

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel  
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل  
كلية العلوم والتكنولوجيا

**Département D'Électrotechnique**

# Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

**Mastère Electrotechnique**

**Option : Machines électriques**

## Thème

**Etude du principe du contrôle non destructif par courant de Foucault et simulation d'un capteur élémentaire**

par :

**Mr / Oussama CHEHEB**

et

**Mr / Housseem LAIOUER**

Travail proposé et dirigé par :

**Dr. Antar BOUROUINA**

**Promotion 2020**

## *REMERCIEMENTS*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné*

*La force et le courage de mener à bien ce modeste travail, également nous remercions infiniment nos parents, qui nous ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de notre formation. Nous tenons à remercier tous ceux et celles qui ont contribué à finaliser ce modeste travail.*

*Nos remerciements vont à Dr. Antar BOUROUINA notre encadrant pour nous avoir guidé*

*Pour la réalisation de ce projet. Nous remercions vivement les étudiants Master-II Machines électriques pour leur aide morale durant toute la période de préparation*

*Et surtout Oussama et Nabil*

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidé et assisté durant nos études*

*Et nous exprimons toute notre gratitude à Dr. Mkidache, Dr. Razig, Dr. Yakhlaf et tous les enseignants qui nous ont formé.*

*Oussama et Houssein*

## *DEDICACES*

### *À MES TRÈS CHERS PARENTS*

*Quoi que je fasse que je dise, je ne saurais point vous remercier comme  
il se doit, aucune*

*Dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma  
considération. Votre*

*Affection me couvre, votre bienveillance me guide et votre présence à  
mes côtés à toujours*

*Été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Que ce  
travail traduit ma*

*Gratitude et mon affection.*

*A mes très cher frères Hassan, Massoud et Radouane et mes belles  
sœurs Loubna, Sihame et Nadia*

*A mes très chers collègues et surtout*

*Salah, Ayoub, Mouad, Aalâ Eddine, Aalâ eddine Mohamed el Salih  
Imad, Lotfi, Nabil, Billal, djamel, Hani, Fouad, ayman*

*Et Ahmed*

*Puisse Dieu vous donner santé, bonheur, courage et surtout réussite*

*Oussama*

## *DEDICACES*

*Je dédie cet ouvrage*

*A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années  
d'études*

*Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance*

*A mes frères, mes grands parents et ceux qui ont partagé avec  
moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail  
ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de  
mon parcours*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour  
et de la vivacité*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite  
plus de succès A tous ceux que j'aime*

*Houssem*

## Sommaire

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

### **Chapitre I : Généralité sur le contrôle non destructif**

I. 1. Introduction.....	3
I. 2. Les différentes méthodes de contrôle non destructif .....	3
I. 2. 1. L'examen visuel.....	3
I. 2. 2. Le ressuage.....	4
I. 2. 3. Les ultrasons.....	5
I. 2. 4. Radiographie .....	7
I. 2. 5. Magnétoscopie .....	9
I. 2. 6. Thermo-inductive .....	11
I. 3. La méthode des courants de Foucault .....	12
I. 3. 1. Génération des courants de Foucault .....	13
I. 3. 2. Capteurs à courants de Foucault.....	14
I. 3. 3. Profondeur de pénétration des courants de Foucault .....	16
I. 3. 4. Signaux d'excitation et d'exploitation .....	16
I. 4. Conclusion .....	17

### **Chapitre II : Principe du CND par CF et modèle d'un capteur élémentaire**

II. 1. Introduction .....	18
II. 2. Principe et présentation .....	18
II. 3. Plan d'impédance .....	19
II. 4. Modélisation du système .....	20
II. 4. 1. Lois classiques de l'électromagnétisme.....	20
II. 4. 2. Méthodes de résolution.....	21
II. 4. 2. 1. Méthodes analytiques.....	21
II. 4. 2. 2. Méthodes numériques .....	21
II. 4. 2. 3. Méthodes semi-analytiques .....	22
II. 4. 3. Méthodes des éléments finis .....	22
II. 4. 4. Formulation en potentiel vecteur A .....	22
II. 4. 5. Conditions de passage et résolution.....	22
II. 4. 5. 1. Dans l'air.....	25
II. 4. 5. 2. Dans la bobine.....	25

II. 4. 5. 3. Dans la cible .....	25
II. 5. Conclusion .....	26

### **Chapitre III : Simulation et interprétation**

III. 1. Introduction .....	28
III. 2. Dimensions du capteur .....	28
III. 3. Géométrie et application .....	29
III. 4. Simulation et exploitation des résultats .....	30
III. 4. 1. Observation des courants induits dans la cible .....	30
III. 4. 2. Calcul et simulation de la variation d'impédance .....	32
III. 4. 3. Cas d'un défaut profond et effet de la fréquence.....	34
III.4.3.1. Défaut simple .....	34
III.4.3.2. Défaut allongé .....	36
III. 5. Conclusion.....	38

### **Conclusion générale**

Conclusion générale .....	40
---------------------------	----

### **Référence**

Bibliographie.....	41
--------------------	----

## Table des figures :

Fig. I. 1. Les étapes de la méthode de ressuage. ....	5
Fig. I. 2. Théorie de l'opération Impact-Echo. ....	6
Fig. I. 3. Appareillage de contrôle par ultrason. ....	6
Fig. I. 4. Source de rayonnement: négatoscope. ....	8
Fig. I. 5. Schéma de principe du contrôle par radiographie. ....	9
Fig. I. 6. Appareil de contrôle par magnétoscopie. ....	10
Fig. I. 7. Procédé à flux de fuite magnétique. ....	10
Fig. I.8. Les étapes du contrôle de magnétoscopie. ....	11
Fig. I. 9. Contrôle par thermo-inductive. [15]. ....	12
Fig. I. 10. Procédé à Courants de Foucault. ....	13
Fig. I. 11. Classification des sondes selon la méthode d'auscultation. [22]. ....	14
Fig. I. 12. Différentes géométries de circuit magnétique. [22]. ....	15
Fig. I. 13. Exemple de montage de sonde à courants de Foucault. [24]. ....	15
Fig. II.1 Principe de contrôle non destructif par CF. [33]. ....	19
Fig. II.2 Réponse de l'inductance et la résistance du capteur en fonction de la conductivité... 21	21
Fig. II.3 Différents milieux ayant différentes caractéristiques électromagnétiques. ....	22
Fig. II.4 Les équations caractéristiques pour chaque domaine d'étude ....	26
Fig. III.1 Structure du système « capteur-cible ». ....	28
Fig. III.2 Géométrie du système ....	30
Fig. III.3 Maillage éléments finis du système. ....	30
Fig. III.4 Densité des courants induits dans la plaque sans défaut. ....	30
Fig. III.5 Densité des courants induits dans la plaque avec défaut. ....	31
Fig. III.6 Distribution des courants induits en surface de la pièce ....	31

Fig.III.7 La différence de la résistance et l'inductance du capteur avec et sans défaut en déplacement.....	33
Fig.III.8 Variation de l'impédance du système (thèse Mohamed CHELABI).....	33
Fig.III.9 Cas du défaut déjà traité.....	34
Fig.III.10 Variation des composantes de l'impédance pour $f=150\text{KHZ}$ .....	35
Fig.III.11 Variation des composantes de l'impédance pour $f=600\text{KHZ}$ .....	35
Fig.III.12 Variation des composantes de l'impédance pour $f=2109375.9\text{HZ}$ .....	36
Fig.III.13 Cas du défaut allongé.....	36
Fig.III.14 Variation des composantes de l'impédance pour $f=150\text{KHZ}$ .....	37
Fig.III.15 Variation des composantes de l'impédance pour $f=600\text{KHZ}$ .....	37
Fig.III.16 Variation des composantes de l'impédance pour $f=2109375.9\text{HZ}$ .....	38

---

# Introduction Générale

---

## Introduction générale

Dans le secteur industriel, la défaillance des pièces mécaniques peut entraîner des conséquences plus ou moins graves. Le contrôle non destructive (CND) qui vise à contrôler sans endommager les pièces en question, représente une phase importante dans la maintenance et la surveillance des appareils et des installations industrielles afin d'éviter les dégâts qui peuvent avoir lieu suite à une défaillance. De ce fait, l'CND est devenu une nécessité industrielle. Les méthodes de CND sont pour la plupart fondées sur l'observation et l'exploitation d'un phénomène physique dépendant des propriétés constitutives ou géométriques du matériau et éventuellement perturbé par la présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité (défaut). Les techniques utilisées sont diverses et dépendent de la nature même du contrôle envisagé, les plus répandues sont : les ultrasons, les rayons ionisants (X ou gamma), le ressuage, la thermographie et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault). [1], [2], [3], [4].

Dans le domaine du contrôle de pièces métalliques, la technique des courants de Foucault est l'une des plus anciennes. Dès 1926 les premiers appareils de mesure d'épaisseur apparaissent. Ces techniques se sont développées essentiellement de manière expérimentale. Les bases techniques et pratiques du contrôle ont été établies durant les années 1950 et 1960, correspondant au développement des techniques nucléaires, [5], [6].

Comme le capteur et son conditionneur sont les premiers éléments de la chaîne de mesure lors d'un contrôle non destructif par courants de Foucault et qu'ils doivent refléter avec précision la variation de l'impédance « capteur-pièce » par un signal électrique. De plus, les performances de l'ensemble de la chaîne de contrôle dépendent la qualité de la conception du capteur et du choix du conditionneur, c'est dans ce cadre s'inscrit la problématique de ce travail.

Les objectifs fixés à travers ce travail est de faire, une recherche bibliographique des techniques de CND les plus utilisées, avoir un aperçu global sur les capteurs à courants de Foucault et les chaînes de mesure qui permettent la détection des fissures. Ensuite, concevoir et réaliser pour le contrôle non destructif à courants de Foucault pour des pièces magnétiques.

Notre mémoire comporte trois chapitres dont nous présentons brièvement les lignes principales ci-après :

Le premier chapitre présente les notions de base nécessaires à l'étude de différentes méthodes du contrôle non destructif (CND) utilisées dans le domaine industriel. Nous présentons une description plus détaillée des principales familles de procédés du contrôle non destructif, à savoir : L'examen visuel, Le ressuage, Les ultrasons, Radiographie, Magnétoscopie, enfin les procédés de contrôle par courants de Foucault et les différents types des capteurs utilisés dans le CND par CF.

Le deuxième chapitre rapporte les principales formulations mathématiques qui permettent de modéliser les phénomènes électromagnétiques dans un procédé de contrôle non destructif par courant de Foucault qui est régi par les quatre équations de Maxwell. Ce chapitre traite les différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution, à savoir : Méthodes analytiques, méthodes semi analytiques et méthodes numériques. Nous passerons ensuite à principe et la présentation puis à Plan d'impédance. On terminera ce chapitre par la modélisation du système.

Le troisième chapitre est consacré à la validation et résolution des équations différentielles dans chaque domaine sous le logiciel COMSOL multi-physiques dans le cas d'une pièce saine et en défaut, la simulation et l'interprétation des résultats obtenus, puis faire une étude paramétrique en changeant la fréquence des courants d'excitation afin de déterminer la nature de défaut présenté.

---

# **Chapitre I**

## **Généralités sur le contrôle non destructif**

---

# Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

## I.1 Introduction

On définit usuellement le Contrôle Non Destructif (CND) ou l'Evaluation Non Destructive (END) comme étant un moyen de mise en évidence des anomalies ou défauts (fissures, discontinuités de matière, fatigue, usure,...etc.) 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, sans porter atteinte à l'état globale du produit. D'où l'importance majeure du CND dans le contrôle de la qualité des produits et dans la gestion des risques, assurant ainsi la sécurité des personnes et des biens. Il existe plusieurs méthodes de CND, quoique la méthode utilisant les courants de Foucault (CND-CF) est très attractive comparée aux autres méthodes. Celle-ci est appliquée uniquement sur les produits constitués de matériaux conducteurs électriques. Dans ce chapitre, nous présentons, d'une manière non exhaustive, les différentes méthodes de contrôle non destructif et particulièrement celle utilisant les courants de Foucault. Nous intéressons dans notre étude à la résolution par la méthode des éléments finis.

## I.2 Les différentes méthodes de contrôle non destructif

Les techniques de CND utilisées sont diverses. Le choix d'une méthode dépend de :

- la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...).
- le type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...).
- les conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué.

### I.2.1 L'examen visuel

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Un examen visuel doit être effectué dans de bonnes conditions assurant avant tout un éclairage suffisant. Le niveau d'éclairage minimum requis est de l'ordre de 350 Lux. L'accessibilité de la partie à

examiner doit permettre d'approcher l'œil à au moins 60 cm, sous une incidence de 30°. Lorsque la partie de la pièce à contrôler n'est pas accessible par un examen direct, on utilise un appareil appelé endoscope. Il s'agit d'un appareillage constitué de miroirs et lentilles. La méthode est appelée contrôle par endoscopie. Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur. Choisir la technique la plus adaptée en CND pour des examens approfondis déterminer des limitations des autres techniques CND choisies (accès, état de surface, etc.). Les tests d'étanchéité, les tests pneumatiques et les épreuves hydrauliques comportent aussi un examen visuel pour mettre en évidence des fuites éventuelles.

Le contrôle visuel est le premier contrôle direct des produits que l'on peut effectuer sans utilisation d'outillages spécifiques. Toutefois l'observation visuelle d'un objet permet de guider le contrôleur dans le choix et la mise en œuvre des autres techniques de contrôle (par exemple, choix de l'angle de tir en radiographie, direction de magnétisation...) et c'est souvent par l'examen d'un cliché ou d'une image 2D que se fait l'interprétation finale des résultats d'un contrôle. L'inspection visuelle directe des pièces peut se révéler un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles du type taches, rayures, pailles...

Néanmoins, l'examen visuel présente des limitations de différentes natures liées aux caractéristiques de l'œil lui-même. [7], [8].

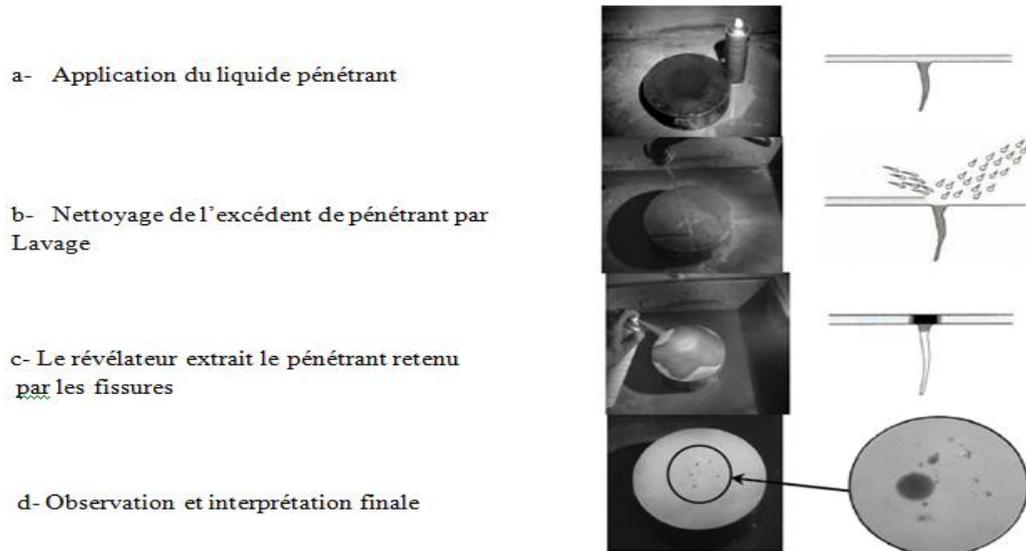
### **I.2.2 Le ressuage**

La méthode « huile et poussière de craie », autrefois utilisée par les industries ferroviaires dans les années 1920. Le contrôle par liquide de pénétration (ressuage) a été revêtu en 1941 par Robert et Joseph Switzer. Le ressuage est un moyen de contrôle basé sur la capillarité qui permet de détecter les défauts superficiels (débouchant plus précisément), il consiste à appliquer un pénétrant coloré qui s'introduit dans les défauts, suivi du révélateur qui facilitera l'observation.[9].

**Les étapes** (Fig. I. 1) :

- Nettoyage, à l'aide d'un chiffon,
- Application d'un produit coloré qui pénètre dans le défaut par capillarité,
- Elimination de l'excès : c'est une étape extrêmement délicate qui consiste à se débarrasser de l'excès de pénétrant. Il faudra prendre des précautions lors du rinçage,

- Application d'un révélateur (constitué d'une poudre blanche très fine qu'on pulvérise sur la surface de l'échantillon) à travers lequel le pénétrant diffuse et on observe les différentes taches résultantes sous un éclairage adapté.



**Fig. I. 1. Les étapes de la méthode de ressuage.[7]**

#### Les avantages :

- Mise en œuvre est relativement simple.
- Prix modique dans une application manuelle.
- Localisation précise des défauts et appréciation de leurs longueurs (pas toujours).
- Possibilité d'automatisation.

#### Les inconvénients :

- Interprétation délicate.
- Pas d'appréciation des défauts en profondeur.
- Pas de détection de défauts internes.
- Non utilisable dans les matériaux poreux.

#### I.2.3 Les ultrasons

Le principe fondamental du contrôle non destructif par ultrasons réside dans l'analyse de l'influence des défauts, de type localisés ou inhomogénéités, sur la propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et diffraction sur les interfaces, atténuation dans

la matrice liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion [7], [8]. 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 (Fig. I. 2).

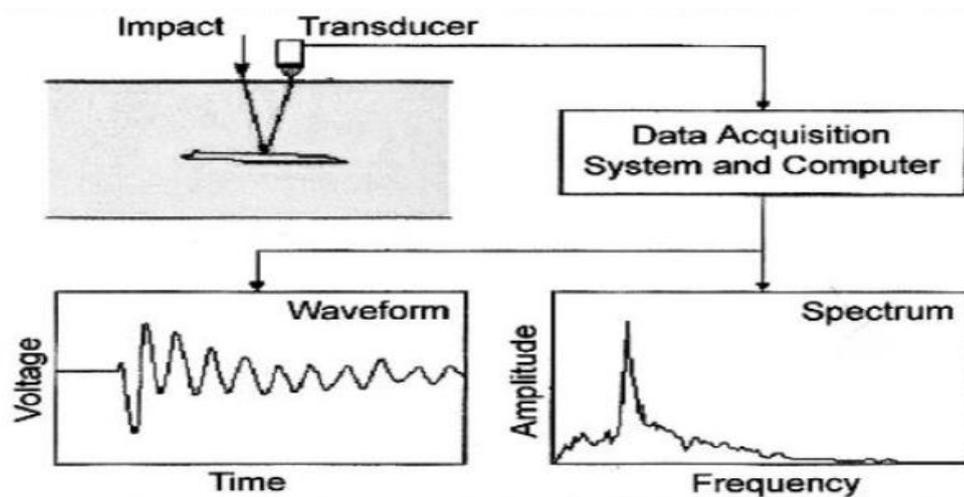


Fig. I. 2. Théorie de l'opération Impact-Echo.[7]

La figure (Fig. I. 3) illustre l'appareil d'analyse par ultrasons; les ondes émises et réfléchies donnent des informations sur la présence ou non de défauts et sur leurs nature.



Fig. I. 3. Appareillage de contrôle par ultrason. [8]

**Le principe :**

La vibration mécanique engendrée par l'élément piézoélectrique du transducteur se propage dans la section de la pièce en se réfléchissant sur les faces. Une partie du faisceau acoustique est intercepte par le défaut et renvoie vers le transducteur qui convertie la vibration en signal électrique. L'œil observe sur l'écran de visualisation un écho caractéristique qui apparaît à une distance donnée sur la base de temps.

**Les avantages :**

- Détection précise des défauts dans le volume de la pièce.
- Grande sensibilité surtout pour les défauts plans correctement orientés.
- Souplesse d'utilisation (utilisation sur chantier aussi bien qu'en contrôle automatisé).

**Les inconvénients :**

- Interprétation délicate des défauts et de leurs dimensions, nécessitant un personnel qualifié.
- Un milieu de couplage est nécessaire entre le palpeur et la pièce, afin d'assurer une bonne propagation des ondes.
- Sensibilité fortement fonction de l'orientation du défaut vis-à-vis de la direction principale du faisceau incident.
- Mise en œuvre difficile sur certains matériaux (fonte par exemple).

**I.2.4 Radiographie**

C'est une technique fréquemment utilisée pour le contrôle des soudures, bien qu'elle fait appel à des équipements plus complexes. Ce procédé permet la visualisation directe du défaut, il fournit éventuellement une documentation directe de l'enregistrement qui reste annexé au compte rendu de l'analyse de l'échantillon [9], [10], [11]. La méthode se base sur un principe similaire à celui de la médecine [12], [13] (radiologie) pour photographier l'intérieur des corps opaques. Lorsqu'un corps est bombardé par des rayons radioactifs (rayons X ou rayons  $\gamma$ ), ces derniers le traverse en conservant une certaine énergie pour impressionner sur une plaque photographique (le film) placée derrière la pièce. Les rayons X ou  $\gamma$  utilisés sont des radiations électromagnétiques analogues aux rayons lumineux mais avec une longueur d'onde réduite.

Les rayons X sont générés par un tube constitué d'une enceinte dans laquelle on a créé le vide qui contient principalement deux électrodes ; anode négative, constituée d'un filament en tungstène porté à une incandescence, émet des électrons, et cathode positive qui reçoit les électrons accélérées par une différence de potentiel.

Pour générés les rayons  $\gamma$ , les substances utilisées sont l'iridium 192, le cobalt 60, le thulium 170, le césium 137. Les caractéristiques de ces radioéléments sont :

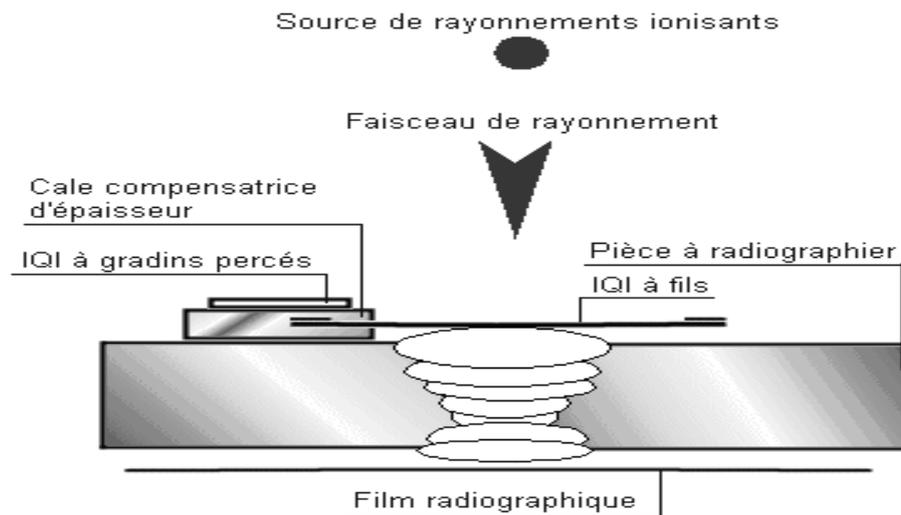
- L'énergie à laquelle correspond un pouvoir pénétrant qui conditionne son emploi pour une, application donnée.
- Leur période : temps au bout duquel leur activité n'est plus que de moitié. Pour certaines, ce temps est assez court (iridium 192 jours) elles doivent être remplacées à un intervalle réguliers.

### Le principe :

L'opération se déroule comme suit : la pièce est soumise à l'action d'une source de rayonnement (Fig. I. 4), le rayonnement sortant de la pièce est fonction de l'épaisseur traversée. Au droit d'un défaut, l'intensité transmise sera plus élevée ou plus faible. Une image se forme sur le film après exposition pendant un temps donné fonction du matériau, de l'épaisseur, de la puissance de la source et de la qualité du rayonnement (Fig. I. 5). Le film est développé en le faisant passer par un révélateur, bain d'arrêt, fixateur (bain acide), bain de rinçage respectivement ensuite on fait passer le film dans un appareil pour le sécher. Le film est interprété à l'aide d'un appareil appelé négatoscope (appareil d'éclairage adapté). La qualité du film est déterminée par un indicateur de qualité d'image (IQI) qui est choisi en fonction de l'épaisseur, les indicateurs les plus utilisées sont (10 ISO 16 "petites épaisseurs" et les 7 ISO 12 " épaisseurs plus importantes").



Fig. I. 4. Source de rayonnement: négatoscope. [12]



**Fig. I. 5. Schéma de principe du contrôle par radiographie. [12]**

**Les avantages :**

- Detections des défauts dans le volume de la pièce.
- Bonne définition des défauts avec détection de leur nature.
- Le cliché permet de sauvegarder les résultats dans l'archive.

**Les inconvénients :**

Sur un point de vue économique on peut dire que c'est une opération coûteuse vu le matériel nécessaire, non seulement pour la réalisation du film mais aussi pour la protection du personnel exposé au rayonnement radioactif. La sensibilité dépend de l'orientation du défaut vis-à-vis de la direction principale du rayonnement.

### **I.2.5 Magnétoscopie**

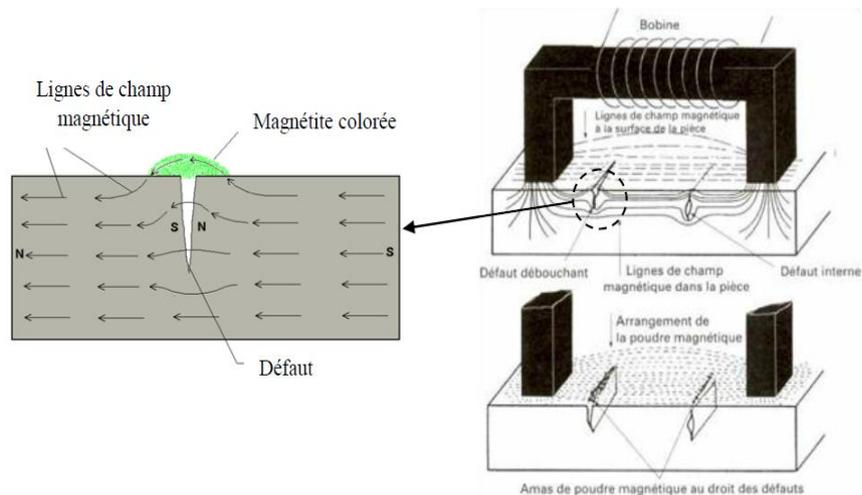
Destinée particulièrement aux matériaux ferromagnétiques. La méthode consiste à créer un champ magnétique, à l'aide d'un circuit magnétique de la forme U (Fig. I. 6), le long de la pièce et interpréter ensuite les différents signaux obtenus.



**Fig. I. 6. Appareil de contrôle par magnétoscopie. [13]**

### Le principe :

On aimante la pièce de façon totale ou partielle à une valeur proche de la saturation magnétique du matériau. Toute discontinuité dans la pièce à contrôler provoquera une diminution de la section de passage du flux magnétique et donc une augmentation du champ d'induction, ainsi des particules ferromagnétiques contenues dans un révélateur s'accumulent à l'endroit du défaut (Fig.I.7). Ensuite on aura qu'à observer la pièce sous un éclairage adapté.



**Fig. I. 7. Procédé à flux de fuite magnétique. [13]**

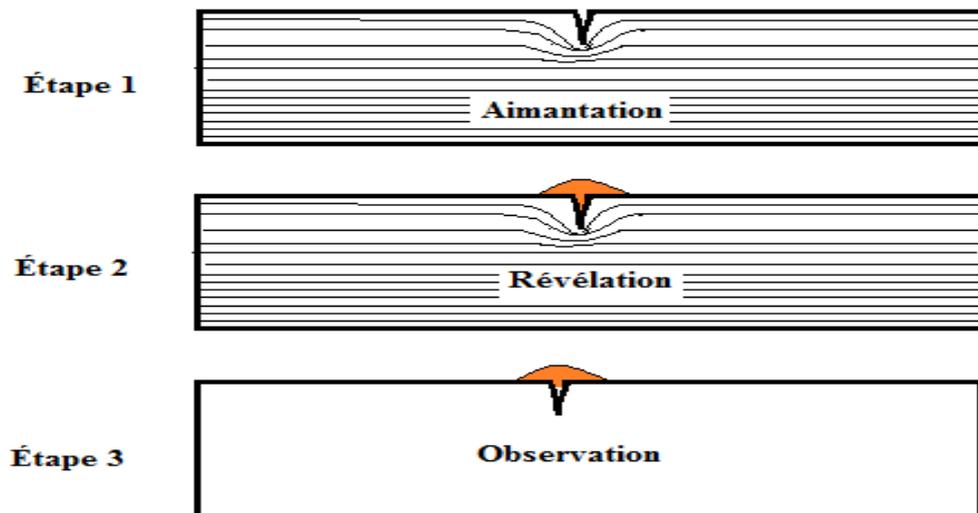


Fig. I.8. Les étapes du contrôle de magnétoscopie. [13]

#### Les avantages :

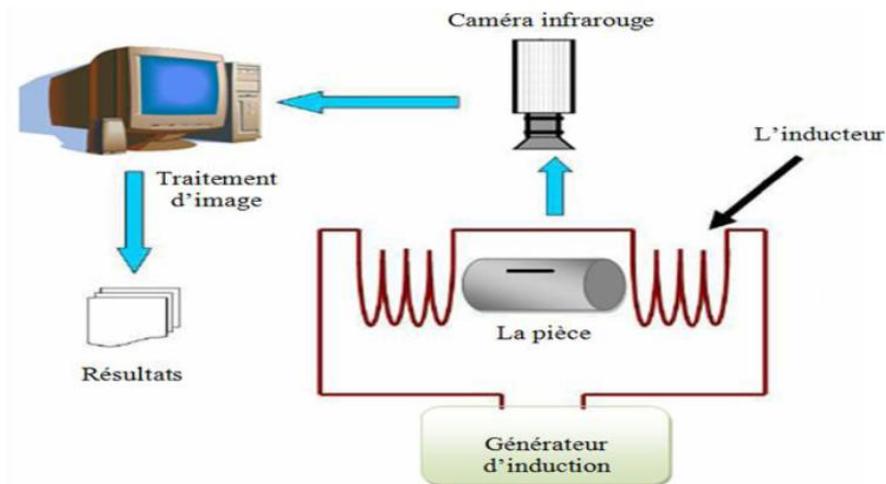
- Mise en œuvre simple.
- Localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous-jacent et une appréciation de leurs longueurs.
- Automatisation possible.
- Résultats quasi immédiats.

#### Les inconvénients :

- Méthode réservée uniquement aux matériaux ferromagnétiques.
- Sensibilité fonction de l'orientation du défaut par rapport aux directions générales des lignes d'induction.
- Pas d'appréciation de la profondeur des défauts.
- Désaimantation nécessaire des pièces avant et après contrôle.

#### I.2.6 Thermo-inductive

Ce mode d'examen consiste à chauffer la zone d'une pièce électriquement conductrice par induction magnétique (Fig. I. 9). En cas de présence d'un défaut, l'anomalie dans la distribution de la densité de courants induits, crée une concentration de la densité de puissance autour du défaut qui se traduit par des surchauffes locales. L'inhomogénéité de la distribution de la température peut être détectée par une caméra infrarouge localisant le défaut. [14]



**Fig. I. 9. Contrôle par thermo-inductive [15].**

**Les avantages :**

- Méthode relativement rapide et sans contact.
- La technique est globale et elle permet l'inspection de l'ensemble de la pièce à la fois.
- Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée.
- Grande sensibilité de détection des défauts.
- L'automatisation est possible pour des pièces de géométries constantes.

**Inconvénients :**

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

**I.3 La méthode des courants de Foucault**

Par sa simplicité et son efficacité, le contrôle par courants de Foucault (CND-CF) est la technique la plus utilisée dans la détection des défauts et la caractérisation des propriétés physiques ou géométriques des matériaux électriquement conducteurs. Le CND-CF est généralement utilisé pour quantifier divers défauts superficiels, tels que les fissures et les hétérogénéités chimiques, microstructurales ou mécaniques. Il est également utilisé pour mesurer les épaisseurs des revêtements métalliques ou isolants sur des matériaux conducteurs [16], [17]. Plusieurs domaines industriels utilisent le CND-CF telle que:

- Les réacteurs nucléaires : on doit noter que de nombreux incidents qui ont marqué et marquent encore le fonctionnement de ces réacteurs sont dus à la fissuration et à la rupture de leurs gaines [18], [19].
- Turbomachine : la présence de fissures est inadmissible sur les disques de turbomachines, telles que les turbines à gaz et les turboréacteurs d'avions [20], [19].
- Les ferroviaires [22], les navires, les automobiles, .....etc.

### I.3.1 Génération des courants de Foucault

Les courants de Foucault sont des courants étudiés par le physicien français Léon Foucault, apparaissant dans la masse de tout matériau conducteur en mouvement dans un champ magnétique ou dans tout matériau conducteur placé dans un champ magnétique variable (Fig. I. 10). Les lignes de ces courants sont fermées sur elles-mêmes : on parle de boucles de courants. Les courants de Foucault s'expliquent par le phénomène d'induction électromagnétique et sont décrits par la loi de Faraday [23]. Les courants de Foucault peuvent facilement être mis en évidence en faisant osciller un pendule constitué d'une plaque métallique dans un champ magnétique : le mouvement du pendule est fortement freiné. La force magnétique de Laplace agit sur la plaque (plongée dans le champ magnétique) parcourue par des courants induits par son mouvement. D'après la loi de Lenz, tout courant induit s'oppose au phénomène qui lui a donné naissance ; le pendule est donc freiné par la force magnétique et non accéléré, car cette force s'oppose au mouvement qui a donné naissance aux courants induits. Parallèlement la masse conductrice parcourue par les courants s'échauffe par effet Joule.

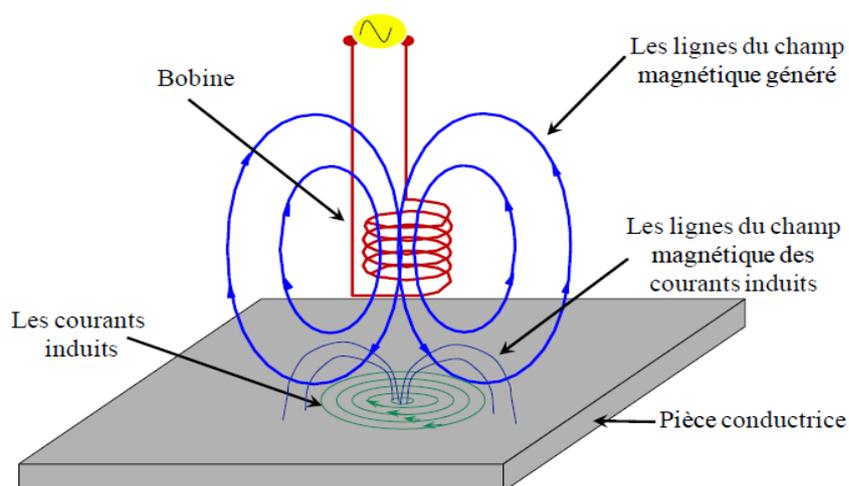
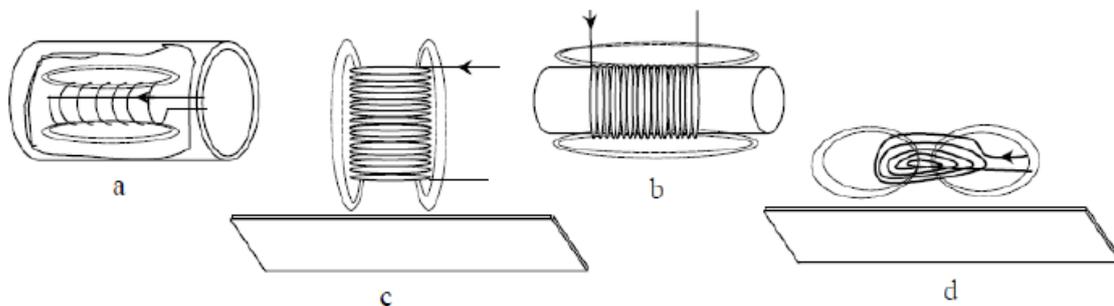


Fig. I. 10. Procédé à Courants de Foucault. [21]

La répartition du champ électromagnétique et des courants induits dans un matériau conducteur est régie par les lois fondamentales de l'électromagnétisme dont la formulation la plus générale est donnée par les équations de Maxwell.

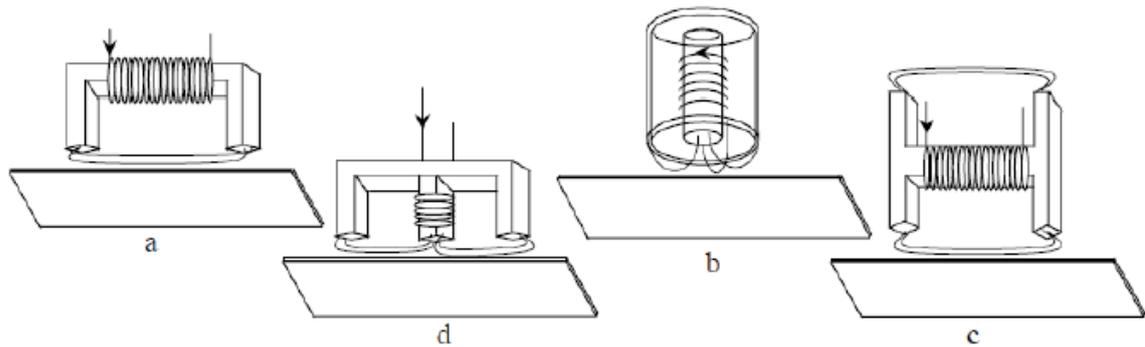
### I.3.2 Capteurs à courants de Foucault

Il existe plusieurs configurations possibles pour la disposition du bobinage d'excitation relativement à la cible; chacune est dédiée au contrôle de cible de forme donnée (Fig. I. 11). Sans dresser un panorama exhaustif de toutes les différentes méthodes d'auscultation, nous allons en citer trois principales. Les bobines internes ; destinées à l'inspection des objets creux de l'intérieur (Fig.I.11.a).Les bobines encerclantes ; utilisées pour contrôler de l'extérieur des objets de faible section (Fig. I.11.b).Les bobines simples ou plates ; utilisées pour l'inspection des objets sur leur surface (Fig. I.11.c et Fig. I. 11.d).



**Fig. I. 11. Classification des sondes selon la méthode d'auscultation, (a) sonde interne, (b) sonde encerclante, (c) bobine simple, (d) bobine plate, [22].**

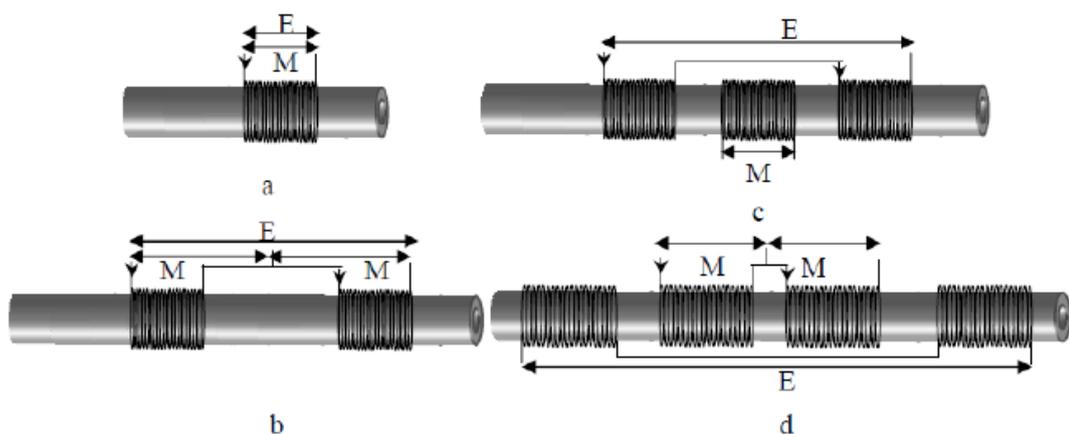
Les sondes précédentes ne comportent qu'un simple bobinage. Les champs qu'elles émettent s'épanouissent largement. Afin de limiter les zones d'interaction de la bobine, on couple généralement celle-ci avec un circuit magnétique de grande perméabilité. Celui-ci peut être réalisé en tôles feuilletées en basse fréquence ou en ferrite pour les fréquences élevées. Son rôle est de canaliser les lignes de champ magnétique vers la ou les zones d'espace où on placera la cible à inspecter (Fig. I. 12).



**Fig. I. 12. Différentes géométries de circuit magnétique,  
(a) sonde en U, (b) sonde en pot, (c) sonde en H, (d) sonde en E, [22].**

Les branchements électriques des sondes peuvent être variés. Pour les bobines encerclantes, par exemple, on peut distinguer :

- Les systèmes à bobinage simple, où le courant d'excitation passe dans la bobine de mesure elle-même, et qui peuvent être à sonde absolue (Fig. I.13.a) ou à sonde différentielle (Fig. I.13.b).
- Les systèmes à bobinage double, où le primaire et le secondaire sont électriquement séparés, peut toujours être soit absolu (Fig.I.13.c), soit différentiel (Fig.I.13.d). La détectivité des défauts dépend de leur géométrie, de leur nature métallurgique. La sonde utilisée doit être adaptée aux types de défauts recherchés : en particulier, les défauts de type fissure ou ligne sont toujours plus délicats à détecter que les défauts de type arrachement ou paille, [24].



**Fig. I. 13. Exemple de montage de sonde à courants de Foucault,  
montage simple: (a) sonde absolue, (b) sonde différentielle,  
bobinage double : (c) sonde absolue, (d) sonde différentielle, [24].**

### I.3.3 Profondeur de pénétration des courants de Foucault

Dans un conducteur plan, l'intensité des courants de Foucault diminue avec la profondeur en dessous de la surface selon une loi exponentielle. Par convention, la profondeur de pénétration  $\delta$  dans tel conducteur soumis à un champ  $H$  uniforme est la profondeur à laquelle l'intensité des courants est égale à «  $1/e$  » soit 0,37 de l'intensité de surface,  $e$  étant la base des logarithmes népériens ( $e = 2,7183$ ). Pour un conducteur plan la profondeur de pénétration  $\delta$  est donnée par l'expression suivante:

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

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

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

$\mu$ : Perméabilité magnétique du matériau.

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

Cette expression permet de constater que :

- pour un matériau donné ( $\mu$  et  $\sigma$  constants) la valeur de  $\delta$  augmente lorsque la fréquence  $f$  diminue et réciproquement (effet de peau),
- pour une fréquence  $f$  donnée, les matériaux caractérisés par une perméabilité magnétique élevée (matériaux ferromagnétiques) ou une conductivité électrique importante (cuivre, aluminium) présentent une faible profondeur de pénétration.

Toutefois, il est possible d'accroître la profondeur de pénétration des courants de Foucault dans ces matériaux par l'utilisation du courant d'excitation de fréquence relativement basse (quelques centaines de kHz). En effet, lors des contrôles de fabrication et plus souvent encore lors des contrôles périodiques de maintenance effectués sur des tubes de faible épaisseur (couche d'aluminium, échangeurs, générateurs de vapeur,...) il est fréquemment nécessaire de connaître la position d'un défaut par rapport aux surfaces interne et externe du produit. Cette discrimination peut être faite grâce à l'utilisation de courants d'excitation, dits « multifréquence ».

### I.3.4 Signaux d'excitation et d'exploitation

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

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

Le type de contrôle mono fréquence est celui le plus utilisé dans l'industrie, en particulier les capteurs double fonctions utilisent ce mode d'alimentation. Le capteur est alimenté par un courant ou une tension sinusoïdale à fréquence déterminée (d'une centaine de Hertz à une dizaine de Mhz selon les applications) et le contrôle se fait par une mesure d'impédance de la bobine. Cependant, dans le contrôle mono fréquentiel, on est limité à deux informations : la résistance et la réactance normalisées. Si ce type de contrôle permet une localisation spatiale d'un défaut et parfois une localisation sur sa taille, il ne permet pas de dissocier plusieurs informations (présence de plusieurs défauts) ou l'information d'une grandeur perturbatrice. La technique multifréquence permet de discriminer un nombre de paramètres supérieur à deux. Elle constitue une extension de la technique mono fréquence et permet d'exploiter  $k$  fréquences différentes et fournit  $2k$  informations.

Le développement des techniques multifréquences résulte d'un double objectif; positionner et caractériser un défaut à partir d'un signal global résultant de la combinaison du signal utile dû au défaut et de bruits parasites ayant des origines diverses.

L'alimentation par des courants pulsés est une dérivée de la méthode de l'alimentation mono fréquentiel mais, à la différence de celle-ci, le champ électromagnétique est généré par une impulsion de courant d'amplitude et du temps variables. Cette technique permet de détecter des défauts dans des profondeurs non accessibles aux courants de Foucault par la méthode mono fréquence sinusoïdale.

#### **I.4 Conclusion**

Nous avons rappelé dans ce chapitre, les méthodes de CND à savoir le ressuage, la radiographie, la thermographie et le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) qui fait l'objet de cette mémoire. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons rapporté des notions sur la création des courants de Foucault et le principe de fonctionnement des différents types des capteurs inductifs utilisés dans les applications de CND-CF. Egalement, les formes principales de bobinage de ces capteurs sont rapportées. Dans la troisième partie, quelques méthodes de caractérisation électromagnétique sont étudiées. Dans le chapitre suivant, nous allons parcourir la modélisation électromagnétique, dans le cas 2D et axisymétrique, d'un problème de CND-CF par la méthode des éléments finis.

---

# Chapitre II

## Principe du contrôle non destructif par CF et modèle d'un capteur élémentaire

---

# Chapitre II : Principe du contrôle non destructif par CF et modèle d'un capteur élémentaire

## II.1 Introduction

L'étude du CND-CF passe par l'analyse des courants induits dans la pièce à contrôler et de la façon dont ils interagissent avec cette dernière. Cela dépend essentiellement des propriétés électromagnétiques et géométriques de la pièce et du capteur, ainsi que du signal d'excitation. Le phénomène des courants induits est régi par les quatre équations de Maxwell, leur résolution passe par des hypothèses simplificatrices et l'adoption d'une formulation. Ceci nous ramène à la résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles qui peut être orienté soit vers des méthodes analytiques, des méthodes numériques, ou bien vers des méthodes semi-analytique selon la complexité du travail à faire. [29]

La résolution analytique des équations de Maxwell présente l'avantage d'être rapide et permet d'obtenir des résultats très précis.. Cependant, la complexité des configurations de CND par CF fait qu'une solution analytique est souvent impossible à obtenir. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques permettant d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées, comprenant des géométries quelconques de pièces, de défauts et de capteurs. Nous nous intéresserons à la méthode des Éléments Finis (EF). [30]

## II.2 Principe et Présentation

Dans notre cas, le capteur est à double fonction, constitué d'une bobine émettrice réceptrice, excitée par un courant alternatif de fréquence constante créant un champ magnétique, dans l'absence d'une certaine matière conductrice en interaction avec le champ, l'impédance de cette bobine est constante.

Dans la présence d'un matériau ferromagnétique ou conducteur proche du capteur, l'interaction du champ avec ce matériau crée des courants induits qui créent eux-mêmes un autre champ en sens inverse qui perturbe le champ initial, cette perturbation va modifier l'impédance du capteur.

La présence d'un défaut dans la pièce à examiner résulte une variation de la conductivité causée par l'inhomogénéité, la température, l'absence de la matière ou l'épaisseur différent, les courants induits vont être créé d'une façon différente, un changement dans l'impédance est donc observé.

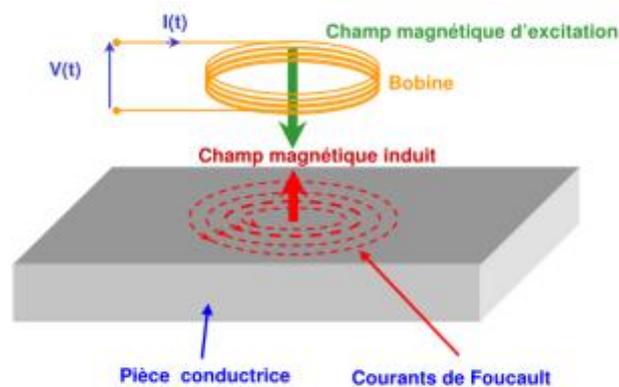


Fig.II.1 Principe de contrôle non destructif par CF.

### II.3 Plan d'impédance

Sachant que l'impédance du capteur change avec la variation de flux magnétique dans la pièce à contrôler et la quantité de ce champ réfléchi vers la bobine d'excitation, ce champ réfléchi émis par les courants induits est fonction des paramètres électromagnétique de la pièce, sa géométrie, et sa position relative au capteur. La bobine d'excitation produit un champ magnétique qui va induire les courants de Foucault dans la pièce qui vont ensuite créer un autre champ magnétique inverse au primaire, causant l'apparition d'une résistance due aux pertes joules et un changement de la réactance de l'énergie magnétique emmagasinée de cette bobine.

La figure II.3 présente la variation des composantes de l'impédance (résistive et inductive) en fonction de la conductivité de la pièce supposée nonferromagnétique  $\mu = \mu_0$ . Pour une valeur  $\sigma = 0$ , le matériau est non-conducteur, pas de courants de Foucault induits, la résistance et l'inductance de la bobine primaire sont celles de l'espace libre  $R_0$  et  $L_0$ , pour une autre valeur de  $\sigma = \infty$  (conducteur parfait), les courants induits circulent librement (sans résistance) et les pertes résistives sont donc nulles, la résistance garde la même valeur  $R_0$  de l'espace libre, mais l'inductance dépend de la quantité du flux capturé et réfléchi par la cible, supposant que cette dernière capture 100% du champ émis, l'autre réfléchi par les courants induits est maintenant en même amplitude et en opposition, comme le champ total est nul, l'inductance elle-même est nulle.

Entre ces deux points extrêmes, on peut déduire que la résistance devrait augmenter en un maximum puis retourner à sa valeur  $R_0$ , car pour des valeurs initiales de la conductivité, les courants induits commencent à circuler et créent des pertes résistives. Mais, Au-delà de certaines

valeurs de la conductivité (où  $R$  est à sa valeur maximale), l'augmentation de la densité des courants induits dépasse l'augmentation de la conductivité, ce qui implique la création d'un champ magnétique plus important avec moins de pertes résistives, par conséquent, la résistance de la bobine primaire diminue.

D'autre part, quand la conductivité augmente, les courants induits augmentent eux-mêmes, le champ magnétique induit est plus important et l'énergie magnétique emmagasiné diminue, l'inductance de la bobine d'excitation devrait décroître. La relation est non linéaire, mais le changement est maximal pour des valeurs maximales de la résistance. [31]

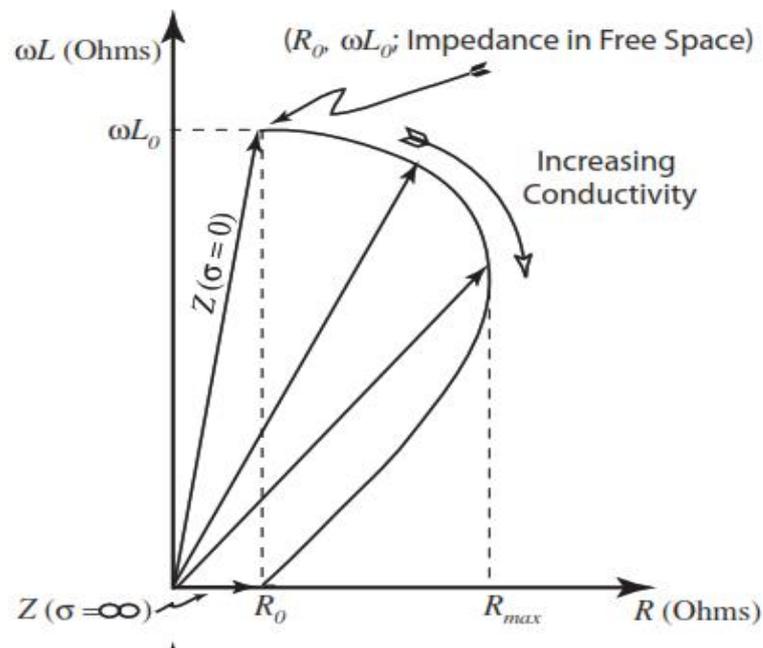


Fig.II.2 Réponse de l'inductance et la résistance du capteur en fonction de la conductivité. [31]

## II.4 Modélisation du système

### II.4.1 Lois classiques de l'électromagnétisme

Tous les phénomènes électromagnétiques variables dans le temps et dans l'espace qu'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électrotechniques classiques sont régis par les quatre équations aux dérivées partielles de Maxwell :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II-1})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II-2})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-3})$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II-4})$$

Où  $\vec{E}$  : Le champ électrique

$\vec{H}$  : Le champ magnétique

$\vec{D}$  : L'induction électrique

$\vec{B}$  : L'induction magnétique

$\rho$  : La densité de charge électrique dans un volume  $v$ .

$J$  : La densité de courant électrique

Les équations du Maxwell sont générales et s'appliquent à tous les milieux. Pour prévoir le comportement des phénomènes électromagnétiques, il faut ajouter les relations particulières aux milieux considérés :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II-5})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II-6})$$

$$\vec{E} = \vec{j} / \sigma \quad (\text{II-7})$$

Où  $\mu$  : Perméabilité magnétique du milieu.

$\varepsilon$  : Permittivité électrique du milieu.

$\sigma$  : La conductivité électrique.

#### II.4.2 Méthodes de résolution

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles décrites précédemment : [30]

##### II.4.2.1 Méthodes analytiques

Les premiers travaux se sont basés sur des méthodes de résolution analytiques des équations issues des modèles à une seule dimension. Pour les modèles bidimensionnels, la solution analytique peut s'avérer très complexe même si pour des géométries simples, on peut trouver des solutions exactes à partir de la méthode de séparation des variables. Dans des cas particuliers, ces méthodes sont des références de validation pour le reste des autres méthodes.

##### II.4.2.2 Méthodes numériques

Avec l'évolution de l'outil informatique, l'utilisation des méthodes numériques pour la résolution de cette catégorie d'équations se généralise de plus en plus. Les méthodes numériques les plus connues sont : Méthode des différences finis (MDF), Méthode des éléments finis (MEF), Méthode des intégrales de frontières (MIF), Méthode des volumes finis (MVF).

### II.4.2.3 Méthodes semi analytiques

Ce sont des méthodes mixtes, qui sont une combinaison de méthodes analytiques couplées à des méthodes numériques. Ces méthodes ne sont appliquées que pour résoudre certains types de problèmes. Cette approche nous permet d'obtenir des expressions analytiques faciles à résoudre et de réduire le temps de simulation tout en ayant des résultats assez proches de la réalité.

### II.4.3 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles, elle repose sur la subdivision du domaine d'étude en des sous-domaines élémentaires et à donner une approximation de la solution de l'équation différentielle qui est construite à partir d'une formulation équivalente du problème en un système d'équations algébriques, elle peut être soit une « formulation variationnelle » ou en « résidus pondéré ».

### II.4.4 Formulation en potentiel vecteur A

En premier lieu nous allons mettre l'équation qui régit notre système. Dans notre travail ça sera l'équation de la magnétodynamique en régime harmonique pour une formulation en potentiel vecteur magnétique A.

Comme le système est composé de deux milieux différents, la méthode des éléments finis, lorsque l'inconnue recherchée aux nœuds est le potentiel vecteur magnétique A, impose la continuité à l'interface de deux milieux de nature différente. Si A1 et A2 sont respectivement les potentiels du milieu 1 et 2 à l'interface alors : [32]

$$A_1 = A_2$$

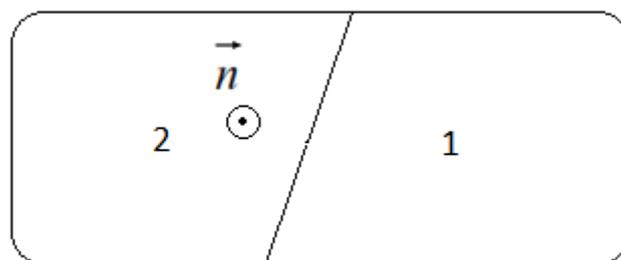


Fig.II.3 Différents milieux ayant différentes caractéristiques électromagnétiques

### II.4.5 Conditions de passage et résolution

La continuité du potentiel assure la continuité de la composante normale de l'induction magnétique à l'interface. Compte tenu des équations de passage qu'on rappelle ci-après : [32]

Conservation de la composante normale de l'induction magnétique B :

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (\text{II-8})$$

Conservation de la composante tangentielle du champ électrique E :

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \quad (\text{II-9})$$

Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique due aux charges surfaciques s'ils existent :

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = r_s \quad (\text{II-10})$$

Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique due aux courants surfaciques s'ils existent :

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K} \quad (\text{II-11})$$

$r_s$ : Densité de charge surfacique à l'interface

$\vec{n}$  : Le vecteur normal à la surface

$\vec{K}$  : Représente la composante de la densité de courant perpendiculaire à l'axe du plan où se trouve  $\vec{n}$  et  $\vec{H}$

On définit le potentiel vecteur magnétique A par l'équation suivante :

$$\vec{B} = \text{Rot}(\vec{A}) \quad (\text{II-12})$$

Pour assurer l'unicité de la solution nous allons imposer une condition de jauge de Coulomb :

$$\text{Div}(\vec{A}) = 0$$

En remplaçant (2-12) dans (2-3), on obtient :

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \cdot \text{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II-13})$$

Comme la dérivé du rotationnel égale au rotationnel de la dérivé d'un champ vectoriel :

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\text{rot}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad (\text{II-14})$$

$$\text{rot}(\vec{E}) + \text{rot}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{II-15})$$

Le rotationnel étant associatif on aura :

$$\text{rot}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{II-16})$$

L'expression (1-16) implique l'existence d'un potentiel scalaire  $V$  défini comme suit :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{grad}(V) \quad (\text{II-17})$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{grad}(V) \quad (\text{II-18})$$

On considérant la loi d'Ohm (2-7) :

$$\vec{J} = \sigma. \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{grad}(V) \right) \quad (\text{II-19})$$

Ce qui permet de définir les deux densités de courant cité précédemment :

$$\vec{J}_{ind} = -\sigma. \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II-20})$$

$$\vec{J}_{exi} = -\sigma. \overrightarrow{grad}(V) \quad (\text{II-21})$$

Si on remplace (2-19) dans (2-1), On obtient (En négligeant les courants de déplacement) :

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

La combinaison entre les équations (II-5) et (II-12) donne :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu}. \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \quad (\text{II-23})$$

En remplaçant (II-23) dans (II-22), on obtient :

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu}. \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \right) = \sigma. \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{grad}(V) \right) \quad (\text{II-24})$$

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu}. \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \right) + \sigma. \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\sigma. \overrightarrow{grad}(V) \quad (\text{II-25})$$

Cette équation représente l'équation de la magnétodynamique transitoire en terme de potentiel vecteur magnétique  $A$  avec un terme source (excitation).

L'étude de cette équation en régime statique (indépendant du temps) constitue un régime magnétostatique. Mais si en prend en compte la dépendance au temps avec une alimentation sinusoïdale (ce qui est notre cas d'étude) cela va constituer un modèle magnétodynamique en régime harmonique avec  $d/dt = j\omega$ . A partir de l'équation (II.21), l'équation s'exprime par :

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

**II.4.5.1 Dans l'air**

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

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu_0} \cdot \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \right) = 0 \tag{II.27}$$

$\mu_0$  : Perméabilité de l'air.

**II.4.5.2 Dans la bobine**

Les inducteurs sont des fils fins de cuivre, l'équation (2-26) pourra alors s'écrire sur la forme suivante :

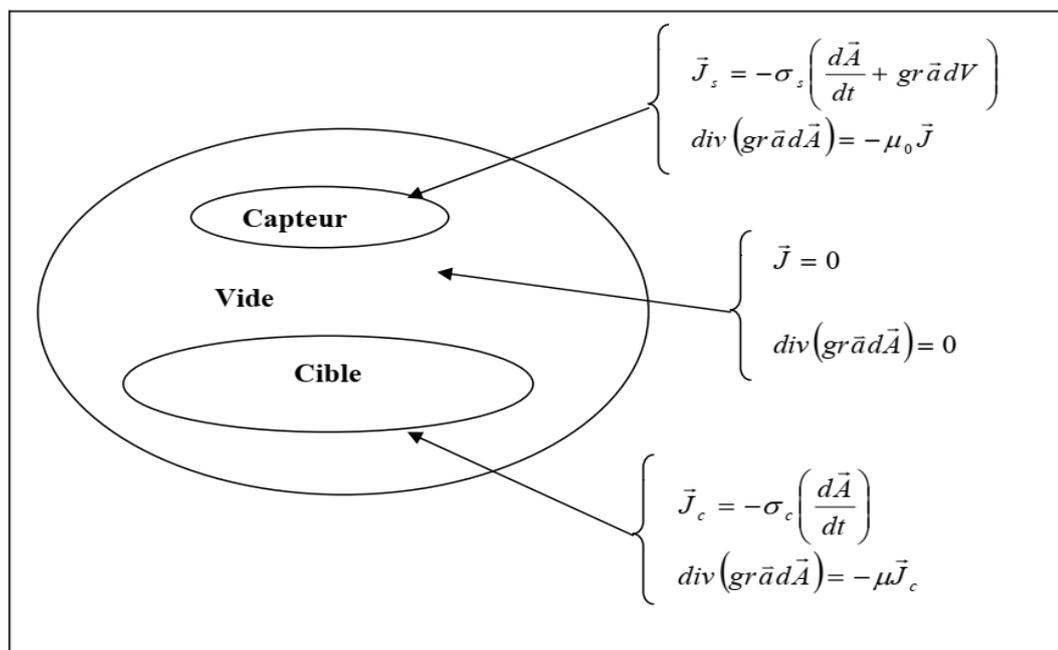
$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \right) = \vec{J}_s \tag{II.28}$$

**II.4.5.3 Dans la cible**

La pièce à contrôler est supposé conductrice seulement (nonferromagnétique), l'équation dans cette région est alors :

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = 0 \tag{II.29}$$

$\mu = \mu_0 \mu_r \approx \mu_0$  : Perméabilité relative du matériau.



**Fig.II.4 Les equations caracteristiques pour chaque domaine d'étude**

## II.5 Conclusion

Ce chapitre a été essentiellement consacré pour la présentation du principe de CND par CF et au rappel des équations de l'électromagnétisme, et à leurs formulations en termes de potentiel vecteur magnétique  $A$ . Les équations de Maxwell et les lois de comportement des milieux permettent avec un judicieux raisonnement d'aboutir à une modélisation des phénomènes électromagnétiques sous forme d'équations aux dérivées partielles. Ces équations peuvent être résolues de diverses manières, celle des éléments finis a été adaptée, on obtient ainsi l'équation de la magnétodynamique transitoire dans chaque domaine d'étude.

---

# **Chapitre III**

## **Simulation et interprétation**

---

# Chapitre III : Simulation et interprétation

## III.1 Introduction

Dans le domaine du CND par CF, la modélisation numérique par éléments finis (MEF) est devenue, grâce à la performance du matériel informatique, un outil majeur dans la conception des sondes et dans l'étude des performances de détection des défauts par CF. [30]

Commençant notre travail tout d'abord en simulant un capteur à fonction double (émetteur-récepteur) constitué d'une seule bobine et observant sa variation d'impédance pour un défaut surfacique.

Sachant que le capteur est constitué d'une bobine cylindrique, une modélisation 2D axisymétrique est faisable. Mais, la présence d'un défaut de forme quelconque, et d'une bobine qui se déplace suivant la longueur de la pièce, nous obligent d'effectuer une étude en 3D. Ici, le logiciel Comsol multi-physique est utilisé pour la modélisation du système « capteur-cible. [33]

## III.2 Dimensions du capteur

Le capteur est constitué d'une simple bobine qui se déplace le long d'une plaque en aluminium qui contient un défaut de forme rectangulaire en surface qui est un capteur de référence « le JSAEM benchmark problème n°2-5 ». Les caractéristiques et les propriétés physiques de la bobine et de la plaque sont regroupées dans le tableau III.1. [33]

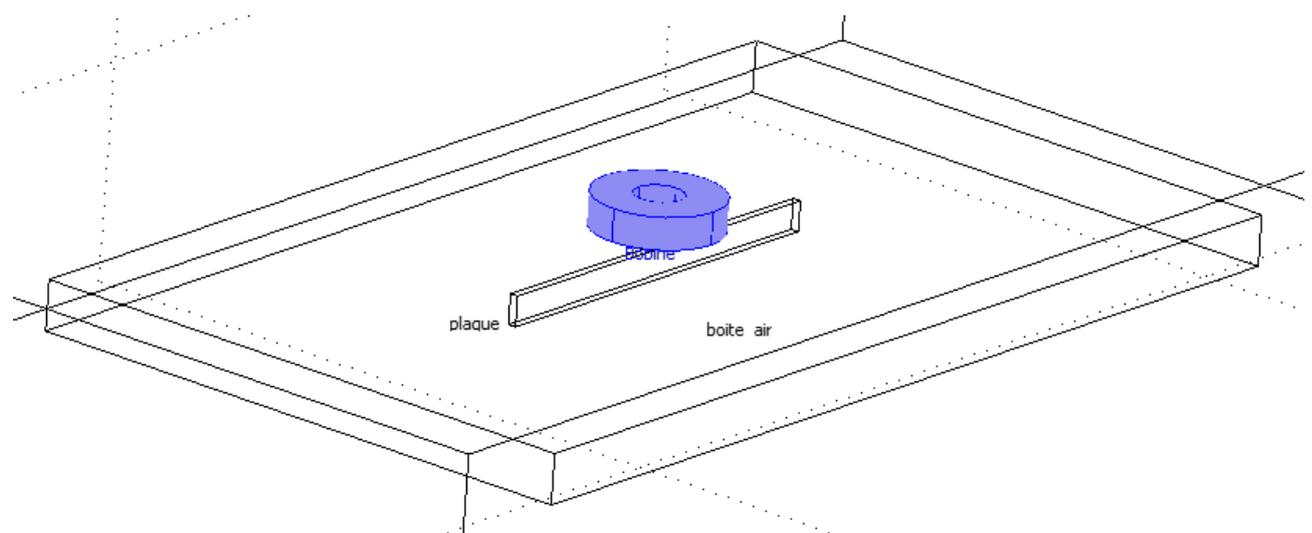


Fig.III.1 Structure du système « capteur-cible »

Plaque métallique		Bobine	
Longueur de la plaque	25 mm	Rayon externe de la bobine	1.6 mm
Largeur de la plaque	15 mm	Rayon interne de la bobine	0.6 mm
Profondeur de la plaque	1.25 mm	Hauteur de la bobine	0.8mm
Longueur du défaut	10 mm	Nombre de spires	140
Largeur du défaut	0.21 mm	Lift-off	0.5 mm
Profondeur du défaut	0.75 mm	Fréquence	1.5 10 <sup>5</sup> Hz
Conductivité de la plaque	1 MS/m	Densité de courant	0.8(A)
Perméabilité relative de la plaque	1	Epaisseur de peau	1.5 mm

**Tableau.III.1 Caractéristique du système « capteur+cible »**

### III.3 Géométrie et application

Afin de réaliser une simulation de la réponse du capteur, en utilisant la méthode des éléments finis, le logiciel Comsol multi-physique 3.5a a été utilisé. Ce dernier permet de traiter des problèmes chimiques, mécaniques, thermiques, mécanique des fluides,... etc. on utilise son module électromagnétique pour ce travail, où la géométrie et le maillage réalisés sont donnés par les figures III.2 et III.3. Les étapes de création et simulation sous COMSOL sont : [33]

#### *a. Choix du type de formulation*

- Formulation en potentiel vecteur magnétique A (modèle magnétodynamique).

#### *b. Pré-processeur*

- Création de la structure géométrique du modèle.
- Choix des types d'éléments à utiliser.
- Affectation des propriétés électriques et magnétiques des matériaux constituant chaque entité géométrique.
- Maillage de la géométrie.

#### *c. Solution*

- Introduction des conditions aux limites et application des sources électromagnétiques (courants, tensions, ...).
- Résolution du problème.

#### *d. Post-processeur*

- Analyse et visualisation des résultats.
- Création et enregistrement de fichiers des résultats.

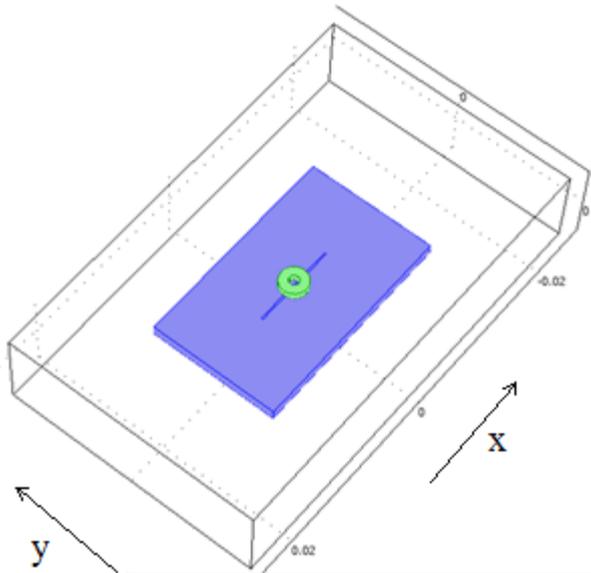


Fig.III.2 Géométrie du système

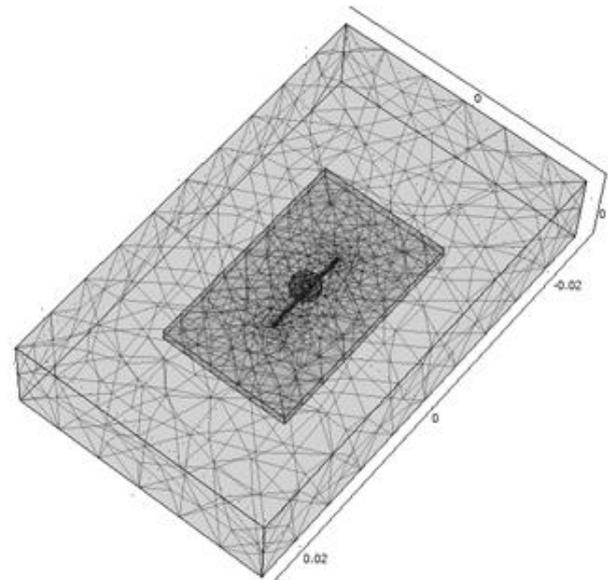


Fig.III.3 Maillage éléments finis du système

### III.4 Simulation et exploitation des résultats

#### III.4.1 Observation des courants induits dans la cible

Afin de valider le modèle proposé, on compare nos résultats avec ceux d'une référence dans ce domaine, une thèse de doctorat 2016 de référence [33], la plaque conductrice à tester est supposée amagnétique caractérisé par une perméabilité égale à 1 et une conductivité de 1MS excité par un courant sinusoïdale de densité  $J = 0.8A$  et une fréquence de 150 KHZ. Les résultats de la simulation obtenus dans le cas d'une pièce sans et avec défaut sont illustrés par les figures suivantes :

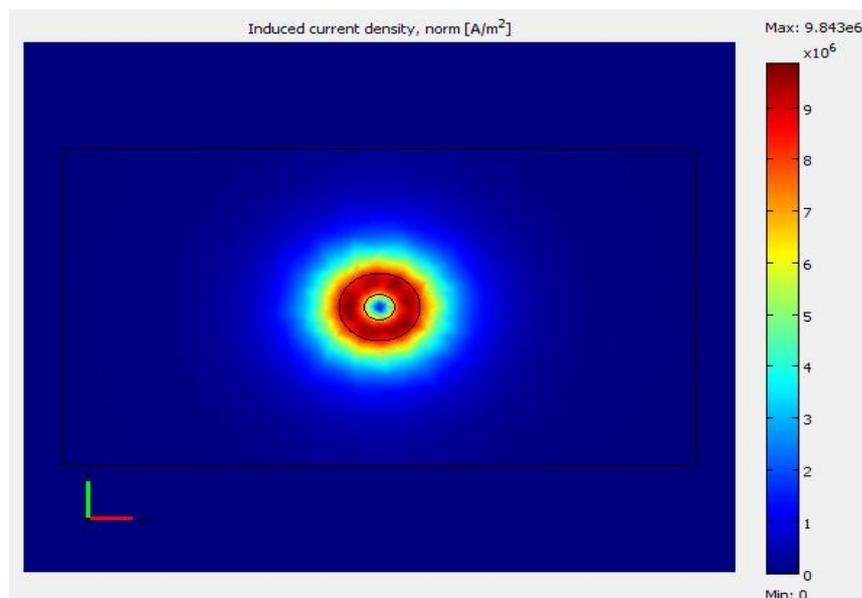
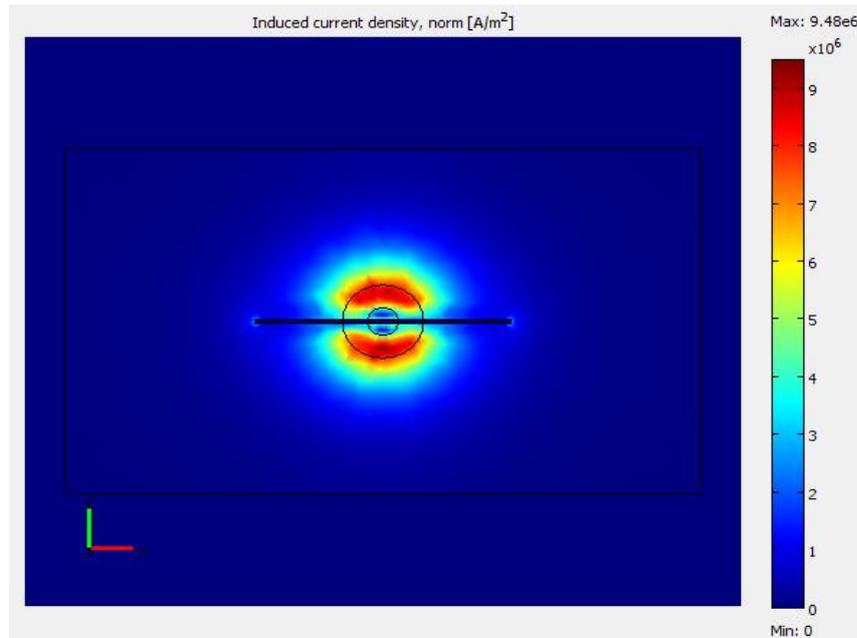
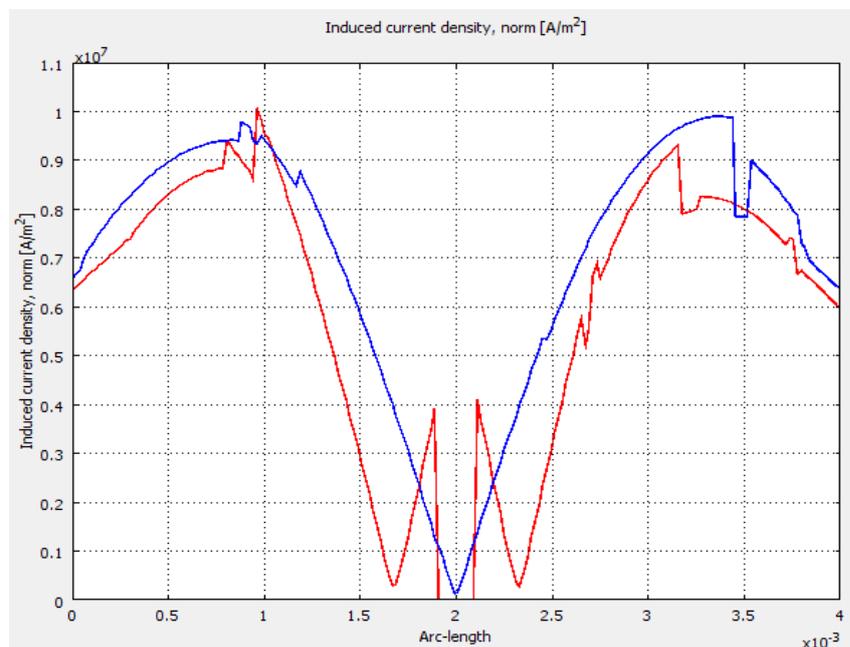


Fig.III.4 Densité des courants induits dans la plaque sans défaut



**Fig.III.5 Densité des courants induits dans la plaque avec défaut**



**Fig.III.6 Distribution des courants induits en surface de la pièce suivant y**  
**En bleu : sans défaut ; En rouge : avec défaut**

Après la résolution du système, nous avons obtenu la distribution des courants induits selon l'axe y ainsi que sa valeur maximale dans la pièce en présence et en absence du défaut. À partir de ces figures, on remarque que la répartition de ces courants est différente dans les deux cas, ceci est dû à

la présence du défaut qui perturbe la circulation de ces courants, une diminution de la valeur maximale de ces courants est aussi observée, causée par l'absence de la matière conductrice où ces courants prennent naissance.

### III.4.2 Calcul et simulation de la variation d'impédance

L'objectif de cette simulation est de déterminer l'impédance complexe du capteur. Il est possible de déterminer cette dernière en calculant l'énergie magnétique ( $W_m$ ) emmagasinée dans tout l'espace d'étude et les pertes Joule ( $P_j$ ) définies par les relations suivantes: [33]

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_{\text{espace}} \frac{1}{\mu} ||B||^2 dv \quad (\text{III.1})$$

$$P_j = \frac{1}{2} \iiint_{\text{conducteur}} \rho ||J||^2 dv \quad (\text{III.2})$$

$J$  : densité de courant dans la bobine.

$\rho$  : résistivité électrique.

Connaissant  $W_m$  et  $P_j$  nous pouvons facilement déterminer l'inductance ( $L$ ) et la résistance ( $R$ ) du capteur. Les expressions reliant l'énergie magnétique et l'inductance ainsi que les pertes joules et la résistance sont :

$$W_m = \frac{1}{2} L I_{eff}^2 \rightarrow L = 2.W_m / I_{eff}^2 \quad (\text{III.3})$$

Et :

$$P_j = \frac{1}{2} R I_{eff}^2 \rightarrow R = 2.P_j / I_{eff}^2 \quad (\text{III.4})$$

$I_{eff}$  : La valeur efficace du courant dans la bobine.

Et l'impédance à pour expression :

$$Z = R + j\omega L = R + jX$$

La partie réelle exprime les pertes par effet joule dans la pièce à examiner, la partie imaginaire d'autre coté présente la déformation et la diminution du champ résultant causé par la génération des courants induits qui génèrent eux-mêmes un champ inverse au primaire.

Après le calcul de l'énergie magnétique emmagasiné et les pertes joules dans la cible et l'obtention des valeurs de la résistance et l'inductance, on s'intéresse à observer la différence des composantes de l'impédance résistive ( $R$ ) et inductive ( $X$ ) du capteur en présence et absence du défaut en fonction du déplacement. Où :

$$R = R_1 - R_0 ; X = X_1 - X_0$$

R1, X1 : Résistance et réactance du capteur en présence du défaut.

R0, X0 : Résistance et réactance du capteur en absence du défaut.

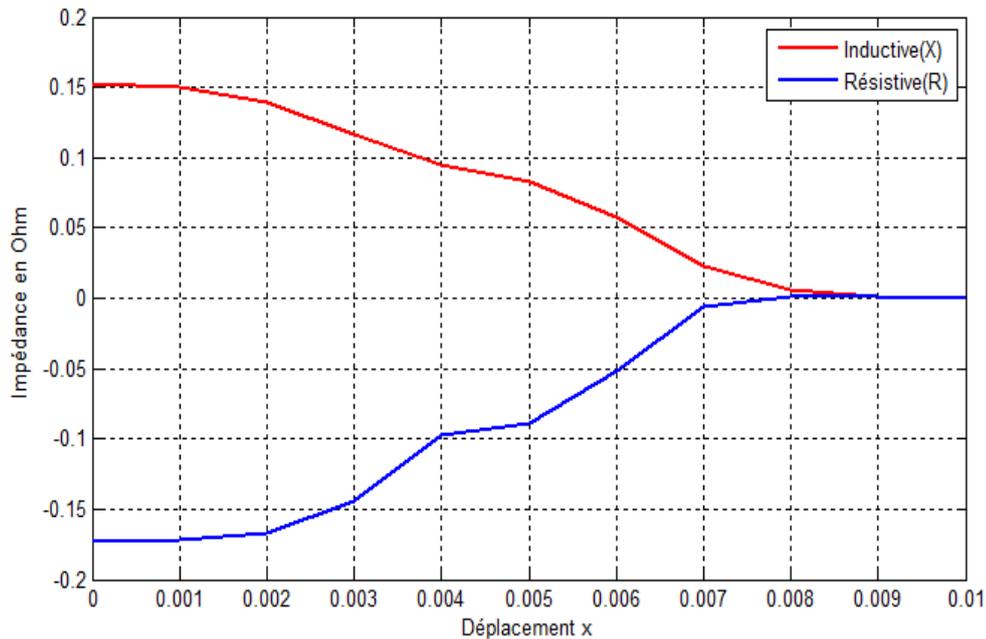


Fig.III.7 La différence de l'impédance du capteur (en  $\Omega$ ) avec et sans défaut suivant x.

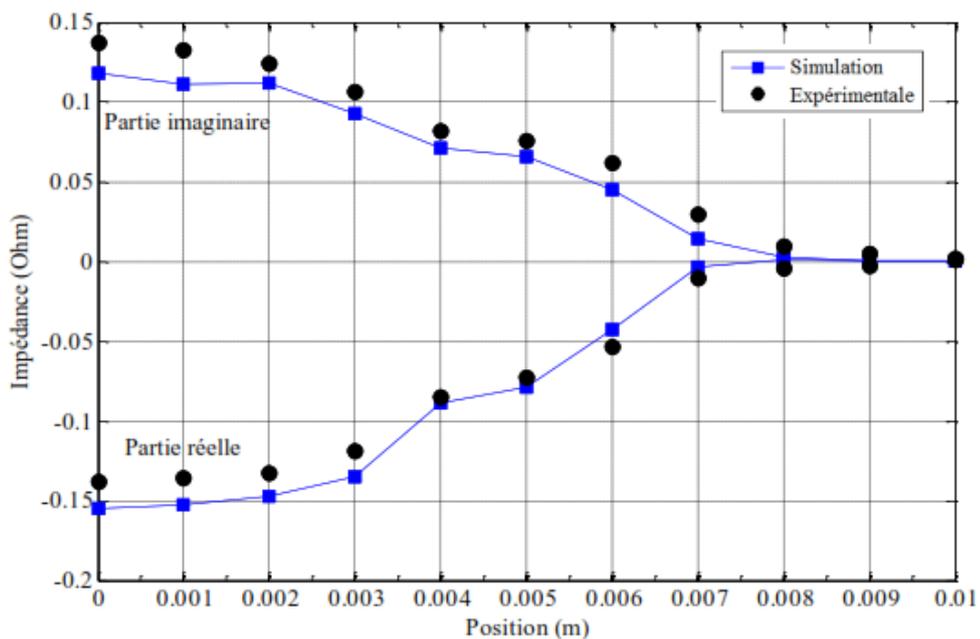


Fig.III.8 Variation de l'impédance du système (thèse Mohamed CHELABI)

En comparant notre résultat avec celle de la thèse référence, on remarque des valeurs très proches et une variation identique de l'impédance en fonction du déplacement. On peut donc confirmer la robustesse de la méthode appliquée pour le calcul de l'impédance. Pour une position initiale du capteur au milieu du défaut ( $x=0$ ), le manque de la matière conductrice va diminuer la circulation des courants induits, les pertes résistives et le champ réfléchi par ces courants vont avoir des

valeurs inférieures à celles d'une pièce saine, la résistance avec défaut est donc inférieure à celle sans défaut ( $R_0 > R_1$ ), d'autre part l'énergie magnétique emmagasiné avec défaut doit avoir des valeurs supérieures à celle sans défaut, l'inductance avec défaut a donc des valeurs supérieures à celles sans défaut ( $L_0 < L_1$ ), ce qui explique les valeurs négatives de sa différence  $R$  et les valeurs positives de l'inductance  $L$ . En déplaçant le capteur, une partie du champ émis par la bobine va éviter le défaut et génèrent plus de courants de Foucault dans la cible, plus de pertes par effets Joules et plus de champ réfléchi, par conséquent, la résistance avec défaut a des valeurs supérieures et  $R$  augmente et l'inductance avec défaut a des valeurs inférieures et  $L$  diminue jusqu'à 0 où le champ émis évite totalement le défaut qui est le cas d'une pièce saine ( $R_0 = R_1$  ;  $L_0 = L_1$ ).

### III.4.3 Cas d'un défaut profond et effet de la fréquence

Dans certains cas du contrôle, un défaut ayant des propriétés différentes nécessite un changement d'un certain paramètre pour être bien déterminé, dans le cas d'un défaut profond, la fréquence doit être changée au niveau de celui-ci pour que l'effet de peau permet au courants induits de pénétrer dans des niveaux différents capable d'extraire plus d'informations afin de donner une image plus claire du défaut.

On fait donc varier la fréquence des courants d'excitation pour ce même défaut, puis on l'allonge jusqu'au niveau inférieur de la plaque et refaire la même étude paramétrique, puis on compare nos résultats.

On prend en considération trois valeurs particulières de la fréquence :

- 150 KHZ où les courants induits sont capables à pénétrer dans toute la plaque (1.25mm).
- 600 KHZ où les courants induits sont capables à pénétrer jusqu'au niveau du premier défaut (0.75mm).
- 2109375.9 HZ où les courants induits sont capables à pénétrer jusqu'au 0.4mm du défaut.

#### III.4.3.1 Défaut simple

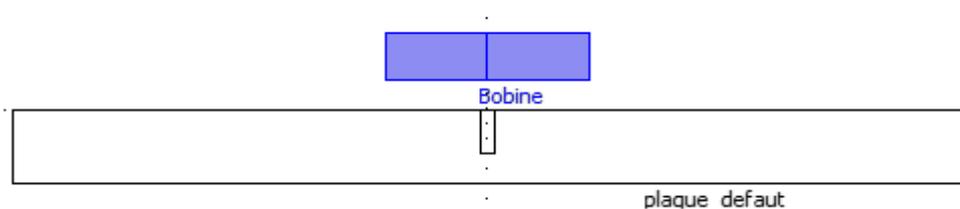
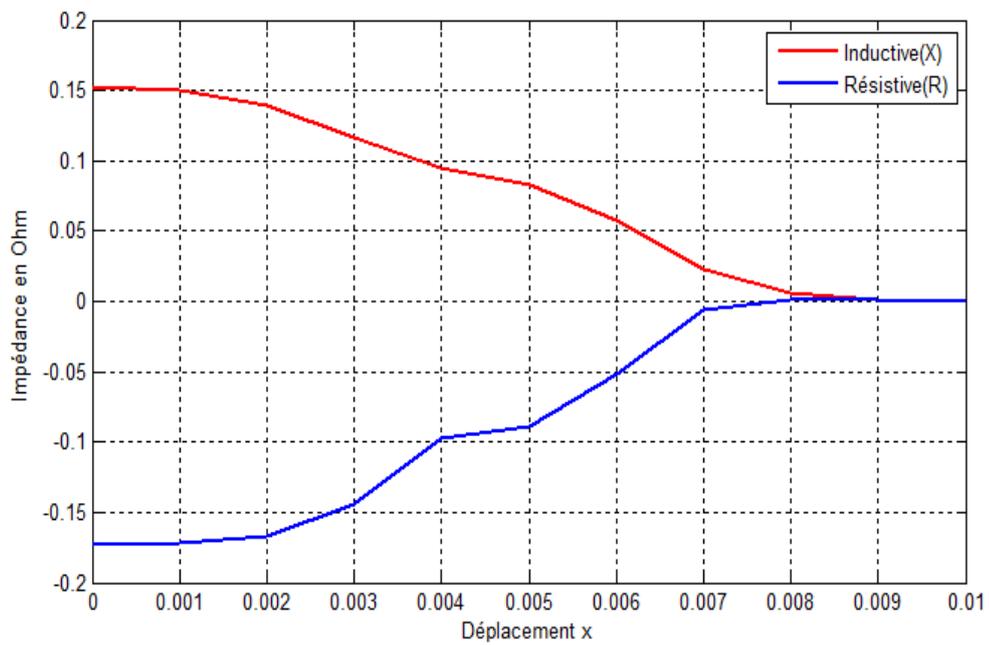
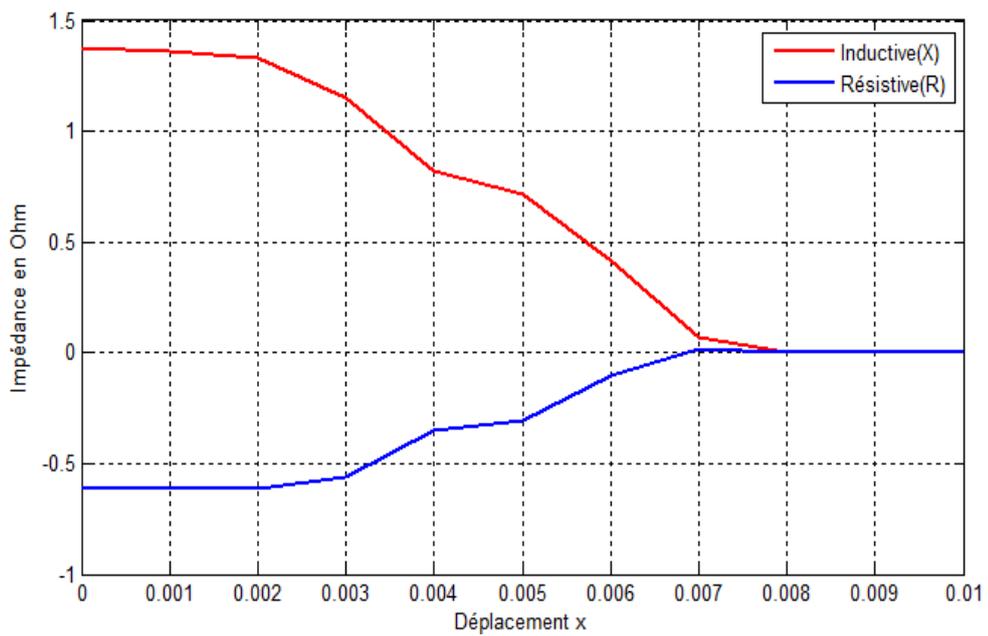


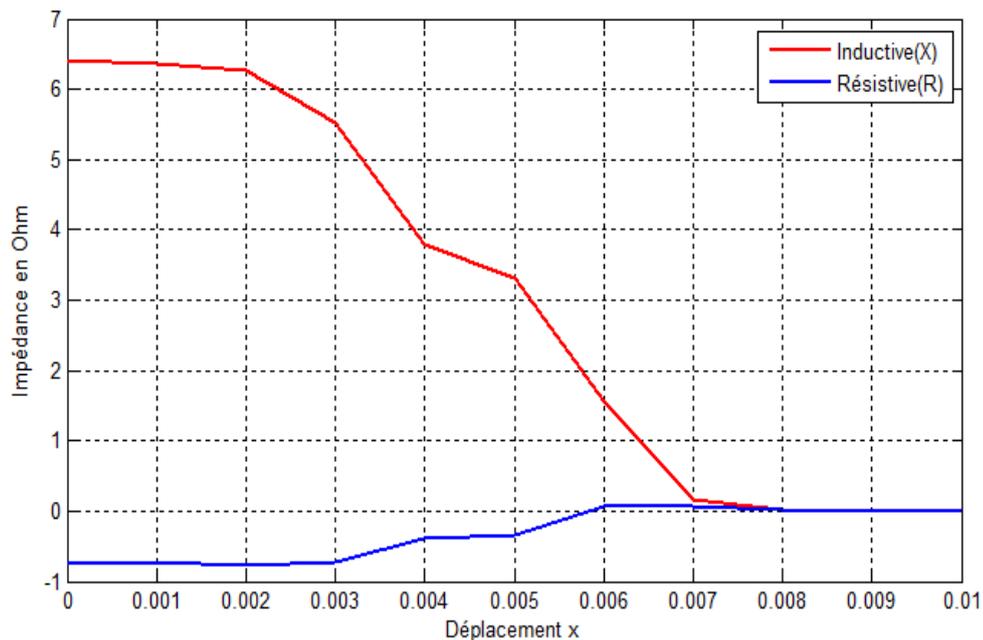
Fig.III.9 Cas du défaut déjà traité.



**Fig.III.10** Variation des composantes de l'impédance pour  $f=150\text{KHZ}$



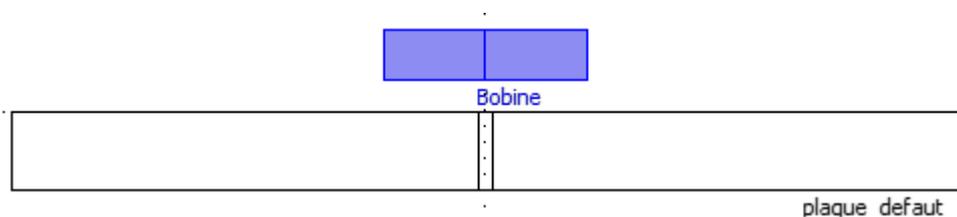
**Fig.III.11** Variation des composantes de l'impédance pour  $f=600\text{KHZ}$



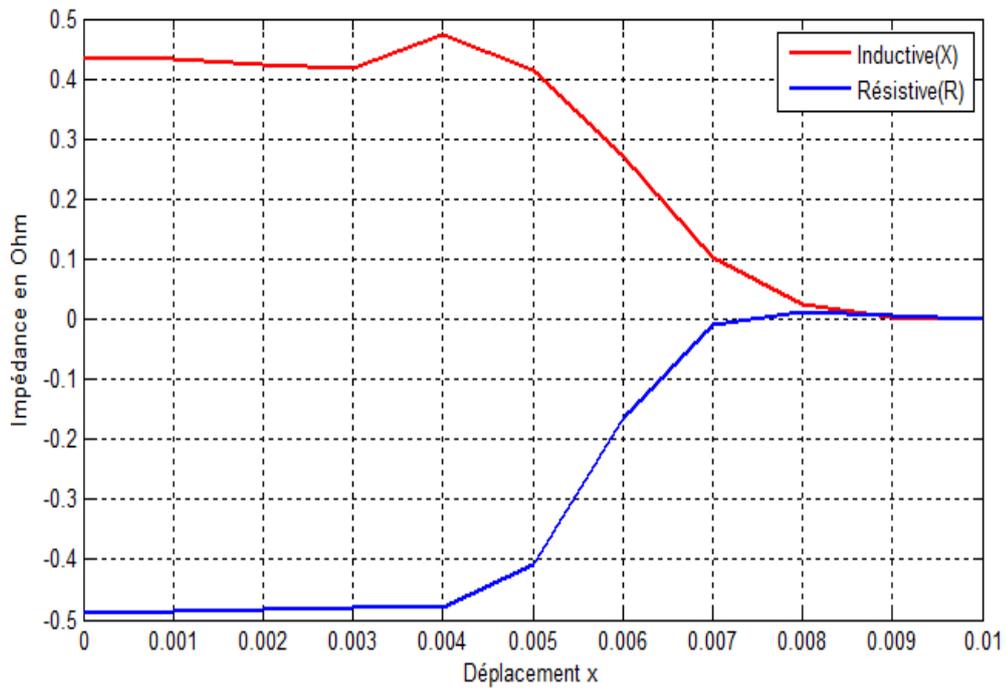
**Fig.III.12 Variation des composantes de l'impédance pour  $f=2109375.9\text{HZ}$**

Après la résolution du système, on remarque, qu'en augmentant la fréquence, la valeur de l'inductance( $L_1$ ) augmente et la résistance( $R_1$ ) diminue (comme  $R_0$  et  $L_0$  sont constants), cela est dû au fait que les courants induits minimisent leur pénétration dans la pièce (l'effet de peau), moins de courant circulent, ce qui résulte une diminution des pertes résistives et moins de champ inverse est réfléchi.

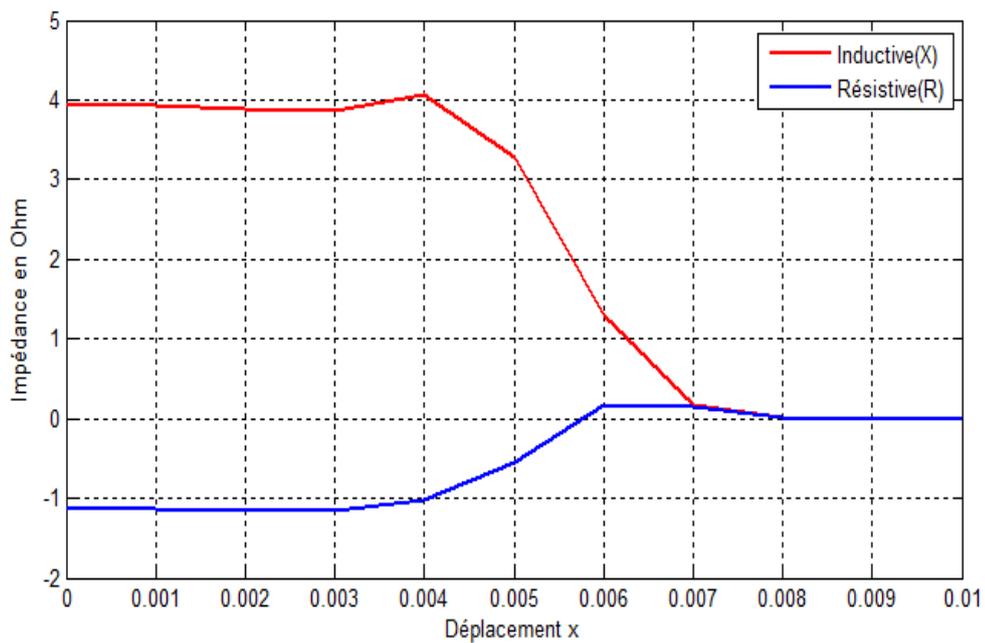
#### III.4.3.2 Défaut allongé



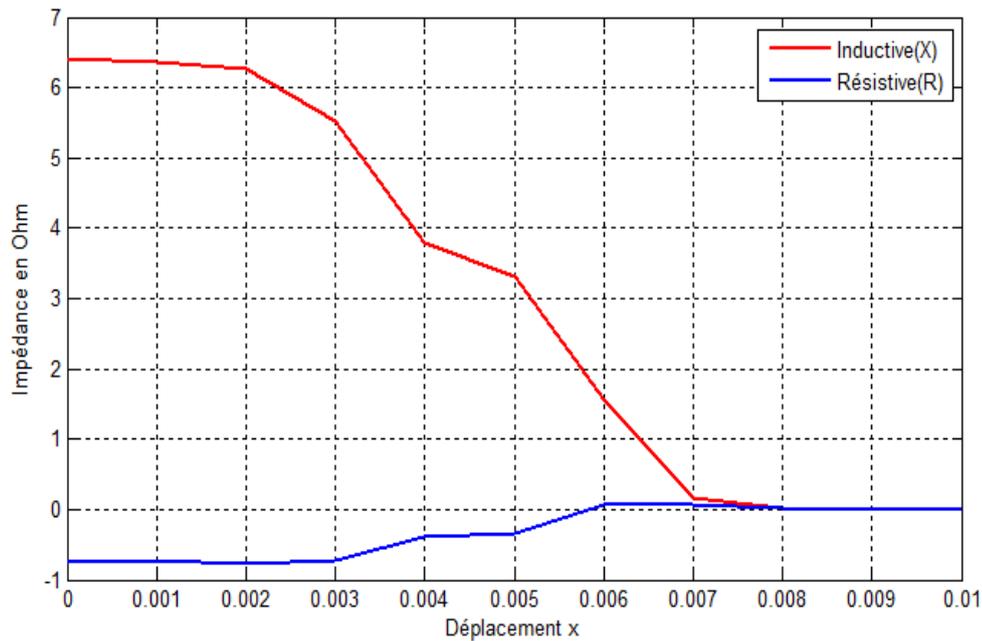
**Fig.III.13 Cas du défaut allongé.**



**Fig.III.14** Variation des composantes de l'impédance pour f=150KHZ



**Fig.III.15** Variation des composantes de l'impédance pour f=600KHZ



**Fig.III.16 Variation des composantes de l'impédance pour  $f=2109375.9\text{HZ}$**

Dans le cas du défaut long, on remarque le même comportement des composantes de l'impédance, mais avec des proportions différentes, où le manque de plus de matière au niveau du défaut résulte en moins de pertes résistives et inductives comme on a déjà expliqué. Ce qui n'est pas le cas dont la fréquence d'excitation est 2109375.9HZ où les courants induits dans les deux cas occupent le même niveau dans la cible (circulent dans la même quantité de matière au niveau de 0.4mm) et les pertes sont les mêmes.

Prenant maintenant la variation de l'impédance dans le cas du défaut occupant toute la pièce comme référence (ce qui est obligatoire à disposer afin de déterminer le niveau d'un défaut surfacique), en variant la fréquence du contrôle où le défaut a été détecté à partir de 2109375.9HZ, et en atténuant la valeur critique de 600KHZ, on remarque une différence claire dans l'impédance comparant les deux défauts, ce qui indique un changement dans la matière conductrice dans ce niveau là, donnant le niveau exacte du défaut.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la solution de l'équation de la magnétodynamique en régime harmonique qui a été formulée précédemment, c'est à dire la répartition du potentiel vecteur magnétique A sur notre domaine d'étude, nous avons utilisé COMSOL Multi-physiques comme plate forme de simulation qui est basé sur la MEF, afin de déterminer la distribution des courants induits, qui nous a permis d'exploiter la variation de l'impédance pour deux type de défaut et pour plusieurs fréquences des courants d'excitation, ou on a constater par Le calcul qu'au-delà

d'une certaine fréquence le capteur devient insensible aux défauts profonds, et que par la variation des fréquences d'excitation on peut déterminer le niveau du défaut surfacique. D'une manière générale les résultats trouvés ont une bonne concordance avec les résultats expérimentaux de la référence de [33].

---

# Conclusion générale

---

### Conclusion générale

De nombreuses techniques de contrôle non destructif CND existent. Dans le présent travail une étude a été faite sur un capteur par courants de Foucault qui est largement utilisé dans l'industrie métallurgique et très répandue en raison de sa facilité de mise en œuvre, de son faible coût et de son caractère non polluant. Elle est réservée aux pièces électriquement conductrices dans lesquelles elle permet de détecter la présence de fissures.

Nous avons commencé notre travail en présentant quelques types du contrôle non destructif utilisés dans l'industrie en général et celle à courant de Foucault en particulier, expliquer leurs principe de fonctionnement et citer quelques avantages et désavantages connus.

Dans le deuxième chapitre, on a expliquer le principe du contrôle non destructif par courant de Foucault, formuler l'équation qui régie le fonctionnement de notre dispositif a partir des équations de Maxwell pour trouver l'équation différentielle aux dérivées partielles, qu'on a résolut numériquement par la méthode des éléments finis, pour avoir comme solution une répartition du potentiel vecteur magnétique  $A$  et les différentes grandeurs qui peuvent être dérivés directement de celui-ci sur l'ensemble de notre domaine d'étude (capteur, air et cible).

Le dernier chapitre traite la résolution du notre système par la méthode des éléments finis sous le logiciel COMSOL Multi-physiques 3,5a, où on a pris beaucoup de temps pour métriser ce nouveau logiciel (pour nous). Ce logiciel est un outil de conception et de modélisation ayant l'avantage de ne pas être dédié à un domaine d'application particulier, il rassemble un ensemble d'outils et une bibliothèque de modèles prédéfinis permettant la simulation de tout processus physique pouvant être décrit par des équations différentielles, il compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF, et d'autre part, il permet de travailler en 2D ou 3D part d'économiser des ressources informatiques en particulier en ce qui concerne le temps de calcul et la mémoire requise pour les simulations. Il nous a permis d'exploiter les courants induits dans la pièce, calculer les pertes joules dans celle-ci et déterminer l'énergie magnétique emmagasiné dans le système d'étude afin de simuler le changement d'impédance le long de la pièce en défaut. Puis de faire une étude paramétrique en changeant la fréquence d'excitation pour pouvoir déterminer la nature du défaut présent dans la cible.

Comme perspective, on veut étudier les défauts qui ce cachent à l'intérieur de la cible et l'influence du mouvement du capteur parallèle à la cible « lift-off », ainsi que la modélisation d'un capteur à fonction séparée.

---

# Références et bibliographie

---

### Bibliographie

- [1] **J. DUMONT-FILLON** , "Contrôle non destructif (CND) ", techniques de l'ingénieur R1400,1996, pp.(1-42).
- [2] **M. WANIN** , " Evaluation non destructive de la qualité des matériaux partie 1", et partie 2 , techniques de l'ingénieur R4130 et R4132 , 1996, pp.( 1-26 et 1-16) .
- [3] **M. LACROIX** , " Essais non destructifs ", techniques de l'ingénieur M110 et M111, juillet 1996, pp.(1-21 et 1-17).
- [4] Document Internet, [www.mesures.com/archives/642FICHE%2043.pdf](http://www.mesures.com/archives/642FICHE%2043.pdf).
- [5] **M. VIENS**, " Essais mécanique et contrôle non destructif ", Université du Québec, Ecole de technologie supérieur.
- [6] **P. MIX**, "Introduction to nondestructive testing", A Training Guide, Second Edition, Wiley interscience, United States of America, 2005.
- [7] **J.-E. Holmström**, *Exposure values for a 300 kV halfwave X-ray unit using three X-ray films of different film classes*, NDT & E International, Vol. 31, Issue 1, 1998, pp. 33-41.lages : rectangulaire et triangulaire.
- [8] **Franz Mairinger**, *Chapter 2 UV-, IR- and X-ray imaging, Comprehensive Analytical Chemistry*, Elsevier, Vol. 42, 2004, pp. 15-71.  
*using eddy current signals*, NDT&E International, Vol. 39, 2006, pp.361–366
- [9] **AULET, Alina, EIRAS, José A., et NEGREIRA, Carlos**, *Modeling, design and characterization of limited diffraction ultrasonic transducers*, Physics Procedia, vol. 3, 2010, p p. 577-583.
- [10] **Cruza, J. F., Perez, M., Moreno, J. M., & Fritsch**, *Real time fast ultrasound imaging technology and possible applications*. Physics Procedia, vol. 63, 2015, pp. 79-84.

- [11] **Lubeigt, E, Mensah, S, Chaix, J F, Rakotonarivo, S, Gobillot G, Baqué F,** *Ultrasonic Imaging in Liquid Sodium: A Differential Method for Damages Detection.* Physics Procedia, vol. 70, 2015, pp. 550-553.
- [12] **Nadjib Hammoudi, Dimitri Arangalage, Lila Boubrit, Marie Christine Renaud, Richard Isnard, Jean-Philippe Collet, Ariel Cohen, Alexandre Duguet,** *Ultrasound-based teaching of cardiac anatomy and physiology to undergraduate*
- [13] **H. Marret, A. Bleuzen, A. Guérin, M.-A. Lauvin-Gaillard, D. Herbreteau, F. Patat, F. Tranquart,** *Résultats préliminaires de la destruction des fibromes utérins par ultrasons focalisés contrôlée par résonance magnétique,* Gynécologie Obstétrique & Fertilité, Vol. 39, Issue 1, January 2011, pp. 12-20.
- [14] **Yahya CHOUA,** *Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault,* Thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, 2009.
- [15] **Brahim RAMDAN,** *Contribution à la modélisation tridimensionnelle 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, Université de Nantes, 2009.
- [16] **I. N. El ghouli, A. Cheriet, S. Bensaid,** *Evaluation de l'épaisseur des plaques conductrices par la Méthode des Courants de Foucault,* 4ème colloque que l'inductique CI'2015, Jijel, Algérie.
- [17] **B. Helifa, A. Oulhadj, A. Benbelghit, I.K. Lefkaier, F. Boubenider, D. Boutassouna,** *Detection and measurement of surface cracks in ferromagnetic materials using eddy current testing,* NDT&E International, Elsevier, Vol. 39, Issue 1, March 2006, pp. 384-390.
- [18] **Do Haeng Hur, Deok Hyun Lee, Myung Sik Choi, Un Chul Lee, Seon Jin Kim, Jung Ho Han,** *Discrimination method of through-wall cracks in steam generator tubes using eddy current signals,* NDT&E International, Vol. 39, 2006, pp.361–366.

## Références et bibliographie

---

- [19] **Do Haeng Hur, Myung Sik Choi, Deok Hyun Lee, Seon Jin Kim, Jung Ho Han**, *A case study on detection and sizing of defects in steam generator tubes using eddy current testing*, Nuclear Engineering and Design, Vol. 240, 2010, pp. 204–208.
- [20] **V. Monebhurrun, B. Duchêne, D. Lesselier**, *Three-dimensional inversion of eddy current data for non-destructive evaluation of steam generator tubes*, Inverse Problems Vol. 14, 1998, pp.707–724.
- [21] **Yan H., Zhong P.D., Xi N.S., Tao C.H.**, *A case study of cracks in aeroengine compressor discs*, Engineering Failure Analysis, PERGAMON, June 1999, p1.
- [22] **L. Oukhellou**, *Paramétrisation et classification de Signaux en Contrôle Non Destructif : application à la reconnaissance des défauts de Rails par courants de Foucault*, Thèse Doctorat à l'université de Paris-sud, France, 1997.
- [23] *Courants de Foucault*, Encyclopédie multimédia, Atlas et organise-notes, Microsoft encarta, collection 2006.
- [24] **M. Lacroix**, *Essais non destructifs*, Techniques de l'ingénieur 7-1986.2
- [25] **Hyang-beom Lee, Dong-hun Kim**, *Impedance Calculation for a Plate with Crack in Eddy Current NDT Using 3D Indirect BIEM*, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 36, Issue 5, H.-B, 2000, pp. 3131- 3133.
- [26] **Bachir HELIFA**, *Contribution a la simulation du CND par courants de Foucault en vue de la caractérisation des fissures débouchantes*, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2012.
- [27] **Ahmed Cheriet**, *Contribution a la modélisation tridimensionnelle par la méthode des volumes finis de dispositifs électromagnétiques*, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2007.
- [28] **Samir BENSaid**, *Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes*, Thèse de

## Références et bibliographie

---

Doctorat, Université de Nantes, 2006.

[29] **Lounis TITOUAH, Ziane ABDESLAM**, *Caractérisation Non Destructive par Courants de Foucault Pulsés d'une rainure par inversion associé à méthode des circuits électriques couplés*, Thèse de Master, Université de Bejaia, 2014.

[30] **Lakhdar BAKAL, Amel LAYACHI**, *Contrôle Non Destructif Par Courants De Foucault. (Application Aux Pièces Cylindriques Et Plaques Muni D'un Alésage)*, Thèse de Master, Université de Msila, 2018.

[31] **Peter J.SHULL**, *Nondestructive Evaluation, Theory, Techniques, and Applications*, book, The Pennsylvania State University, Altoona, Pennsylvania, 2002.

[32] **Mohamed KHEBBAB**, *Etude Et Modélisation De Capteur A Courant De Foucault Pour Le Contrôle Non Destructif (CND)*, Thèse de Magistère, Université de Constantine, 2007.

[33] **Mohamed CHELABI**, *Utilisation Des Machines A Vecteur De Supports Pour Le Contrôle Non Destructif Par Méthodes Electromagnétiques*, Thèse de Doctorat, Université de Jijel, 2016.