2 et 3 dans la partie horizontale et un cadre N°=4 et neuf nervures dans la partie inclinée.

Les nervures sont en tôle de l'aluminium.

La nervure N°=6 sous la forme d'un cadre sert à la fixation de boîte de transmission finale.

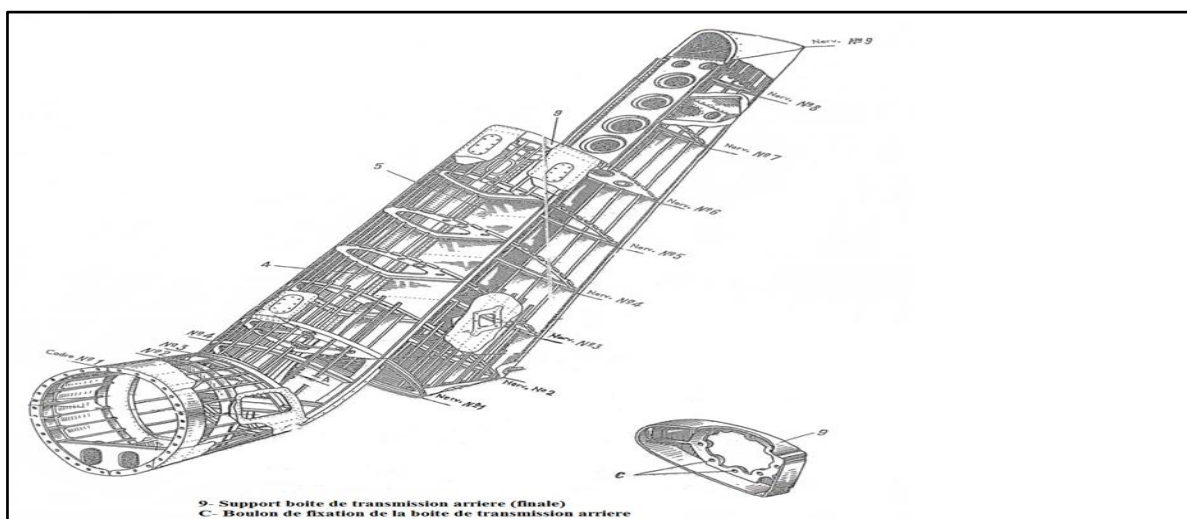


Fig.I.6. Poutre de dérive

#### I.4. La transmission

La transmission de l'hélicoptère sert à faire varier la vitesse de rotation et à transmettre le couple moteur des deux turbomoteurs au rotor principale et au rotor anti couple et à la boîte d'engrenage.

La transmission comprend :

- 1- Une boîte de transmission principale (BTP) située au-dessus de la partie centrale de fuselage, elle réunit la puissance des deux moteurs et la transmette aux arbres du rotor principal et du rotor anti couple et la boîte d'engrenage.
- 2- Boîte d'engrenage : il s'y produit une démultiplication de la vitesse de rotation de l'arbre de queue sans inversion de sens de rotation.
- 3- Boîte de transmission intermédiaire : sert à former un coude de 45° de l'arbre de queue pour suivre le coude de la poutre. La transmission se fait sans changement de la vitesse de rotation.
- 4- Boîte de transmission arrière : destinée à mettre en rotation le rotor anti couple et comprend un mécanisme de commande du pas du rotor anti couple (la commande de direction de l'hélicoptère).
- 5- Arbre de queue : sert à transmettre le couple moteur fourni par la BTP au rotor anti couple par l'intermédiaire de la boîte d'engrenage, de la boîte de transmission intermédiaire et la boîte de transmission arrière.

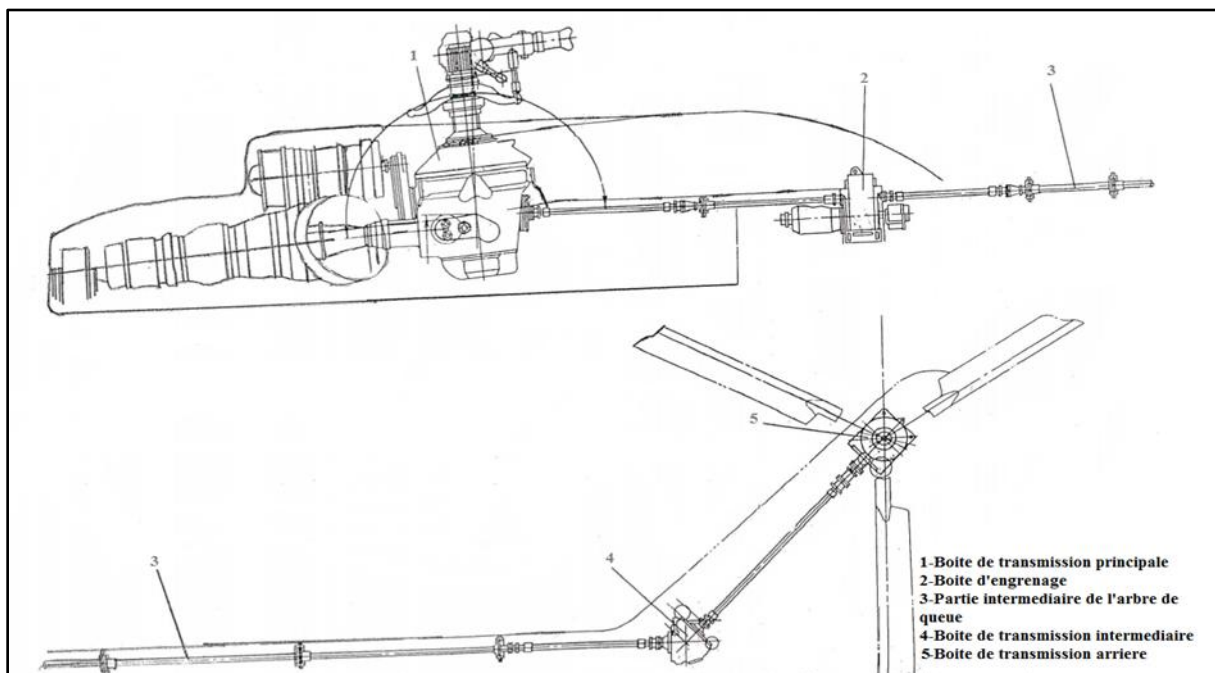


Fig.I.7. Transmission de l'hélicoptère

### I.5. Type de défauts

Dans le tableau ci-dessous, nous présentons quelques types de défauts qui peuvent se développer dans les structures des MI-24 ainsi que les méthodes de contrôles adoptées pour leur détection.

Probabilité de défaut Emplacement	Méthode de localisation de défaut instrument de contrôle	Méthode de réparation
Déchirure, entaille	Inspection visuelle	Rebuter
Vieillessement de caoutchouc	Inspection visuelle	Rebuter
Fissures	Inspection visuelle Courants de Foucault	Rebuter ou selon le constructeur
Colmatage de graisseur	Inspection visuelle	Nettoyer
Piques de corrosion	Courants de Foucault	< 40% Fait passer la pièce par la fraise > 40% Rebuter
Endommagement de recouvrement	Inspection visuelle	Restaurer
Traits superficiels de la surface	Inspection visuelle	Apte l'exploitation sans réparation
Matage et arrachement du filetage au début vers la fin	Inspection visuelle	Polir et tarauder

Tab.I.1. Types de défauts

### **I.6. Le contrôle non destructif par courants de Foucault**

Notre stage a été réalisé au niveau de l'unité contrôle et normalisation où nous nous sommes intéressées au contrôle des éléments de la structure du MI-24 et ses pièces par la méthode des CF. Après vérifications des consignes en vigueur sur les règles de travail, on procède comme suit :

- Placer l'hélicoptère dans hangar et le mettre à la terre.
- Vidanger le carburant et l'huile des réservoirs.
- Mettre l'escabeau sous l'appui de queue.
- Ramener les sources d'alimentation aux appareillages de contrôle.
- Scanner les différentes pièces et zones concernées par les défauts.

### **I.7. Règles de sécurités**

- 1- Il faut que le contrôle soit réalisé par des spécialistes qualifiés qui sont au courant des recommandations prescrites des instruments des règles de sécurité lors du travail avec les équipements électroniques.
- 2- Il est interdit de travailler avec les CF dans un local avec les liquides des vapeurs facilement inflammables.
- 3- Respecter les mesures de sécurité, de protection des personnes ainsi que l'hygiène industrielle dans l'entreprise.

### **I.8. Conclusion**

Après avoir acquis des notions théoriques sur le principe de CND par CF, nous avons pu décrocher un stage de fin d'études au sein de l'entreprise E.R.M.A. Cette expérience nous a été très bénéfique et nous a permis de découvrir beaucoup de choses sur le processus de rénovation des matériels aéronautiques.

Dans un premier temps, on a procédé à la prise de connaissance de cette entreprise et ses activités. Ensuite, nous avons entamé notre séjour au sein de l'équipe de CND chez laquelle nous avons été initiées au CND par CF des différentes pièces critiques d'un MI-24.

# **Chapitre II**

## **Généralités sur le CND**

## **II.1. Introduction**

Le contrôle non destructif (CND) permet de vérifier l'état de santé d'une pièce industrielle (repérer les discontinuités dans une pièce) sans l'endommager soit au cours de la production, soit au cours des opérations de maintenance. De nos jours les techniques de CND ont une importance majeure dans le contrôle de la qualité des produits ainsi que dans la gestion des risques, assurant ainsi la sécurité des personnes et des biens.

Dans ce chapitre, nous présentons, d'une manière non exhaustive, les différentes méthodes de CND et nous verrons un peu plus dans le détail celle qui utilise les courants de Foucault.

## **II.2. Historique**

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

## **II.3. Le contrôle non destructif**

### **II.3.1. Principe**

Le CND est l'ensemble des techniques et procédés, aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure. Le terme « santé » s'il renvoie à une certaine parenté avec le domaine des examens médicaux, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif des différentes techniques de CND qui est la mise en évidence de tout défauts susceptibles, d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné [7].



Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants :

- La rapidité d'exécution : Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts qui sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.
- le coût : Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- la reproductibilité : La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- la fiabilité : Le contrôle doit remplir son cahier des charges, par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.
- la sensibilité : La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.
- la résolution : La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

### **II.3.2. Les défauts**

La recherche de défauts dans une pièce (faisant partie ou pas d'une installation) peut se faire à plusieurs stades :

- Avant fabrication : sur la matière brute, par exemple une tôle avant emboutissage, une pièce de fonderie...
- Pendant la fabrication : par exemple suivi de l'épaisseur au cours d'un process, ...
- Après la fabrication : vérification de l'absence d'anomalies, ...
- En cours de (ou après) fonctionnement : contrôles réguliers pendant les arrêts, détection de défauts après défaillance, ...

La recherche des défauts peut se faire de manière :

➤ **Surfacique**

Les contrôles surfaciques concernent la détection de défauts débouchant ou proches de la surface. Ils sont parmi les plus utilisés, notamment pour détecter des fissures ou les micro-piqûres de corrosion.

➤ **Volumique**

Les contrôles volumiques sont utilisés pour des défauts internes débouchant ou non, tel que :

- Défauts dans les soudures (inclusions, porosités, collages, fissures, manques de pénétration).
- Délaminage, replis, inclusions, ... sur produit laminé ou forgé, ...

### II.3.3. Les techniques du CND

La diversité des pièces à inspecter, de leurs géométries, de leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Il n'est pas question ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du CND, mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement [8].

#### II.3.3.1. Le contrôle visuel

Le contrôle visuel est une technique essentielle qui donne un aperçu de l'état extérieur d'une pièce. Il est destiné à déceler les défauts tels que les fissures, les inclusions, et le manque de pénétration dans la soudure.

Pour le cas de la soudure on utilise des loupes, des caméras vidéo, des calibres et des règles graduées [8].

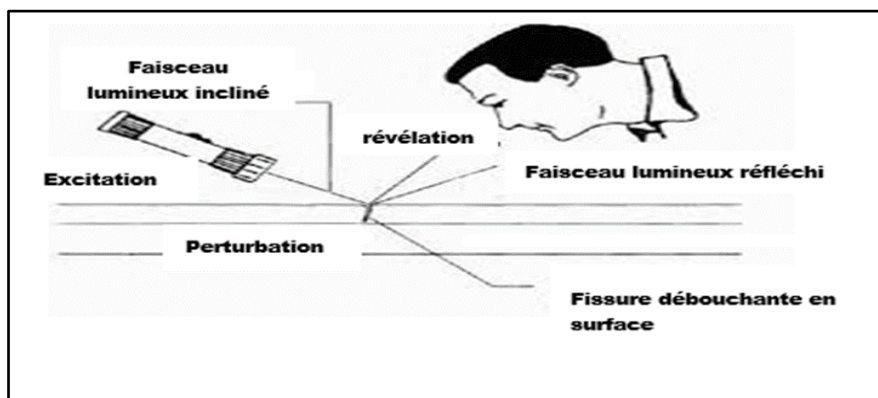


Fig.II.1. Contrôle visuel

### II.3.3.2. Le contrôle par ressuage

Cette méthode est exclusivement dédiée à la détection de défauts surfaciques (manque de matière, éraflure, . . .). Elle reste très utilisée et consiste à appliquer à la surface à contrôler préalablement nettoyée et séchée, un liquide d'impression coloré ou fluorescent. Le liquide pénètre par la capillarité et dans les ouvertures du défaut. Après le temps nécessaire à la pénétration du liquide d'impression, la pièce est lavée et séchée puis soumise à un révélateur du liquide. Un éclairage approprié (qui dépend du liquide utilisé) permet d'observer visuellement le défaut. Toutefois, cette technique ne révèle pas les défauts débouchant et ne donne pas la géométrie du défaut [8].

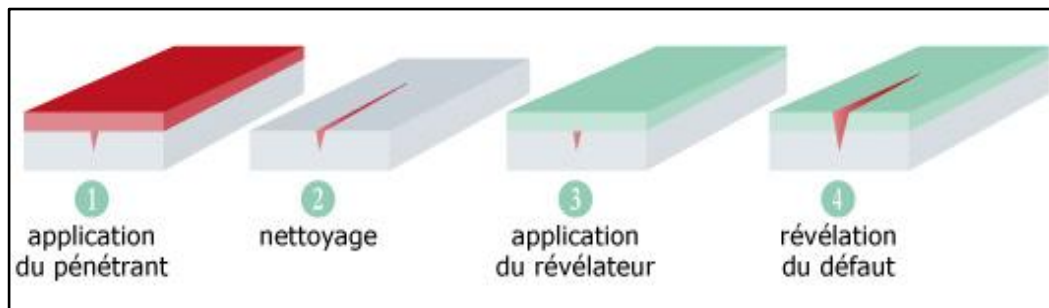


Fig.II.2. Recherche défaut par ressuage

### II.3.3.3. Le contrôle par magnétoscopie

C'est une méthode applicable seulement aux matériaux magnétiques pour la détection des défauts débouchant en surface ou proche à la surface. À l'instar du ressuage, la magnétoscopie complète l'examen visuel. On a recours à la magnétoscopie lorsque le ressuage est insuffisant (les imperfections de surface restent peu visibles malgré tout le soin apporté). La pièce est aimantée localement ou totalement à une valeur proche de la saturation magnétique. En l'absence de défaut, les fuites dans l'air sont insignifiantes (la perméabilité du matériau étant beaucoup plus grande que celle de l'air). Toute discontinuité du matériau provoquera une diminution de la section de passage et donc une augmentation du champ d'induction magnétique (conservation du flux). Cette augmentation provoquera une fuite magnétique à la surface de la pièce. Des particules ferromagnétiques contenues dans un révélateur s'accumulent au droit du défaut. On observe le spectre résultant sous un éclairage adapté [9].

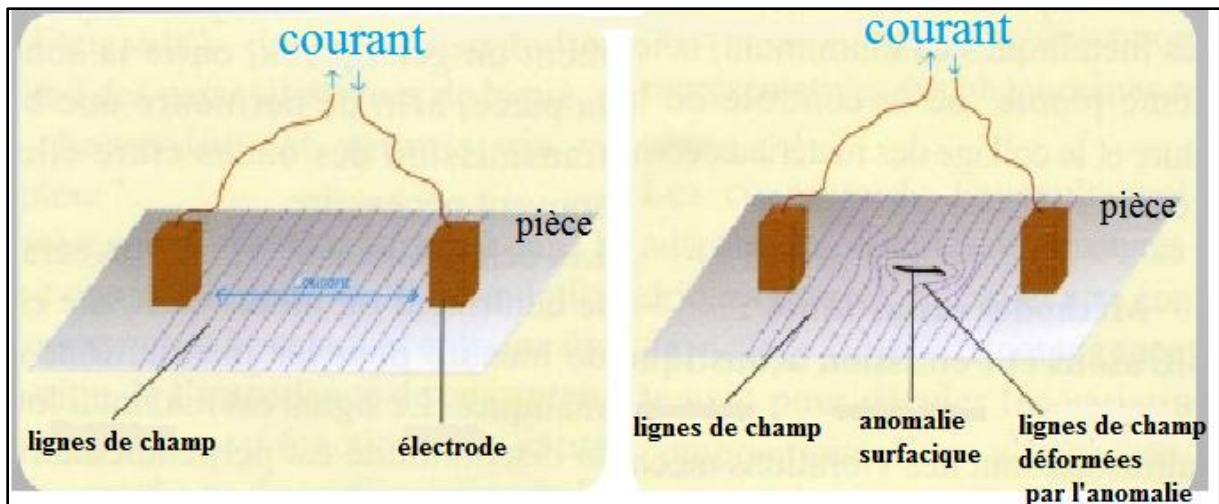


Fig.II.3. Inspection par magnétoscopie

#### II.3.3.4. Le contrôle par radiographie, RX et $\gamma$

La radiographie industrielle permet l'examen interne des défauts d'un objet en lui faisant traverser un rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde (rayons X et  $\gamma$ ) et recueillir les variations d'intensité du faisceau sous forme d'image, pour la plupart, sur un film. La quasi-totalité des matériaux peuvent être examinés en radiographie et les épaisseurs peuvent être importantes [10].

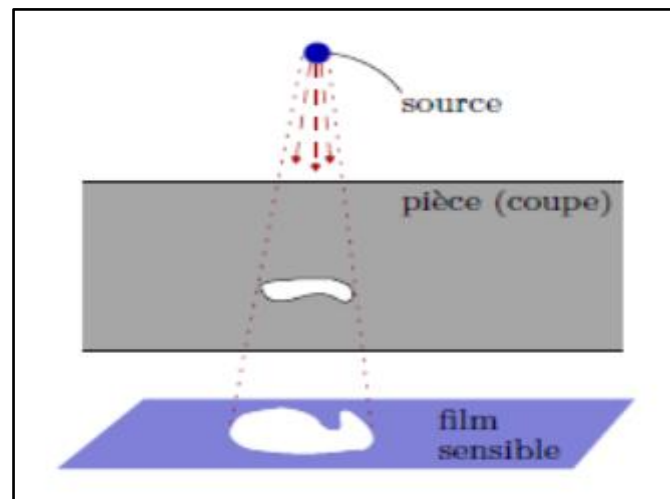


Fig.II.4. Contrôle par radiographie

### II.3.3.5. Le contrôle par ultrason

Le contrôle ultrasonore est basé sur la propagation d'ondes ultrasonores dans un matériau. L'évaluation des défauts se fait par l'analyse des perturbations du signal provenant de la surface du défaut. La vitesse de propagation est variable selon les directions. Une bonne connaissance des phénomènes liés à la propagation des ultrasons est donc une base indispensable à la pratique de ce type de contrôle alors on déduit que l'ultrason est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage dans la pièce à contrôler [10].

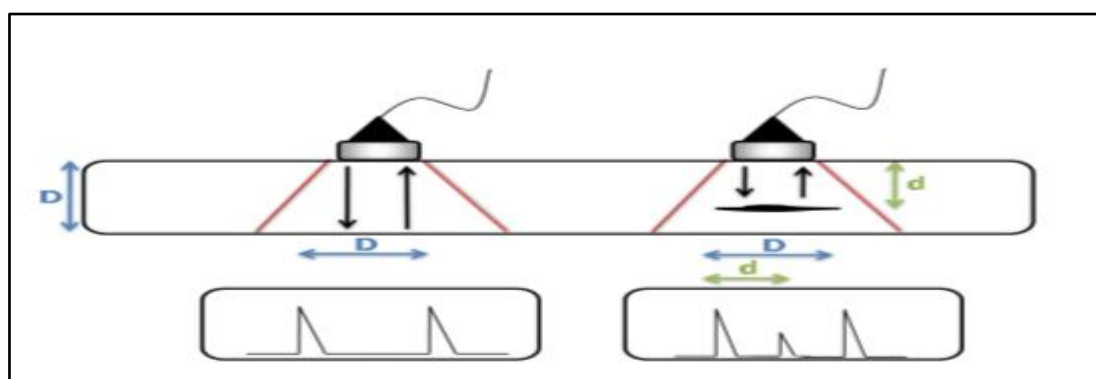


Fig.II.5. Contrôle par ultrason des pièces industrielles

Technique	Domaine d'application	Avantages	Inconvénients
Ultrasons	Majorité des matériaux	Importante profondeur de pénétration pour la mesure de défauts.	Couplant
Courant de Foucault	Matériaux conducteurs	Automatisation	Interprétation des signaux
Magnétoscopie	Matériaux ferromagnétiques	Simple d'utilisation	Faible pénétration
Radiographie	Tous matériaux	Possibilité d'avoir une cartographie	Coût, protection
Ressuage	Tous produits à surface accessible	Simplicité	Uniquement défaut débouchant

Tab.II.1. Tableau des techniques de CND

## II.4. Le contrôle par courant de Foucault

### II.4.1. Principe de fonctionnement

Le CND-CF consiste à créer dans les matériaux conducteurs des courants induits par un champ magnétique variable au moyen d'un capteur, ces courants induits sont appelés courants de Foucault, ils circulent localement dans le matériau et ont une distribution et une répartition qui dépend de champ magnétique d'excitation.

En présence d'une anomalie leur déplacement va être perturbé ce qui va entraîner une variation de l'impédance apparente du capteur, c'est l'analyse de cette variation de l'impédance qui va fournir les informations nécessaires pour détecter l'emplacement de défaut ainsi que sa nature [9].

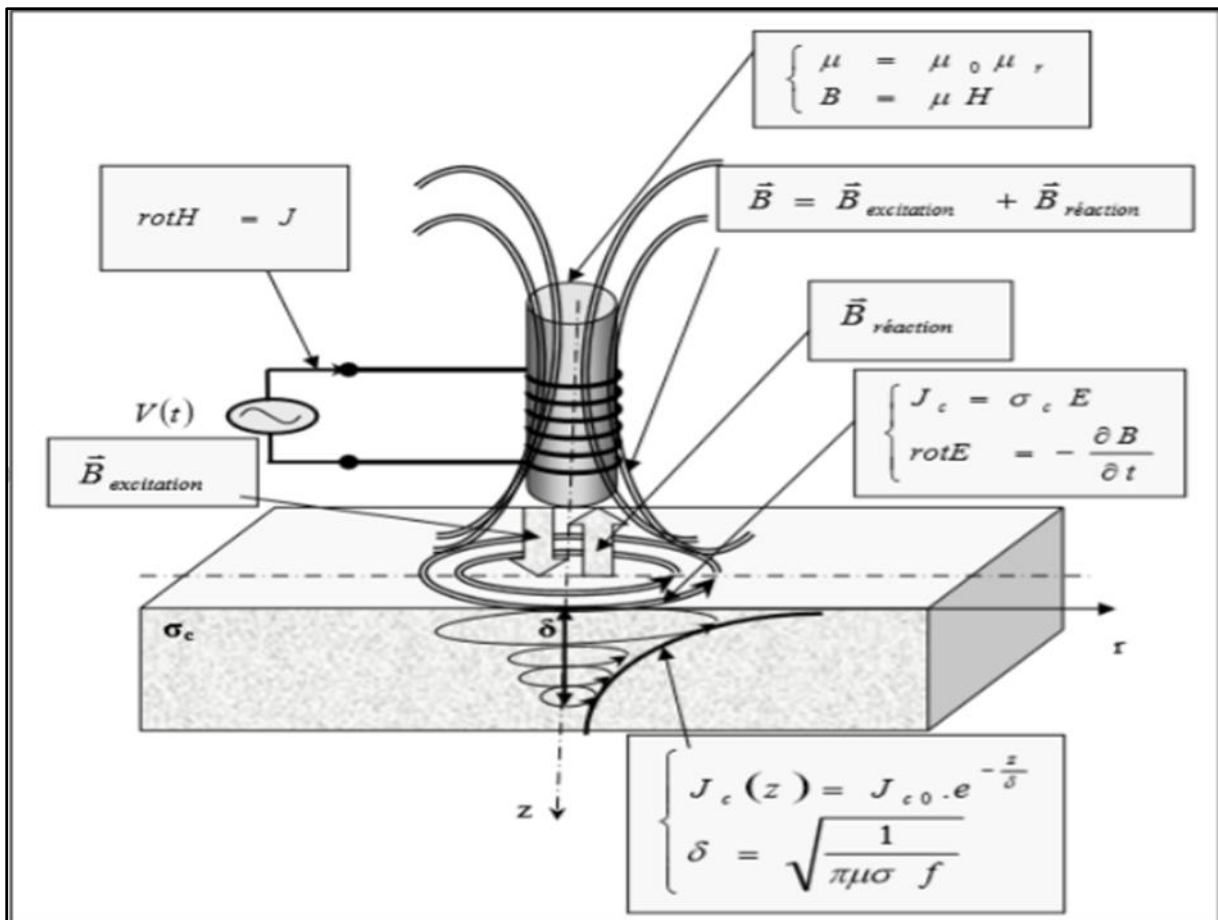


Fig.II.6. Schéma de principe de contrôle par courants de Foucault

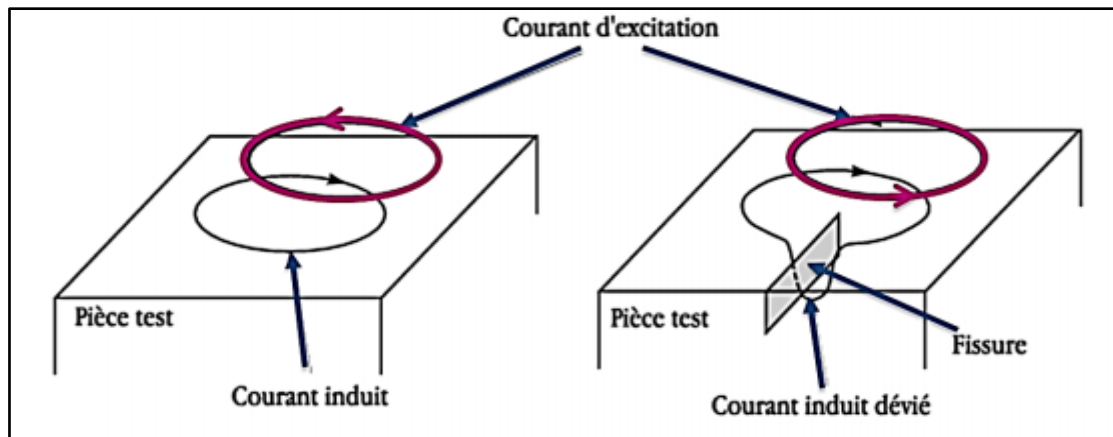


Fig.II.7. Principe de la détection par courants de Foucault

#### II.4.2. Profondeur de pénétration / effet de peau

L'effet de peau ou effet pelliculaire est un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée, le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs. Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la surface du conducteur. Il en résulte une augmentation de la résistance du conducteur.

La fréquence de travail, la conductivité et la perméabilité apparaissent dans l'épaisseur de peau électromagnétique telle que :

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

Ce phénomène engendre une décroissance exponentielle de la densité de courant de Foucault, soit :

$$J(z) = J_0 e^{-z/\delta} \quad (\text{II.2})$$

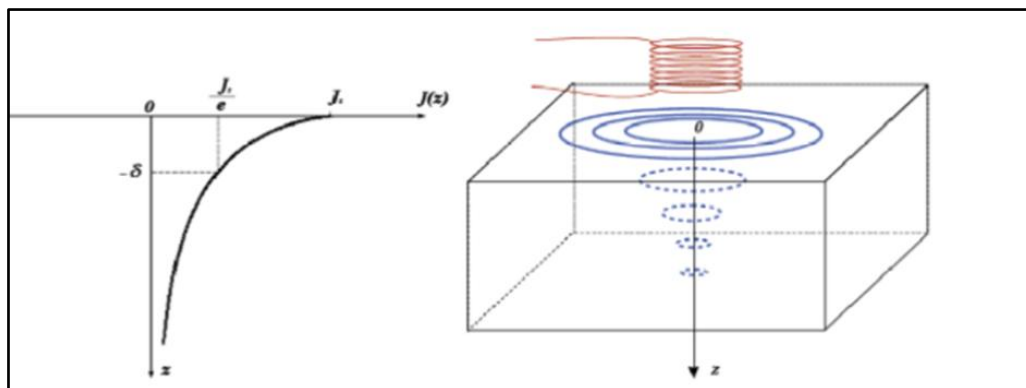


Fig.II.8. Profondeur de pénétration

$\delta$ : Profondeur de pénétration(m).

f : fréquence du courant parcourant la bobine (Hz).

$\mu$  : Perméabilité magnétique du matériau.

$\sigma$  : Conductivité électrique du matériau(S/m).

### II.4.3. Signaux d'excitation et exploitation

Il existe trois types d'excitation pour les capteurs à CF :

- L'alimentation mono fréquence.
- L'alimentation multi fréquentielle.
- L'alimentation par de courants pulsés.

#### II.4.3.1. L'alimentation mono fréquence

Le CF est obtenu par une excitation sinusoïdale de fréquence fixe qui peut être fournie par un générateur ayant une ou quelques fréquences fixes commutables. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés. La fréquence intervient sur la profondeur de pénétration et sur la séparation en phase des réponses de divers défauts. Pour une fréquence très basse, l'amplitude des CF sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits. Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés par les capacités inter spires du capteur. Il n'y a cependant pas de critères simples et uniques du choix de la fréquence. Nous pouvons donc dire que ce mode d'excitation est limité en utilisation car il ne délivre pas une caractérisation fine des contrôles et n'élimine pas l'influence de l'ensemble des paramètres perturbateurs [11].

#### II.4.3.2. L'alimentation multifréquences

La méthode multifréquence est sans doute celle la plus utilisée dans le domaine du CND à CF, développée en particulier pour le contrôle des tubes des générateurs de vapeur et des rails ferroviaires. En réalisant des mesures à plusieurs fréquences d'excitation, il est possible d'atténuer fortement l'effet des grandeurs perturbatrices. L'utilisation de n fréquences permet d'avoir  $2*n$  informations réelles. Dans ce mode particulier d'utilisation des CF, les générateurs excitent la bobine simultanément sur plusieurs fréquences. Le signal reçu est ensuite filtré par des passes bandes à forte pente. Ayant plus d'informations, il est possible d'éloigner les signaux perturbateurs du signal recherché. Il faut faire des mesures à plusieurs fréquences d'excitation pour avoir beaucoup d'information.



Cette technique de mesure peut être réalisée en fréquences séquentielles ou en fréquences simultanées. La première excite le capteur par mono fréquence successive, c'est une technique qui met un temps d'exécution et d'acquisition de données important. La deuxième consiste à injecter au capteur simultanément plusieurs signaux de fréquences différentes. En pratique un système en double fréquence (10kHz et 100kHz) est utilisé pour le contrôle des rails ferroviaires et à trois fréquences simultanés (100kHz, 240kHz ,500kHz) pour les tubes de vapeur [12-13].

#### **II.4.3.3. L'alimentation par des courants pulsés**

Une technique est destinée à l'évaluation de l'épaisseur de revêtement métallique, par la suite elle a été appliquée à la détection de défauts profonds, les dépôts sur les pièces dans le domaine de l'inversion du phénomène. Elle Consiste à émettre un champ magnétique de large bande de fréquence. La forme des signaux utilisés est variable dans le temps, c'est une excitation qui peut être des impulsions produites par une décharge capacitive ou bien une excitation impulsionnelle rectangulaire, triangulaire, ou semi sinusoïdale, cette dernière étant la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

#### **II.4.4. Domaine d'application**

Le CND-CF peut être appliqué aux :

- Matériaux conducteurs magnétiques ou amagnétiques.
- Contrôles de filtrages (détection de métaux dans un environnement donné).
- Contrôles des tôles minces.
- Contrôle d'épaisseur de revêtement.
- Matériaux composites comportant des fibres conductrices.

#### **II.4.5. Les capteurs**

Le capteur est une bobine ou un ensemble de bobines. Il sert à générer les CF ainsi qu'à capter leurs effets. La grandeur mesurée est l'impédance ou une différence de potentiel représentant l'image des CF. La forme du capteur, sa position relative au matériau, sa fonction et sa conception varient en fonction de son utilisation. Il peut être classé en fonction de trois caractéristiques :

- Type.
- Fonction.
- Mode de contrôle.

### II.4.5.1. Types de capteurs

Du point de vue géométrique, on distingue trois types de capteurs [14] :

➤ Bobine encerclante

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner.

Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, les barres.

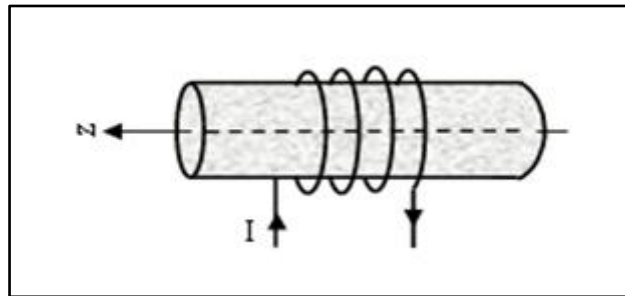


Fig.II.9. Bobine encerclante

➤ Sonde

C'est un capteur destiné à l'examen d'es produits creux. Il peut être placée à l'intérieur d'un tube ou d'une conduite. Il existe la sonde dite axiale (enroulement bobines autour de l'axe de translation de celle-ci) et la sonde dite tournante (constituée d'une bobine ponctuelle tournante autour de l'axe translation de celle-ci). Ce type de capteur est principalement développé pour l'inspection des tubes de générateurs de vapeur dans les installations nucléaires.

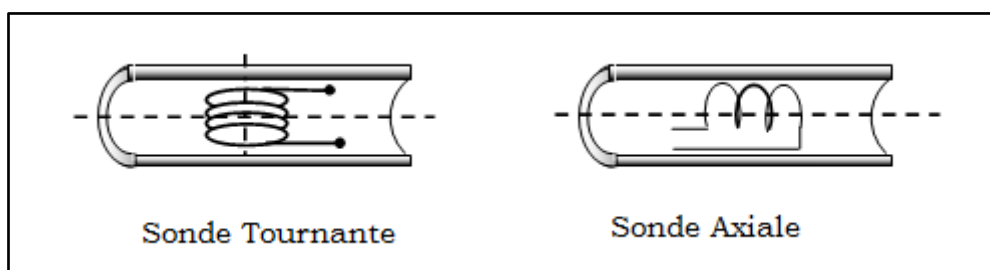


Fig.II.10. Sonde à courant de Foucault

➤ Palpeur ou bobine ponctuelle

C'est une bobine destinée à l'examen local de la surface d'une pièce. Elle peut être déplacée sur ou près de la surface.

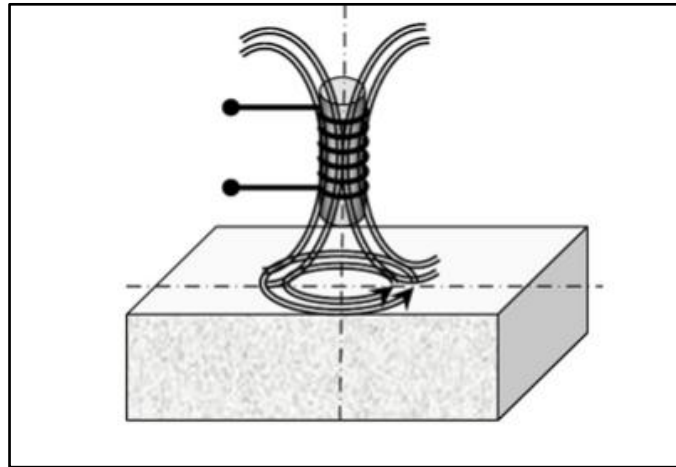


Fig.II.11. Bobine simple avec noyau

#### II.4.5.2. Fonction du capteur

L'excitation est assurée par une bobine alimentée sous une tension ou un courant variable. Selon son utilisation, il existe deux types de fonctions des capteurs [15] :

➤ Capteur à double fonction

Les fonctions d'induction et de réception sont assurées par les mêmes enroulements. L'exploitation se fait à partir de la mesure de l'impédance équivalente de la bobine ou de la variation de l'impédance due à la présence du matériau au voisinage du capteur ou due à la présence d'un défaut dans ce matériau. L'un des inconvénients de l'utilisation d'une bobine unique est que la détection de défauts enfouis, nécessite une augmentation des dimensions de la bobine d'excitation. Pour pallier à cet inconvénient, une solution consiste à séparer « émetteur » et « récepteur ».

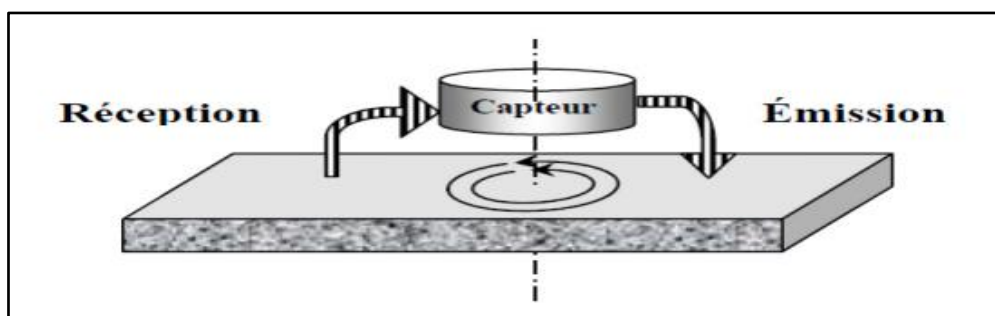


Fig.II.12. Capteur à double fonction

➤ Capteur à fonction séparée

Ces capteurs possèdent un enroulement réservé à l'excitation et un autre à la réception. Les fonctions de réception sont assurées par des capteurs de dimensions plus petites devant celles de la bobine excitatrice. Cette conception est souvent utilisée pour la détection de défaut de grande taille ou profond.

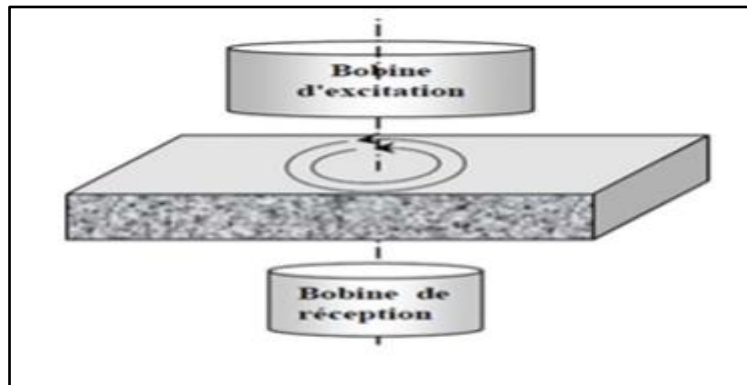


Fig.II.13. Capteur à fonction séparée

### II.4.5.3. Mode de contrôle

➤ Mode absolue

Pour la détection de défauts longs (corrosion, usure, érosion...).

Très sensible aux variations lentes de conductivité électrique, de perméabilité magnétique et d'épaisseur du matériau, elle est utilisée en mode statique ou dynamique de caractérisation pour :

-La mesure des conductivités.

-Le tri des matériaux.

-La mesure des profondeurs de trempe.

-La mesure de l'épaisseur des revêtements (peinture, dépôts électrolytiques, matières plastiques, anodisation...) ou des traitements thermo-chimiques (cémentation, nitruration...).

➤ Mode absolu compensé

Qui utilise deux capteurs absolus. Un des deux capteurs absolus prend place au-dessus d'une pièce de référence fixe (elle permet de s'affranchir des variations d'une grandeur d'influence, température, conductivité...).

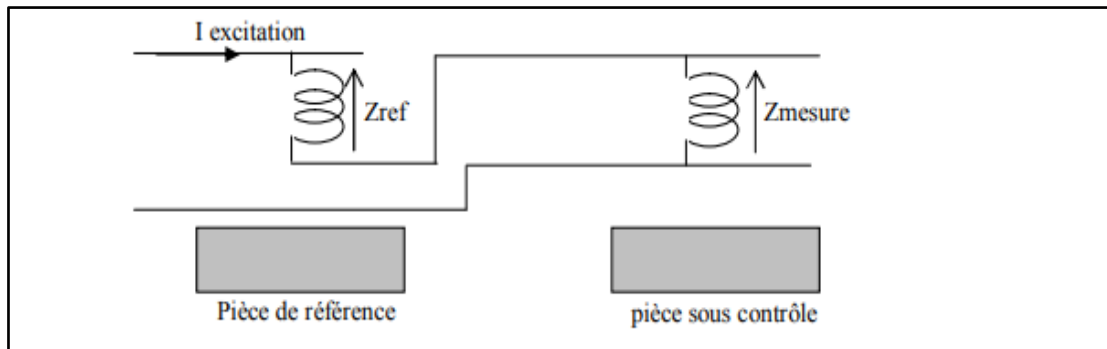


Fig.II.14. Exemple de mode absolu compensé

➤ Mesure différentielle

Pour la détection de défauts courts (fissures, soufflures, inclusions, points de corrosion...) nécessitant un mouvement relatif entre la pièce et le capteur (mesure dynamique), cette mesure est utilisée en contrôle de santé car elle est peu sensible aux variations progressives des grandeurs qui influent sur le trajet des CF [15].

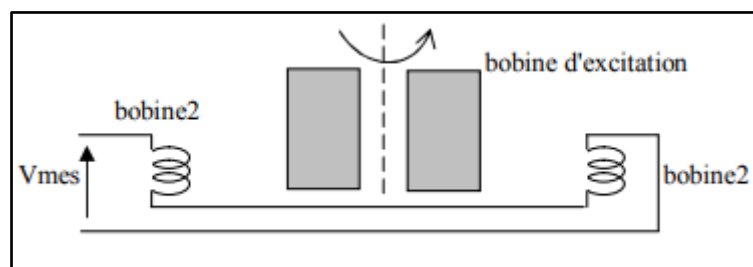


Fig.II.15. Exemple de capteur différentiel

### II.4.6. Impédance normalisée

Considérons un capteur CF posé sur une cible conductrice. La mesure de l'impédance du capteur peut être utilisée pour le contrôle de cette cible. On peut en déduire une autre grandeur : l'impédance normalisée, plus commode à interpréter. Elle peut être représentée graphiquement dans le plan complexe, avec en abscisse sa partie réelle et en ordonnée sa partie imaginaire.

L'impédance normalisée d'un capteur à CF est définie comme suit :

$$Z_n = R_n + jX_n = \frac{R-R_0}{X_0} + j \frac{X}{X_0} \quad (\text{II.3})$$

Où  $Z_0 = R_0 + jX_0$  est l'impédance du capteur à vide,  $R_0$  et  $X_0$  étant respectivement ses parties réelle et imaginaire, elle est obtenue en l'absence de cible.

$Z = R + jX$  est l'impédance du capteur en présence d'une cible,  $R$  et  $X$  désignant respectivement ses parties réelle et imaginaire.

Cette définition (II.3) permet d'une part de s'affranchir de l'influence de la résistance propre  $R_0$  de la bobine, et d'autre part d'utiliser une grandeur dont la partie imaginaire n'augmente pas proportionnellement à la fréquence [16].

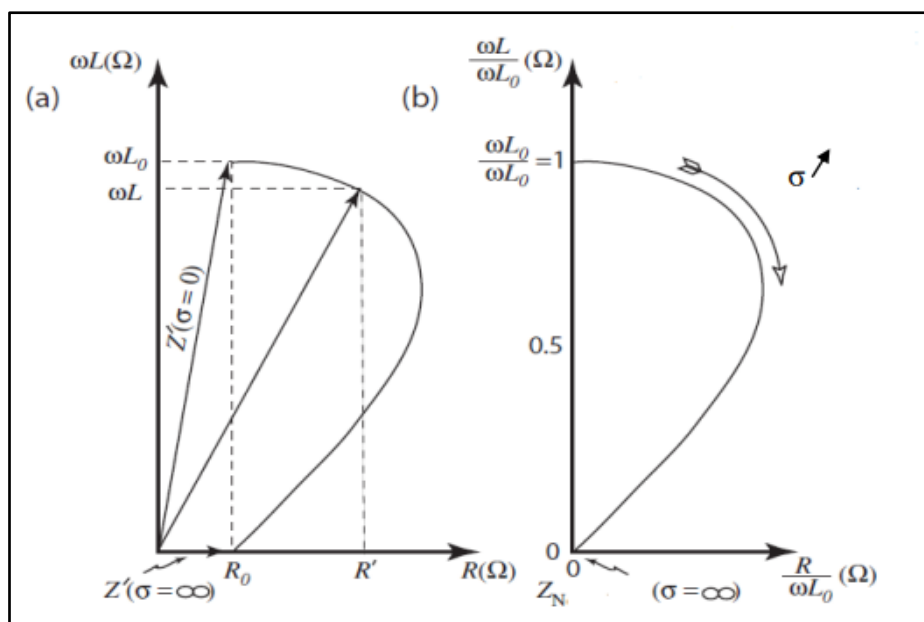


Fig.II.16. (a) Plan d'impédance non-normalisée ; (b) Plan d'impédance normalisée

## **II.4.7. Les paramètres perturbateurs**

### **II.4.7.1. Température**

Dans le domaine d'évaluation et de CND par CF, la température est un élément perturbateur. La perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau varient avec la température. Toute variation thermique devient très gênante pour les appareils qui assurent une mesure absolue tels que ceux destinés à des mesures d'épaisseur ou de détection d'anomalies.

La température varie en raison du courant d'excitation (effet Joules) ou de l'environnement (différence de température entre la référence et les pièces à mesurer). Pour neutraliser cette perturbation, on utilise dans le cas de mesure absolue avec des bobines de compensation, les thermistances ou les thermocouples [13].

### **II.4.7.2. Lift-off**

Le lift-off est un paramètre très influent dans le CND par CF, il décrit la distance entre le capteur et la pièce à contrôler [13].

## **II.4.8. Avantages et inconvénients du CND-CF**

### ➤ **Avantage**

- Grande vitesse de contrôle.
- Très bonne sensibilité.
- Facilement automatisable.
- Contrôle possible sous revêtement.
- Localisation et dimensionnement.

### ➤ **Inconvénients**

- matériaux conducteur.
- Procédé couteux.
- Faible profondeur de contrôle.
- Mise au point souvent longue.
- Sensibilité aux perturbations magnétiques.

**II.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons effectué une recherche bibliographique sur les techniques de CND et nous nous sommes intéressés en particulier à celle des CF.

En partant de la source d'excitation, à travers le capteur, nous arrivons à la mesure de l'impédance complexe aux bornes de ce dernier. Cette grandeur, résultante de la topologie des CF, nous informera sur l'état dimensionnel, physique et de santé du matériau à contrôler.

De ce fait, nous ne nous intéressons dans ce qui suit aux équations de Maxwell chose qui va nous permettre de calculer les CF et de la variation d'impédance qui en résulte.



# **Chapitre III**

## **Modélisation numérique des structures CND-CF**

### III.1. Introduction

La simulation consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système. Elle s'appuie sur une modélisation et fait appel à des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques. En chaque point du système considéré, plusieurs grandeurs physiques (vitesse, température, champ électromagnétique . . .) décrivent son état. Ces grandeurs physiques ne sont pas indépendantes, mais liées par des équations, généralement aux dérivées partielles. Ces équations constituent la traduction mathématique des lois de la physique qui régissent le comportement du système. Modéliser, c'est pouvoir déterminer l'état du système pour une source donnée [17].

Dans le domaine du CND par CF la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu permet d'élaborer un modèle mathématique qui pourra prédire la réponse de la sonde en fonction des paramètres de la cible, qui doivent être connus. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell. Selon la complexité de la configuration cette résolution peut être analytique ou numérique.

### III.2. Equations de Maxwell

Ces équations sont la base de résolution de tout problème électromagnétique, elles aboutissent au calcul de la valeur des champs en tout point de l'espace considéré.

C'est vers la fin du 19eme siècle que Maxwell a proposé un ensemble de quatre équations en regroupant les équations de Faraday, Ampère et Gauss. Ces équations relient le champ électrique  $\vec{E}$  (ou l'induction électrique  $\vec{D}$ ) et le champ magnétique  $\vec{H}$  (ou l'induction magnétique  $\vec{B}$ ) à leurs sources (densité de charge  $\rho$  et densité de courant  $\vec{J}$ ) par l'intermédiaire des trois paramètres : la conductivité électrique  $\sigma$  la perméabilité magnétique  $\mu$ , la permittivité électrique  $\epsilon$  [18].

Les équations de Maxwell peuvent s'écrire sous la forme différentielle ou intégrale dans le domaine temporel ou fréquentiel.

### III.2.1. Première équation de Maxwell

Cette équation est héritée du théorème de Gauss, qui permet de lier le flux du champ électrique à travers une surface fermée à la charge intérieure à cette surface.

D'après le théorème de Gauss on a :

$$\oiint_S \vec{E} \cdot \vec{ds} = \frac{\Sigma Q_{int}}{\epsilon_0} \quad (III.1)$$

$$\oiint_S \vec{D} \cdot \vec{ds} = \Sigma Q_{int} \quad (III.2)$$

D'autre part on a :

$$\Sigma Q_{int} = \iiint_v \rho \cdot dv \quad (III.3)$$

D'où :

$$\oiint_S \vec{D} \cdot \vec{ds} = \iiint_v \rho \cdot dv \quad (III.4)$$

En appliquant le théorème d'Ostrogradski à l'intégrale de gauche on aura :

$$\iiint_v \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \iiint_v \rho \cdot dv \quad (III.5)$$

D'où l'expression de la première équation de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (III.6)$$

$\vec{D}$ : Induction électrique [C/m<sup>2</sup>].

$\Sigma Q_{int}$ : Charge totale contenue dans le volume [C].

$\epsilon_0$ : Permittivité électrique du vide  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$  (F/m).

$dv$ : Élément du volume [m<sup>3</sup>].

$\rho$ : Densité de charge volumique [C/m<sup>3</sup>].

$ds$ : Élément de surface [m<sup>2</sup>].

### III.2.2. Deuxième équation de maxwell

Cette équation traduit le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday et complété par Lenz. Une variation de flux d'induction magnétique engendre une force électromotrice qui tend à s'opposer à la cause qui lui a donnée naissance. Sa forme intégrale est :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (III.7)$$

Sachant que :

$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (\text{III.8})$$

$$e = \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} \quad (\text{III.9})$$

On aura :

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = - \frac{d}{dt} (\iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS}) \quad (\text{III.10})$$

Selon le théorème de Stokes :

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = \iint_S (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) \cdot \vec{dS} \quad (\text{III.11})$$

D'où la deuxième équation de Maxwell est de la forme :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.12})$$

### III.2.3. Troisième équation de Maxwell

Cette équation traduit le principe de conservation flux magnétique à travers une surface fermée.

D'après la deuxième équation de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.13})$$

En appliquant la divergence aux deux membres de l'équation on aura :

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) = \vec{\nabla} \cdot \left( - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \quad (\text{III.14})$$

On déduit :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.15})$$

D'où la troisième équation de Maxwell est de la forme :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.16})$$

### III.2.4. Quatrième équation de Maxwell

Cette équation est la généralisation du théorème d'Ampère. Elle relie le champ magnétique à ses sources. Le terme supplémentaire  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  indique qu'un champ électrique variable est source de champ magnétique.

D'après le théorème d'Ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \quad (\text{III.17})$$

Selon le théorème de Stokes :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) \cdot d\vec{S} \quad (\text{III.18})$$

Sachant que :

$$\sum I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (\text{III.19})$$

On déduit :

$$\iint_S (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (\text{III.20})$$

D'où :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III.21})$$

Avec :

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_d \quad (\text{III.22})$$

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{III.23})$$

D'où la quatrième équation de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{III.24})$$

$\vec{J}_c$  : densité de courant de conduction.

$\vec{J}_d$  : densité de courant de déplacement.

### III.3. Hypothèses simplificatrices

En électrotechnique, les fréquences utilisées sont inférieures aux radios fréquences qui sont de l'ordre de  $10^{12} \text{ Hz}$ . D'où les courants de déplacements sont faibles, ce qui revient à négliger le terme  $\left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right)$  devant le terme de conduction  $\sigma \vec{E}$ .

En considérant ces hypothèses, les équations de Maxwell deviennent :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{III.25})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.26})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.27})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{III.28})$$

#### III.4. Relations du milieu

Elles expriment les relations qui existent entre le champ magnétique  $\vec{H}$  et l'induction magnétique  $\vec{B}$ , à travers la perméabilité magnétique  $\mu$  ainsi que celle entre l'induction électrique  $\vec{D}$  et le champ électrique  $\vec{E}$ , à travers la permittivité électrique  $\varepsilon$ .

$$\vec{B} = \mu(\vec{H}) \cdot \vec{H} \quad (\text{III.29})$$

$$\vec{D} = \varepsilon(\vec{E}) \cdot \vec{E} \quad (\text{III.30})$$

Dans le cas linéaire nous avons :

$$\mu = \mu_0 \mu_r = C^{\text{te}} \quad (\text{III.31})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = C^{\text{te}} \quad (\text{III.32})$$

$\mu$ : Perméabilité magnétique absolue (H/m).

$\mu_0$ : Perméabilité magnétique du vide  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  (H/m).

$\mu_r$ : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré.

$\varepsilon$ : Permittivité électrique (F/m).

$\varepsilon_0$ : Permittivité électrique du vide  $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$  (F/m).

$\varepsilon_r$ : Permittivité relative du milieu considéré.

#### III.5. Loi d'Ohm

Elle exprime la relation liant la densité du courant  $\vec{j}$  au champ électrique  $\vec{E}$  à travers la conductivité  $\sigma$ , elle est donnée par :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{III.33})$$

### III.6. Equation de continuité

L'équation de continuité appelée aussi équation de la conservation de la charge électrique est donnée par :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.34})$$

Avec :

$\vec{J}$  : Densité de courant (A/m).

$\rho$  : Densité de charge volumique (C/m<sup>3</sup>).

#### III.6.1. Modèle magnétodynamique

La magnétodynamique consiste en l'étude des phénomènes électromagnétiques en régime dynamique, en négligeant les courants de déplacement. Les champs électromagnétiques sont alors variables, soit par variation dans le temps des courants d'excitation, soit par mouvement d'aimants permanents.

#### III.6.2. Formulations magnétodynamiques

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

- Formulations de type électrique :  $\vec{E}$  et  $\vec{A} - V$ .
- Formulations de type magnétique :  $\vec{H}$  et  $\vec{T} - \psi$ .

#### III.6.3. Formulation en termes de potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$

De (III.27) on a :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \Rightarrow \exists \vec{A} / \vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{III.35})$$

De l'équation (III.29) on a :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \Rightarrow \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (\text{III.36})$$

En combinant (III.35) et (III.26) on aura :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \quad (\text{III.37})$$

De (III.37) on a :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \Rightarrow \exists V / \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \quad (\text{III.38})$$

D'où :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{III.39})$$

En combinant (III.39) et (III.33) on aura :

$$\vec{J} = -\sigma \vec{\nabla}V - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{III.40})$$

On pose :

$$\vec{J}_s = -\sigma \vec{\nabla}V \quad (\text{III.41})$$

$$\vec{J} = \vec{J}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{III.42})$$

De (III.28), (III.35) et (III.42) on peut avoir :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{\vec{\nabla} \wedge \vec{A}}{\mu} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (\text{III.43})$$

C'est l'équation magnétodynamique en termes de  $\vec{A}$  [4].

#### III.6.4. Formulation $\vec{T}$ - $\Psi$

La formulation  $\vec{T}$ - $\Psi$ , décrit la distribution du champ électromagnétique par l'utilisation du potentiel vecteur électrique  $\vec{T}$  et du potentiel scalaire magnétique  $\Psi$ . Cette formulation a l'avantage de permettre une réduction du coût de calcul en diminuant les degrés de liberté de trois à un dans toutes les zones non conductrices [19].

Pour la solution du problème nous considérons une autre fois la condition de la continuité :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{III.44})$$

A partir de l'équation (III.44), l'expression de la densité de courant en termes de potentiel vecteur électrique est donnée par l'équation :

$$\vec{J} = \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \quad (\text{III.45})$$

On peut noter des équations (III.28) et (III.45) que  $\vec{T}$  et  $\vec{H}$  diffère par le gradient scalaire  $\Psi$ :

$$\vec{H} = \vec{T} - \vec{\nabla}\Psi \quad (\text{III.46})$$

La combinaison des équations (III.26), (III.29) et (III.33) nous donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \vec{\nabla}\Psi) = 0 \quad (\text{III.47})$$



De l'équation (III.27) et (III.46) on obtient :

$$\vec{\nabla} \cdot (\mu(\vec{T} - \vec{\nabla}\Psi)) = 0 \quad (\text{III.48})$$

Dans l'air l'expression du champ magnétique est réduite à :

$$\vec{H} = -\vec{\nabla}\Psi \quad (\text{III.49})$$

En remplaçant (III.49) dans (III.27) :

$$-\vec{\nabla} \cdot \mu \vec{\nabla}\Psi = 0 \quad (\text{III.50})$$

La divergence de  $\vec{T}$  n'est pas encore définie et par conséquent  $\vec{T}$  et  $\Psi$  restent ambigus. Pour y remédier on utilise l'une de jagues communément utilisée en électromagnétisme en l'occurrence la jauge de Coulomb :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{T} = 0 \quad (\text{III.51})$$

Cette condition nous autorise à rajouter à l'équation (III.44) le terme :

$$\vec{\nabla} \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) \quad (\text{III.52})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) - \vec{\nabla} \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \vec{\nabla}\Psi) = 0 \quad (\text{III.53})$$

C'est ce modèle que nous avons adopté pour nos simulations en 3D.

### III.7. Résolution des équations aux dérivées partielles (EDP)

Plusieurs techniques sont envisageables pour la résolution d'un système d'EDP. Les méthodes les plus utilisées en CND par CF sont introduites dans cette sous-section.

#### III.7.1. Résolution analytique

Une résolution analytique repose sur le calcul direct d'une solution exacte des équations différentielles. Plusieurs configurations électromagnétiques de CND par CF ont été traitées analytiquement. Par exemple Dodd et Deeds sont arrivés à une solution analytique pour des configurations axisymétriques en utilisant des techniques d'intégration qui reposent sur le principe de séparation des variables. D'autres travaux ont été effectués dans la même direction : une bobine avec noyau magnétique et une bobine inclinée sur une pièce plane. Malgré ces travaux, le calcul d'une solution analytique pour une configuration électromagnétique donnée est souvent compliqué, voire impossible. En effet, pour chaque configuration qu'on désirera traiter (type de défaut, bord de pièce...) il faudra repartir des

équations de l'électromagnétisme et remettre en œuvre une nouvelle démarche de calcul parfois très complexe ou insolvable.

Par conséquent, il y a très souvent besoin de recourir à des méthodes numériques pour arriver à une solution approchée du problème à résoudre [20].

### **III.7.2. Méthodes numériques**

Les phénomènes qui décrivent le comportement des dispositifs électromagnétiques sont représentés par des EDP. En général, la résolution de ces équations se fait à l'aide des méthodes analytiques ou des méthodes numériques. Pour des géométries plus complexes, on a recouru à des méthodes numériques qui font appel à des techniques de discrétisation. En effet, elles transforment les EDP du champ en un système d'équations algébriques compte tenu des conditions aux limites. La solution fournie une approximation de l'inconnue en différents points situés aux nœuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation. Les principales méthodes numériques sont : La méthode des différences finies (MDF), la méthode des volumes finis (MVF), la méthode des intégrales de frontières (MIF) et la méthode des éléments finis (MEF).

#### **III.7.2.1. Méthode des différences finies (MDF)**

La méthode des différences finies est relativement simple de mise en œuvre, mais présente l'inconvénient d'avoir une faible qualité d'approximation des variables et l'incapacité de modéliser des géométries de forme complexe. Par ailleurs, elle exige un schéma de maillage très fin, qui peut ainsi se traduire par un coût de calcul prohibitif. La méthode est basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences. Le domaine d'étude est découpé au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrit pour chaque nœud du maillage. La méthode est difficilement applicable aux domaines à géométrie complexe, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières régulières tels que les carrés et les rectangles [21].

#### **III.7.2.2. Méthode des éléments finis (MEF)**

Sans doute ce sont les éléments finis qui occupent une grande place dans la modélisation. Contrairement à la MDF, les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes, ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul par la prise en compte de différents types de fonctions d'interpolations des variables. La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires de forme tétraédrique dans lesquelles on représente la

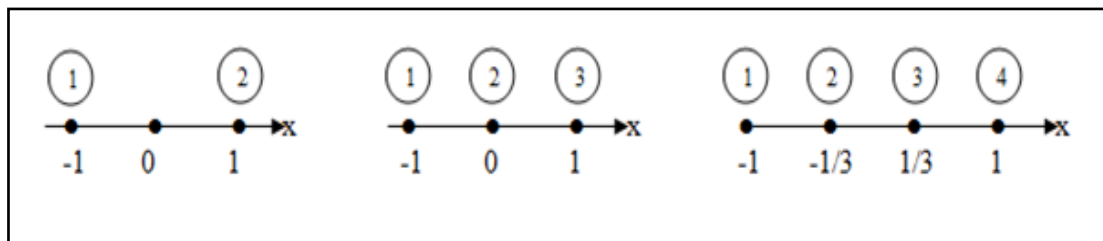
grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. La méthode conduit à des systèmes algébriques de grande taille, et par conséquent nécessite une mémoire importante des calculateurs. L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la MEF soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important [21].

### III.7.2.3. Discrétisation du domaine

Pour un domaine unidimensionnel qui est en fait une ligne droite ou curviligne, les éléments sont souvent de petits segments interconnectés entre eux pour former tout le domaine. Pour un domaine bidimensionnel, les éléments sont constitués des triangles ou rectangles. Dans le cas de problèmes tridimensionnels, le domaine peut être subdivisé en éléments tétraédriques, prismatiques, hexaédriques. Ces éléments nécessitent une description complète de leurs nœuds.

Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

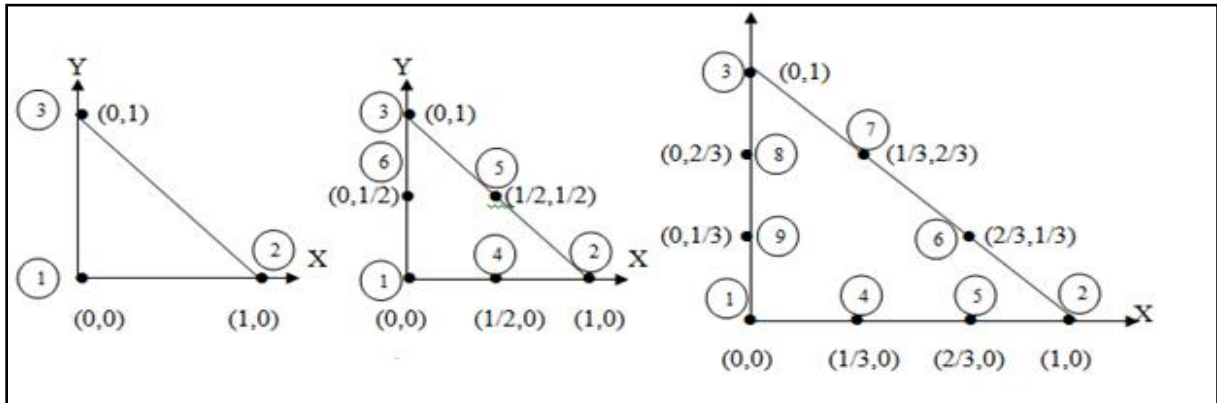
- Eléments à une dimension



(a) Linéaire (2 nœuds) ; (b) Quadratique (3 nœuds) ; (c) Cubique (4 nœuds)

Fig.III.1. Discrétisation des éléments à une dimension

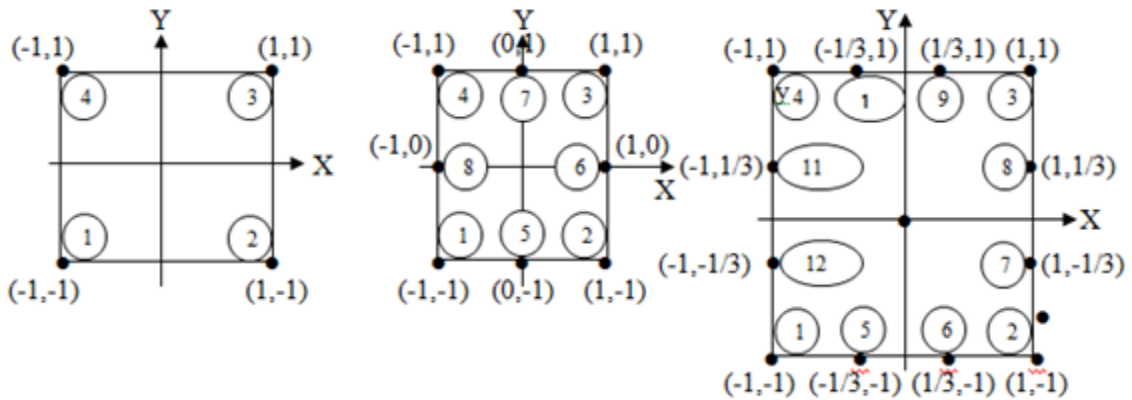
- Eléments à deux dimensions
- ✓ Eléments triangulaires



(a) Linéaire (3 nœuds) ; (b) Quadratique (6 nœuds) ; (c) Cubique (9 nœuds)

Fig.III.2. Discrétisation des éléments triangulaires

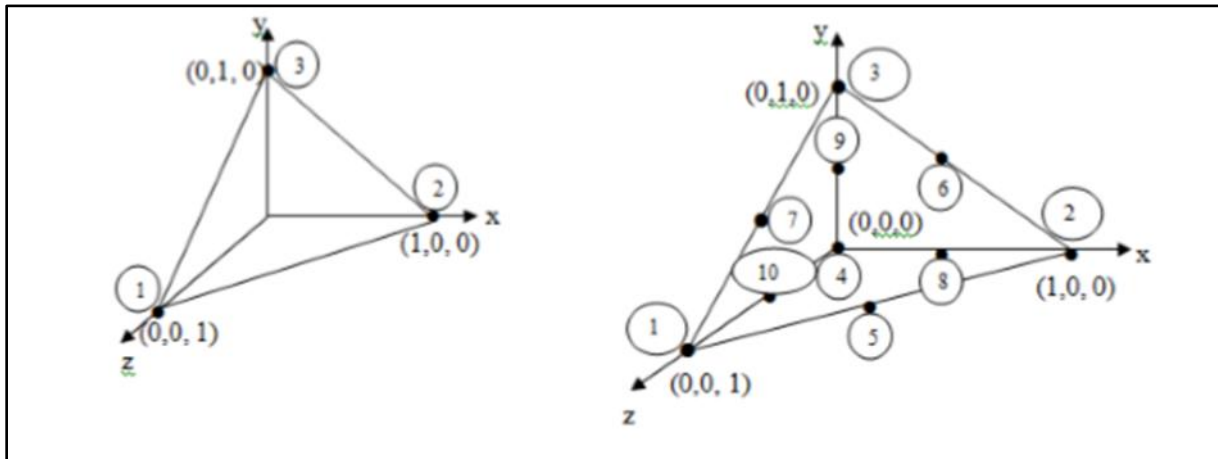
- ✓ Eléments carrés



(a) Linéaire (4 nœuds) ; (b) Quadratique (8 nœuds) ; (c) Cubique (12 nœuds)

Fig.III.3. Discrétisation des éléments carrés

➤ Éléments à trois dimensions



(a) Linéaire (3 nœuds) ; (b) Quadratique (10 nœuds)

Fig.III.4. Discretisation des éléments à trois dimensions

### III.8. Approximation par la MEF

La méthode des éléments finis a largement été présentée dans la littérature scientifique. Elle consiste en une double discrétisation : une discrétisation spatiale (maillage du domaine) et une discrétisation des champs. La discrétisation spatiale permet de définir les fonctions de base (scalaires ou vectorielles) donnant naissance aux sous-espaces d'approximation des espaces continus (espaces dans lesquels se trouvent les champs). La discrétisation des champs consiste en la discrétisation de l'équation différentielle et des conditions aux limites pour obtenir un système algébrique où le vecteur solution de ce système contient les valeurs approximatives des champs sur les points du maillage.

De façon générale, les problèmes de magnétodynamique formulés sur un domaine  $\Omega$  de frontière  $\Gamma$  peuvent s'exprimer sous la forme suivante :

$$L(u) = f \quad \text{dans } \Omega \quad (\text{III.54})$$

$$M(u) = g \quad \text{sur } \Gamma \quad (\text{III.55})$$

Où  $L$  et  $M$  sont des opérateurs différentiels,  $f$  et  $g$  des fonctions connues et  $u$  la variable (inconnue) recherchée.

L'équation (III.33) constitue la "forme forte" de la formulation dont la résolution directe est souvent difficile, vu l'ordre des dérivations élevé et le caractère discontinu des variables considérées.

Pour résoudre numériquement ce problème, il faut l'écrire sous une forme intégrale : la "forme faible". On l'obtient soit par la méthode de Galerkin, soit par la minimisation d'une fonctionnelle comme par exemple l'énergie du modèle physique. Ces deux solutions donnent le même résultat :

$$F(u) = \int_{\Omega} N \cdot (L(u) - f) d\Omega = 0 \quad (\text{III.56})$$

Où N est la fonction de pondération scalaire ou vectorielle appartenant au même espace fonctionnel des solutions admissibles. Cette équation traduit le fait que si u est la solution du problème (L(u)-f) alors sa projection sur l'espace des fonctions qui la décrivent N est globalement nulle sur le domaine de résolution  $\Omega$ .

### III.9. Calcul de la variation d'impédance

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

- La mesure de l'induction, généralement par effet Hall
- La mesure de l'impédance du capteur

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

Notre choix s'est porté sur le calcul de l'impédance, étant donné que nos expériences sont basées sur la mesure de la variation d'impédance de la bobine. On doit disposer tout d'abord d'un modèle qui nous permet de calculer le champ électrique en présence et en absence du défaut. Il est nécessaire de trouver ensuite une méthode pour calculer la variation d'impédance engendrée par la présence de défaut. L'impédance de la sonde est appelée Z et sa variation  $\Delta Z$ .

#### III.9.1. Impédance à travers les énergies électromagnétiques

Le comportement électromagnétique de l'ensemble bobine - matériau à contrôler peut-être étudié au moyen d'une analogie électrique : un circuit constitué de deux bobines couplées de manière inductive est équivalent à un seul circuit dont les paramètres sont ramenés à la bobine source. D'après cette équivalence, l'énergie magnétique du système (capteur - pièce) est égale à l'énergie magnétique du circuit équivalent. Il en est de même pour l'énergie dissipée par effet Joule [13].

La résistance  $R$  vue par le capteur peut être évaluée à travers le calcul de la puissance perdue par effet Joule, soit :

$$P_J = \iiint_V \frac{j^2}{\sigma} dv \quad (\text{III.57})$$

$$P_J = RI^2 \quad (\text{III.58})$$

D'où :

$$R = \frac{N^2}{S^2 j^2} P_J \quad (\text{III.59})$$

De même l'énergie magnétique emmagasinée nous permet de déduire l'inductance du système.

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_V \frac{B^2}{\mu} dv \quad (\text{III.60})$$

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{III.61})$$

D'où :

$$L = \frac{2N^2}{S^2 j^2} W_m \quad (\text{III.62})$$

C'est cette méthode qui a été adoptée pour nos calculs d'impédance, elle permet de calculer la résistance et l'inductance (réactance) d'une bobine de manière extrêmement simple et rapide même si cette bobine est en présence d'un matériau réactif. Néanmoins, cette méthode est applicable uniquement aux capteurs double fonctions, c'est-à-dire aux capteurs faisant office en même temps d'émetteur et de récepteur.

### III.10. Conclusion

Comme le CND par CF fait partie des phénomènes électromagnétiques, ce chapitre a été consacré aux notions de base de l'électromagnétisme ainsi qu'aux équations de Maxwell.

Le problème traité dans notre application est de nature tridimensionnel, de géométrie complexe. De ce fait nous avons opté pour une formulation magnétodynamique  $\vec{T}$ - $\Psi$  et une résolution numérique par éléments finis.

# **Chapitre IV**

## **Applications et résultats**



### IV.1. Introduction

Parmi tous les problèmes rencontrés dans le CND aéronautique, la fatigue mécanique est à l'origine de l'apparition de défauts. Les constructeurs aéronautiques s'attachent lors de la conception de leurs appareils à dimensionner chacune des pièces de sorte qu'elles puissent supporter les contraintes mécaniques d'une utilisation normale durant tout un cycle de vie sans voir apparaître de défauts de fatigue. Or les contraintes économiques tendent à accroître la durée de vie des appareils au-delà de leur premier cycle [22]. Dans ce cas, pour un second voire un troisième cycle de vie, il devient nécessaire, par mesure de sécurité, d'exécuter des contrôles d'usure plus approfondis. C'est le cas en ce qui concerne les ferrures d'attache de voilure d'avions de chasse. Des simulations et tests de fatigue mécanique menés par les constructeurs d'avions et les organismes d'entretien ont permis d'identifier un risque éventuel d'apparition de défauts de type fissures de fatigue, ainsi que leurs caractéristiques.

C'est cette problématique qui fait l'objet de notre travail, où nous nous sommes intéressés à la modélisation 3D d'une configuration représentant un système de détection de fissures qui apparaissent dans les poutres de dérive des MI 24.

### IV.2. Description de la pièce contrôlée

L'objet concerné par le contrôle est une pièce qui sert de support à la boîte de transmission finale sur la poutre de dérive d'un MI 24, elle est fabriquée en aluminium et composée de neuf trous pour boulons de fixation de la boîte de transmission finale. La zone à proximité des boulons est sujet de fissures de type radial ou longitudinal.



Fig.IV.1. Support de la boîte de transmission arrière

Les fissures sont définies comme étant des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur/largeur. L'image ci-dessous montre une fissure de type longitudinal.



Fig.IV.2. Fissure longitudinale

## **Partie I : Simulation par la méthode des éléments finis**

### **IV.I.1. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell**

Ansys-Maxwell 3D est un logiciel leader dans la simulation pour la conception, l'analyse et l'optimisation 2D et 3D des dispositifs électromagnétiques, tels que les machines électriques tournantes, les transformateurs, les actionneurs, des isolateurs, des bobines...etc. Ansys-Maxwell utilise l'approche par éléments finis pour résoudre des équations de Maxwell et le calcul du champ électromagnétique dans les structures avec la prise en compte des conditions aux limites [23].

L'algorithme de résolution adapté par logiciel est donné par la figure (IV.3) :

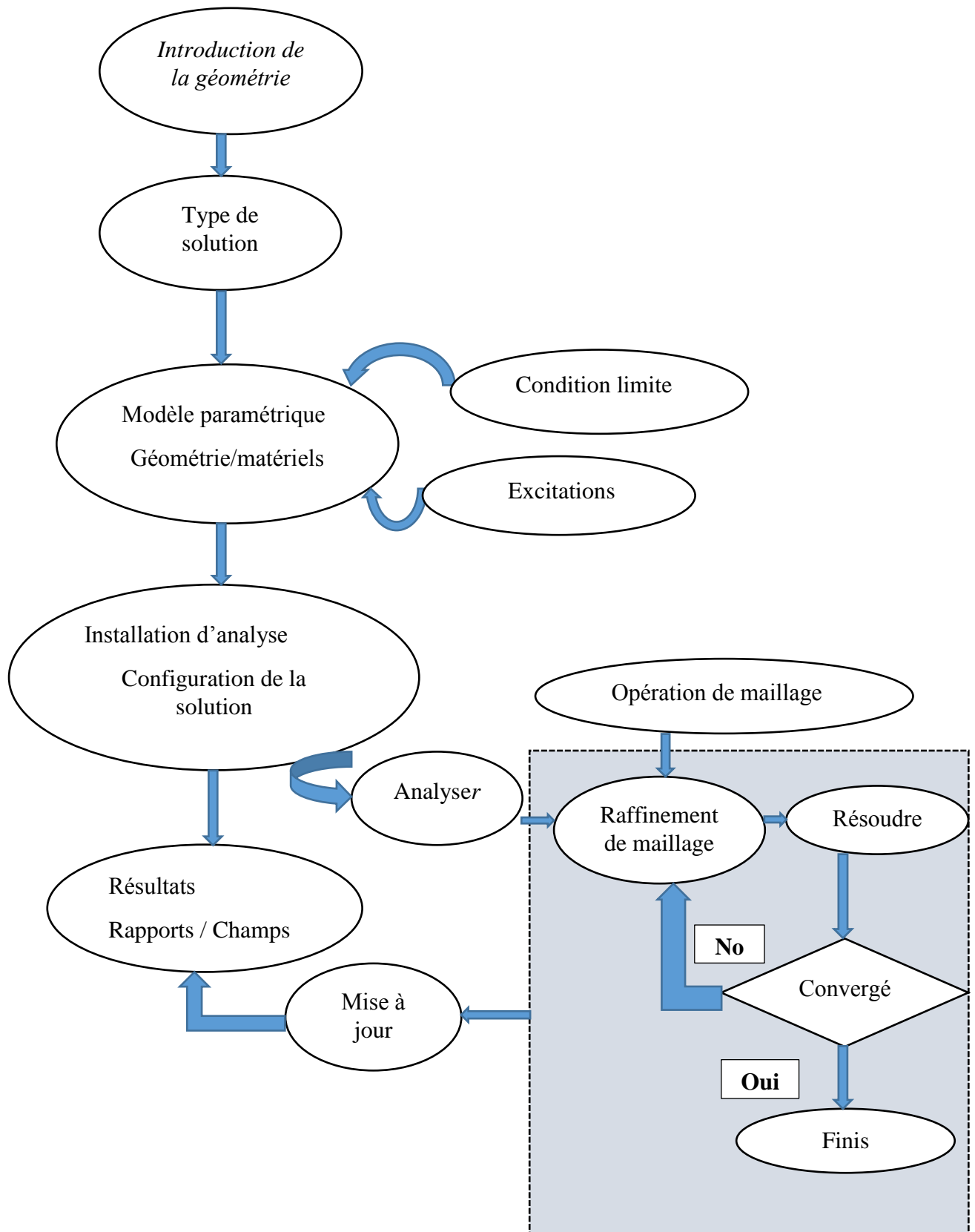


Fig.IV.3. Organigramme de simulation sous Ansys-Maxwell

### IV.I.2. Description de la configuration simulée

Il s'agit d'une bobine à air qui scanne la zone limitrophe aux boulons du support de fixation. Nous avons effectué des simulations de l'impédance de la bobine pour différents paramètres du système tels que : Les dimensions des fissures, la fréquence d'excitation du capteur, le lift-off... etc.

La figure (IV.4) vue de la configuration capteur/pièce sous l'environnement Ansys-Maxwell.

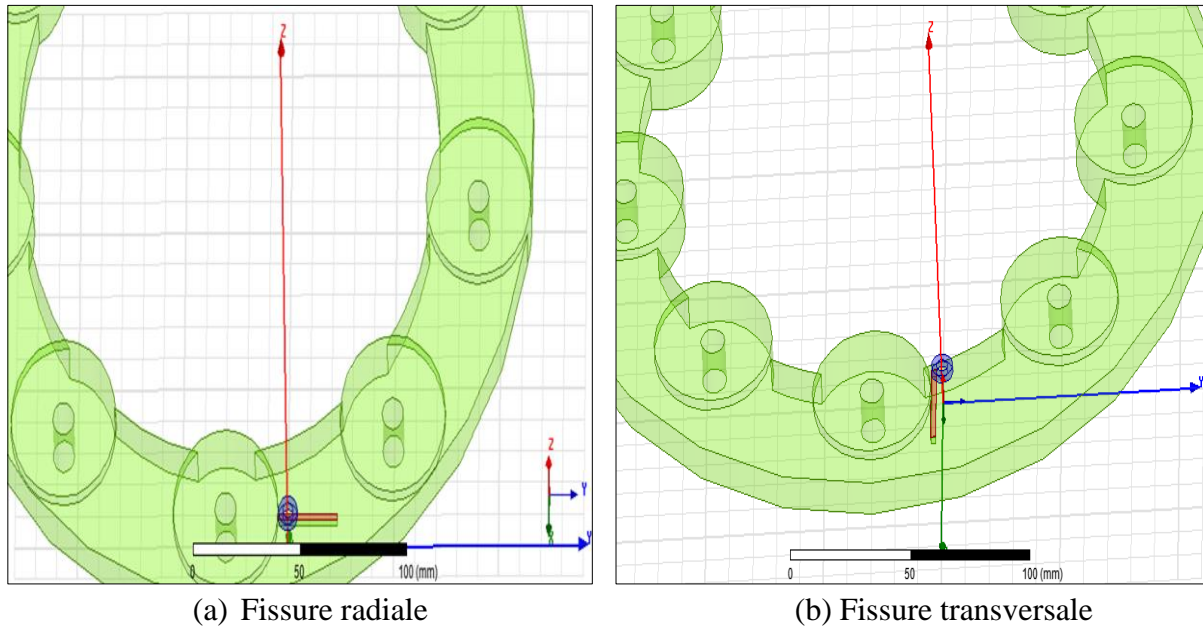


Fig.IV.4. Capteur/pièce sous l'environnement Ansys-Maxwell

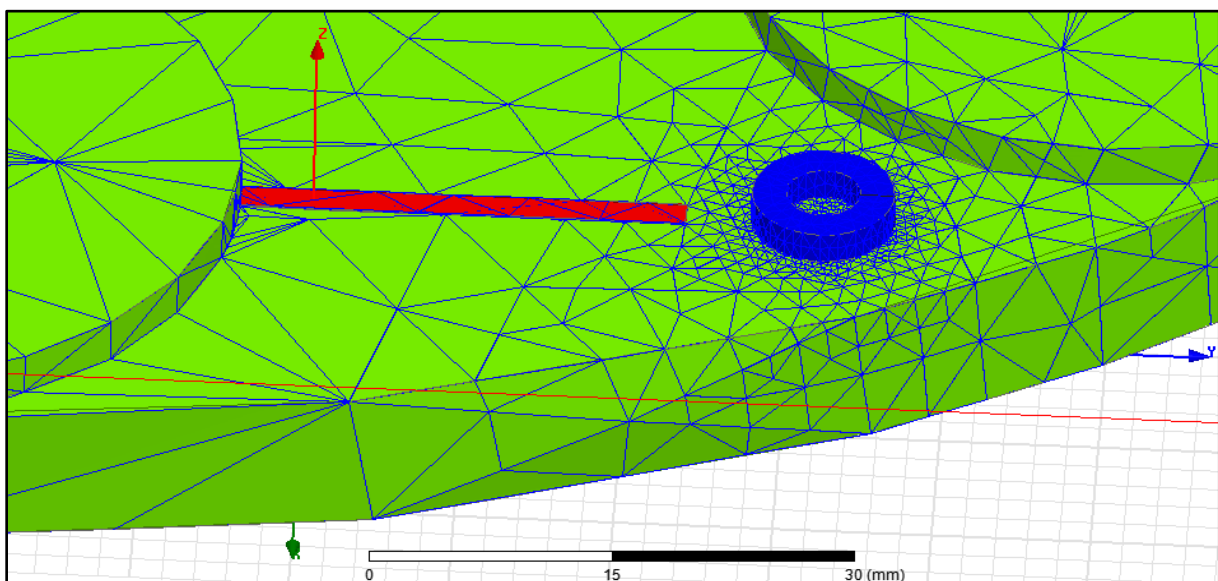


Fig.IV.5. Maillage du domaine

Les caractéristiques physiques et géométriques du système sont données par le Tableau (IV.1)

Paramètres	Valeurs
<b>Capteur</b>	
Rayon intérieur	2.35 mm
Rayon extérieur	4.5 mm
Hauteur	2.2 mm
Lift-off	0.13 mm
Nombre de spires	170
Fréquence	100 kHz
<b>Piece</b>	
Rayon intérieur	100 mm
Rayon extérieur	145 mm
Hauteur	10 mm
Conductivité électrique	35 10 <sup>6</sup> S/m
<b>Trous de boulon</b>	
Rayon intérieur	5 mm
Rayon extérieur	25 mm
Hauteur	13 mm
<b>Fissure</b>	
Longueur	28 mm
Largeur	2 mm
Profondeur	2 mm

Tab.IV.1. Tableau des dimensions

Nous avons effectué des scans unidirectionnels suivant l'axe de la fissure. A chaque déplacement du capteur un maillage et un calcul éléments finis sont réalisés pour calculer l'impédance correspondante.

La variation de l'impédance est donnée par :

$$\Delta Z = Z_f - Z_s$$

Où  $Z_f$  et  $Z_s$  représentent respectivement l'impédance du capteur en présence et en absence de la fissure.

Tous les résultats sont normalisés par rapport à la valeur de l'impédance de la sonde dans l'air  $Z_0$  [24].

### IV.I.3. Défaut radial

#### IV.I.3.1. Variation de la profondeur de défaut

La figure (IV.6) représente la variation de l'impédance en fonction de la position de capteur pour différentes profondeurs de la fissure.

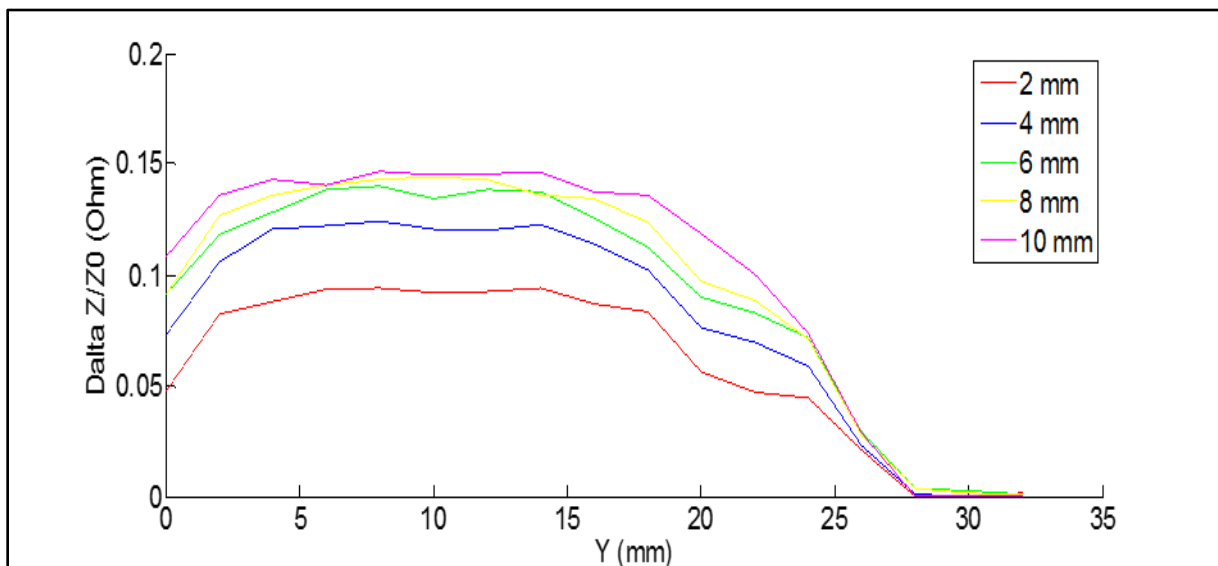


Fig.IV.6. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut

A travers cette figure, nous voyons clairement que l'augmentation de profondeur de défaut conduit à une augmentation de la variation de l'impédance du capteur.

### IV.I.3.2. Variation de la longueur

Dans un second temps, nous avons varié la longueur de la fissure. La figure (IV.7) représente la variation de l'impédance en fonction de la position de capteur.

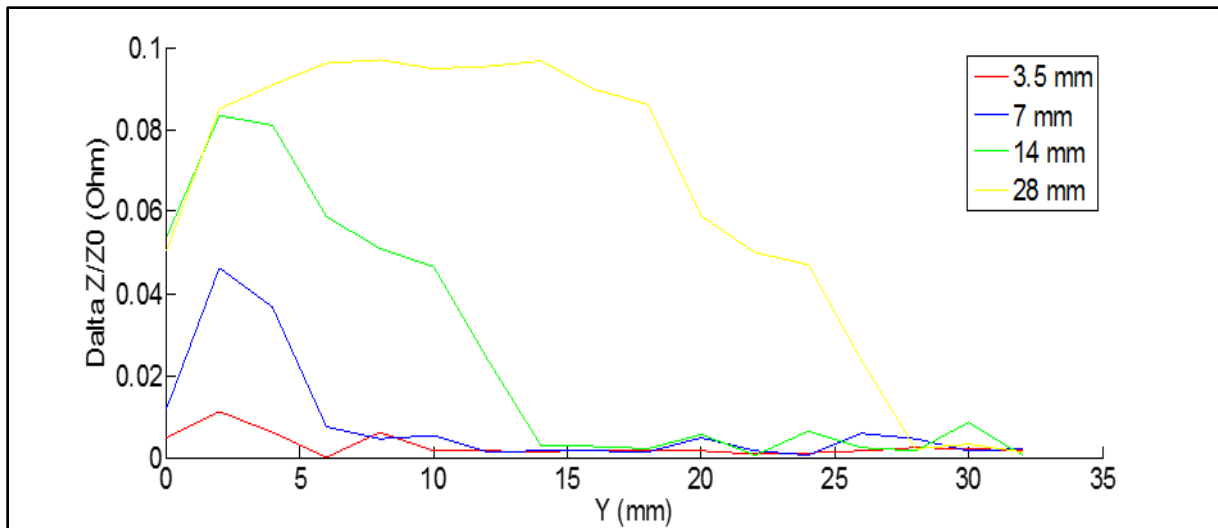


Fig.IV.7. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs du défaut

La figure montre que l'augmentation de longueur du défaut conduit à une augmentation de la variation de l'impédance ce qui signifie que le signal CF dépend fortement de la longueur de défaut.

### IV.I.3.3. Variation de la largeur

La troisième validation est relative à la variation de la largeur de la fissure. Les résultats obtenus sont donnés par la figure (IV.8).

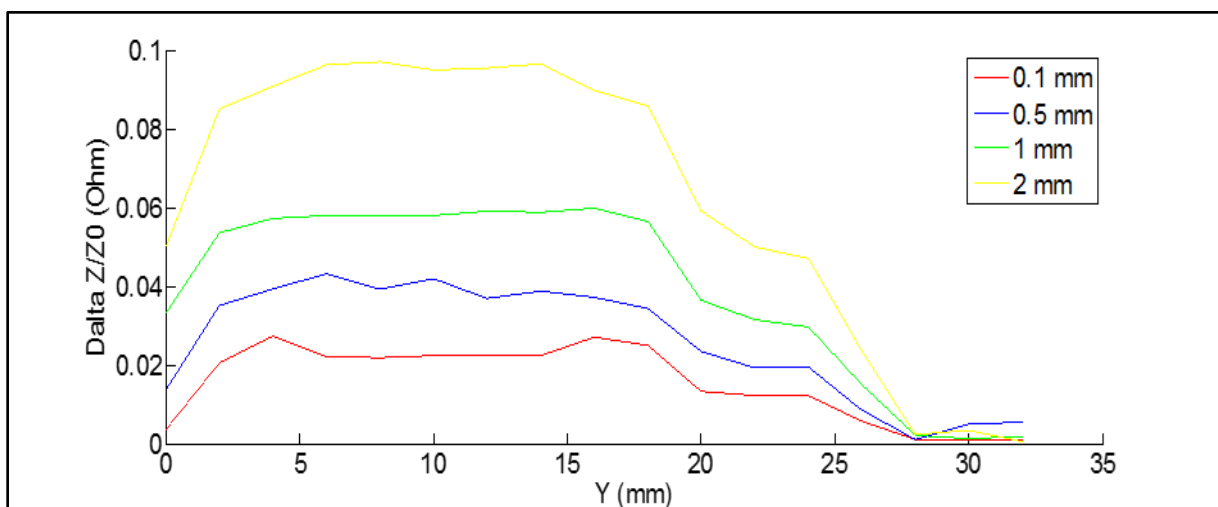


Fig.IV.8. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut

L'augmentation de la largeur de défaut conduit à une augmentation de la variation de l'impédance. Donc la largeur de défaut a un impact sur la variation de l'impédance.

#### IV.I.3.4. Variation de lift-off

La figure (IV.9) représente la variation de l'impédance du capteur en fonction de différents lift-off.

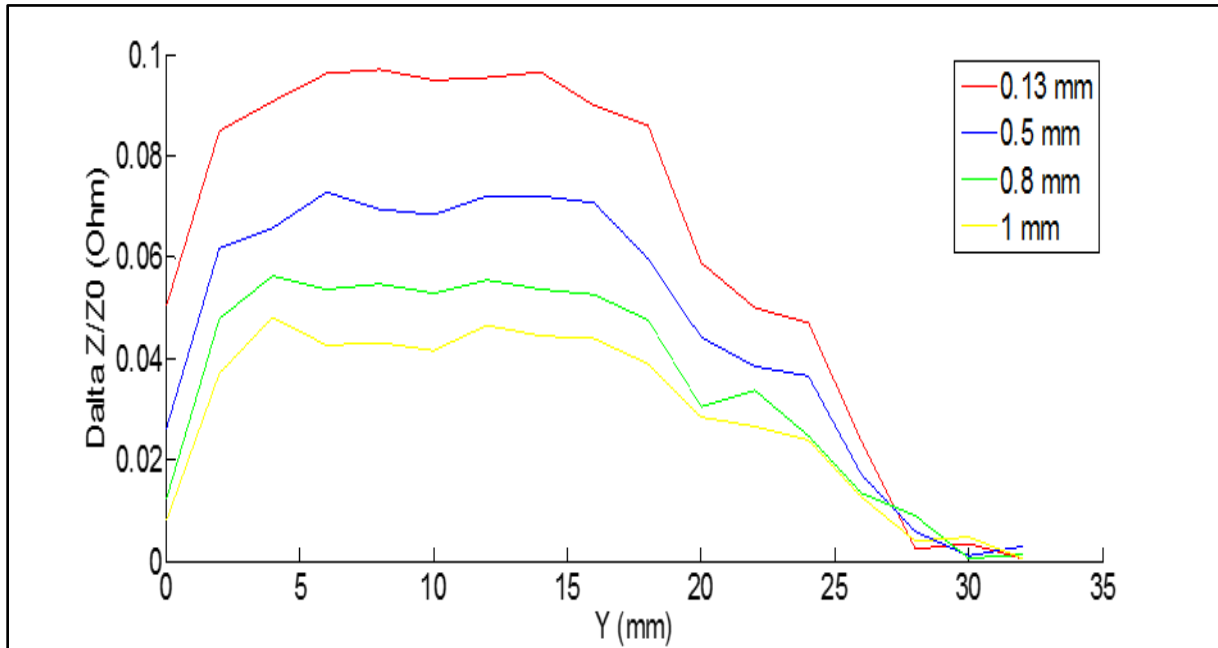


Fig.IV.9. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents lift-off

Nous remarquons que la variation de l'impédance décroît avec l'augmentation de lift-off, lorsque le lift-off augmente l'interaction magnétique entre le capteur et la pièce diminue ce qui fait baisser la qualité du signal.

#### IV.I.3.5. Variation de la fréquence

Dans cette simulation nous avons changé la fréquence d'excitation du capteur. Les résultats sont donnés par la figure (IV.10).



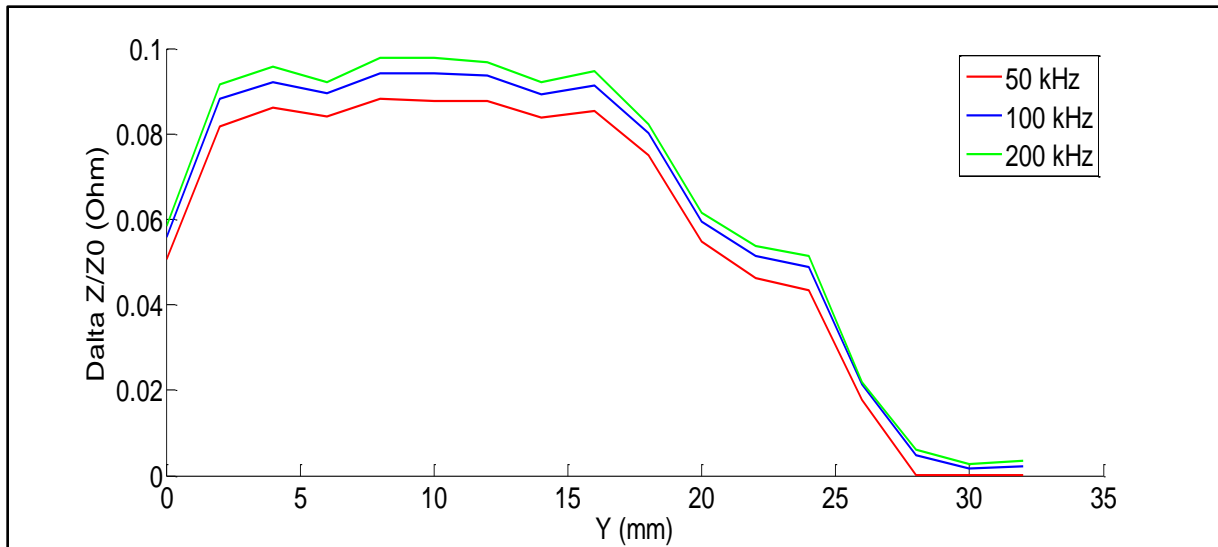


Fig.IV.10. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences d'alimentation du capteur

A travers cette figure, nous voyons que la variation de l'impédance augmente avec l'augmentation de la fréquence.

#### IV.I.3.6. Défaut enfoui

Dans cette application nous avons considéré les défauts enfouis. Nous avons traité deux cas de fissures sub-surfaciques avec des profondeurs d'enfouissement de 0.25 mm et 0.5 mm, les résultats obtenus sont donnés dans les figures ci-dessous :

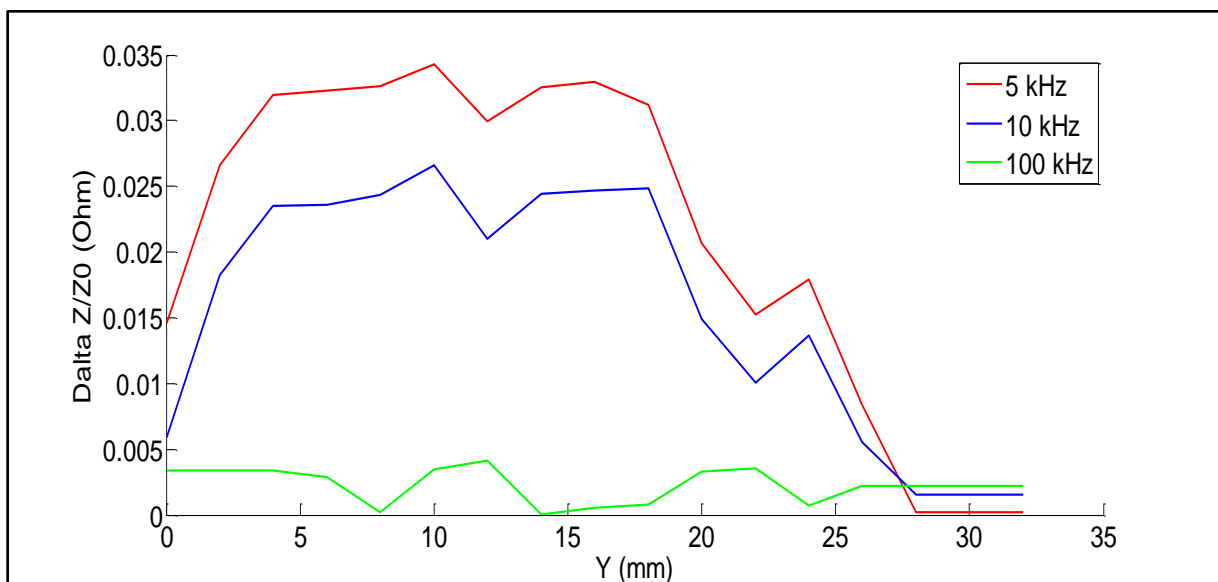


Fig.IV.11. Variation de l'impédance pour une profondeur d'enfouissement 0.25 mm en fonction de différentes fréquences

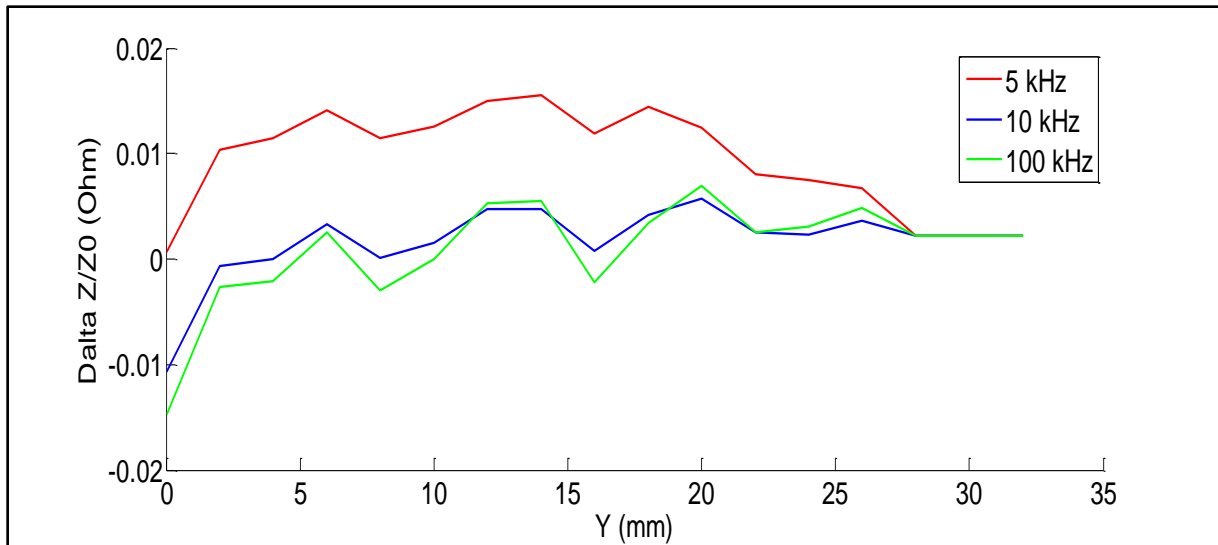


Fig.IV.12. Variation de l'impédance pour une profondeur d'enfouissement 0.5 mm en fonction de différentes fréquences

D'après les résultats nous voyons clairement que plus le défaut est enfoui plus le signal est faible. Afin de remédier à ce problème nous avons baissé la fréquence d'alimentation pour augmenter la profondeur de pénétration du champ et atteindre la zone du défaut.

#### IV.I.3.7. Densité des courants induits

Les figures (IV.13) (IV.14) et (IV.15) montrent la cartographie des CF en fonction de la position du capteur. Les trois images montrent bien l'altération de la circulation de ces courants en la présence de la fissure ce qui va modifier la répartition du champ réfléchi et donc l'impédance du capteur.

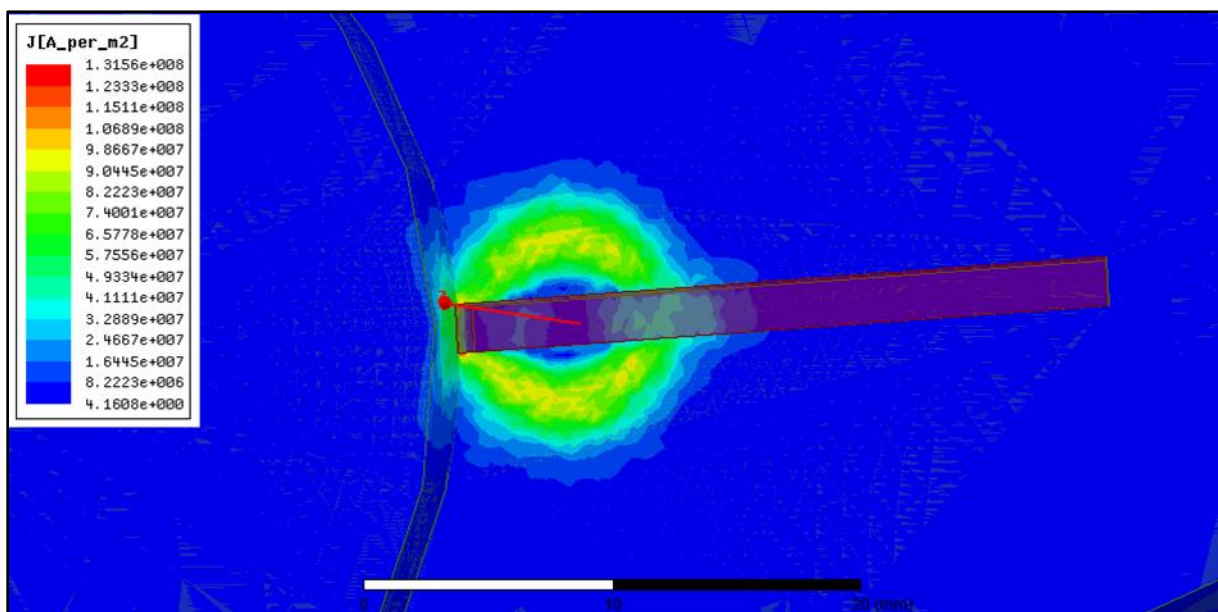


Fig.IV.13. Densité de courant au début de défaut

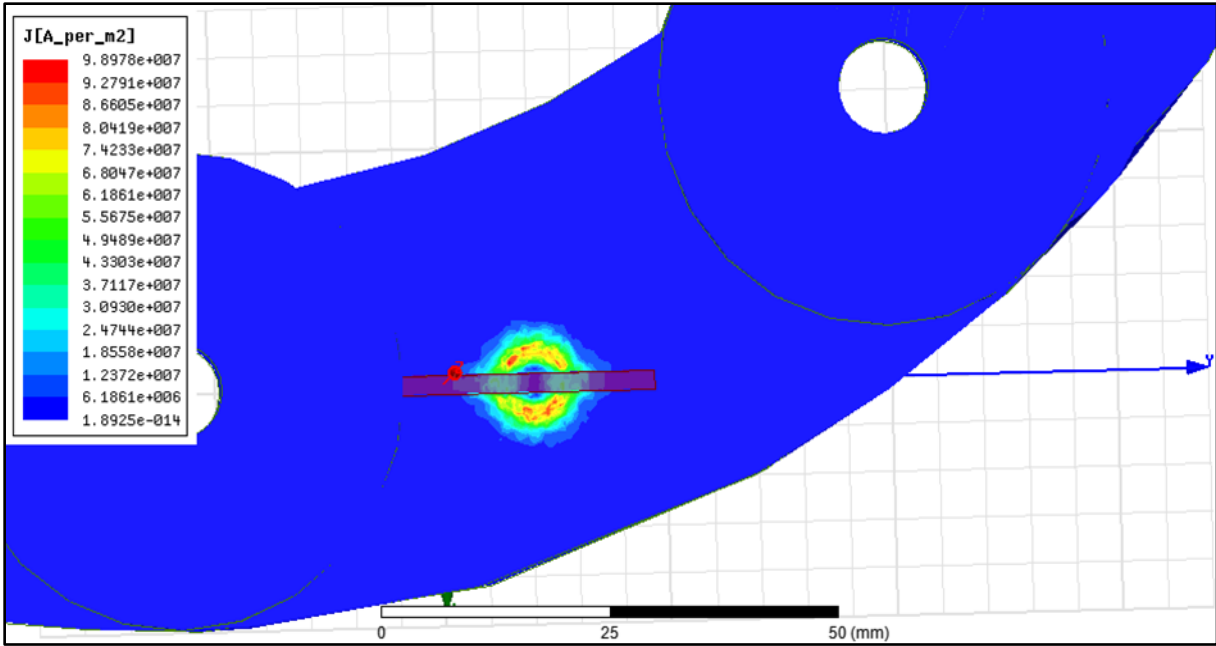


Fig.IV.14. Densité de courant au milieu de défaut

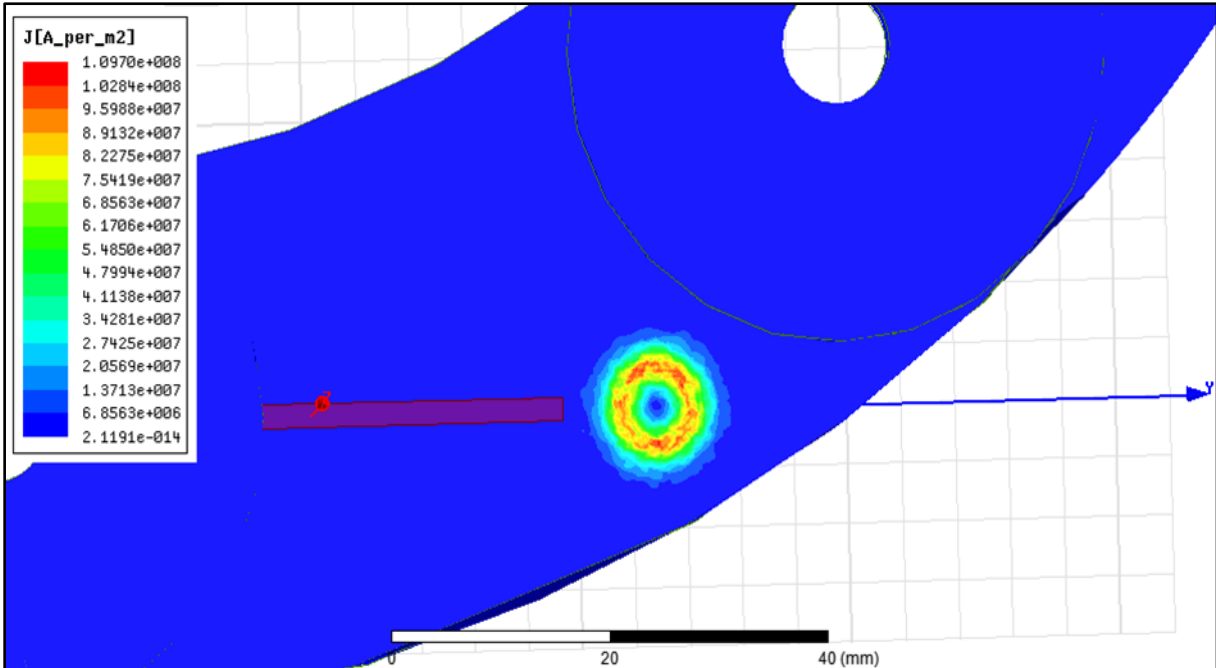


Fig.IV.15. Densité de courant dans la zone saine

#### IV.I.4. Défaut transversal

Nous avons re-simuler notre système en considérant cette fois-ci une fissure transversale, tous les scénarios adoptés pour la fissure radiale ont été repris pour ce cas de figure. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous.

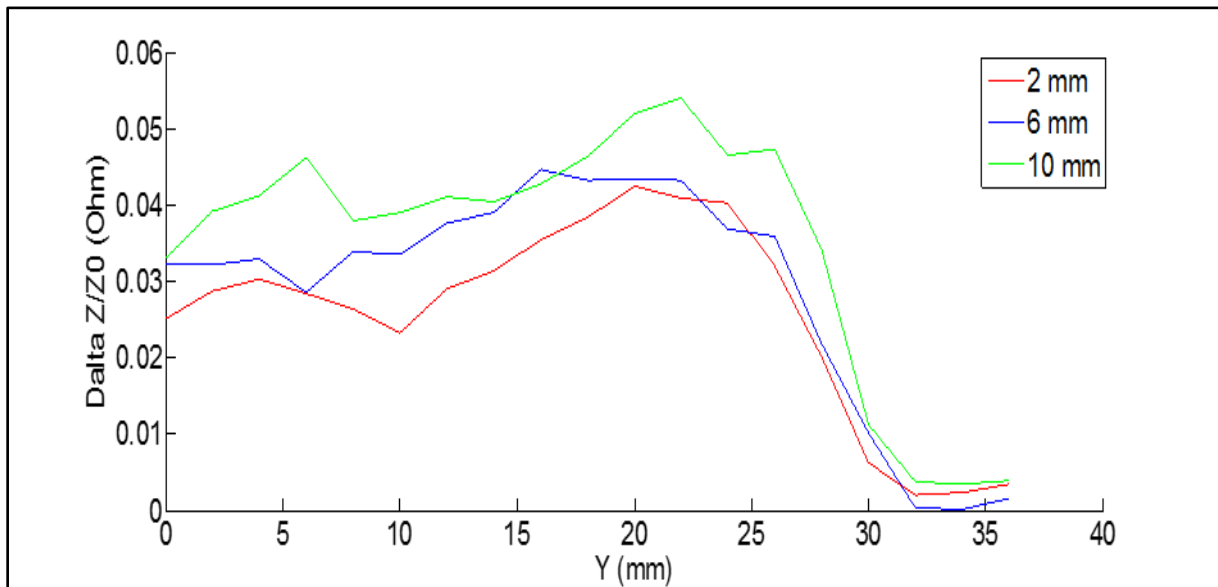


Fig.IV.16. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut

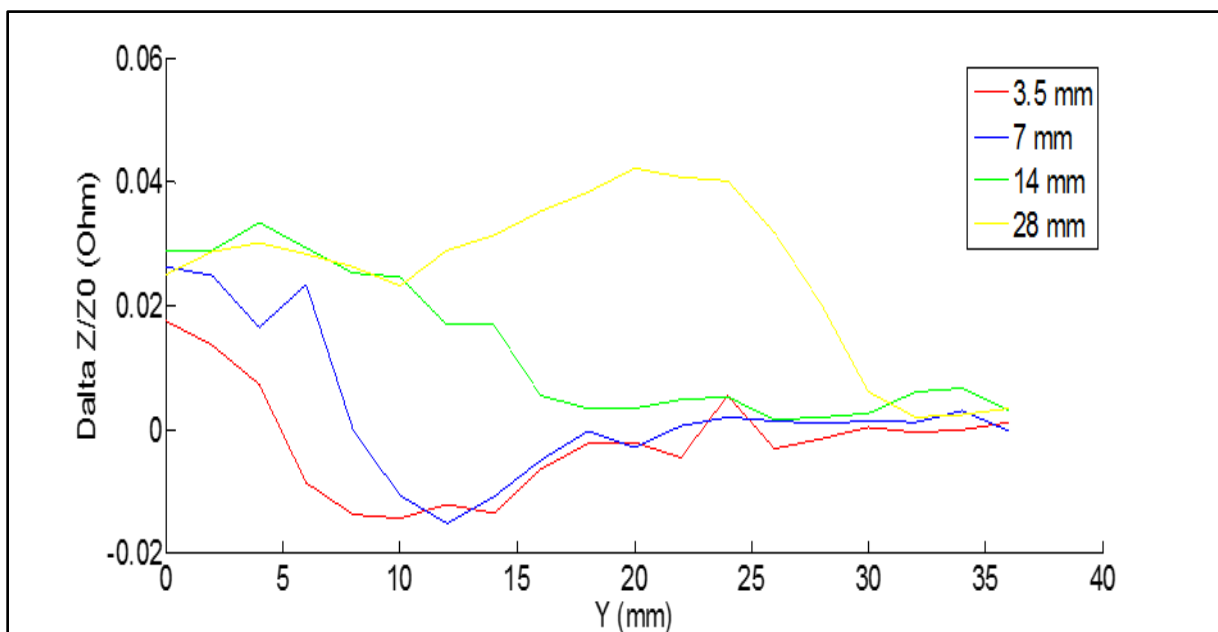


Fig.IV.17. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs du défaut

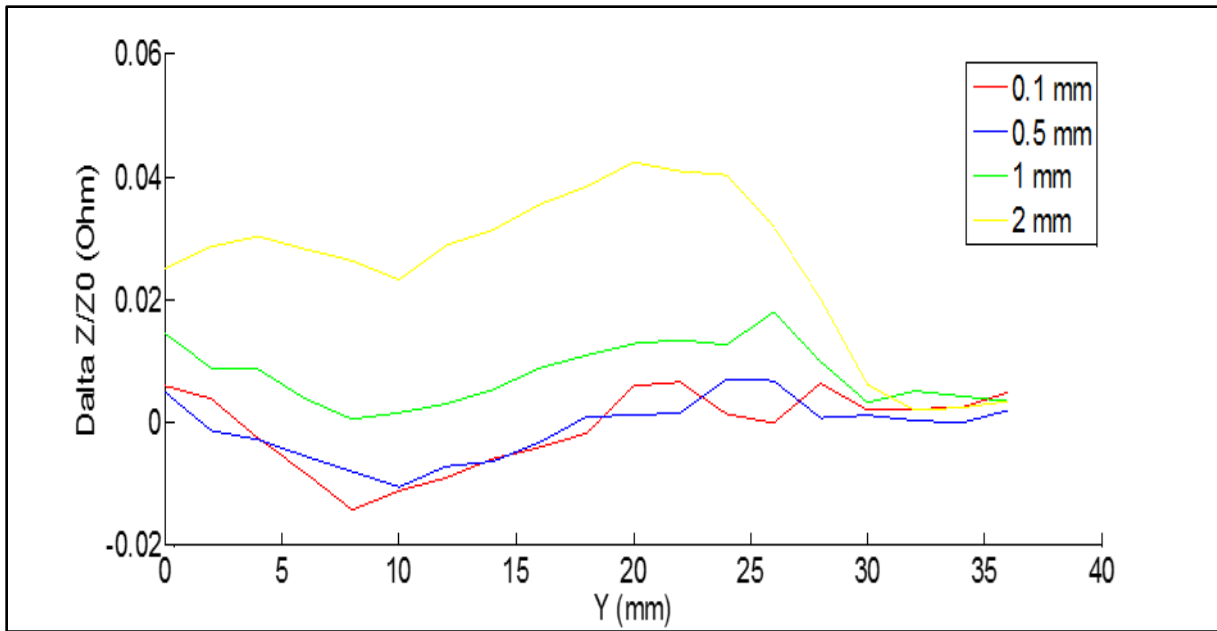


Fig.IV.18. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes largeurs du défaut

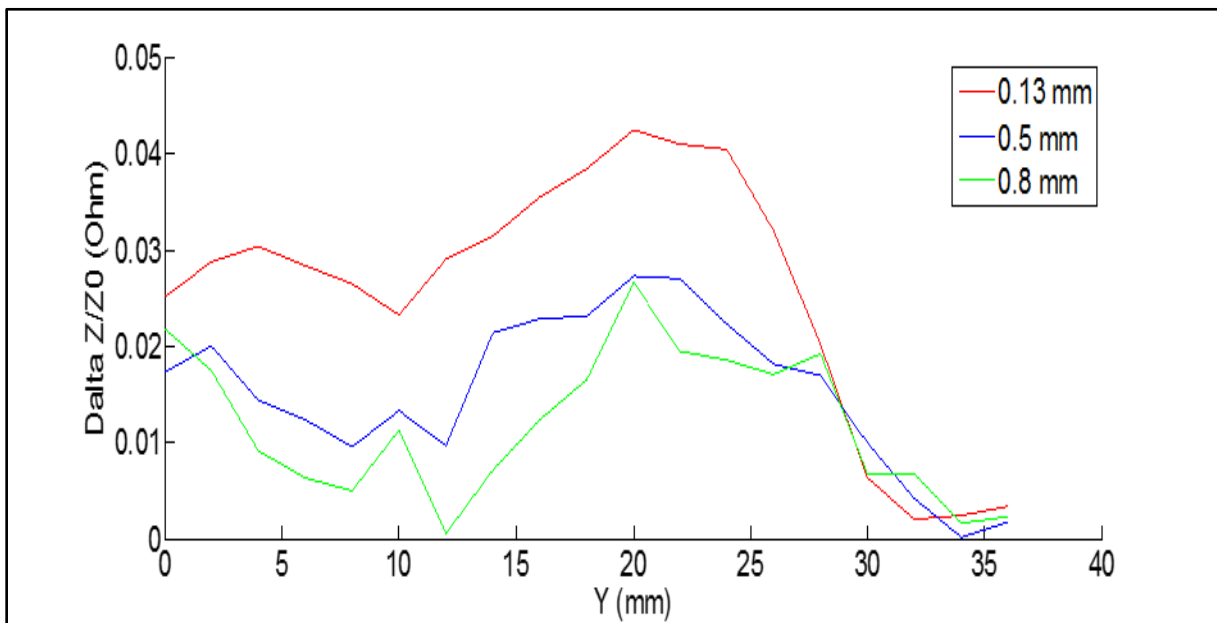


Fig.IV.19. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents lift-off

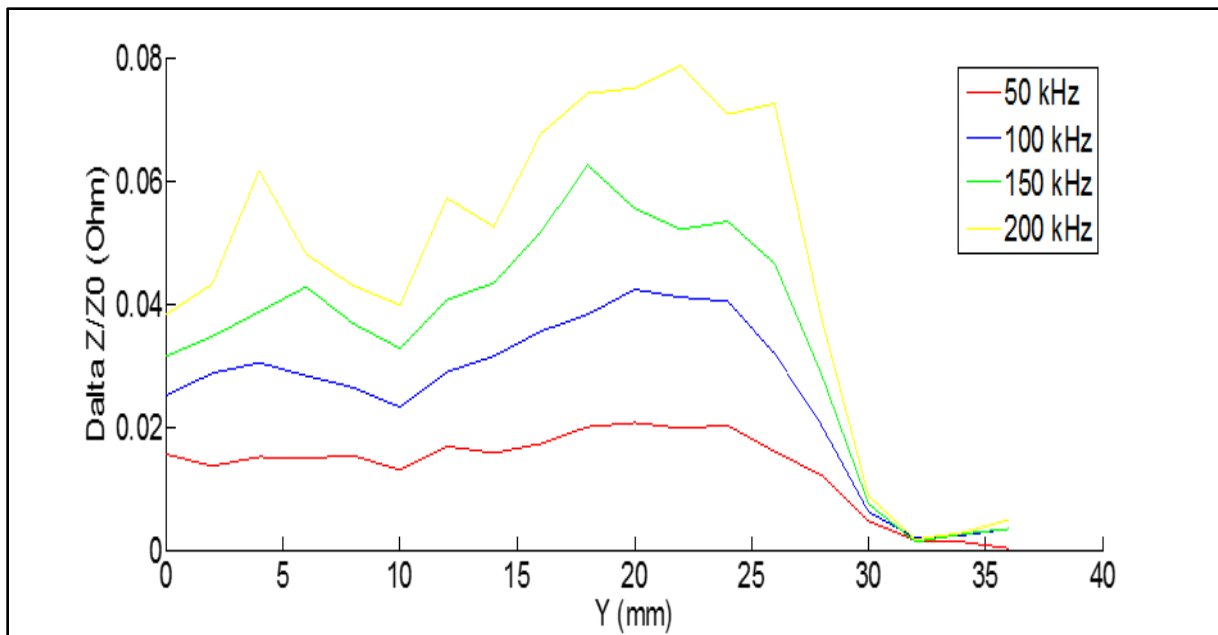


Fig.IV.20. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences d'alimentation du capteur

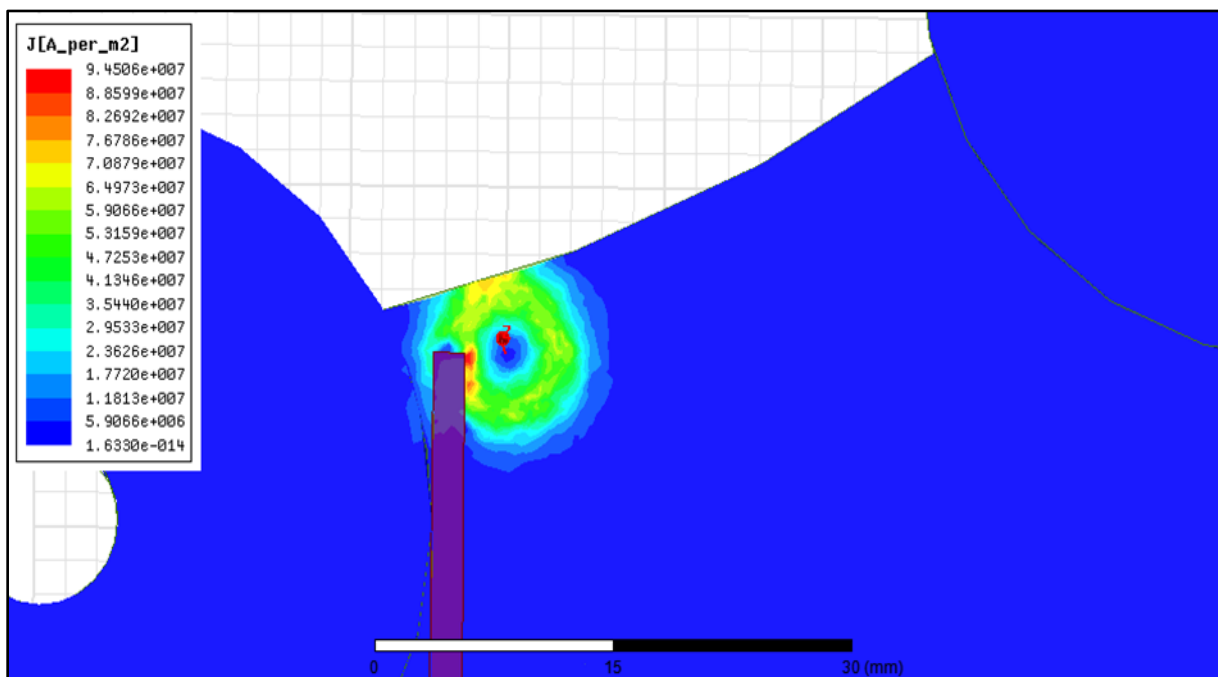


Fig.IV.21. Densité de courant au début de défaut

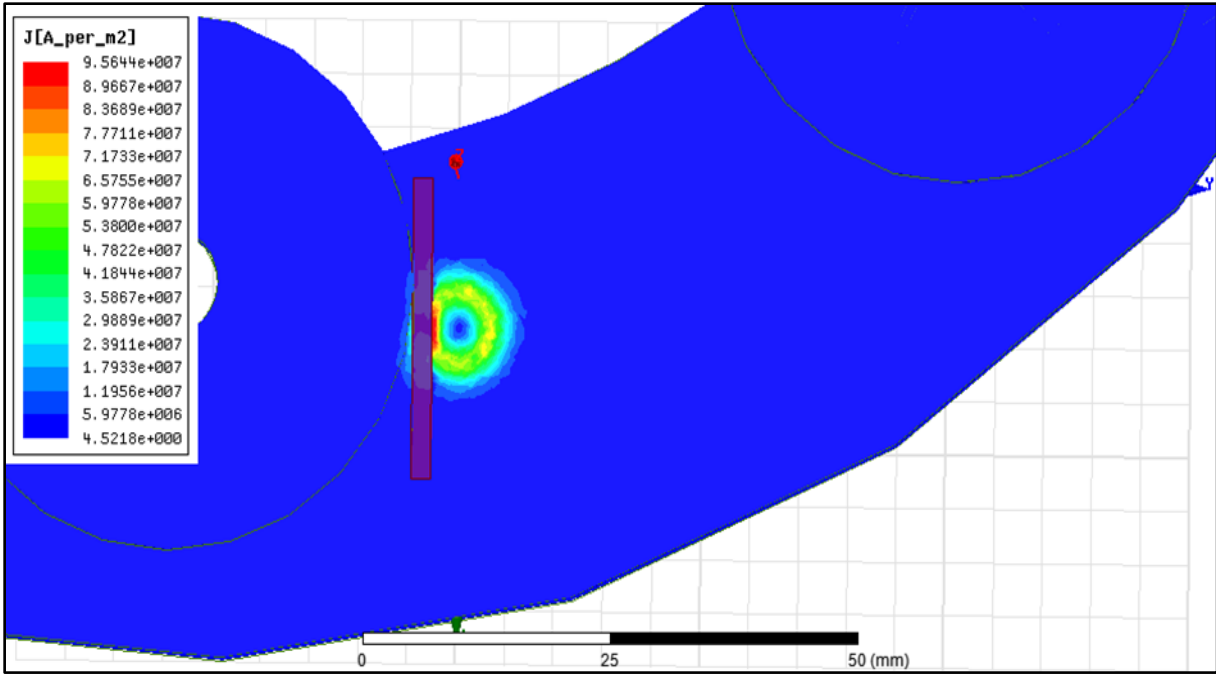


Fig.IV.22. Densité de courant au milieu de défaut

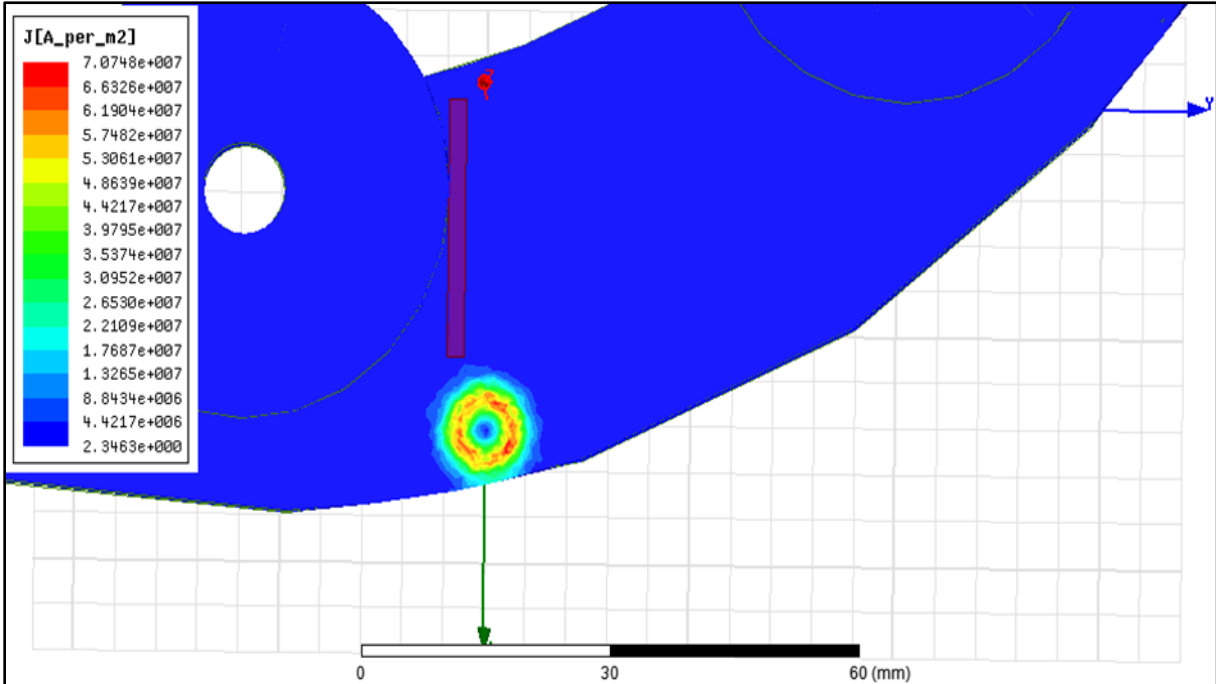


Fig.IV.23. Densité de courant dans la zone saine

#### IV.I.5. Comparaison entre défaut radial et le défaut transversal

- Pour une longueur  $L=28\text{mm}$

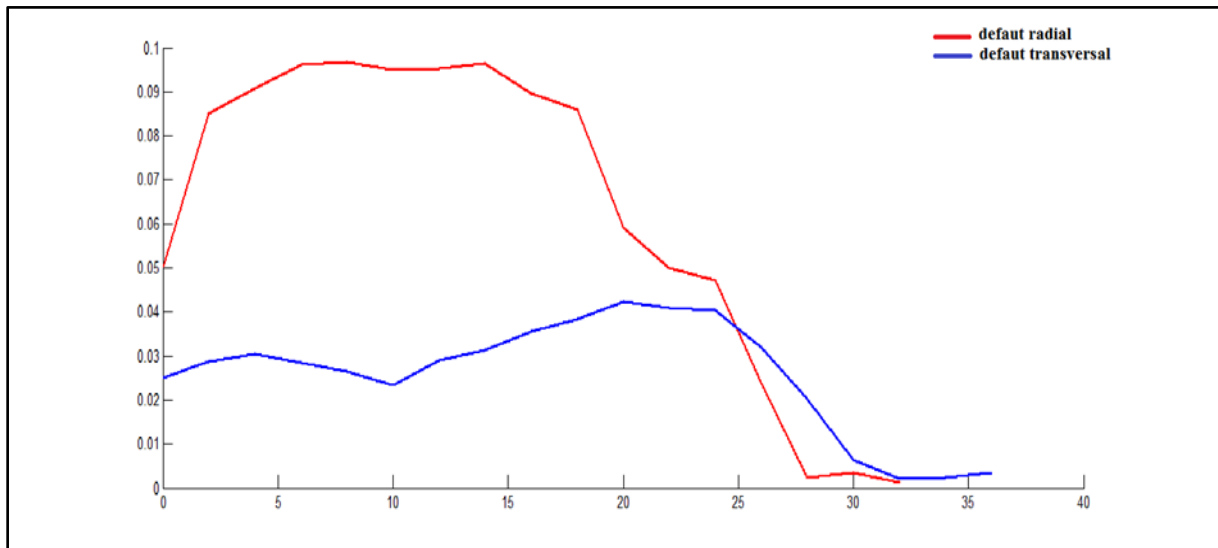


Fig.IV.24. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes positions de défaut

- Pour une longueur  $L=14\text{mm}$

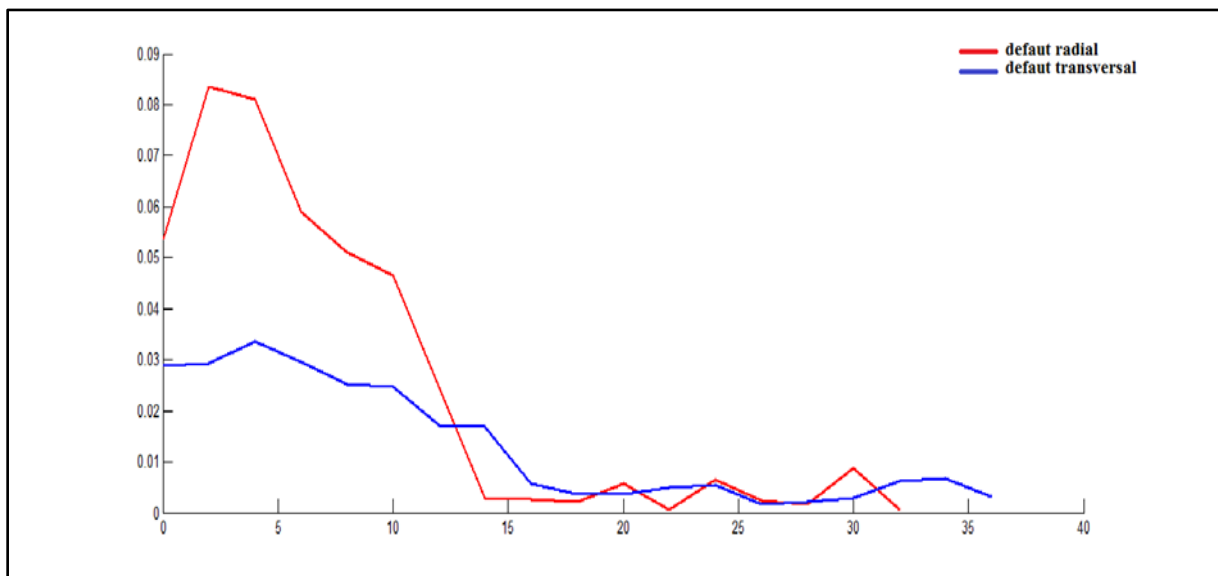


Fig.IV.25. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes positions de défaut

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la qualité des signaux est faible dans le cas des fissures transversales. Pour certains cas de figures, l'impédance prend des valeurs inférieures à zéro, cela est justifié par le signal du mur du trou qui vient cacher le signal dû à la fissure.



## Partie II : Partie expérimentale

### IV.II.1. Système expérimental

Des acquisitions ont été effectuées au sein de l'unité de contrôle et normalisation de l'E.R.M.A sur le précédent support, le système utilisé comprend :

- Un appareil de détection de défaut NORTEC 500D, fonctionnant avec une gamme de fréquence 50 Hz – 12 MHz.
- Le support précédemment décrit
- Une sonde pour la détection de fissures
- Une sonde à balayage rotatif

### IV.II.2. L'appareil de détection de défauts NORTEC 500

La série NORTEC 500, qui regroupe les appareils de recherche de défauts CF les plus récents d'Olympus, comprend toute une gamme de caractéristiques : bobine de compensation internes, connecteur de sortie VGA (pour affichage tête haute, moniteur et projecteurs) et interface USB pour le transfert rapide de l'information. La série NORTEC 500 comprend également la fonction Power Link qui permet aux appareils de reconnaître les sondes et d'effectuer automatiquement les réglages en conséquence. La série NORTEC 500 apporte des améliorations aux précédents appareils CF de la famille NORTEC. Elle se présente en quatre modèles : chacun comprend les fonctions de port USB et de hautes résolutions avec réduction du bruit. Les bobines de compensation interne permettent l'utilisation des sondes absolues peu coûteuses, sans avoir besoin d'adaptateurs de bobines de compensation externes. Le préamplificateur intégré fournit le gain supplémentaire nécessaire lors des inspections difficiles. La sortie VGA permet l'ajout de l'affichage tête haute, pour une utilisation mains libres.

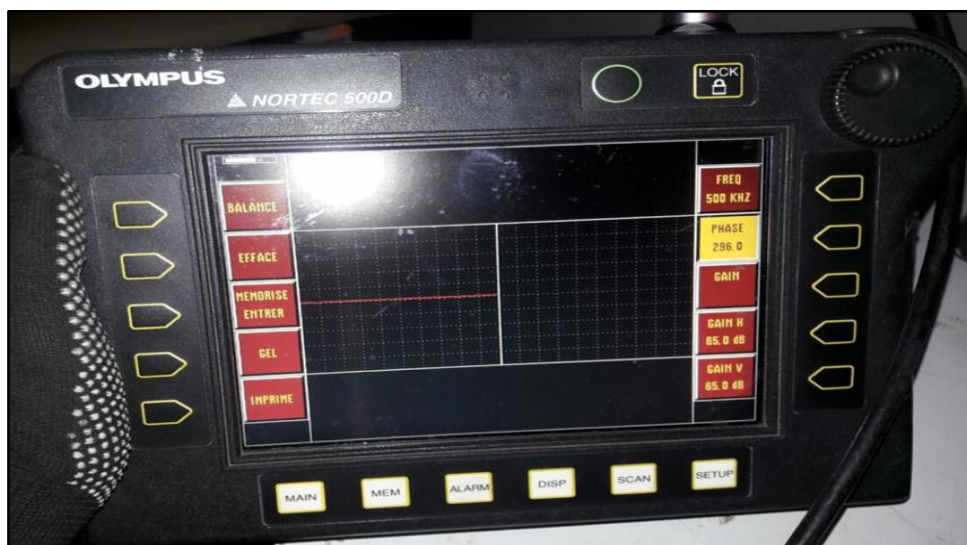


Fig.IV.26. NORTEC 500D (OLYMPUS)

### IV.II.3. Sonde à balayage rotatif

Les sondes à balayage rotatif sont équipées de dispositifs mécaniques pour faire tourner automatiquement la sonde dans le défaut. Ces sondes utilisent des bobines différentielles avec des fréquences de fonctionnement 100kHz à 2MHz.



Fig.IV.27. Sonde à balayage rotatif

### IV.II.4. La sonde pour détection de fissures

Les sondes de surface sont conçues pour travailler avec des fréquences élevées. Leurs applications sont généralement limitées aux défauts de surface.



Fig.IV.28. Sonde pour détection de fissures

#### IV.II.5. Etalonnage

La mise en œuvre d'un examen par CF nécessite l'utilisation des pièces de référence. Elles comportent des caractéristiques connues qui peuvent être utilisées pour le réglage d'examen et démontrer sa validité ou encore pour établir des courbes d'étalonnage.

Généralement, la pièce de référence doit être du même matériau et dans le même état de finition que le produit à contrôler.



Fig.IV.29. Etalonnage dans la zone saine



Fig.IV.30. Etalonnage d'une zone avec défaut

#### IV.II.6. Résultats de scan avec Nortec 500

Pour effectuer le contrôle de la pièce avec le nortec 500, on doit procéder comme suit :

- 1- Préparer le poste de travail en respectant les consignes de sécurité.
- 2- Nettoyer les surfaces a inspecté.
- 3- Effectuer une inspection visuelle détaillée et reporter toutes anomalies sur le procès-verbal de contrôle.
- 4- Allumer l'appareil.
- 5- Faire l'étalonnage pour un contrôle à haute fréquence.

Le contrôle se fait en balayant les zones critiques de la pièce, dans notre cas nous scannons la région limitrophe à un boulon de fixation, les résultats obtenus sont représentés dans les figures (IV.31) et (IV.32) :

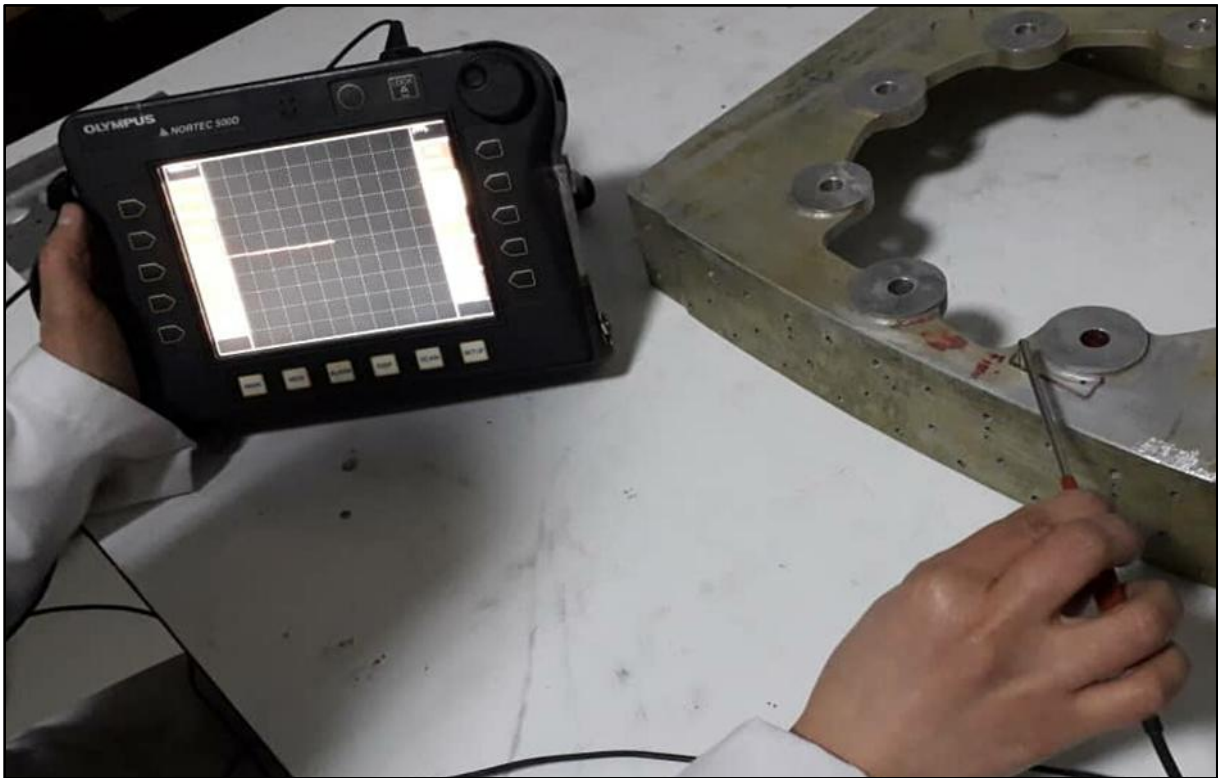


Fig.IV.31. Signal dans la zone sans défaut

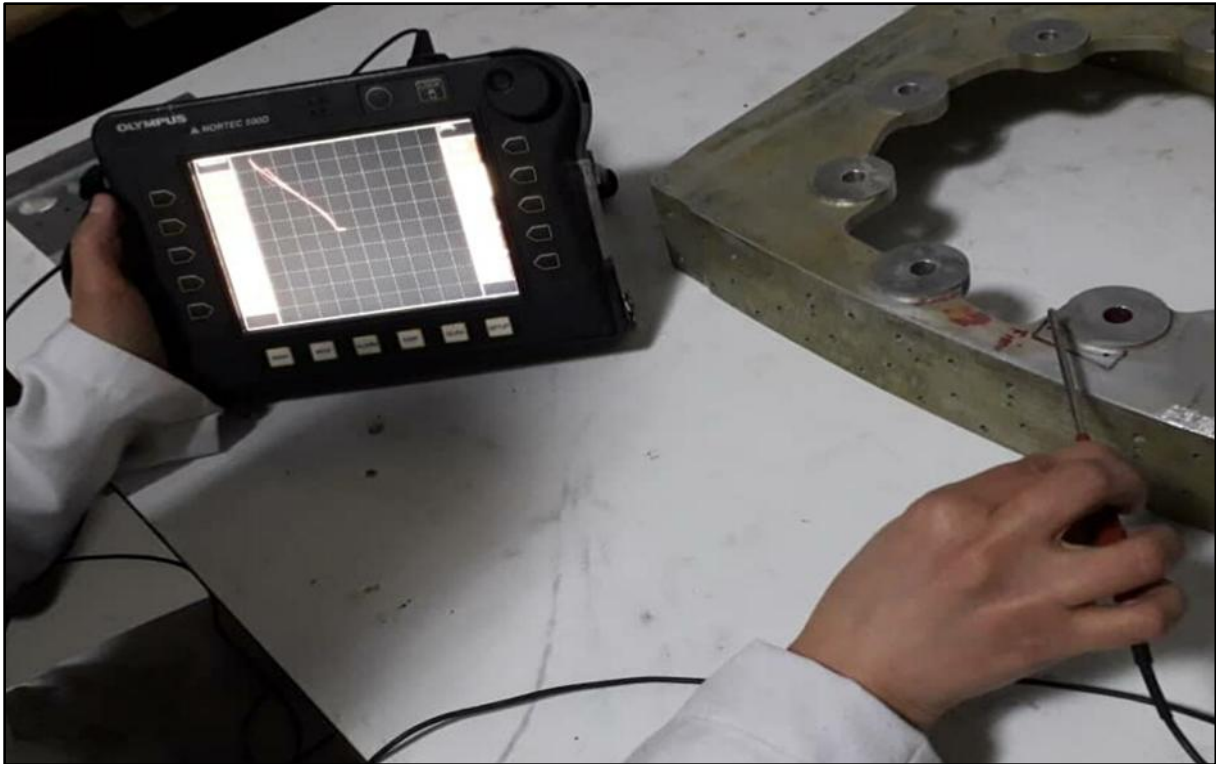


Fig.IV.32. Signal dans la zone de défaut

L'appareil Nortec 500 affiche les résultats en termes d'impédance normalisée, sur la figure (IV.31) le signal est nul, alors qu'on a une déviation verticale du signal dans la figure (IV.32), ce qui est considéré comme une indication pertinente relative à la présence d'un défaut.

#### IV.II.7. Conclusion

Au cours de ce dernier chapitre nous avons procédé à l'étude du CND d'une pièce d'un hélicoptère MI-24 siège de fissures de fatigue. Dans un premier temps, des simulations par la MEF ont été effectuées pour obtenir la réponse de notre capteur aux différentes dimensions et orientations des fissures.

Ensuite, nous avons présenté un système expérimental pour la détection de fissures par courants induits.

Les résultats obtenus peuvent constituer une base de données importante pour le problème inverse (réseaux de neurones...).

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

La complexité grandissante des processus industriels et des pièces fabriquées, les exigences croissantes en termes de sûreté de fonctionnement ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces en matériaux conducteurs conduisent à mettre en place de nouveaux procédés de CND toujours plus efficaces. La technique des courants de Foucault apporte une amélioration notable des performances de détection des défauts. Elle permet également un contrôle non destructif fiable. Sa simplicité et son caractère global en font une technique prometteuse pour les applications industrielles notamment dans les secteurs automobile et aéronautique.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en une étude de la technique du contrôle non destructif par courants de Foucault. Pour atteindre cet objectif, nous avons tout d'abord réalisé, à travers une recherche bibliographique, une étude technologique, méthodologique et électromagnétique du CND par CF.

Nous avons opté pour une modélisation du système (sonde/pièce avec fissure) par éléments finis 3D en se basant sur la formulation  $\vec{T}$ - $\Psi$  en vue de la construction d'une base de données pour l'inversion. Parmi les méthodes de résolution des équations à dérivées partielles qui régissent le système, on a choisi la méthode numérique des éléments finis qui s'adapte bien à ce type de problème. Grâce à sa souplesse et à sa possibilité de traiter des géométries complexes, cette méthode occupe une place importante dans le cadre des techniques de modélisation utilisées dans le CND par CF.

L'application choisie pour la validation, traite avec le contrôle par CF d'une pièce sensible d'un hélicoptère MI-24 de construction russe. L'effet des différents paramètres géométriques et électromagnétiques sur les performances du capteur a été abordé à travers plusieurs configurations. Les résultats obtenus concordent bien avec ceux trouvés dans la littérature.

Comme perspective de ce travail, nous proposons la réalisation d'un système de détection utilisant des cartes d'acquisition pour une meilleure caractérisation des défauts.

# **Bibliographie**



## Bibliographie

- [1] I.N. El Ghouli, « Réalisation D'un Banc D'essais Pour M'inversion Des Signaux En Contrôle Non Destructif Par Courants De Foucault », thèse de doctorat, université de Biskra.
- [2] V. Doirat, « Contribution à la modélisation de systèmes de Contrôles Non Destructifs par Courants de Foucault Application à la caractérisation physique et dimensionnelle de matériaux de l'aéronautique », thèse de doctorat, université de Nantes, 2007.
- [3] J. Dumont-Fillon, « Contrôle non destructif (CND) », techniques de l'ingénieur, R 1400, mesures mécaniques et dimensionnelles, 1996.
- [4] M. Hamel, « Etude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive », thèse de doctorat, université de Tizi-Ouzou, 2018.
- [5] G. Dhatt, G. Touzot, « Une présentation de la méthode des éléments finis », Maloine, Paris, 1981
- [6] Documentation interne de l'entreprise E.R.M.A.
- [7] B. Ramdane, « Contribution à la modélisation tridimensionnelles de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision », thèse de doctorat, Saint Nazaire, 2009.
- [8] Y. Choua, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault » ; thèse doctorat, Paris, 2009.
- [9] M. Hamel, « Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes Electromagnétiques », mémoire de magister, université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [10] C. Ravat, « Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif », thèse de doctorat, Paris, 2008.
- [11] A. Zaoui, « Contribution à la modélisation du CND par matrice de capteurs à courants de Foucault », thèse de doctorat, école militaire polytechniques d'Alger, 2008.
- [12] M. Lacroix, « Essais non destructifs », techniques de l'ingénieur M110 et M111, pp (1-21 et 1-17), 1996.
- [13] L. Oukhellou, « Paramétrisation et classification de signaux en Contrôle non destructif : Application à la reconnaissance des défauts de rails par courants de Foucault », thèse de doctorat, Paris, 1997.
- [14] B. Maouche, « Elaboration de modèles couplés basés sur la méthode des moments pour la modélisation de structures électromagnétiques : Application à l'étude du Contrôle Non Destructif par Induction », thèse de doctorat, Setif.
- [15] A. Haddar, « Evaluation non destructive par courant de Foucault de la caractéristique électrique des pièces amagnétique », mémoire de magister, 2009.

## Bibliographie

- [16] P.J. Shull, « Nondestructive evaluation theory, Techniques, and Applications », edition Marcel Dekker, New York, 2002.
- [17] S. Cherif, « Modélisation électromagnétique des systèmes multi capteurs-pièces à défauts complexes pour le contrôle non destructif par courant de Foucault », mémoire de magister, université Tizi-Ouzou, 2011.
- [18] E. Durand, « Magnétostatique », Masson et Cie, 1968.
- [19] Y.L. Floch, « Développement de formulations 3D éléments finis  $\vec{T}$ - $\Psi$  pour la prise en compte de conducteurs massifs et bobinés avec un couplage circuit », thèse de doctorat, France, 2002.
- [20] Y. Belkhiri, « Modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécaniques couplés par la méthode des volumes finis (CVM) », mémoire de magister, université de Batna, 2003.
- [21] M. Feliachi, « Contribution au calcul du champ électromagnétique par la méthode des éléments finis en vue d'une modélisation dynamique de machines électriques », thèse de doctorat, Paris, 1981.
- [22] V. Thomas, « Système multi-capteurs et traitement des signaux associé pour l'imagerie par courants de Foucault de pièces aéronautiques », thèse de doctorat, Paris, 2010.
- [23] N. Zemouri, « Etude et Réalisation d'un Système Multicapteur destiné au Diagnostic des matériaux conducteurs », mémoire de magister, université de Tizi-Ouzou, 2016.
- [24] J. Martinos, T. Theodoulidis, N. Poulakis, & A. Tamburrino, A benchmark problem for eddy current nondestructive evaluation. IEEE Transactions on Magnetics, 50(2), 1053–1056, 2014.

# Résumé

## Résumé

De nombreuses techniques permettent aujourd'hui le contrôle non destructif (CND) ou l'évaluation non destructive (END) des matériaux. L'usage de ces techniques est particulièrement développé dans les industries nucléaires, gazières, pétrolières et aéronautiques. Elles permettent de révéler la présence de défaut, telles que les fissurations, les inclusions, la corrosion, etc.

Parmi les méthodes les plus en plus utilisées, on retrouve la technique de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF), cette dernière consiste à évaluer l'état de santé d'une pièce par la mesure de la variation de l'impédance des capteurs inductifs.

Ce travail synthétise l'étude et la simulation par la méthode des éléments finis 3D d'un dispositif de détection de défauts par courants de Foucault. Le système est simulé sous l'environnement Ansys-Maxwell, il comporte une bobine à noyau d'air placée au-dessus d'une pièce conductrice représentant un support fissuré d'un hélicoptère. Afin de réaliser la détection de la fissure, la bobine balaye la cible et les signaux sont collectés en termes de la variation de l'impédance de la bobine. Les résultats obtenus peuvent constituer une base de données importante pour le problème inverse.

**Mots clés :** Contrôle non destructif, fissures, courants de Foucault, formulation  $\vec{T}$ - $\psi$ , méthode des éléments finis.

## Abstract

Many techniques today allow non-destructive testing (NDT) or non-destructive evaluation (NDE) of materials. The use of these techniques is particularly developed in the nuclear, gas, oil and aeronautical industries. They reveal the presence of defects, such as cracks, inclusions, corrosion, etc.

Among the most widely used methods is the technique of eddy current non-destructive testing (NDF-CF), the latter consists in evaluating the state of health of a part by measuring the variation of the impedance of inductive sensors.

This work synthesizes the study and simulation by the 3D finite element method of an eddy current fault detection device. The system is simulated under the Ansys-Maxwell environment, it has an air core coil placed over a conductive part representing a cracked support of a helicopter. In order to realize the crack detection, the coil scans the target and the signals are collected in terms of the variation of the impedance of the coil. The results obtained can constitute an important database for the opposite problem.

**Key words:** Nondestructive testing, cracks, eddy currents,  $\vec{T}$ - $\psi$  formulation, finite element method.