

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté de Génie de Construction  
Département Génie Mécanique

## Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER

Filière : **Électromécanique**  
Spécialité : **Maintenance industrielle**

*Présenté par*  
**Mr. MAKHLOUF Abdellah**  
**M<sup>lle</sup>. ZOBIRI Amel**

### Thème

**Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts  
par courants de Foucault**

Mémoire soutenu le 10 /03/ 2021 devant le jury composé de :

<b>Mr. HOCINI Farid</b>	<b>MCB</b>	<b>UMMTO</b>	<b>President</b>
<b>Mr. HAMEL Meziane</b>	<b>MCB</b>	<b>UMBB</b>	<b>Promoteur</b>
<b>Mr. SI AHMED Hamid</b>	<b>MAA</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Co-Promoteur</b>
<b>Mme. HARCHAOUI Nadra</b>	<b>MCA</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. NAIT OUSLIMANE Ahmed</b>	<b>MAA</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Examineur</b>

# Remerciements

# Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Département de Génie mécanique de l'Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou (UMMTO).

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance et notre profonde gratitude envers notre promoteur de mémoire, Monsieur Hamel Meziane, MCB à l'UMBB ; Sans sa confiance, sa générosité, son optimisme et sa patience, ce mémoire n'aurait pu voir le jour. Ses qualités scientifiques exceptionnelles associées à ses qualités humaines aussi merveilleuses nous ont aidés à surmonter les moments les plus délicats de ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance et notre profonde gratitude envers notre co-promoteur de mémoire, Monsieur Si Ahmed Hamid, MAA à l'UMMTO de nous avoir prodigué d'utiles suggestions tout au long de ce travail et pour ses conseils avisés sur la façon de mener notre travail, pour son soutien dans les périodes difficiles et pour son optimisme et son enthousiasme constant. Travailler avec lui a été une grande satisfaction. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude et notre grande estime.

Nous exprimons notre plus sincère reconnaissance à Monsieur Hocini Farid, MCB à l'UMMTO, de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance.

Nous tenons à remercier Monsieur Nait Ouslimane Ahmed, MAA à l'UMMTO, et Madame HARCHAOUI Nadra, MCA à l'UMMTO, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Enfin, nos chaleureux remerciements vont également à nos deux familles pour leur soutien moral et matériel sans égal durant nos études et notre vie.

# Dédicaces

# *Dédicaces*

*Pour chaque début il y a une fin, et ce qui est beau dans toute fin c'est la réussite et l'atteinte du but.*

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :*

*✚ A ceux qui ont fait de moi un homme... mes parents.*

*Ma très chère mère pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.*

*Mon très cher père qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de m'aider.*

*✚ Mes chère sœurs et à mes frères.*

*✚ A toute ma famille*

*✚ A mes meilleurs amis chacun en son nom.*

*✚ A la fin je dédie, très chaleureusement, ce mémoire à tous ceux que j'aime et que je respecte*

*Aldellah*

## *Dédicaces*

*« Louange au bon Dieu, le possesseur de toute la grâce »*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes chers parents, pour leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*À mes chères cousines : Kahina , Meriem et Ikram*

*À mes deux chères amies : Thiziri et Lila*

*À mon binôme et à tous mes camarades de la promotion sans exception chacun avec son nom.*

*Amel*

# Sommaire

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur le CND</b>	3
I.1 Introduction .....	4
I.2 Les différentes méthodes de contrôle non destructif .....	4
I.2.1 Examen visuel .....	4
I.2.2 Ressuage.....	5
I.2.3 Radiologie .....	6
I.2.4 Ultrasons.....	7
I.2.5 Magnétoscopie .....	8
I.2.6 Les courants de Foucault .....	9
I.2.7 Principe de courants de Foucault .....	9
I.3 Conclusion .....	18
<b>Chapitre II : Modélisation numérique des structures CND-CF</b>	19
II.1 Introduction .....	20
II.2 Modélisation d'un dispositif CND par CF .....	20
II.3 Equation de maxwell .....	21
II.3.1 Première équation Maxwell – Gauss .....	21
II.3.2 Deuxième équation « conservation de flux » .....	22
II.3.3 Troisième équation Maxwell – Faraday .....	22
II.3.4 Quatrième équation Maxwell – Ampère .....	23
II.3.5 Loi de comportement.....	24
II.3.6 Relation du milieu .....	24
II.3.7 Loi d'ohm .....	24
II.3.8 Hypothèses simplificatrices.....	25
II.3.9 Condition de continuité .....	25
II.3.10 Condition de passage .....	26
II.3.11 Conditions aux limites .....	27
II.4 Modèle magnétodynamique.....	27
II.4.1 Formulations magnétodynamiques.....	28
II.4.2 Formulation $\vec{A} - \vec{V}$ .....	28
II.4.3 Formulation $\vec{T} - \Omega$ .....	29
II.5 Les méthodes de résolution des modèles électromagnétiques.....	30
II.5.1 Méthodes de résolution analytique .....	30
II.5.2 Méthodes de résolution numériques .....	31
II.5.3 Méthode de résolution des éléments finis .....	31
II.6 Calcul de la variation d'impédance .....	37
II.6.1 Impédance à travers les énergies électromagnétiques .....	38
II.8 Conclusion .....	39
<b>Chapitre III : Simulations et résultats</b>	40
III.1 Introduction .....	41
III.2 Présentation de logiciel ANSYS-Maxwell.....	41

III.3	Présentation de l'application .....	43
III.4	Maillage du domaine .....	45
III.5	Densité des courants induits .....	46
III.6	Validations des dimensions de la fissure.....	48
III.6.1	Les résultats de la simulation pour des différentes profondeurs du défaut .....	48
III.6.2	Les résultats de la simulation pour des différentes longueurs du défaut.....	51
III.6.3	Les résultats de la simulation pour des différentes valeurs du lift off.....	51
III.7	Conclusion.....	52
 <b>Chapitre IV : Réalisation expérimentale et résultats</b>		<b>53</b>
IV.1	Introduction.....	54
IV.2	Description générale du système d'acquisition.....	54
IV.3	La carte Arduino .....	56
IV.3.1	Le choix de la carte Arduino UNO .....	56
IV.3.2	Les mémoires .....	58
IV.4	La machine à commande numérique.....	58
IV.4.1	La structure de la CNC .....	59
IV.5	Le logiciel Arduino .....	61
IV.5.1	Présentation de « IDE » .....	61
IV.5.2	Description de la barre de boutons.....	62
IV.5.3	Programme avec Arduino .....	62
IV.5.4	Structure du programme .....	62
IV.6	Redressement et filtrage.....	64
IV.7	Application et résultats.....	64
IV.7.1	Variation de lift-off .....	64
IV.7.2	Variation de la fréquence d'excitation.....	65
IV.7.3	Variation de la longueur du défaut.....	65
IV.8	Conclusion .....	66
 <b>Conclusion générale</b> .....		<b>68</b>
<b>Bibliographie</b> .....		<b>70</b>

# Liste des figures et tableaux

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b> : Examen visuel .....	4
<b>Figure I.2</b> : Examen par ressuage.....	5
<b>Figure I.3</b> : Examen par radiographie .....	6
<b>Figure I.4</b> : Examen par ultrason.....	7
<b>Figure I.5</b> : Inspection par magnétoscopie .....	8
<b>Figure I.6</b> : Contrôle par courants de Foucault .....	9
<b>Figure I.7</b> : Génération des courants de Foucault dans un matériau conducteur .....	10
<b>Figure I.8</b> : Répartition des courants de Foucault dans une pièce.....	11
<b>Figure I.9</b> : Bobine encerclante .....	14
<b>Figure I.10</b> : Sonde interne.....	14
<b>Figure I.11</b> : Sonde interne tournante .....	15
<b>Figure I.12</b> : Bobine simple avec noyau .....	15
<b>Figure I.13</b> : Bobine plate .....	16
<b>Figure I.14</b> : Capteur à double fonction .....	16
<b>Figure I.15</b> : Capteur à fonctions séparées.....	17
<b>Figure I.16</b> : Mesure différentielle .....	18
<b>Figure I.17</b> : Modèle compensé.....	18

### Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Définition du problème .....	20
<b>Figure II.2</b> : Schématisation des conditions d'interface .....	26
<b>Figure II.3</b> : Schématisation des frontières .....	27
<b>Figure II.4</b> : Discrétisation des éléments à une dimension .....	32
<b>Figure II.5</b> : Discrétisation des éléments triangulaires.....	32
<b>Figure II.6</b> : Discrétisation des éléments carrés .....	32
<b>Figure II.7</b> : Discrétisation des éléments à trois dimensions .....	33

**Figure II.8** : Triangle de Pascal ..... 34  
**Figure II.9** : Elément triangulaire typique ..... 34

**Chapitre III**

**Figure III.1**: La fenêtre principale du logiciel Maxwell ..... 42  
**Figure III.2** : Organigramme de simulation sous Ansys-Maxwell ..... 43  
**Figure III.3** : Géométrie du domaine d'étude ..... 43  
**Figure III.4** : Maillage du domaine pour une position de 0mm du capteur ..... 45  
**Figure III.5** : Maillage du domaine pour une position de 5mm du capteur ..... 45  
**Figure III.6** : Maillage du domaine pour une position de 10mm du capteur ..... 46  
**Figure III.7** : Maillage du domaine pour une position de 15mm du capteur ..... 46  
**Figure III.8** : Densité des courants induits au centre du défaut ..... 47  
**Figure III.9** : Densité des courants induits au milieu du défaut ..... 47  
**Figure III.10** : Densité des courants induits au début du défaut ..... 48  
**Figure III.11**: Densité des courants induits loin du défaut ..... 48  
**Figure III.12** : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une longueur de 10mm ..... 49  
**Figure III.13** : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une longueur de 12mm ..... 49  
**Figure III.14** : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une longueur de 14mm ..... 50  
**Figure III.15** : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une longueur de 16mm ..... 50  
**Figure III.16** : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs du défaut ..... 51  
**Figure III.17** : Variation de l'impédance en fonction de lift off ..... 52

**Chapitre IV**

**Figure IV.1** : Le circuit d'acquisition ..... 54  
**Figure IV.2** : Le circuit électronique de mesure de l'impédance ..... 55  
**Figure IV.3** : Ensemble plaque/ pièce ..... 55  
**Figure IV.4** : La carte Arduino ..... 57  
**Figure IV.5** : Vue globale de la machine CNC ..... 58

## Liste des figures et tableaux

<b>Figure IV.6</b> : La conception de la machine CNC.....	60
<b>Figure IV.7</b> : Vue de face de la machine.....	60
<b>Figure IV.8</b> : Les éléments de l'interface Arduino IDE.....	61
<b>Figure IV.9</b> : Barre de boutons.....	62
<b>Figure IV.10</b> : Interface du logiciel de la machine CNC .....	63
<b>Figure IV.11</b> : La partie commande manuelle du logiciel.....	63
<b>Figure IV.12</b> : Circuit électronique équivalent .....	64
<b>Figure IV.13</b> : Superposition des courbes de la variation de la tension pour un défaut de 12mm.....	65
<b>Figure IV.14</b> : Superposition des courbes de la variation de la fréquence pour un défaut de 12mm.....	65
<b>Figure IV.15</b> : Superposition des courbes de la variation de la longueur .....	66

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1</b> : Les caractéristiques physiques et géométriques du système .....	44
<b>Tableau IV.1</b> : Les paramètres de la bobine et de la pièce .....	55
<b>Tableau IV.2</b> : Les caractéristiques de la carte Arduino UNO .....	57
<b>Tableau IV.3</b> : La nomenclature de la machine CNC.....	59

# Notations et symboles

CND	Contrôle non destructif	
CND-CF	Contrôle non destructif par courant de Foucault	
UV	Ultraviolet	
CF	Courant de Foucault	
MDF	Méthode des Différences Finies	
MIF	Méthode d'Intégrale de Frontière	
MVF	Méthode des Volumes Finis	
MEF	Méthode des Eléments Finis	
EDP	Equation aux dérivées partielles	
CAO	Conception assisté par ordinateur	
IDE	L'environnement de développement intégré	
$H_{\text{ext}}$	Champs magnétique exciteur	[A/m]
$H_{\text{ind}}$	Champs magnétique induit	[A/m]
$f$	Fréquence d'excitation	[Hz]
$\sigma$	La conductivité électrique	[S/m]
$\mu$	La perméabilité magnétique	[H/m]
$J$	La densité de courant	[A/m <sup>2</sup> ]
$\delta$	La profondeur de pénétration conventionnelle	[m]
$B$	L'induction magnétique	[T]
$\vec{l}$	Longueur du circuit magnétique	[m]
$n$	Nombre de spires	
$I_i$	Courant électrique	[A]
$e$	Force électromotrice	[V]
$\phi$	Flux magnétique	[wb]
$t$	Temps	[s]
$\vec{E}$	Le champ électrique	[V/m]
$\vec{D}$	Induction électrique	[C/m <sup>2</sup> ]
$\sum Q_{\text{int}}$	Charge totale contenue dans le volume	[C]
$\epsilon_0$	Permittivité électrique du vide	[F/m]
$dv$	Elément du volume	[m <sup>3</sup> ]
$\rho$	Densité de charge volumique	[C/m <sup>3</sup> ]
$\vec{dS}$	Elément de surface	[m <sup>2</sup> ]
$\vec{H}$	Champ magnétique	[A/m]
$\vec{J}_c$	Densité de courant de conduction	[A/m <sup>2</sup> ]
$\vec{J}_d$	Densité de courant de déplacement	[A/m <sup>2</sup> ]
$\mu_0$	Perméabilité magnétique du vide.	[H.m-1]
$\mu_r$	Perméabilité magnétique relative du milieu considéré	

## Notations et symboles

---

$\epsilon_0$	Permittivité du vide	[F/m]
$\epsilon_r$	Permittivité relative	
$\omega$	La pulsation d'alimentation	[rd/s]
$j$	Nombre complexe	
$\vec{A}$	Potentiel vecteur magnétique	[T.m]
$V$	Potentiel scalaire électrique	[V]
$\vec{T}$	Potentiel vecteur électrique	
$\Omega$	Potentiel scalaire magnétique	
$N$	Le nombre de nœuds	
$\alpha_j$	Fonction d'interpolation au nœud $j$	
$A_j$	Inconnue au nœud $j$	
$\Omega$	Domaine d'étude	
$L$	La fonction de Lagrange	
$\omega_c$	Energie de type cinétique	[Joule]
$\omega_p$	Energie de type potentielle	[Joule]
$R$	Représente le résidu de l'approximation	
$f_v$	Fonction définie sur le domaine d'étude $\Omega$	
$A$	L'inconnue du problème	
$\phi_i$	Fonction de projection	
$P_j$	Pertes joules	
$W_m$	Énergie électromagnétique	[Joule]
$Z_f$	L'impédance du capteur en présence de la fissure	[ $\Omega$ ]
$Z_S$	L'impédance du capteur en absence de la fissure	[ $\Omega$ ]
$Z_0$	L'impédance du capteur dans l'air	[ $\Omega$ ]



# Introduction générale

# Introduction générale

Le processus de maintenance s'avère être l'un des principaux leviers d'action sur la performance globale des systèmes industriels, et dans lequel le Contrôle Non Destructif (CND) constitue une pièce maîtresse [1].

Le danger de la fissuration des structures métalliques dans le secteur industriel (aviation, automobile, centrale nucléaire), exige un contrôle de qualité au niveau de la production. Ceci oblige le dimensionnement des pièces au plus juste afin de garantir leur disponibilité et garantir leurs performances tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Pour répondre à ces exigences, les industriels font recours aux techniques de CND [2].

Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité . . .), soit pour déceler la présence de défauts et les caractériser. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault . . .). Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui . . .), les conditions de mise en œuvre... [3].

C'est en surface ou proche de la surface des pièces que sont amorcées la majorité des ruptures ou dégradations constatées en service : usure, fatigue (flexion, torsion), corrosion, brûlure. C'est pour cette raison que les techniques de surface sont très largement appliquées.

Parmi ces techniques, le contrôle par Courants de Foucault (CF) y prend une place privilégiée. Le CND par CF est utilisé pour détecter et quantifier divers défauts superficiels ou faiblement enfouis dans les matériaux conducteurs, tels que les fissures et les hétérogénéités chimiques ou micro structurelles. Le besoin grandissant de fiabilité et de rapidité dans les opérations d'inspection requiert le développement de nouvelles stratégies et de nouveaux dispositifs répondant aux exigences accrues des industriels [1].

L'objectif de ce travail est l'étude et la réalisation d'un dispositif compact de CND-CF pour la détection et l'évaluation des défauts dans les matériaux conducteurs.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur les techniques de CND. Le contrôle par courants de Foucault est particulièrement détaillé.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation électromagnétique des structures CND-CF. il présente la formulation en terme  $\vec{T} - \Omega$  ainsi que la méthode des éléments finis utilisés pour la résolution du problème électromagnétique.

Le troisième chapitre présente les résultats de la modélisation numérique de notre dispositif. Différents résultats ont été obtenus pour différents paramètres géométriques et électromagnétiques de notre système.

Le quatrième et dernier chapitre est dédié à la réalisation expérimentale. Il décrit le dispositif complet comportant une machine à commande numérique(CNC) ainsi que l'instrumentation utilisée pour l'acquisition des signaux à courants de Foucault.

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

# Chapitre I

### I.1 Introduction

Le contrôle non destructif regroupe l'ensemble des techniques qui permettent d'inspecter une pièce et d'en rechercher les éventuels défauts susceptibles d'avoir des conséquences néfastes sur la fonction qu'elle assure. Les techniques sont multiples (procédés optiques, ressuage, flux de fuites magnétiques, rayonnement ionisant, vibrations mécaniques, contrôle d'étanchéité, procédés électromagnétiques) et les applications variées. Le contrôle en ligne se distingue du contrôle sur site, le premier est un contrôle de fabrication qui a pour but de vérifier la qualité d'un produit industriel avant sa mise en service, le deuxième est une inspection en service réalisable au cours de la vie du produit dont le but est de s'assurer de la non dégradation de la pièce soumise à des contraintes mécaniques, chimiques, thermiques [4].

### 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 Examen visuel

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructif.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect réhilitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, ...etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures, ce qui justifie l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique [6].



**Figure I.1** : Examen visuel

### a) Avantages

- Examen simple, rapide moins coûteux.
- Souplesse d'inspection.

### b) Inconvénients

- Pas de dimensionnement des défauts.
- La surface doit être propre.
- Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.
- Résolution et sensibilité limitées.

## I.2.2 Ressuage

Le contrôle par liquide de pénétration (ressuage) a été inventé en 1941 par Robert et Joseph Switzer. Le ressuage est un moyen de recherche des défauts superficiels qui consiste à l'amélioration de l'inspection visuelle de défauts. Il consiste à l'application du pénétrant par la couche poudreuse du révélateur, le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux phases illustrées sur la figure I.2 : application du pénétrant suivie d'un temps d'imprégnation, élimination de l'excès du pénétrant sur la surface de la pièce, ressuage du pénétrant par disposition d'une couche de « révélateur » sur la surface. L'image des défauts apparaîtra à l'observateur dans la mesure où l'étalement du pénétrant sur le révélateur conduit à une nette variation de couleur ou de luminance [14].

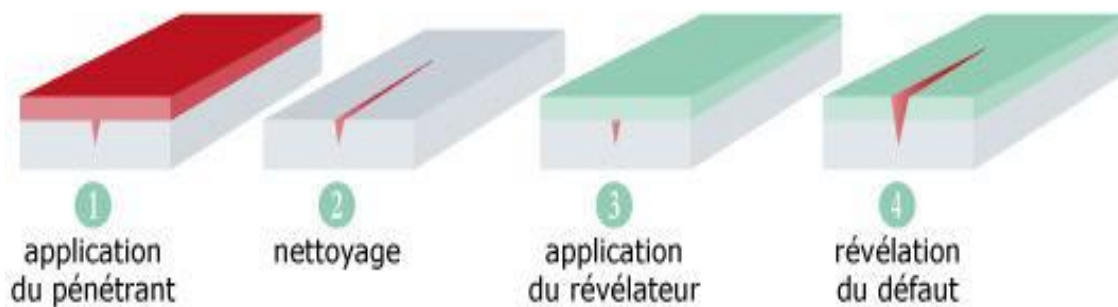


Figure I.2 : Examen par ressuage

### a) Avantages

- Facilité de mise en œuvre et relativement sensible aux fissures débouchant.
- Applicable aux différents types de matériaux.

### b) Inconvénients

- Limite de l'application sur les matériaux non poreux.
- L'interprétation des résultats est subjective: Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.
- Danger des solvants toxiques, corrosifs et inflammable.

### c) Domaines d'applications

Le domaine d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement avec le pénétrant [2].

### I.2.3 Radiologie

Comme la plupart des autres techniques de contrôle non destructif, la radiographie par rayons X est connue depuis de nombreuses années, et elle a largement fait ses preuves dans l'industrie. Son principe est simple. La pièce à contrôler est irradiée et traversée par des rayons X. Derrière elle, on place un récepteur, le plus souvent un film radiographique, afin de récupérer le rayonnement transmis. Une fois développé, le film permet d'obtenir une image de l'intérieur de la pièce et de localiser les éventuels défauts internes [4].

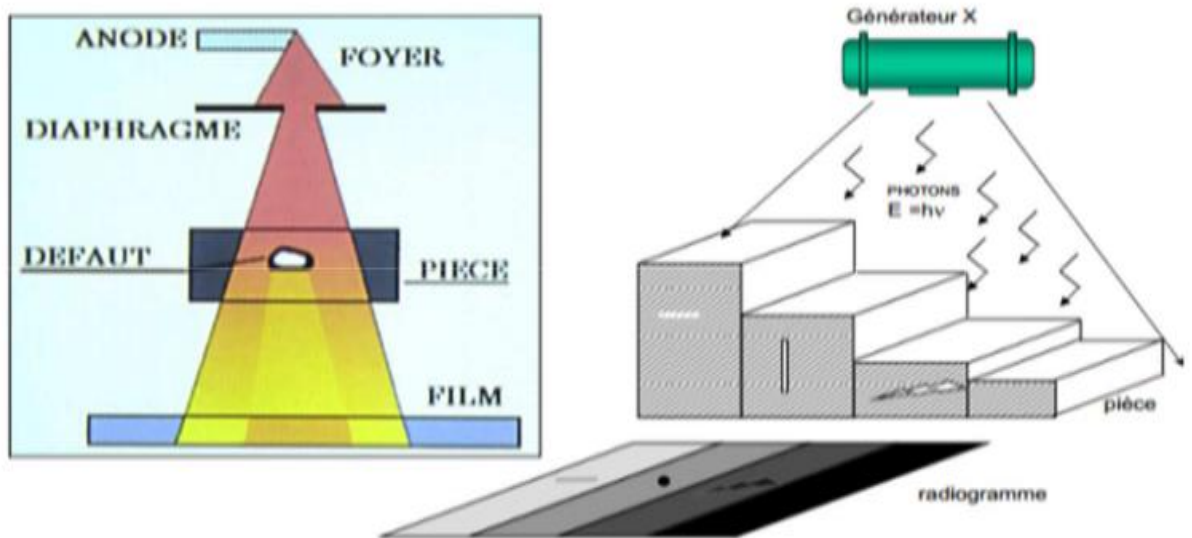


Figure I.3 : Exemple par radiographie

#### a) Les avantages

- Détections 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.

#### b) Les inconvénients

Sur un point de vue économique on peut dire que c'est une opération coûteuse vue 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 [6].

#### c) Domaines d'applications

Traditionnellement, les domaines d'application du contrôle radiographique sont ceux de la fonderie et du soudage métallique avec la mise en évidence de porosités, soufflures, inclusions non métalliques, criques, manque de pénétration. Les nouvelles techniques de contrôle en temps réel sont en train d'élargir ce domaine d'application hors des industries métallurgiques [2].

### I.2.4 Ultrasons

L'ultrason est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut.

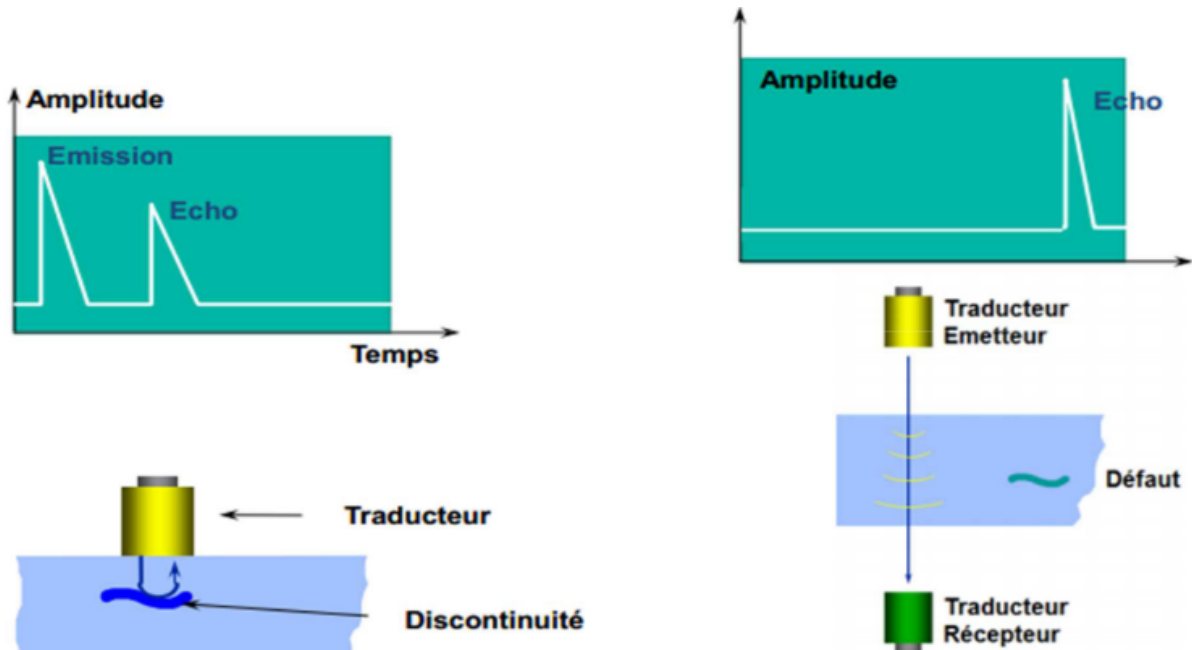


Figure I.4 : Examen par ultrason

#### a) Avantages

- On peut obtenir une sensibilité de contrôle constant dans toute l'épaisseur du produit à inspecter.
- Les défauts détectés sont : les criques, les pailles, les arrachements, les rayures, tous les défauts ayant un bon pouvoir réflecteur par rapport à l'orientation principal du champ ultrasonique.

#### b) Inconvénients

- Le contrôle est relativement lent.
- Il est nécessaire d'employer un produit de couplage, et de s'assurer que les tubes à contrôler ont un état de surface convenable.
- Si l'on veut obtenir des cadences industrielles, il faut les appareillages complexes, adapter à ces cadences et nécessitant de ce fait des investissements importants.
- Les signaux exploitables étant très faibles, les installations peuvent être sensibles aux parasites industriels.

c) domaines d'applications

L'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques [2].

I.2.5 Magnétoscopie

Cette méthode permet en plus, par rapport au ressuage, de mettre en évidence des défauts non débouchant mais proche de la surface. Pour cela, on applique un fort champ magnétique ou un fort courant sur la pièce et on visualise à l'aide d'une poudre métallique les lignes de champ au droit des défauts. L'examen des pièces se fait le plus souvent sous éclairage UV., comme l'illustre la figure(I.5) [7].

a) Avantages

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

b) Inconvénients

- Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques.
- Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée.
- La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce [2].

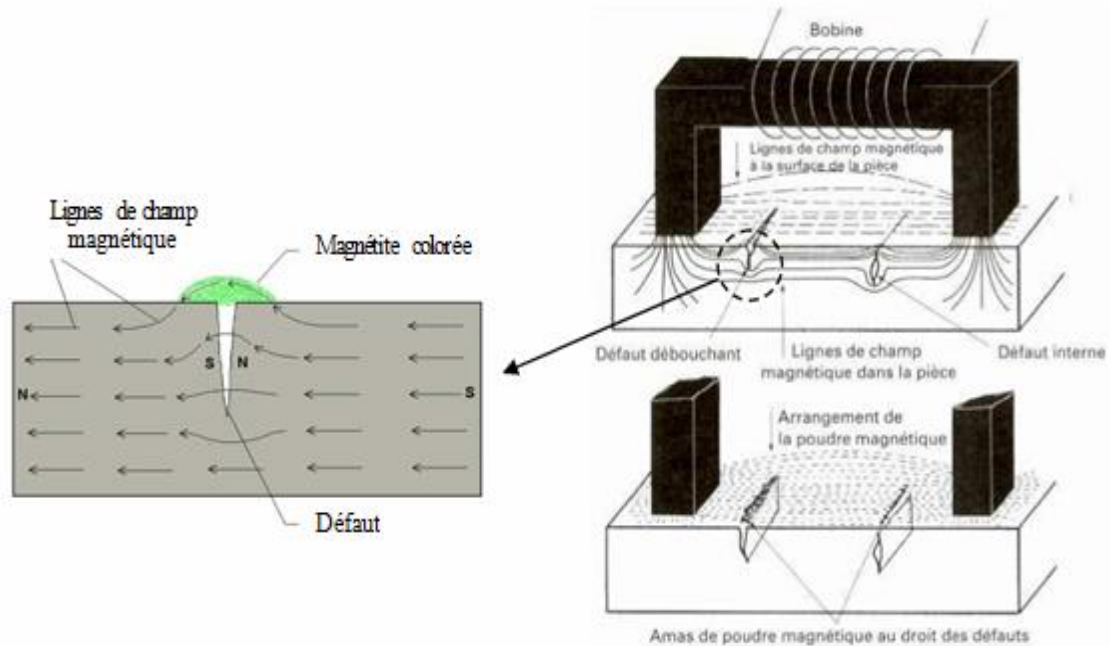


Figure I.5 : Inspection par magnétoscopie

### I.2.6 Les courants de Foucault

Le contrôle par CF est une méthode qui consiste à évaluer l'état d'intégrité d'une pièce par la mesure de la variation de l'impédance issue du couplage électromagnétique entre le capteur et la pièce à tester. La circulation des courants dans la pièce est modifiée par l'existence de défaut (trous, fissures, rayures) à cause de la variation des caractéristiques électromagnétiques et géométriques [2].

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.



Figure I.6 : Contrôle par courant de Foucault

### I.2.7 Principe 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 [5].

La génération des courants de Foucault dans un matériau conducteur repose sur le phénomène de l'induction électromagnétique. Toute variation de flux d'un champ magnétique  $H_{ext}$  (champ excitateur) à travers un conducteur, induit dans celui-ci une force électromotrice (fem) d'induction, qui donne naissance à des « courants induits » appelés aussi « courants de Foucault » (en anglais Eddy currents).

D'après la loi de Lenz, ces courants tourbillonnaires créent un champ  $H_{ind}$  magnétique (champ induit) dont le flux magnétique tend à réduire le flux qui lui a donné naissance. Il en découle, dans le matériau, une induction et un champ résultants qui varient en module et en phase en fonction de l'épaisseur traversée.

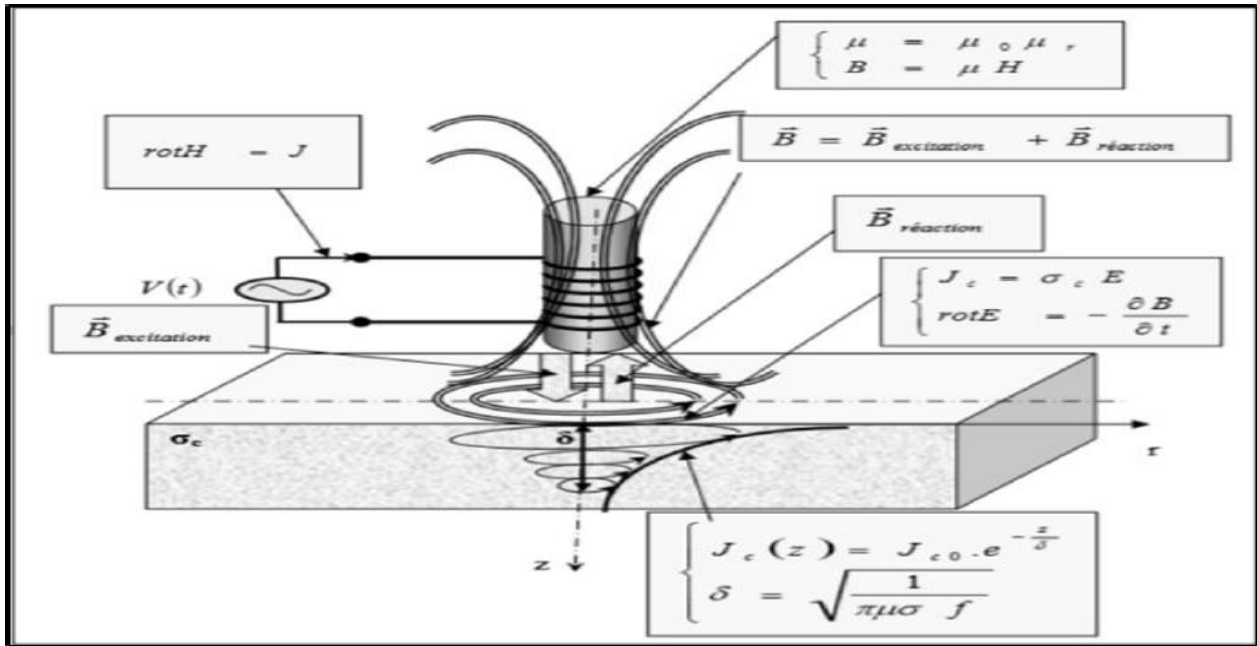


Figure I.7 : Génération des courants de Foucault dans un matériau conducteur

L'intensité et la répartition de l'induction, du champ magnétique ou des courants de Foucault dépendent :

- du couplage électromagnétique entre le matériau et l'inducteur.
- de la fréquence d'excitation  $f$ .
- de la géométrie de la pièce.
- de la conductivité électrique  $\sigma$ .
- de la perméabilité magnétique  $\mu$  du matériau.
- d'éventuels défauts superficiels tels que fissures, hétérogénéités chimiques ou microstructurales [1].

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.2.7.1 Distribution des courants de Foucault

Les CF, non homogènes dans la profondeur du matériau, sont régis par les équations de Maxwell. L'intensité des CF dans un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique  $\sigma$  [S/m] et une perméabilité magnétique  $\mu$  [H/m], diminue avec la profondeur notée  $\delta$  [m]. Dans le cas d'une pièce conductrice infiniment épaisse à surface plane, excitée uniformément à une fréquence  $f$  [Hz] par une onde plane, le module de la densité de courant  $J$  [A/m<sup>2</sup>] est exprimé par : [9]

$$J(\delta) = J_0 e^{-\delta \sqrt{\pi f \mu \sigma}} \cos(\omega t - \delta \sqrt{\pi f \mu \sigma}) \quad (I.1)$$

### I.2.7.2 Epaisseur de peau

Les courants de Foucault sont très sensibles à différents paramètres géométriques (la présence de défauts, la distance entre la bobine et la pièce, l'épaisseur de la pièce), électromagnétiques (la conductivité, la perméabilité) et thermiques. Le paramètre perturbateur est la température car elle modifie localement ou totalement la perméabilité ou la conductivité du matériau et donc l'impédance de la bobine réceptrice [2].

On a défini une profondeur de pénétration conventionnelle  $\delta$  pour laquelle le module du courant à la surface est divisée par  $e = 2.718$  la base des logarithmes népériens [4].

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

- $f$ : Fréquence d'excitation.
- $\sigma$  : Conductivité électrique du matériau.
- $\mu$ : Perméabilité magnétique du matériau.

Cette profondeur est fonction de la fréquence. Plus la fréquence est importante, plus la densité de CF induits dans la cible est importante et limitée à la surface. Il en résulte que la profondeur à laquelle un capteur CF permet d'inspecter une cible est dépendante de la fréquence d'excitation. Les courants induits ayant une amplitude inférieure à 5% de l'amplitude maximale au-delà de  $3\delta$ , il est quasiment impossible de détecter des défauts à cette profondeur [10].

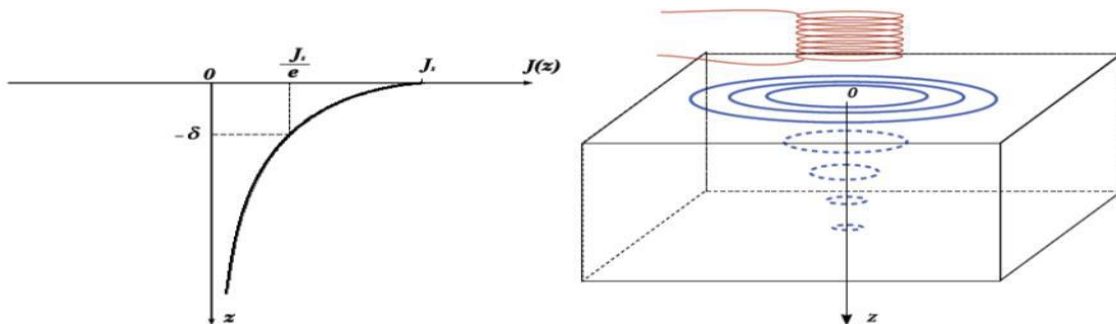


Figure I.8 : Répartition des courants de Foucault dans une pièce

### I.2.7.3 Les modes d'excitation

Pour réaliser la fonction d'émission, trois principales excitations sont possibles : l'excitation mono-fréquence, multifréquence ou bien pulsée.

#### ➤ Excitation mono-fréquence

Les courants de Foucault sont induits par une excitation sinusoïdale, de fréquence fixe. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité

aux paramètres recherchés. Elle devra cependant se situer dans une gamme raisonnable. En effet, pour une fréquence trop basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits. Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés notamment par les capacités inter-spires de la sonde. Celles-ci provoquent des résonances et tendent à court-circuiter le circuit inductif.

Cette méthode simple et parfois suffisante présente cependant des limitations car elle permet difficilement d'éliminer l'influence de l'ensemble des grandeurs perturbatrices. En effet on ne dispose alors au mieux que de deux observations réelles (ex : partie réelle et imaginaire de l'impédance). Le nombre d'inconnus que l'on peut espérer déterminer est alors limité à deux [3].

### ➤ **Excitation multifréquence**

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 [11].

### ➤ **Excitation pulsée**

Cette méthode représente une alternative à l'excitation multifréquence. Elle consiste à émettre un champ magnétique de large bande fréquentielle en excitant le capteur avec un signal impulsionnel (signal à durée finie). Ce mode de fonctionnement est couramment appelé contrôle par courants de Foucault pulsés. Cette technique a vu le jour au milieu des années 50 pour la mesure d'épaisseur des revêtements métalliques. Des travaux ont également porté sur son utilisation pour la détection de défauts enfouis.

Les signaux d'alimentation peuvent être de forme rectangulaire, triangulaire ou demi-sinusoïdale. Dans ce type de contrôle, c'est la variation temporelle des signaux qui est utilisée étant donné le spectre du signal d'excitation, une telle méthode est plus riche en informations qu'un contrôle par courants de Foucault mono-fréquentiel ou multi-fréquentiel. Cependant, la quantité d'informations recueillies dans la pratique dépend fortement du traitement des signaux et du bruit qui est difficilement filtrable car les signaux sont de large bande [12].

#### **I.2.7.4 Les gammes de fréquences**

Les fréquences d'excitation délivrées par le générateur peuvent être classées en trois Gammes :

- **Basse fréquence de 1 Hz à 1 kHz** : ce domaine concerne surtout les produits ferromagnétiques et convient pour le contrôle de tôles de forte épaisseur (0,1 à 15mm) et le tri de matériaux selon leur nuance à cœur.
- **Moyenne fréquence de 1 kHz à 1 MHz** : c'est le domaine le plus employé et couvre Aussi bien le contrôle de santé (détection d'hétérogénéités du type fissures et inclusions) que le contrôle qualité (mesures dimensionnelles et caractéristiques métallurgiques).
- **Haute fréquence** : ce domaine s'étend sur quelques MHz : l'utilisation de ce domaine de fréquence est encore limitée (détection de microfissures de surface, par exemple) [1].

#### **I.2.7.5 Les capteurs à courant de Foucault**

Le capteur est une bobine ou un ensemble de bobines qui sert à générer les courants de Foucault ainsi qu'à capter leurs effets. La grandeur mesurée est l'impédance ou une différence de potentiel représentant l'image du courant de Foucault. Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs du fait que leurs configurations diffèrent selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle [8].

Du point de vue fonctionnel, le classement des capteurs est basé sur la géométrie du capteur et le type de produit à contrôler, on peut citer :

- **Les bobines encerclantes**

Ce sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent la pièce à examiner et sont destinés au contrôle des produits longs (tubes, barres...), les plus répandus dans le domaine industriel [7]. Elle analyse un anneau de la pièce ayant une largeur égale à la largeur active ou effective de la bobine [1].

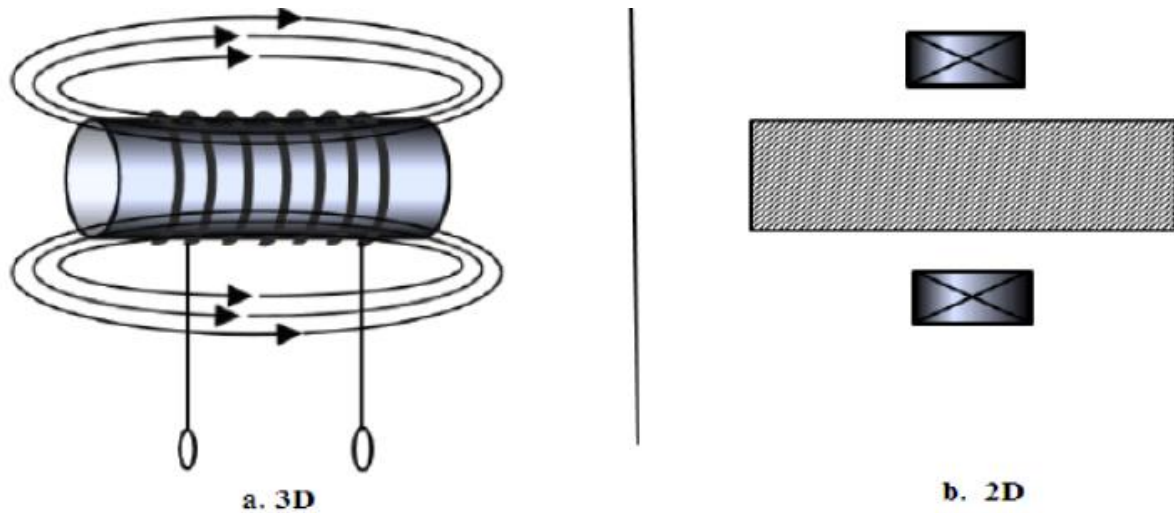


Figure I.9 : Bobine encerclante

➤ **Les sondes internes**

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

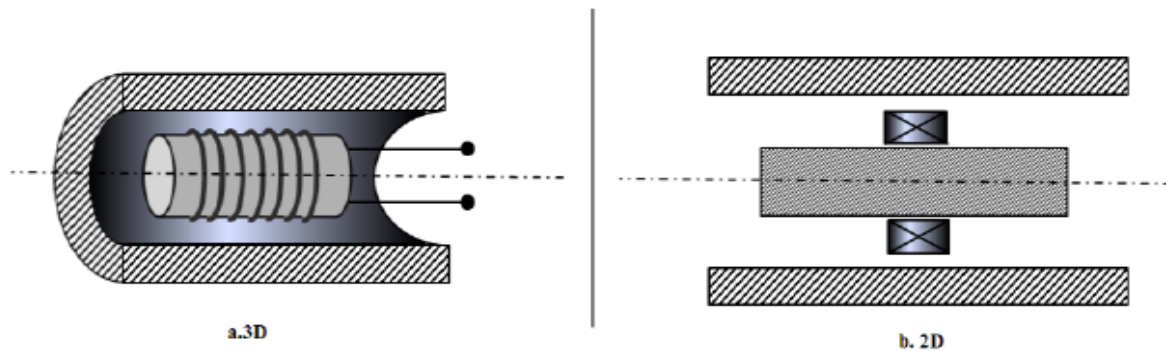
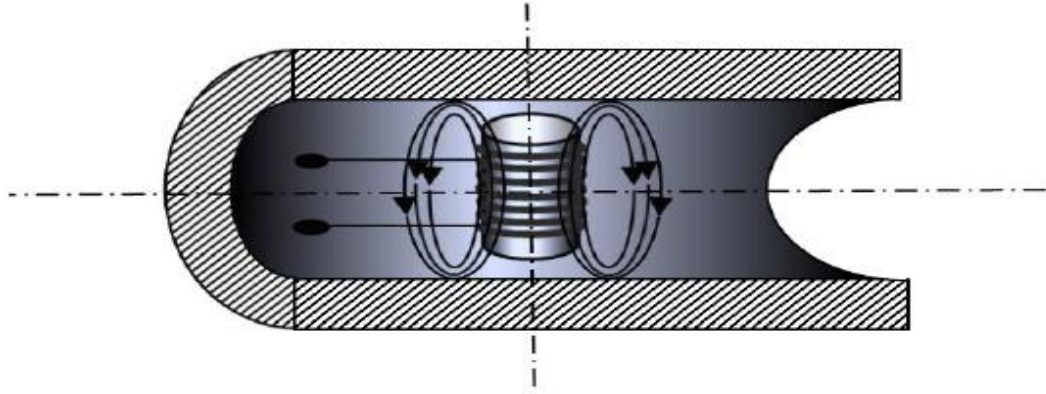


Figure I.10 : Sonde interne

➤ **Sonde interne tournante**

Dans ce cas, le capteur tourne au tour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube [8].



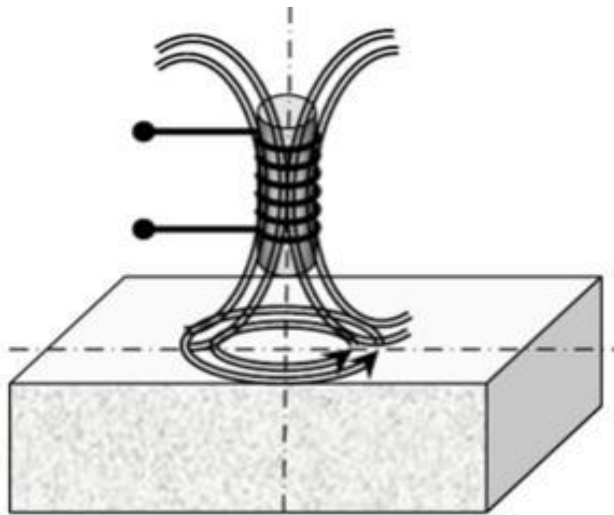
**Figure I.11** : Sonde interne tournante

Ces deux types de capteur est principalement développé pour l'inspection des tubes de générateurs de vapeur dans les installations nucléaires [11].

➤ **Palpeur ou bobine ponctuelle**

Ses enroulements forment une petite bobine qui peut être placée sur, ou près, de la surface de la pièce. Il est destiné au contrôle local d'un produit à partir de sa surface, sur laquelle il peut se déplacer avec deux degrés de liberté. Il analyse une zone essentiellement égale à l'aire de sa section transversale. Dans le cas de l'examen d'une surface importante, il nécessite un balayage méthodique de la pièce.

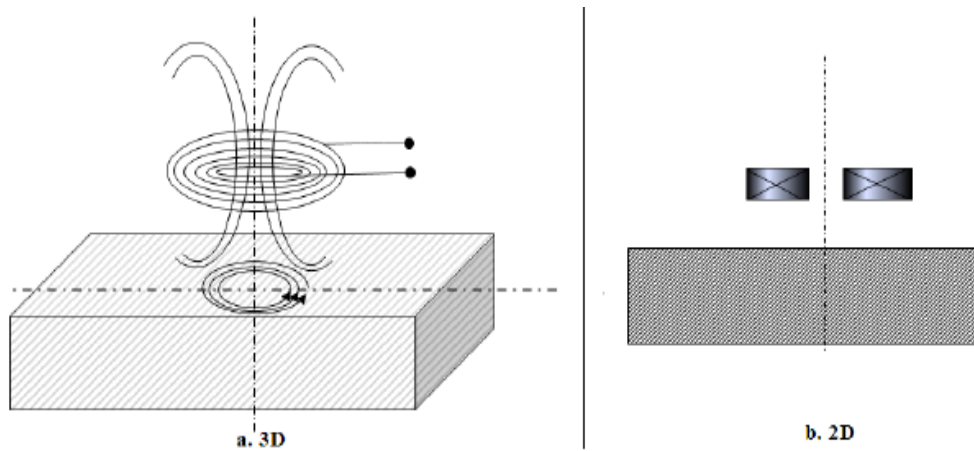
Les palpeurs peuvent être du type à air ou avoir des noyaux magnétiques dans le but d'augmenter l'induction  $B$  créée par la bobine excitatrice. L'usage des palpeurs, peu répandu autrefois, tend à se généraliser en raison des exigences d'une précision accrue dans les contrôles [1].



**Figure I.12** : Bobine simple avec noyau

➤ **Les bobines plates**

Pour le contrôle de surfaces planes ou dont la courbure est faible devant le rayon de la bobine [7].



**Figure I.13 : Bobine plate**

**I.2.7.6 Fonctions des capteurs**

Le principe des courants de Foucault nécessite l'emploi de deux fonctions :

- l'émission d'un champ électromagnétique alternatif.
- la réception de la réponse de la pièce via une modification du champ.

Chacune de ces deux fonctions peut être réalisée par un ou plusieurs éléments.

L'émission est assurée via une ou plusieurs bobines. La réception repose sur l'utilisation de bobines ou de capteurs directement sensibles au champ magnétique [12].

➤ **les capteurs 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 » [11].

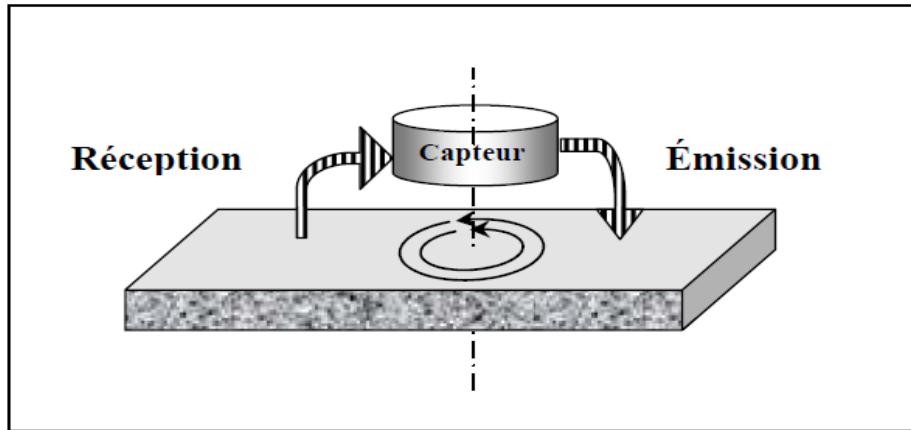


Figure I.14 : Capteur à double fonction

➤ les capteurs à fonctions séparées

Deux bobines distinctes peuvent également être employées, l'une pour l'émission du champ magnétique d'excitation et l'autre pour la réception. La différence de potentiel est alors mesurée aux bornes de cette deuxième bobine, qui peut être de taille réduite par rapport à la bobine d'émission [13]. Cette technologie est utilisée lorsque le contrôle nécessite des champs magnétiques intenses, sa stabilité en température étant plus grande. [1]  
On utilise ces types de capteurs dans le cas des grands défauts en taille au profond. [2]

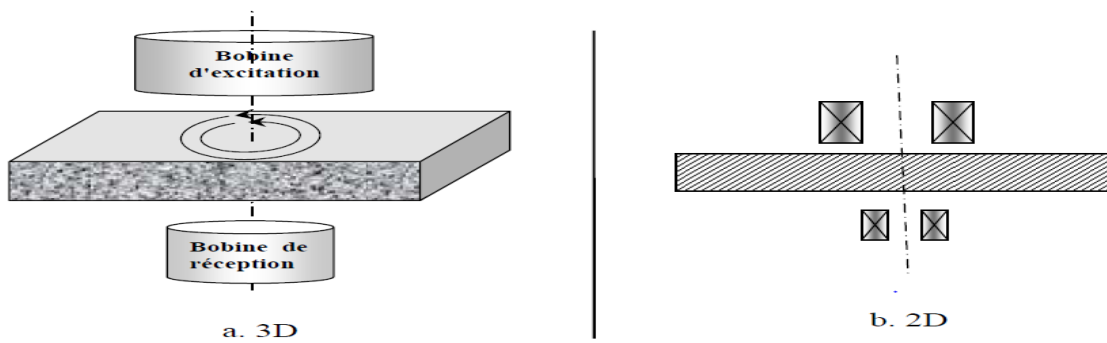


Figure I.15 : Capteur à fonctions séparées.

I.2.7.7 Les modes de contrôle

En fonction de l'intensité du champ dépendant des caractéristiques électromagnétiques de la pièce à inspecter et des perturbations éventuelles, nous distinguons trois modes de mesure : le mode absolu, le mode différentiel et le mode compensé [8].

➤ Mode absolu

Mode absolu est destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit contrôlé par rapport à une référence fixe.

Le mode absolu permet d'accéder à toutes les grandeurs, qu'elles soient utiles ou perturbatrices (par exemple, la variation de la température affecte la conductivité  $\sigma$  et la perméabilité  $\mu$  du matériau à contrôler).

Le mode absolu est de façon générale bien approprié à la mise en évidence de défauts longs (corrosion étendue, défauts géométriques aux dimensions lentement variables telles que la variation d'épaisseur, l'excentration, l'ovalisation...). Son inconvénient principal reste la dérive de la mesure en cas de variation de température [1].

➤ **Mode différentiel**

Ce mode de mesure est, par opposition à un capteur à mesure absolue, sensible uniquement à des variations locales de l'objet à inspecter. Il permet de détecter les changements dus aux discontinuités lors du déplacement du capteur le long du produit examiné en se débarrassant des perturbations lentes telles que la variation du lift-off, conductivité... Typiquement, le récepteur est constitué d'au moins deux éléments voisins. Cette approche revient à effectuer la différence de mesures réalisées conjointement sur les deux éléments. Le signal fourni par un capteur différentiel est idéalement nul lorsque la pièce est saine [12].

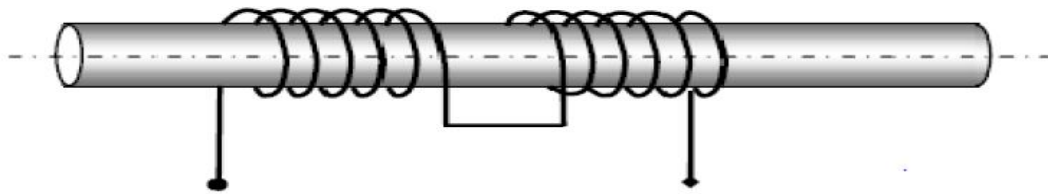


Figure I.16 : Mesure différentielle.

➤ **Mode absolu compensé**

Deux bobines sont utilisées, l'une à proximité d'une surface de la pièce à contrôler, l'autre à proximité de la surface saine. la première capte les grandeurs utiles et perturbatrices tandis que l'autre capte les signaux perturbateurs [8].

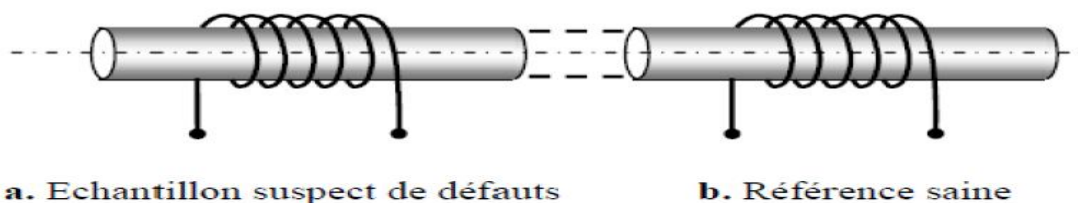


Figure I.17 : Modèle compensé.

### I.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit les principales techniques employées dans le CND et on s'est intéressé particulièrement au CND-CF. Le chapitre suivant traitera les équations qui permettent de modéliser les phénomènes électromagnétiques dans les dispositifs CND-CF.

# Chapitre II

## II.1 Introduction

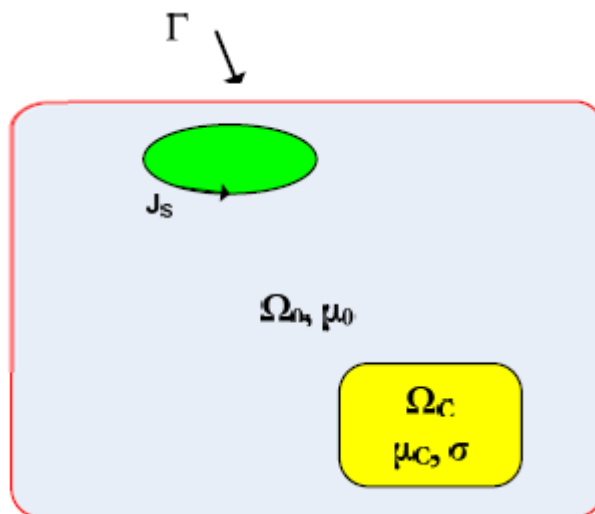
Lors de la mise en œuvre des outils du CND-CF et l'étude des paramètres d'intérêt peut avoir des difficultés pour plusieurs raisons telles que: la disponibilité des capteurs inductifs et des échantillons étalons. L'apparition des calculateurs puissants et le développement logiciel actuel a contribué considérablement dans ce domaine par remplacé les essais expérimentaux par des simulations moins couteuse. Dans un problème de CND-CF, la modélisation donne la fonction de transfert capteur-matériau à contrôlé. Cette modélisation peut prévoir les signaux du capteur en connaissant les paramètres physiques du système capteur-pièce, telles que la conductivité électrique, la perméabilité magnétique, le lift-off, l'épaisseur de la pièce...etc. [5].

Les phénomènes courants de Foucault sont modélisés à l'aide des équations de Maxwell. Les gros progrès réalisés dernièrement dans la résolution de ces équations par des méthodes numériques (éléments finis, équations intégrales) ont permis les simulations des configurations les plus complexes.

Dans ce chapitre, nous allons modélisé l'ensemble capteur-cible en passant par les équations de Maxwell pour la mise en forme de l'équation qui gère le phénomène de la détection puis on passera en revue la méthode de résolution par éléments finis qui sera utilisée pour la résolution de ce problème électromagnétique.

## II.2 Modélisation d'un dispositif CND par CF

Nous définissons notre type de problème représenté dans la figure (II.1), composé d'aire  $\Omega_0$ , d'une partie conductrice massive  $\Omega_c$  et un conducteur électrique. La frontière  $\Gamma$  forme le domaine d'étude. Les relations entre les grandeurs physiques, comme les champs électriques et magnétiques, sont gouvernées par les équations de maxwell et les lois de comportement des matériaux [16].



**Figure II.1** : Définition du problème

### II.3 Equation de Maxwell

Les équations de Maxwell sont la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques [18]. En les associant aux équations dites de milieux et de passage. Cela permet de modéliser la majorité des systèmes électromagnétiques [19].

Ces équations aux dérivées partielles font intervenir des champs physiques (champ électrique et magnétique) [20].

#### II.3.1 Première équation Maxwell - Gauss

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 : [11]

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \sum \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad (\text{II.1})$$

$$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum Q_{\text{int}} \quad (\text{II.2})$$

D'autre part on a :

$$\sum Q_{\text{int}} = \iiint \rho \cdot dv \quad (\text{II.3})$$

D'où :

$$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint \rho \cdot dv \quad (\text{II.4})$$

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

$$\iiint \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \iiint \rho \cdot dv \quad (\text{II.5})$$

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

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

$\vec{E}$  : Le champ électrique [V/m].

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

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

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

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

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

$d\vec{S}$  : Elément de surface [m<sup>2</sup>].

### II.3.2 Deuxième équation « conservation de flux »

Cette équation traduit le fait simple qu'il n'existe pas de monopole magnétique. S'il est possible d'avoir des particules négatives ou positives électriquement, ce n'est pas possible avec des aimants. Un monopole « sud » ou « nord » d'un aimant n'existe pas. Si on brise un aimant, on obtient deux aimants avec chacun son pôle nord et son pôle sud. Mathématiquement, cette équation peut aussi être lue comme « les lignes de champ magnétique sortant d'un pôle d'un aimant rentrent dans l'autre pôle ». Cette formulation explique mieux le fait que la somme de toutes les lignes de champs est égale à zéro : ce qui sort d'un côté rentre de l'autre et finalement on ne perd ni ne crée rien : [19]  
D'après la troisième loi de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{II.7})$$

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

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) = \vec{\nabla} \cdot \left(-\frac{d\vec{B}}{dt}\right) \quad (\text{II.8})$$

On déduit la deuxième équation de MAXWELL :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.9})$$

### II.3.3 Troisième équation Maxwell - Faraday

L'équation de Maxwell- Faraday représente la loi d'induction qui établit le lien entre le champ électrique et l'induction magnétique. C'est la formulation mathématique du phénomène inductif dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur en mouvement mais soumis à un champ magnétique constant [2].  
D'après la loi de Faraday on a :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.10})$$

Sachant que :

$$\phi = \iint \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (\text{II.11})$$

$$e = \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} \quad (\text{II.12})$$

On aura donc :

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.13})$$

Selon le théorème de Stokes :

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = \iint (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) \cdot \vec{dS} \quad (\text{II.14})$$

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

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{II.15})$$

### II.3.4 Quatrième équation Maxwell – Ampère

Cette équation est la généralisation du théorème d'Ampère. Elle relie le champ magnétique à ses sources. Le terme supplémentaire  $\frac{d\vec{D}}{dt}$  indique qu'un champ électrique variable est source de champ magnétique [11].

D'après le théorème d'Ampère :

$$\int (\vec{H} \cdot d\vec{l}) = \sum_{i=1}^n I_i \quad (\text{II.16})$$

Selon le théorème de Stokes :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) \cdot d\vec{S} \quad (\text{II.17})$$

Sachant que :

$$\sum I = \iint \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (\text{II.18})$$

On déduit :

$$\iint (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) \cdot d\vec{S} = \iint \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (\text{II.19})$$

D'où :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$\vec{j} = \vec{j}_c + \vec{j}_d \quad (\text{II.21})$$

$$\vec{j}_d = \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (\text{II.22})$$

D'où la quatrième équation de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j}_c + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (\text{II.23})$$

$\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m]

$\vec{j}_c$  : Densité de courant de conduction.

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

Les deux premières équations sont des équations de conservation de la charge et du flux, tandis que les deux dernières équations indiquent le lien qui existe entre les champs et leurs sources.

### II.3.5 Loi de comportement

Pour résoudre un problème d'électromagnétisme les équations de Maxwell ne suffisent pas, et par conséquent en fait appel à des équations supplémentaires qui représentent les lois du comportement du milieu [19].

### II.3.6 Relation du milieu

Les deux types de champs de vecteurs sont liés par les relations constitutives, dites lois de comportement, décrivant les caractéristiques des matériaux. Sans elles, le système (II.6 – II.23) serait indéterminé. Elles sont données généralement sous les formes suivantes : [3]

➤ **Milieu magnétique**

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

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (\text{II.25})$$

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide [H.m<sup>-1</sup>].

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

$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  [H/m].

➤ **Milieu diélectrique**

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.26})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (\text{II.27})$$

$\varepsilon_0$  : Permittivité du vide [F/m].

$\varepsilon_r$  : Permittivité relative.

$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$  [F/m].

### II.3.7 Loi d'ohm

Dans un milieu statique sans courant de source :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.28})$$

$\vec{J}$  : Vecteur densité électrique du milieu [A/m<sup>2</sup>].

$\sigma$  : Conductivité électrique du milieu [ $\Omega \text{ m}$ ]<sup>-1</sup>.

$\vec{E}$  : Vecteur champ électrique du milieu [V/m].

### II.3.8 Hypothèses simplificatrices

Dans le cas des courants de Foucault, les fréquences utilisées sont relativement faibles (< 1 MHz) et toutes les pièces sont immobiles. Les courants de déplacement introduits par le terme  $\frac{d\vec{D}}{dt}$  peuvent être négligés. Le système est alors quasi-stationnaire. Certaines hypothèses simplificatrices sont à considérer :

Le terme de déplacement dans le cas d'une excitation sinusoïdale est :

$$\vec{J}_d = \frac{d\vec{D}}{dt} = \frac{\epsilon_0 d\vec{E}}{dt} = \frac{d\vec{J}_c}{dt} \frac{\epsilon_0}{\sigma} = j2\pi f \frac{\epsilon_0}{\sigma} \vec{J}_c \quad (\text{II.29})$$

Les matériaux utilisés dans le contrôle non destructif par courants de Foucault sont suffisamment conducteurs pour considérer que le rapport  $(\frac{\epsilon_0}{\sigma})$  très faible.

En termes de courant, Le rapport  $\frac{\vec{J}_d}{\vec{J}_c}$  est faible pour des basses fréquences ainsi que le terme  $\vec{J}_d$  devient négligeable devant  $\vec{J}_c$ .

La densité volumique de charges est considérée nulle, soit  $\rho=0$ . [15], [21], [5].

Le système d'équation Maxwell devient:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (\text{II.30})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.31})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{II.32})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c \quad (\text{II.33})$$

Pour assurer l'unicité de la solution du système (II.6 à II.26), il est nécessaire d'ajouter trois types de conditions : les conditions aux limites, les conditions de continuité et de passages ainsi que les jauges.

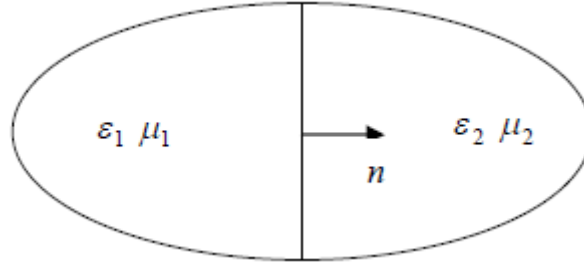
### II.3.9 Condition de continuité

L'équation de continuité appelée aussi équation de la conservation de la charge électrique est donnée par : [11]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_c = 0 \quad (\text{II.34})$$

### II.3.10 Condition de passage

Les champs électromagnétiques subissent des discontinuités lors du passage entre deux milieux de propriétés différents. Les conditions passage s'écrivent alors à l'interface entre deux grandeurs électromagnétiques : [23]



**Figure II.2 :** Schématisation des conditions d'interface

- La conservation de la composante tangentielle du champ électrique  $\vec{E}$  :

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{II.35})$$

$\vec{E}_1$ : La composante tangentielle du champ électrique dans le milieu(1).

$\vec{E}_2$ : La composante tangentielle du champ électrique dans le milieu(2).

$\vec{n}$ : Vecteur unité suivant la normale de l'interface, dirigée du milieu (1) vers le milieu (2).

- La conservation de la composante normale de l'induction magnétique  $\vec{B}$  :

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{II.36})$$

$\vec{B}_1$ : La composante tangentielle du champ magnétique dans le milieu(1).

$\vec{B}_2$ : La composante tangentielle du champ magnétique dans le milieu(2).

$\vec{n}$ : Vecteur unité suivant la normale de l'interface, dirigée du milieu (1) vers le milieu (2).

- La discontinuité de la composante normale de l'induction.

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \wedge \vec{n} = \vec{\rho}_s \quad (\text{II.37})$$

$\vec{\rho}_s$ : Densité de charges électriques portées par la surface de séparation.

- La discontinuité de la composante tangentielle du champ

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \wedge \vec{n} = \vec{K} \quad (\text{II.38})$$

$\vec{K}$ : Densité de courant porté à la surface de séparation.

L'ensemble de ces équations décrit globalement tous les phénomènes électromagnétiques [8].

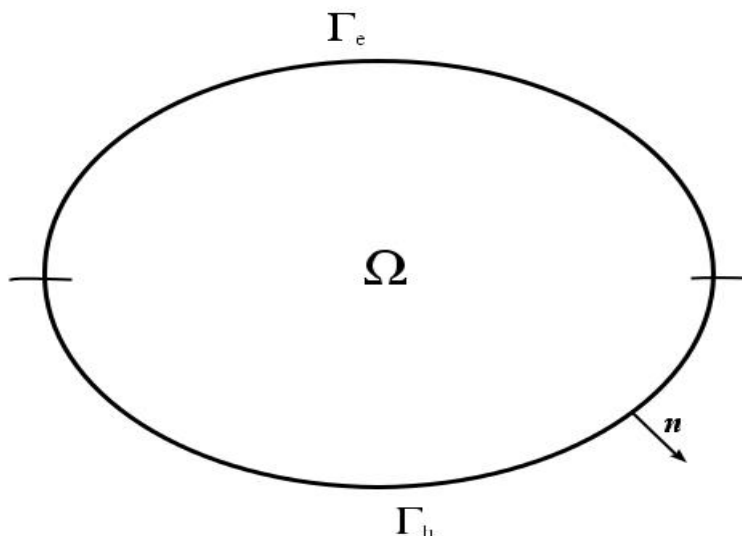
### II.3.11 Conditions aux limites

Le système composé des équations de Maxwell et des lois de comportement admet une infinité de solutions. Des conditions aux limites doivent être données sur la frontière du domaine d'étude afin d'assurer l'unicité de la solution [3].

a) une condition initiale:

$$\vec{H}(t_0) = \vec{H}_0 \quad (\text{II.39})$$

b) des conditions sur la frontière  $\Gamma = \Gamma_H \cup \Gamma_E$  :



**Figure II.3 :** Schématisation des frontières.

$$\vec{n} \times \vec{E} = \vec{0} \quad \text{Sur } \Gamma_e \quad (\text{II.40})$$

$$\vec{n} \times \vec{B} = \vec{0} \quad \text{Sur } \Gamma_h \quad (\text{II.41})$$

La condition (II.40) implique  $\vec{n} \cdot \vec{B} = \vec{0}$  sur  $\Gamma_e$  et la condition (II.41) entraîne  $\vec{n} \cdot \vec{J} = \vec{0}$  sur la frontière du conducteur qui touche  $\Gamma_h$  [24].

## II.4 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.

### II.4.1 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 : [17]

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

### II.4.2 Formulation $\vec{A} - V$

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

En reprenant l'équation (II.9), on peut montrer que l'induction magnétique peut être considérée comme le rotationnel d'un potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  tel que : [10]

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{II.42})$$

De même en remplaçant (II.42) dans (II.15) on obtient :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \vec{E} + \frac{d\vec{A}}{dt} \right) = 0 \quad (\text{II.43})$$

On remarque que la quantité  $\left( \vec{E} + \frac{d\vec{A}}{dt} \right)$  est conservée donc c'est une dérivée d'un potentiel V alors :

$$\vec{E} + \frac{d\vec{A}}{dt} = -\vec{\nabla} V \Rightarrow \vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{d\vec{A}}{dt} \Rightarrow \sigma \vec{E} = -\sigma(\vec{\nabla} V) - \sigma \frac{d\vec{A}}{dt} \quad (\text{II.44})$$

Après on a :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{II.45})$$

$\vec{J}_s$  =Densité de courant de source.

$\vec{J}_{ind}$  =Densité de courant d'induit.

Et :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (\text{II.46})$$

On trouve donc :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) = \vec{J}_c \quad (\text{II.47})$$

On a alors :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) = \vec{J}_s - \sigma(\vec{\nabla} V) - \sigma \frac{d\vec{A}}{dt} \Rightarrow \vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left( \frac{d\vec{A}}{dt} + \vec{\nabla} V \right) = \vec{J}_s \quad (\text{II.48})$$

A cette équation s'ajoute la conservation de la densité de courant :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_c = \vec{\nabla} \cdot \sigma \left( -\frac{d\vec{A}}{dt} - \vec{\nabla} V + \vec{J}_s \right) = 0 \quad (\text{II.49})$$

Aux équations précédentes, il faut imposer la condition de Jauge de Coulomb.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{II.50})$$

Cette jauge est introduite par pénalité en ajoutant le terme :

$$-\vec{\nabla} \cdot \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \right) \quad (\text{II.51})$$

Le système général à résoudre est le suivant :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) - \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \right) + \sigma \left( \frac{d\vec{A}}{dt} + \vec{\nabla} V \right) = \vec{J}_s \quad (\text{II.52})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_c = \vec{\nabla} \cdot \sigma \left( -\frac{d\vec{A}}{dt} - \vec{\nabla} V + \vec{J}_s \right) = 0 \quad (\text{II.53})$$

[21], [1]

Pour le dispositif 2D, la jauge de Coulomb est naturellement vérifiée, L'expression (conservation) devient alors : [22]

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

D'où l'équation à résoudre :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left( \frac{d\vec{A}}{dt} \right) = \vec{J}_s \quad (\text{II.55})$$

On tenant compte que l'alimentation est sinusoïdale :  $\frac{d}{dt} = j\omega$

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + j\omega\sigma\vec{A} = \vec{J}_s \quad (\text{II.56})$$

$\omega$  : La pulsation d'alimentation.

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

L'équation (II.56) représente l'équation de la magnétodynamique harmonique en termes de potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  avec un terme source.

### II.4.3 Formulation $\vec{T} - \Omega$

Cette formulation est duale de la formulation  $\vec{A} - V$ . A partir de la relation relative à la conservation de la densité de courant, on peut extraire un potentiel vecteur électrique  $\vec{T} = \vec{T}_x, \vec{T}_y, \vec{T}_z$  tel que donnée par l'équation : [21]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{II.57})$$

$$J = \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \quad (\text{II.58})$$

On peut noter des équations (II.20) et que  $\vec{T}$  et  $\vec{H}$  diffère par le gradient scalaire  $\Omega$  :

$$\vec{H} - \vec{T} = -\overline{\nabla\Omega} \quad (\text{II.59})$$

La combinaison des équations (II.15), (II.24) et (II.28) nous donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \overline{\nabla\Omega}) = 0 \quad (\text{II.60})$$

De l'équation (II.9) et (II.59) on obtient :

$$\vec{\nabla} \cdot \mu(\vec{T} - \overline{\nabla\Omega}) = 0 \quad (\text{II.61})$$

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

$$\vec{H} = -\overline{\nabla\Omega} \quad (\text{II.62})$$

On remplaçant (II.62) dans (II.8) :

$$-\vec{\nabla} \cdot \mu \overline{\nabla\Omega} = 0 \quad (\text{II.63})$$

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{T} = 0 \quad (\text{II.64})$$

Cette condition nous autorise à rajouter à l'équation (II.57) le terme : [10]

$$\vec{\nabla} \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) \quad (\text{II.65})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) - \vec{\nabla} \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \overline{\nabla\Omega}) = 0 \quad (\text{II.66})$$

## II.5 Les méthodes de résolution des modèles électromagnétiques

### II.5.1 Méthodes de 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 [11].

### **II.5.2 Méthodes de résolution numériques**

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution des équations aux dérivées partielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution donne les valeurs et les distributions des grandeurs recherchées. Des méthodes numériques, nous citons : [25]

- Méthode des Différences Finies (MDF)
- Méthode d'Intégrale de Frontière (MIF)
- Méthode des Volumes Finis (MVF)
- Méthode des Éléments Finis (MEF)

### **II.5.3 Méthode des éléments finis**

#### **II.5.3.1 Principe**

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. Cette méthode appliquée au début à des problèmes de mécanique de structure, a connu des développements importants dans différents domaines scientifiques et industriels durant les dernières décennies.

L'étude par éléments finis consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue recherchée pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Cependant elle ne s'applique pas directement aux équations aux dérivées partielles mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre. Les méthodes couramment utilisées pour obtenir la formulation intégrale sont la mise sous forme variationnelle et la méthode variationnelle de Ritz consiste à rendre extrême une fonctionnelle qui est une intégrale qui dépend de la fonction inconnue et de ses dérivées. Souvent, cette fonctionnelle représente l'énergie du système. Par contre la méthode des résidus pondérés permet de traiter directement l'équation aux dérivées partielles sans avoir à passer par un principe variationnel, elle consiste à projeter l'équation à résoudre sur une base de fonctions.

#### **II.5.3.2 Discrétisation du domaine**

La méthode des éléments finis consiste à subdiviser le domaine d'étude en éléments simples, appelés éléments finis, et à approximer l'inconnue sur chaque élément par des fonctions d'interpolation.

L'interpolation dans un élément est d'effectuer une fonction des valeurs de l'inconnue aux nœuds de cet élément ; il s'agit alors de l'interpolation nodale. Celle-ci a l'avantage d'imposer la continuité de l'inconnue. Les éléments peuvent être représentés par une dimension ou des formes triangulaires ou des formes quadrilatérales [7].

Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

➤ Éléments à une dimension :

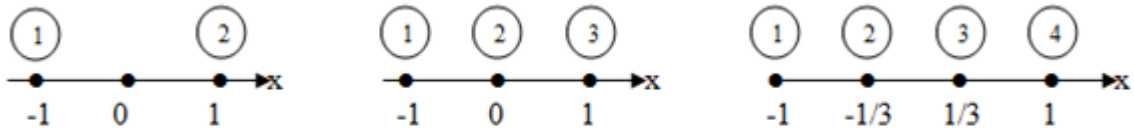


Figure II.4 : Discretisation des éléments à une dimension

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

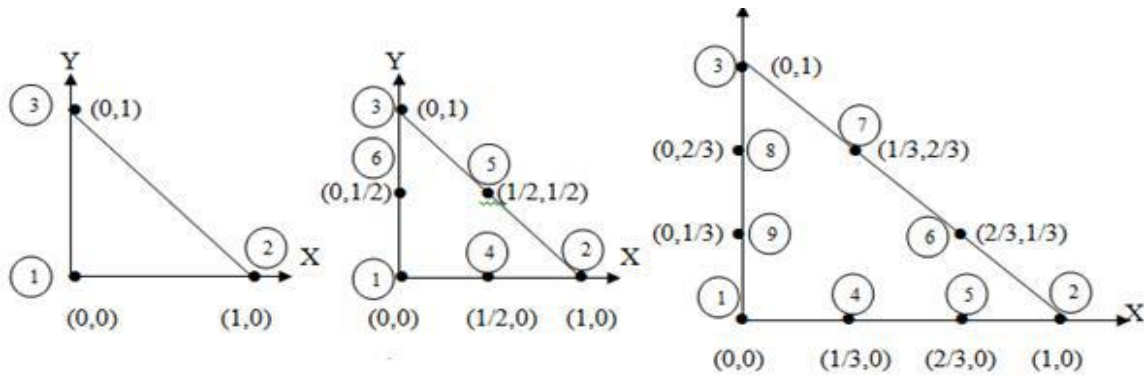


Figure II.5 : Discretisation des éléments triangulaires

➤ Éléments à deux dimensions.

- Éléments triangulaires.
- Éléments carrés :

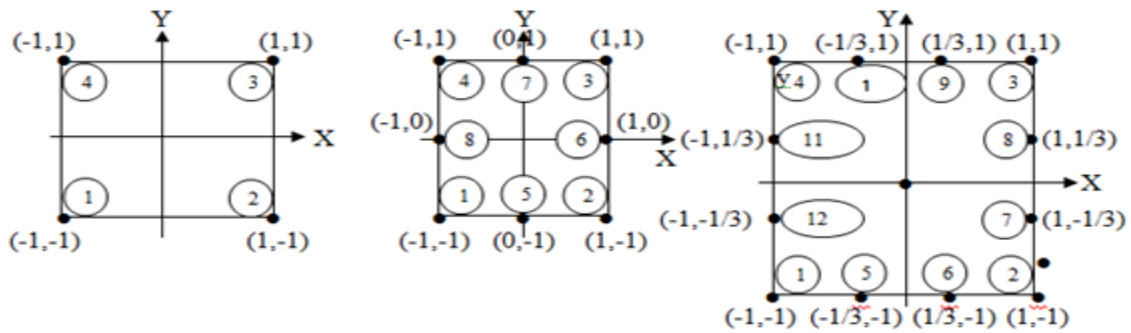
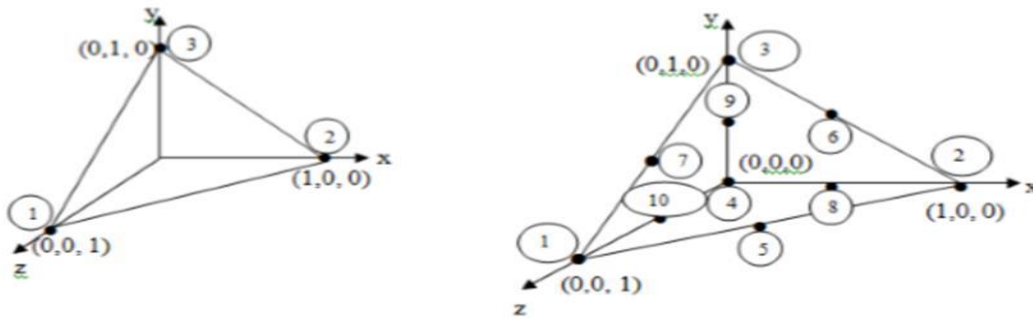


Figure II.6 : Discretisation des éléments carrés

➤ Éléments à trois dimensions :



**Figure II.7 :** Discretisation des éléments à trois dimensions

❖ **Les étapes du processus de discrétisation d'un problème physique**

**a. Modélisation de la physique du problème**

- Choix des équations régissant le problème avec conditions limites et initiales.
- Choix du domaine physique.
- Loi de comportement.
- Autres hypothèses ...

**b. Représentation discrète de la géométrie :** Génération d'un maillage.

**c. Obtention de l'équation d'équilibre discrète :** Cette étape consiste à remplacer tous les termes de dérivées sous une forme discrètes à l'aide d'une technique basée sur les développements limités.

**d. Assemblage du système discret :** Application de l'équation discrète sur l'ensemble des nœuds autorisés pour obtenir le système suivant :

$$[M]\{A\} = \{K\}$$

**e. Mise en place des conditions aux limites dans le système d'équations.**

**f. La résolution, pour un problème linéaire,** il s'agit de trouver :

$$\{A\} = [M]^{-1}\{K\}$$

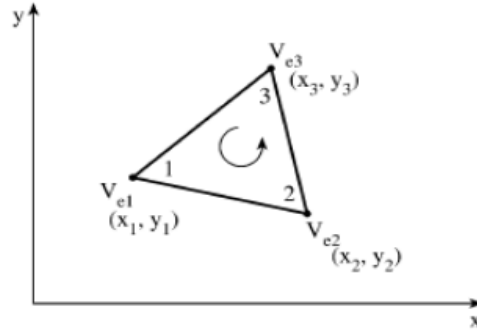
**g. Analyse des résultats.**

**II.5.3.3 Fonction d'approximation :**

La fonction d'interpolation est aussi définie en fonction de la géométrie de l'élément qu'on choisit préalablement et coïncide avec les nœuds de cet élément relatifs aux valeurs de l'inconnue, on parle alors d'interpolation nodale. Dans la majorité de cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre. Pour aboutir à une meilleure exactitude de la solution. Les fonctions d'approximations sont obtenues à partir du triangle de Pascal ci-dessous : [21]

$$\begin{array}{c}
 1 \\
 x \ y \\
 x^2 \ xy \ y^2 \\
 x^3 \ x^2y \ xy^2 \ y^3
 \end{array}$$

**Figure II.8 :** Triangle de Pascal



**Figure II.9 :** Elément triangulaire typique

On applique la relation générale :

$$N_i(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

Soient les 3 systèmes à 3 systèmes d'équations suivants à résoudre :

$$\begin{cases} N_1(x_1, y_1) = 1 = a_1 + b_1x_1 + c_1y_1 \\ N_1(x_2, y_2) = 0 = a_1 + b_1x_2 + c_1y_2 \\ N_1(x_3, y_3) = 0 = a_1 + b_1x_3 + c_1y_3 \end{cases}, \begin{cases} N_2(x_1, y_1) = 0 = a_2 + b_2x_1 + c_2y_1 \\ N_2(x_2, y_2) = 1 = a_2 + b_2x_2 + c_2y_2 \\ N_2(x_3, y_3) = 0 = a_2 + b_2x_3 + c_2y_3 \end{cases}, \begin{cases} N_3(x_1, y_1) = 0 = a_3 + b_3x_1 + c_3y_1 \\ N_3(x_2, y_2) = 0 = a_3 + b_3x_2 + c_3y_2 \\ N_3(x_3, y_3) = 1 = a_3 + b_3x_3 + c_3y_3 \end{cases}$$

Après résolution des 3 systèmes, on a :

$$N_1 = \frac{1}{2A} ((y_3 - y_2)(x_2 - x) - (x_3 - x_2)(y_2 - y)) \tag{II.67.a}$$

$$N_2 = \frac{1}{2A} ((y_1 - y_3)(x_3 - x) - (x_1 - x_3)(y_3 - y)) \tag{II.67.b}$$

$$N_3 = \frac{1}{2A} ((y_2 - y_1)(x_1 - x) - (x_2 - x_1)(y_1 - y)) \tag{II.67.c}$$

Avec :

$$A = \frac{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}{2} \text{ aire de l'élément}$$

### II.5.3.3.1 Fonction d'interpolation sur le domaine

Dans le domaine global contenant N nœuds, l'inconnue s'exprime alors : [22]

$$A = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_j \tag{II.68}$$

N : Le nombre de nœuds.

$\alpha_j$  : Fonction d'interpolation au nœud j.

$A_j$  : Inconnue au nœud j.

### II.5.3.4 Formulations intégrales

La particularité de la méthode des éléments finis (MEF) est de discrétiser, non pas la relation d'équilibre, mais une forme « affaiblie » de cette équation. Cette forme est appelée sous divers noms : [21]

- Forme intégrale en résidus pondérés.
- Forme variationnelle.

#### ❖ Formulation variationnelle

Les formulations variationnelles sont construites à partir du principe de l'action Hamiltonienne qui stipule l'existence d'une fonctionnelle de type intégrale donnée par:

$$\begin{cases} F(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \\ L(A) = (\omega_c - \omega_p) \end{cases} \quad (\text{II.69})$$

Avec:

$\Omega$ : Domaine d'étude.

L: la fonction de Lagrange

$\omega_c$ : Energie de type cinétique.

$\omega_p$ : Energie de type potentielle.

De là, on constate que la méthode variationnelle nécessite la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système étudié.

#### ❖ Formulation projective (résidus pondérés)

Appelée aussi méthode de Galerkin, son principe est basé sur un théorème applicable dans un espace de Hilbert stipulant que seul le vecteur nul est orthogonal à tous les vecteurs de l'espace. Son principe consiste à chercher la solution approchée du problème partant directement des EDP. La méthode des résidus pondérés présente un intérêt particulier par rapport la formulation variationnelle car elle ne nécessite pas la connaissance au préalable de la fonctionnelle de l'énergie. La détermination du résidu se fait par:

$$R = L(A) - f_v \quad (\text{II.70})$$

R: représente le résidu de l'approximation.

L: Opérateur différentiel.

$f_v$ : Fonction définie sur le domaine d'étude  $\Omega$ .

A: L'inconnue du problème.

Si les fonctions de pondérations sont bien choisies, l'intégrale du résidu doit s'annuler en n points du domaine  $\Omega$ .

$$\int_{\Omega} R_i \cdot \phi_i \cdot d\Omega \quad (II.71)$$

$\phi_i$ : Fonction de projection.

Les valeurs de A qui annulent l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu [8].

L'équation ( $F(A) = Ld\Omega$ ) 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 [11].

### II.5.3.5 formulation éléments finis du modèle $\vec{T} - \Omega$

La formulation éléments finis du modèle  $\vec{T} - \Omega$  a été mise en œuvre en utilisant des éléments tétraédriques de second ordre. Dans chaque élément le potentiel scalaire magnétique et le potentiel vecteur électrique sont exprimés par une fonction de forme second degré associée avec les nœuds :

Dans un élément le potentiel scalaire magnétique est approché comme suite :

$$\Omega = \sum_{j=1}^N \Omega_j A_j \quad (II.72)$$

Dans le système de coordonnées cartésiennes le potentiel vecteur électrique  $\vec{T}$  à trois composantes  $\vec{T}_x, \vec{T}_y, \vec{T}_z$ . Chaque nœud a trois degrés de liberté au lieu d'un. Dans chaque élément le potentiel vecteur électrique peut être approché comme :

$$\vec{T} = \sum_{j=1}^N \vec{T}_j A_j = \sum_{j=1}^N (\vec{T}_{xj} \cdot \vec{x} + \vec{T}_{yj} \cdot \vec{y} + \vec{T}_{zj} \cdot \vec{z}) A_j \quad (II.73)$$

Pour un élément tétraédrique les fonctions de formes sont définies comme suit:

$$A_j = \frac{a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4 xy + a_5 yz + a_6 xz + a_7 x^2 + a_8 y^2 + a_9 z^2}{6 \cdot vol} \quad (II.74)$$

La formulation de Galerkin des équations (II.66), (II.63) et (II.61) est donnée par les équations (II.75) (II.76) et (II.77) respectivement :

$$\int_{vol} A_j \cdot (\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) - \vec{\nabla} \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) + j\omega\mu(\vec{T} - \overline{\nabla\Omega})) dvol = 0 \quad (II.75)$$

$$\int_{\text{vol}} A_j \cdot (\vec{\nabla} \cdot (\mu(\vec{T} - \vec{\nabla}\Omega))) d\text{vol} = 0 \quad (\text{II.76})$$

$$\int_{\text{vol}} A_j \cdot (-\vec{\nabla} \cdot \mu \vec{\nabla}\Omega) d\text{vol} = 0 \quad (\text{II.77})$$

Ces équations peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{\text{vol}} ((\vec{\nabla} \wedge A_j) \cdot (\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T}) + (\vec{\nabla} \cdot A_j) (\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T}) + A_j \cdot j \omega \mu (\vec{T} - \vec{\nabla}\Omega)) d\text{vol} + \\ \int_{\text{surf}} \left( A_i \cdot \hat{n} \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) ds + \oint \left( A_i \cdot \wedge \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \right) \cdot \hat{n} \right) ds = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.78})$$

$$\int_{\text{vol}} \vec{\nabla} A_i \cdot (\mu(\vec{T} - \vec{\nabla}\Omega)) d\text{vol} + \oint (\mu(\vec{T} - \vec{\nabla}\Omega) \cdot \hat{n}) ds = 0 \quad (\text{II.79})$$

$$\int_{\text{vol}} \vec{\nabla} A_i \cdot (\mu(-\vec{\nabla}\Omega)) d\text{vol} + \oint (\mu(-\vec{\nabla}\Omega) \cdot \hat{n}) ds = 0 \quad (\text{II.80})$$

En imposant les conditions de surface sur les composantes normales de  $\vec{B}$  et  $\vec{J}$ , et sur les composantes tangentielles de  $\vec{H}$  sur la surface entre les deux milieux conducteur et non-conducteur toutes les intégrales de la surface disparaissent [10].

### II.5.3.6 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

➤ **Avantage :**

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités accrues.

➤ **Inconvénients :**

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération de domaines infinis.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude.
- Temps de calcul relativement important. [18]

## II.6 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  $\Delta Z$ .

### II.6.1 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.

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

$$P_j = \iiint_v \frac{J^2}{\sigma} dv \quad (\text{II.81})$$

$$P_j = RI^2 \quad (\text{II.82})$$

$P_j$  : Pertes joules.

D'où :

$$R = \frac{N^2}{S^2 J^2} P_j \quad (\text{II.83})$$

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

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_v \frac{B^2}{\mu} dv \quad (\text{II.84})$$

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{II.85})$$

$W_m$  : Énergie électromagnétique.

D'où :

$$L = \frac{2N^2}{S^2 J^2} W_m \quad (\text{II.86})$$

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 [11].

### **II.7 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré aux techniques de modélisation du capteur à courants de Foucault, et aux notions de base de l'électromagnétisme ainsi qu'aux équations de Maxwell.

Nous avons présenté le modèle électromagnétique magnétodynamique sous forme d'équations aux dérivées partielles, ensuite on a fait appel à des méthodes analytiques et numériques permettant la résolution de ces EDP. Il s'avère inextricable d'aboutir à une résolution des problèmes électromagnétiques de CND via la méthode analytique vue que la complexité du champ en interaction avec des variations matérielles (L'hétérogénéité) telles que les défauts. Nous nous sommes principalement intéressés à la méthode des éléments finis que nous utiliserons dans nos travaux.

# Chapitre III

### **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.

Les défauts de types fissures sont fréquemment rencontrés en CND. Leur géométrie est caractérisée par le fait qu'une dimension est petite par rapport aux deux autres. Le CND-CF est accessible pour mettre en évidence ce genre de discontinuité. C'est ce type de défaut que nous avons simulé au cours de ce chapitre.

L'objectif de cette partie est d'évaluer le modèle de calcul par éléments finis de l'impédance d'un capteur en prenant compte l'influence du paramètre géométrique, sur le logiciel ANSYS-Maxwell.

### **III.2 Présentation de logiciel ANSYS-Maxwell**

ANSYS-Maxwell est un logiciel commercial qui calcule le champ électromagnétique dans le domaine fréquentiel et temporel, et permet d'analyser le comportement électromagnétique d'une structure. Pour analyser ce comportement en détails, le logiciel met à notre disposition des outils d'interprétation post-traitement. Il effectue des calculs électromagnétiques par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis. Cette dernière est basée sur la discrétisation géométrique de la structure étudiée sous forme d'un maillage.

Un projet sous ANSYS-Maxwell se construit étape par étape. L'évolution du projet passe par le dessin de la géométrie, la définition des conditions aux limites ainsi que les matériaux et à la fin la visualisation des résultats de simulation dans le post-processeur [26].

La figure suivante montre la fenêtre principale du logiciel :

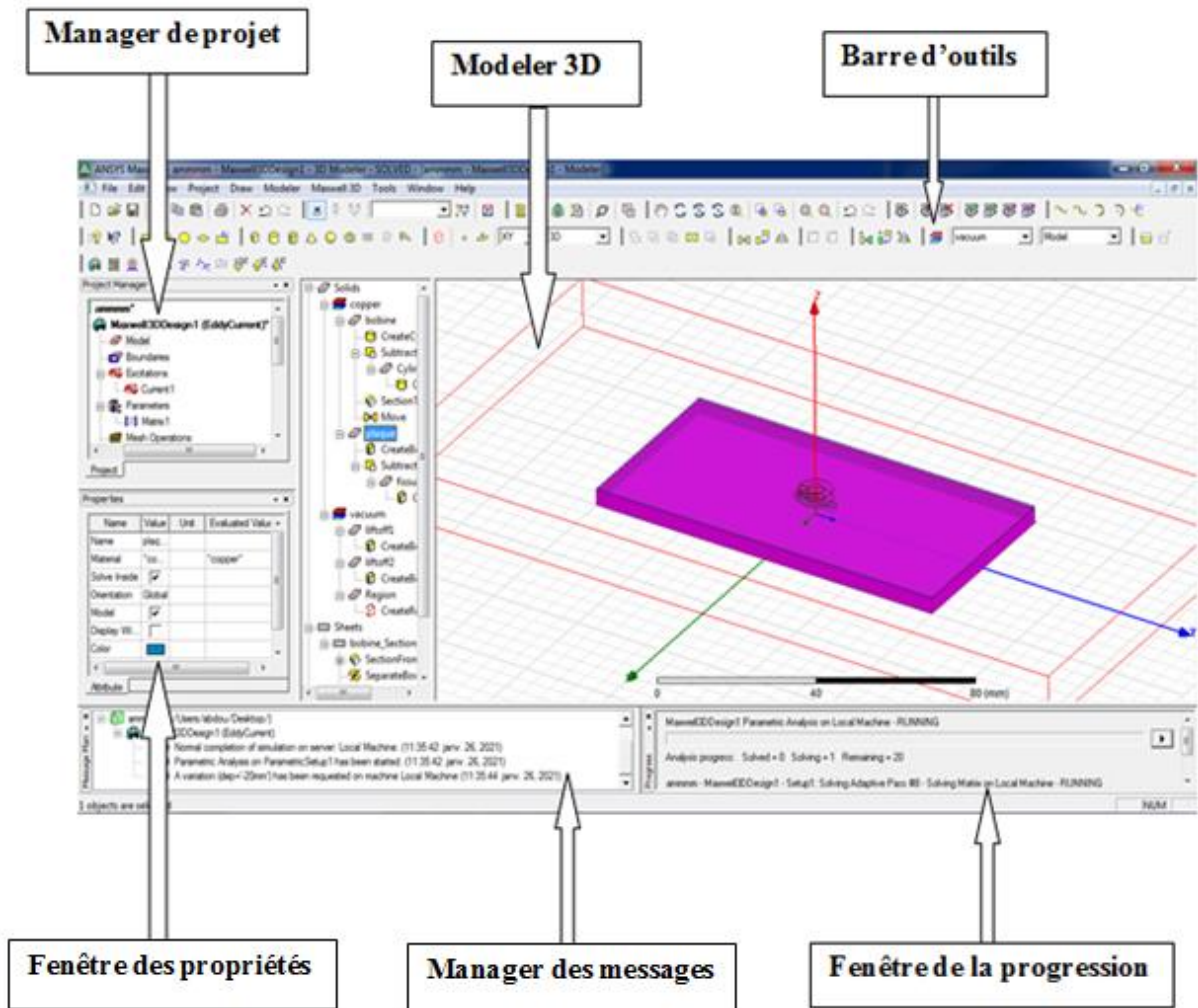


Figure III.1 : La fenêtre principale du logiciel Maxwell.

- **Le Project Manager:** contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.
- **Le Message Manager:** permet d'afficher tous les erreurs avant de commencer la Simulation
- **La fenêtre de Propriété :** Permet d'afficher et modifier les paramètres du modèle.
- **La fenêtre de Progress:** affiche les progressions de la simulation.
- **La fenêtre de 3D Modeler:** contient le modèle et son arbre pour la conception géométrique.

La figure (III.2) présente un organigramme décrivant les étapes de la résolution d'un problème électromagnétique avec le logiciel ANSYS Maxwell.

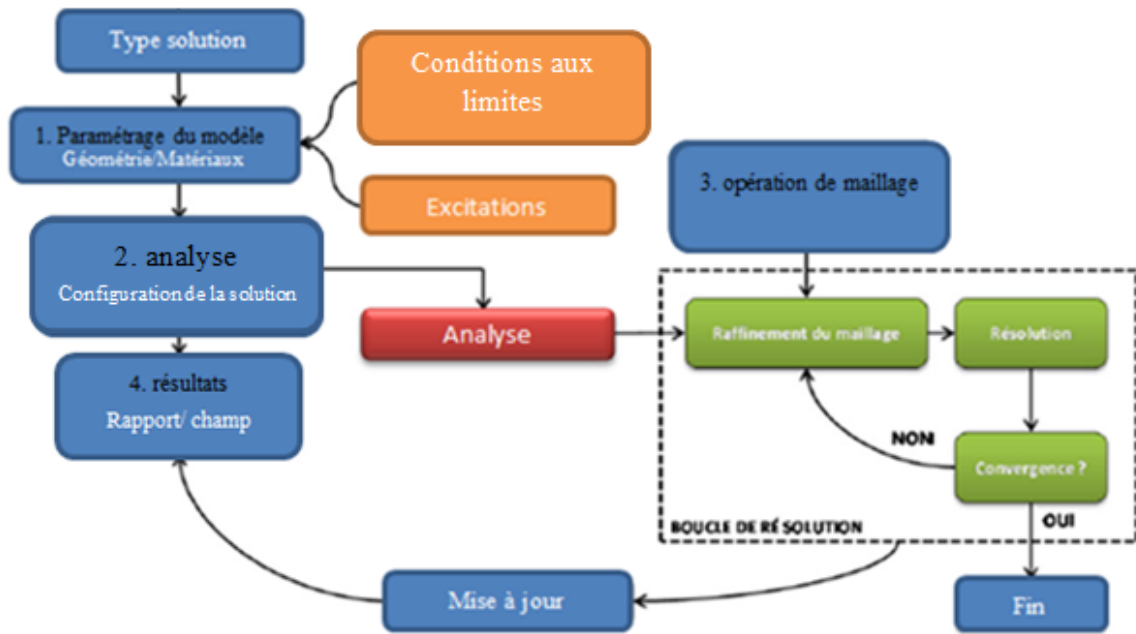


Figure III.2 : Organigramme de simulation sous Ansys-Maxwell

### III.3 Présentation de l'application

Il s'agit d'une bobine à air qui scanne une pièce en cuivre d'une forme parallélépipédique qui contient une fissure en surface. Nous avons effectué des simulations de l'impédance de la bobine pour différentes dimensions de la fissure.

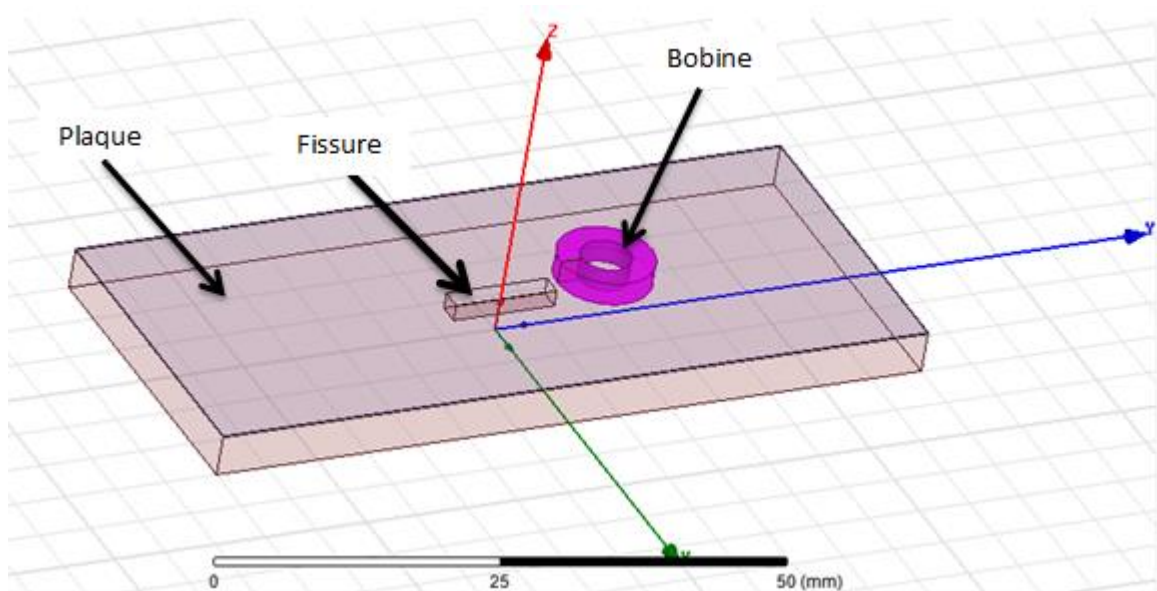


Figure III.3 : Géométrie du domaine d'étude

Les caractéristiques physiques et géométriques du système sont données dans le tableau suivant :

**Tableau III.1** : les caractéristiques physiques et géométriques du système

Paramètres	Valeurs
<b>Capteur</b>	
<b>Rayon intérieur</b>	2.35mm
<b>Rayon extérieur</b>	4.5mm
<b>Hauteur</b>	2.2mm
<b>Lift-off</b>	0.13mm
<b>Fréquence</b>	50Khz
<b>Nombre de spires</b>	170
<b>Pièce</b>	
<b>Longueur</b>	70mm
<b>Largeur</b>	30mm
<b>Epaisseur</b>	4mm
<b>Conductivité électrique</b>	58 10 <sup>6</sup> S/m
<b>Fissure</b>	
<b>Longueur</b>	16mm 14mm 12mm 10mm
<b>Largeur</b>	2mm
<b>Profondeur</b>	20% 40% 60% 80% 100%

Nous avons effectué des scans unidirectionnels suivant l'axe de la fissure (Oy), A chaque déplacement du capteur un calcul éléments finis est réalisé pour calculer l'impédance correspondante.

La variation de l'impédance est donnée par :

$$\Delta Z = Z_f - Z_S \tag{III.1}$$

$Z_f$  : L'impédance du capteur en présence de la fissure.

$Z_S$  : L'impédance du capteur en absence de la fissure.

Ensuite on effectue la normalisation des résultats obtenus en utilisant le rapport suivant :

$$\frac{\Delta Z}{Z_0} \tag{III.2}$$

$Z_0$  : L'impédance du capteur dans l'air.

### III.4 Maillage du domaine

Les figures ci-dessous illustrent le maillage élément finis de notre dispositif pour différentes position du capteur par rapport au centre du défaut (0mm, 5mm, 10mm, 15mm), qui est en éléments triangulaires.

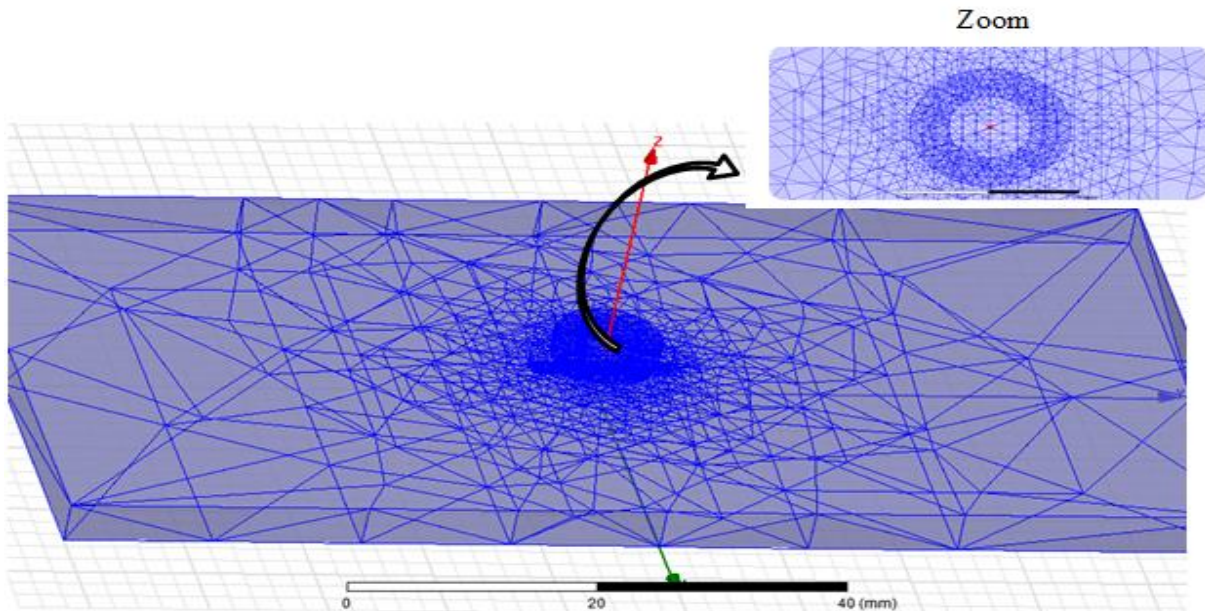


Figure III.4 : Maillage du domaine pour une position de 0mm du capteur

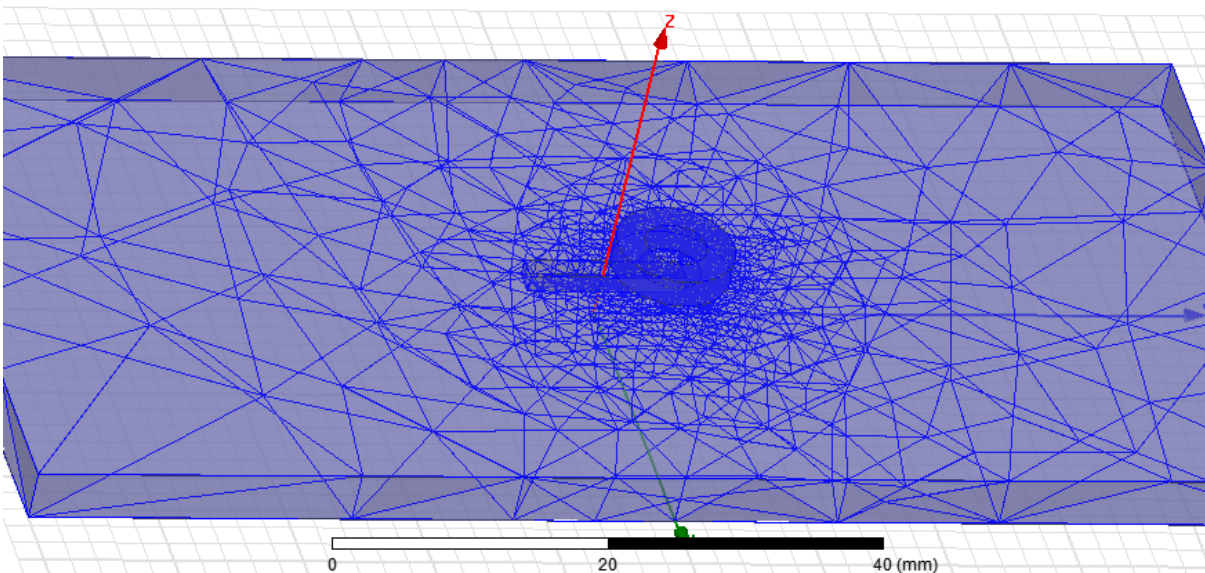


Figure III.5 : Maillage du domaine pour une position de 5mm du capteur

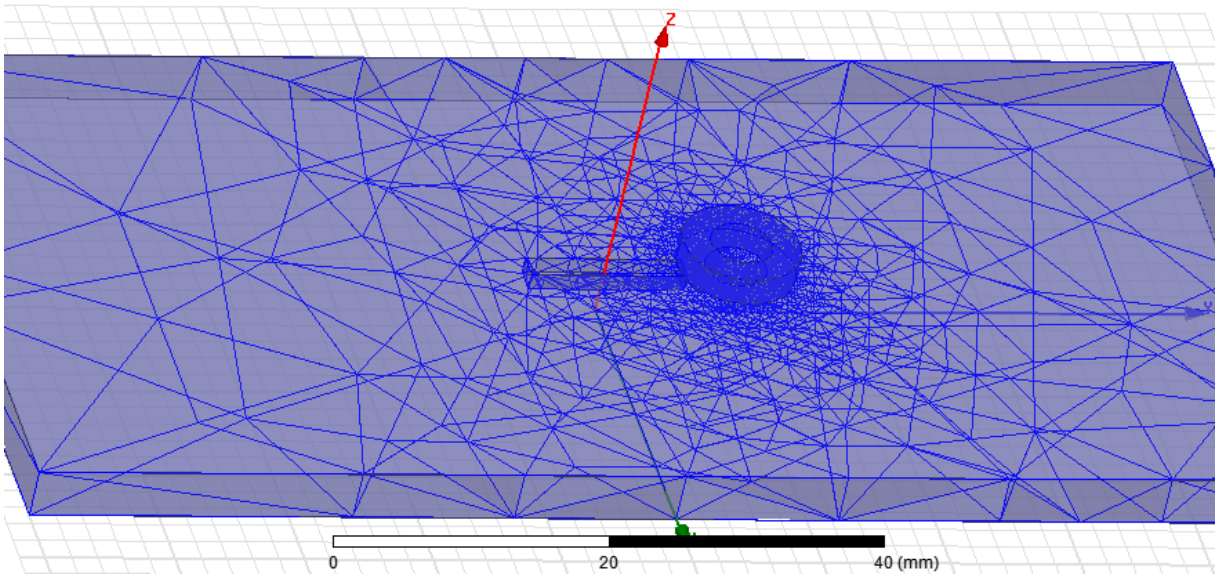


Figure III.6 : Maillage du domaine pour une position de 10mm du capteur

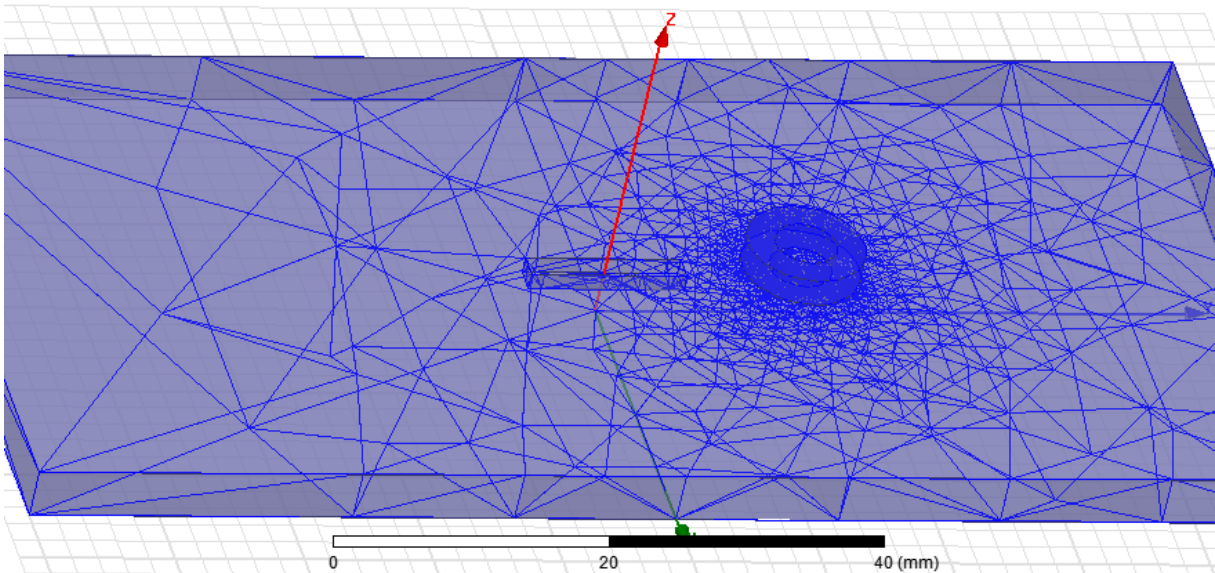


Figure III.7 : Maillage du domaine pour une position de 15mm du capteur

On remarque que le maillage est plus concentré dans les régions où se trouve notre capteur ce qui est montré dans les figures (III.4, III.5, III.6, III.7) car ce sont les régions actives. En revanche dans les autres régions qui sont loin, le maillage est peu concentré.

### III.5 Densité des courants induits

Les figures (III.8) (III.9) (III.10) et (III.11) montrent la cartographie des CF en fonction de la position du capteur. En présence d'une anomalie dans la pièce a contrôlée, telle qu'une fissure, la densité et la circulation des courants induits vont être perturbés, modifiant localement le champ magnétique de détection et donc l'impédance du capteur.

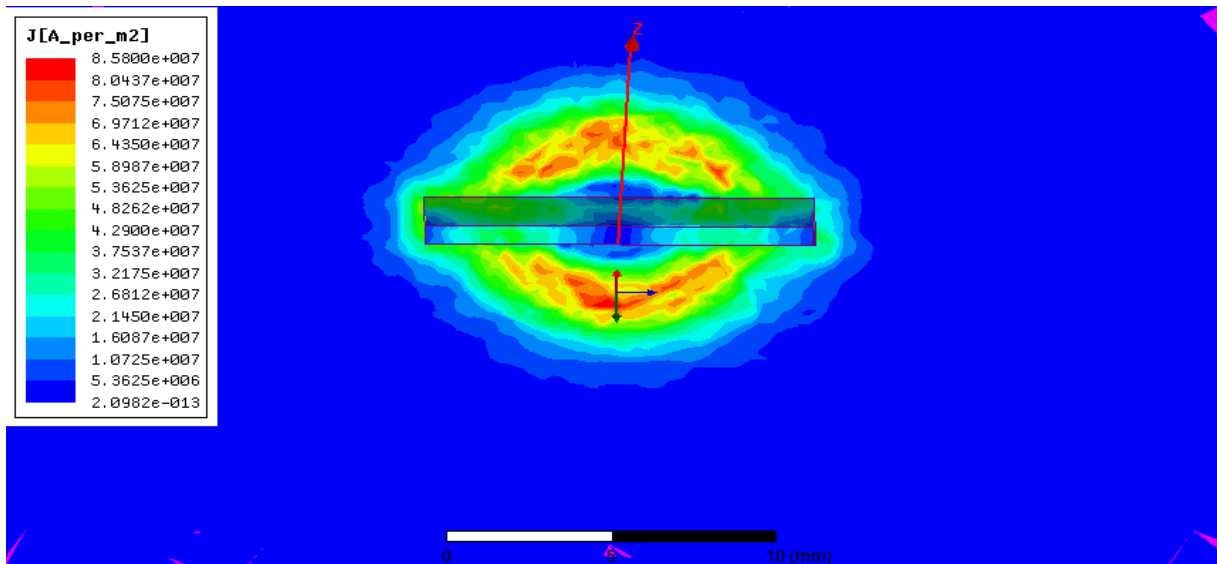


Figure III.8 : Densité des courants induits au centre du défaut

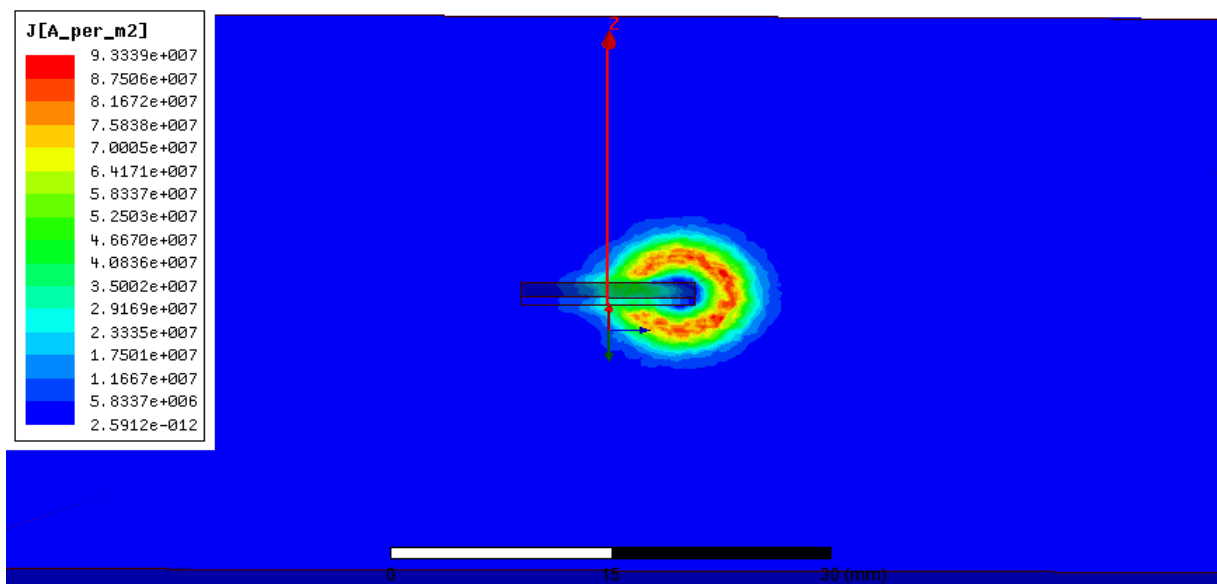


Figure III.9 : Densité des courants induits à l'extrémité du défaut

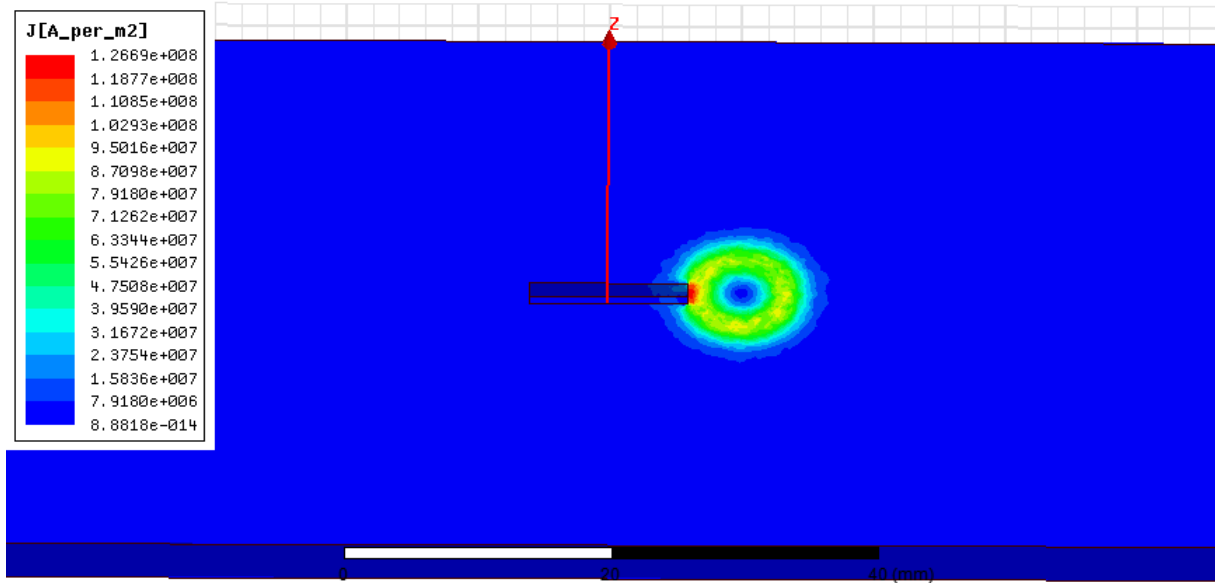


Figure III.10 : Densité des courants induits au début du défaut

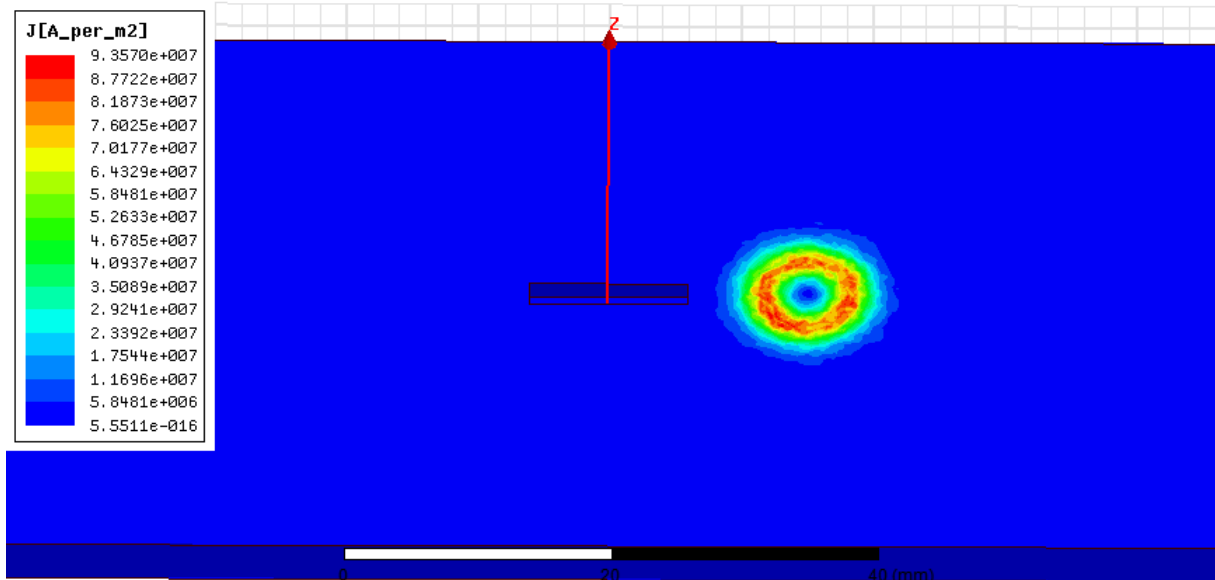


Figure III.11: Densité des courants induits loin du défaut

### III.6 Validations des dimensions de la fissure

#### III.6.1 Les résultats de la simulation pour des différentes profondeurs du défaut

L'objectif de cette application est de voir l'effet de la variation de la profondeur de la fissure sur l'impédance du capteur.

Nous avons effectué plusieurs scans d'une plaque comportant une fissure pour différentes valeurs de la profondeur et de la longueur du défaut. Initialement on s'intéresse qu'aux variations de la profondeur (4mm, 3.2mm, 2.4mm, 1.6mm, 0.8mm), les figures ci-dessous présentent le résultat de la variation de l'impédance en fonction de déplacement du capteur pour une fréquence de 50kHz.

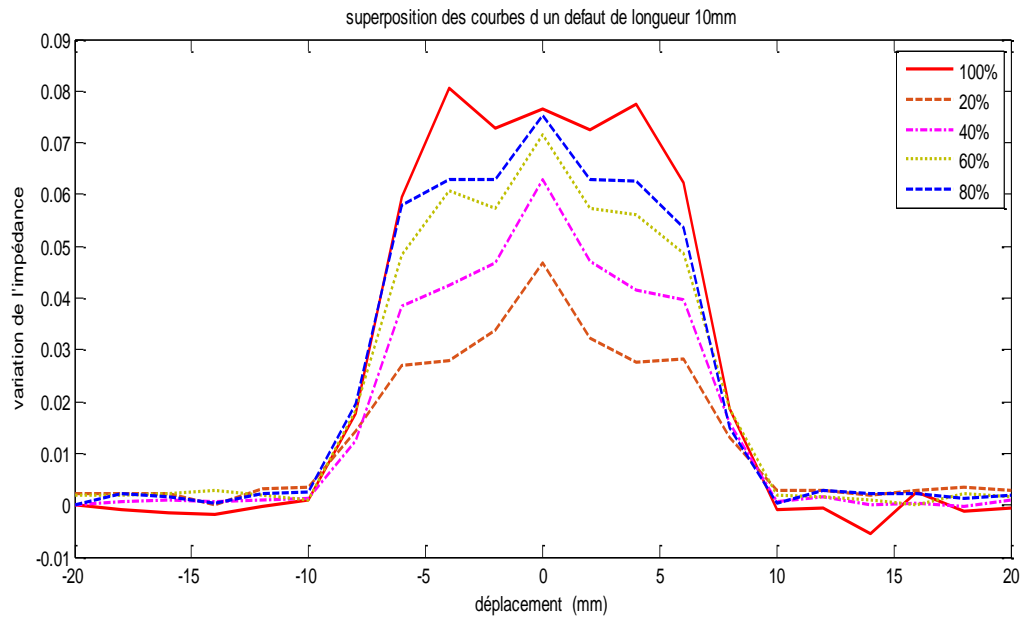


Figure III.12 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une longueur de 10mm

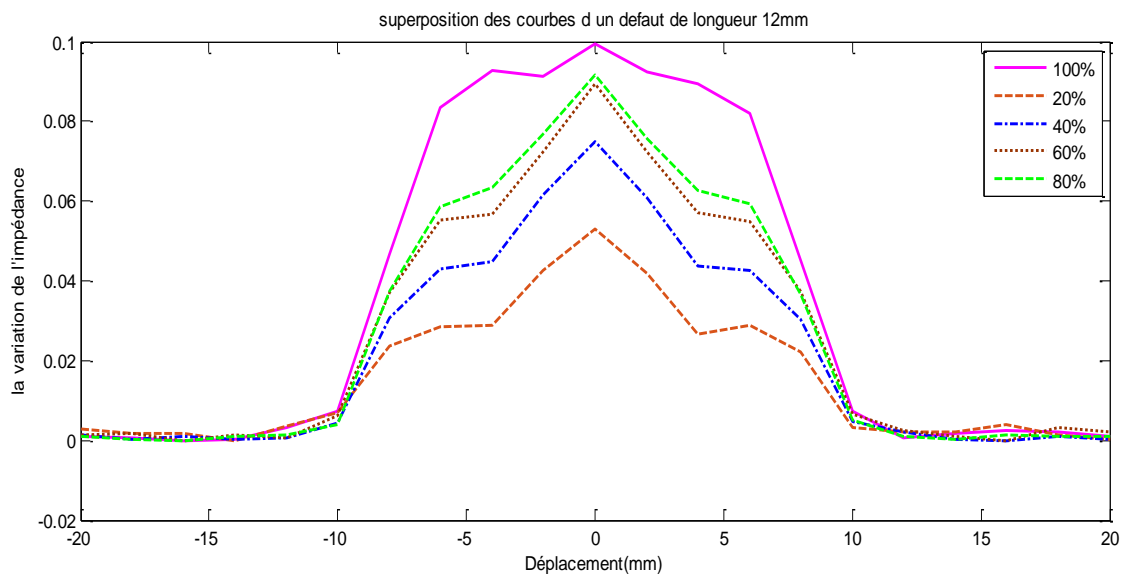


Figure II.13 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une longueur de 12mm.

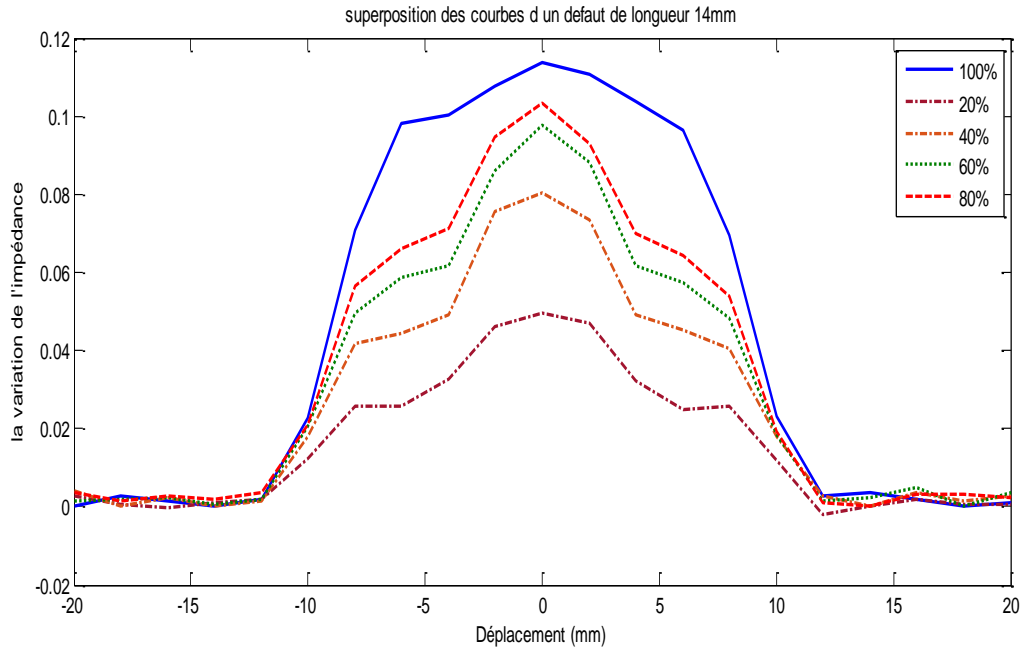


Figure III.14 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une longueur de 14mm.

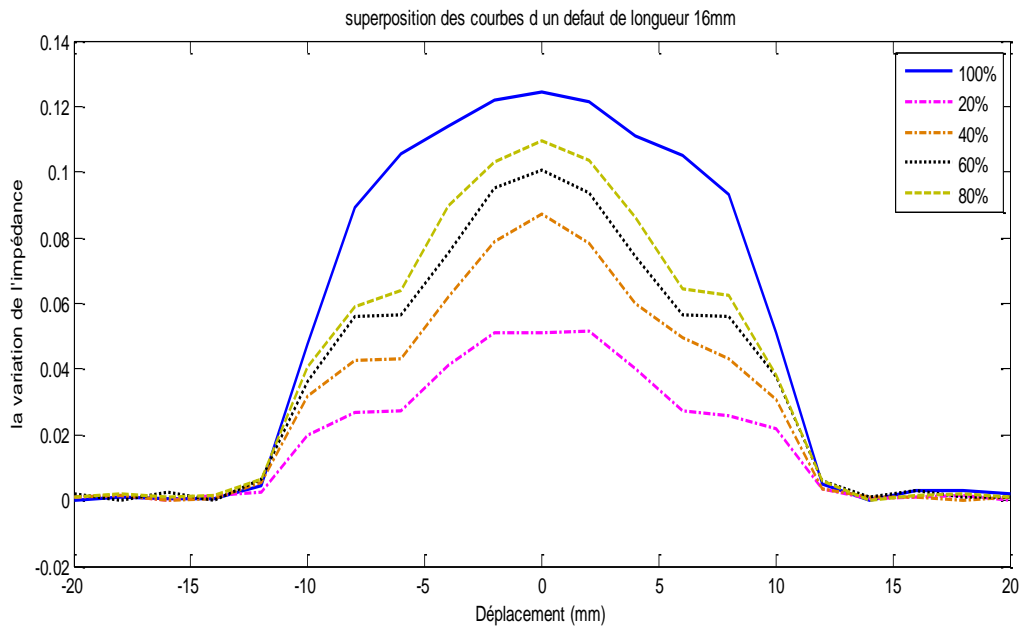


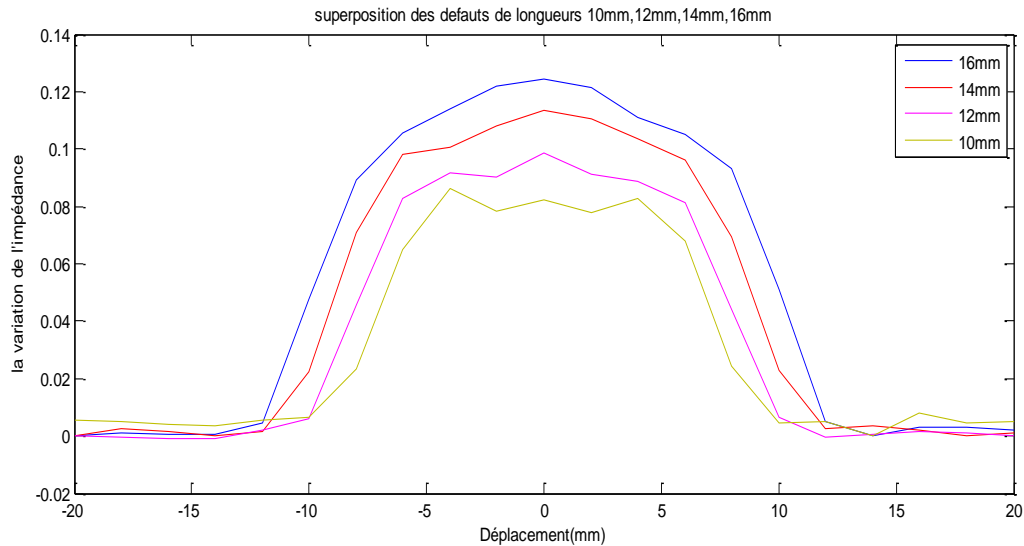
Figure III.15 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes profondeurs du défaut pour une longueur de 16mm.

La courbe de l'impédance du capteur en fonction du déplacement à une forme en cloche, qui atteint son maximum lorsque le capteur est au milieu de défaut.

A travers les figures précédentes, nous voyons clairement que l'augmentation de la profondeur de défaut conduit à une augmentation de la variation de l'impédance du capteur et que la détection est meilleure d'autant plus que le défaut est profond. Cette augmentation de l'impédance peut être expliquée par le fait que plus la profondeur du défaut augmente plus sa

taille augmente ainsi plus la trajectoire des courants induits est fortement altérés, cela conduit à une création d'un champ de réaction moins intense ce qui fait augmenter la valeur de Z.

### III.6.2 Les résultats de la simulation pour des différentes longueurs du défaut



**Figure III.16 :** Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes longueurs du défaut.

La figure(III.16) montre la variation de l'impédance en fonction de déplacement pour différentes longueurs du défaut. A partir de ces allures, on remarque qu'on peut évaluer les longueurs et que plus les défauts sont longs plus la détection est meilleure

### III.6.3 Les résultats de la simulation pour des différentes valeurs du lift off

La figure (III.17) représente la variation de l'impédance du capteur pour différentes valeurs de la distance ente la pièce à contrôler et le capteur (lift off), soient (0.13mm, 0.26mm, 0.52mm, 1.3mm).

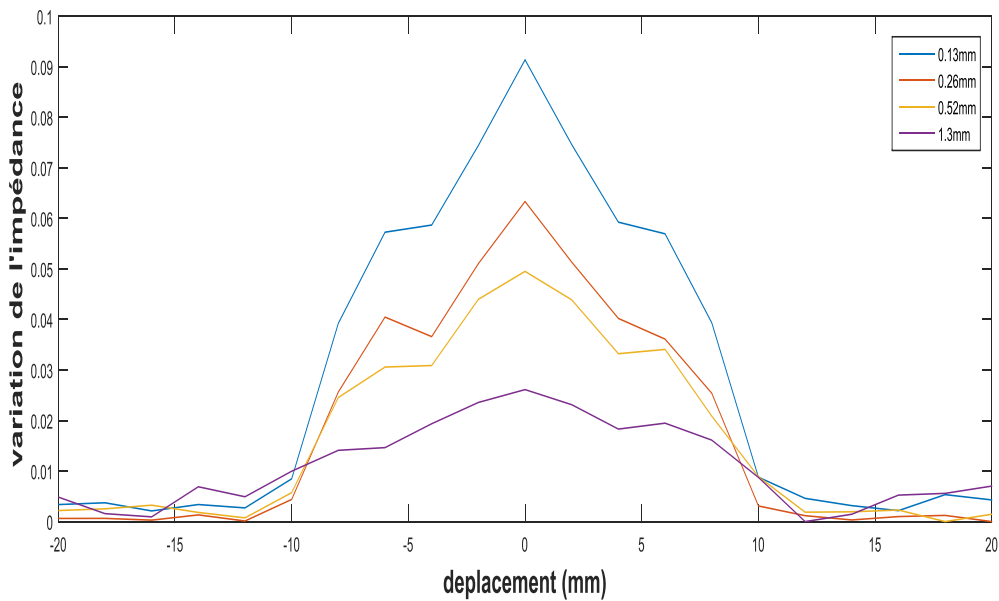


Figure III.17 : Variation de l'impédance en fonction de lift off

L'augmentation du lift off engendre une diminution de l'influence de la plaque sur le capteur, par conséquent la variation de l'impédance du capteur par rapport au défaut diminue et son impédance absolue tend vers son impédance à vide (en absence de la cible).

L'éloignement du capteur par rapport à la pièce (lift-off) a causé la diminution des courants induits dans la cible en l'occurrence notre signal sera faible et la détection du défaut est donc mauvaise.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, des simulations par la MEF ont été effectuées pour obtenir la réponse de notre capteur aux différentes dimensions des fissures. Ainsi l'influence des propriétés géométriques du défaut sur la variation de l'impédance du capteur a été mise en évidence.

# Chapitre IV

### IV.1 Introduction

L'objet du travail réalisé dans cette section est la réalisation d'une chaîne d'acquisition d'un capteur à courants de Foucault, et de sa mise en œuvre dans le cadre de la recherche des fissures débouchantes dans les matériaux conducteurs.

Une procédure a été suivie pour l'acquisition des signaux via une carte Arduino. Les signaux récoltés sont traités au préalable en utilisant un pont redresseur et un circuit de filtrage pour les adapter aux entrées analogiques de la carte Arduino.

### IV.2 Description général du système d'acquisition

Un capteur inductif fonctionnant en mode absolu a été utilisé pour l'inspection d'une plaque conductrice en cuivre, cette dernière possède un défaut superficiel. L'évolution de l'impédance du capteur nous renseigne sur l'état de santé de la plaque à contrôler.

Pour obtenir la valeur d'impédance du capteur, on va mesurer le courant qui le traverse ainsi que la tension aux bornes de ce dernier. La carte Arduino nous permettra d'accueillir, les deux valeurs de courant et de tension et un programme exécutera le rapport  $Z = \frac{V_{eff}}{I_{eff}}$  pour chaque position du capteur au-dessus de la pièce. Comme la variation de la valeur du courant  $I_{eff}$  est très modérée, nous nous intéressons donc uniquement à l'acquisition de la tension aux bornes du capteur.

Les figures IV.1, IV.2 et IV.3 montrent les images des différentes parties de la chaîne d'acquisition :

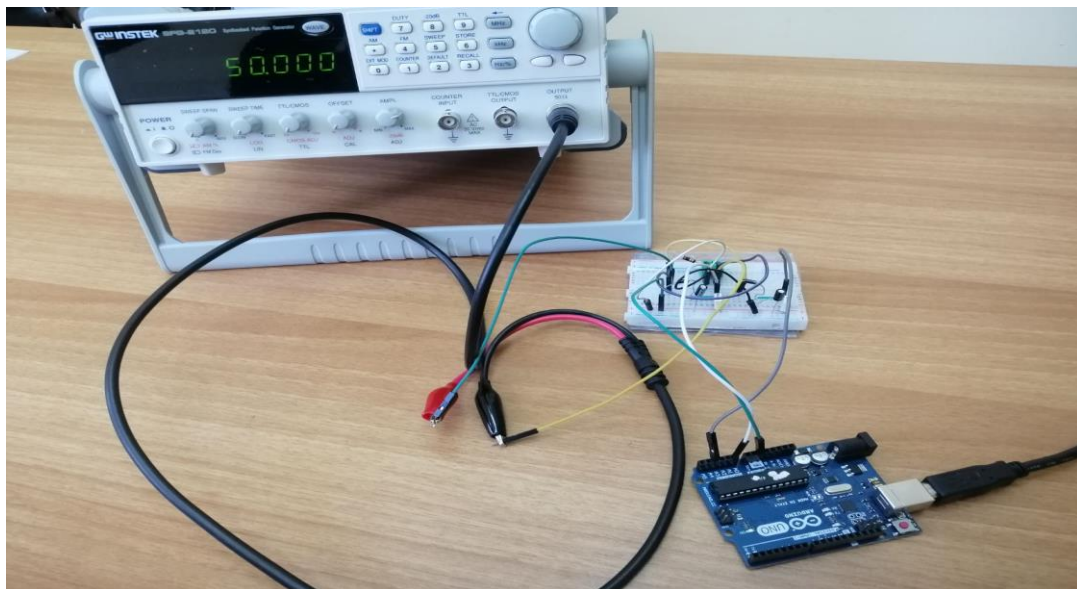
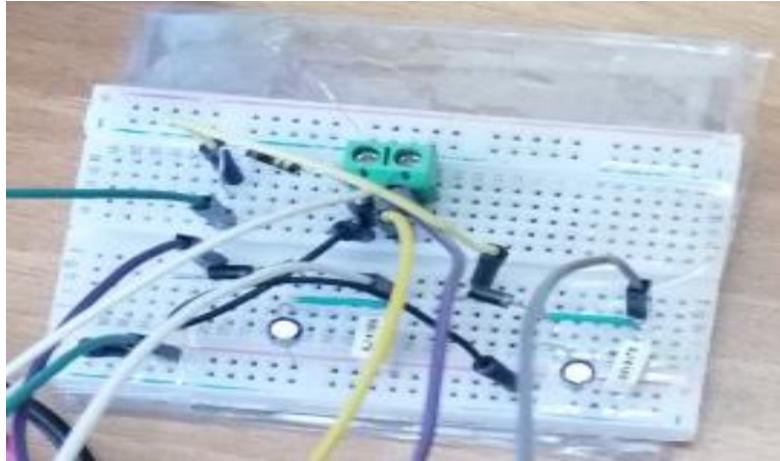
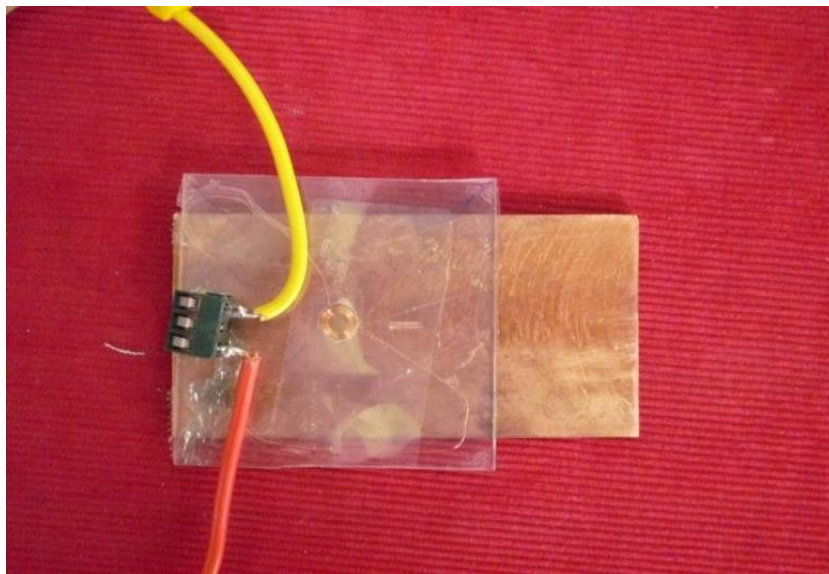


Figure IV.1: Le circuit d'acquisition



**Figure IV.2:** Le circuit électronique de mesure de l'impédance



**Figure IV.3 :** Ensemble capteur/plaque

Le tableau IV.1 regroupe les informations sur les caractéristiques physiques du capteur et de la pièce à contrôler :

**Tableau IV.1 :** les paramètres de la bobine et de la plaque

Paramètres	Valeurs
<b>Capteur</b>	
<b>Rayon intérieur</b>	2.35mm
<b>Rayon extérieur</b>	4.5mm
<b>Hauteur</b>	2.2mm
<b>Lift-off</b>	0.13mm
<b>Fréquence</b>	50kHz
<b>Nombre de spires</b>	170

<b>Pièce</b>	
<b>Longueur</b>	150mm
<b>Largeur</b>	60mm
<b>Epaisseur</b>	4mm
<b>Conductivité électrique</b>	58 10 <sup>6</sup> S/m

<b>Fissure 1</b>	
<b>Longueur</b>	16mm
<b>Largeur</b>	2mm
<b>Profondeur</b>	2mm

<b>Fissure 2</b>	
<b>Longueur</b>	12mm
<b>Largeur</b>	2mm
<b>Profondeur</b>	2mm

---

### **IV.3 La carte Arduino**

Arduino est un projet électronique open source de prototypage basé sur une plateforme flexible, autant du côté matériel que logiciel. Le projet Arduino est la mise en œuvre d'une petite carte électronique programmable et un logiciel multiplateforme, dans le but de créer facilement des systèmes électroniques.

Il est principalement destiné aux artistes, designers, amateurs, et tous ceux qui s'intéresse à la création d'objets et d'environnements interactifs. L'Arduino peut sentir l'environnement en recevant l'apport de capteurs, et interagir en contrôlant des circuits électroniques, des moteurs, des actionneurs, lumières et autres. En gros, c'est une carte disposant d'une large plage d'entrée sortie, avec un microcontrôleur au milieu.

#### **IV.3.1 Le choix de la carte Arduino UNO**

Plusieurs types d'Arduino existent sur le marché comme le MEGA 2560, ZERO, DUE, NANO, etc. Mais dans ce projet, l'Arduino UNO est le principal matériel. Ce choix est fait parce qu'UNO est la carte la plus robuste, le plus utilisé et documenté sur toute la famille de Arduino et Genuino. UNO offre assez de pins analogiques et numériques pour couvrir le besoin du présent projet et compatible avec plusieurs modules sur le marché [27].

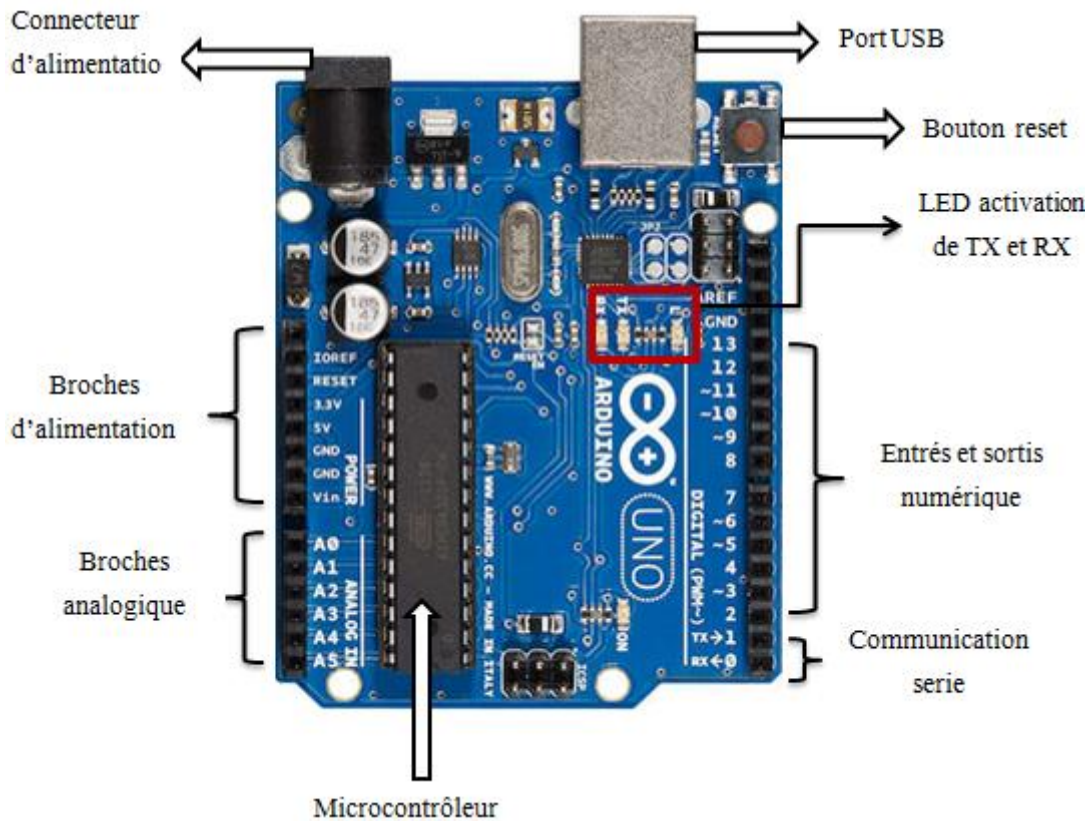


Figure IV.4 : Carte Arduino UNO

Tableau IV.2 : Les caractéristiques de la carte Arduino UNO

<b>Microcontrôleur</b>	ATmega328
<b>Fréquence horloge</b>	16Mhz
<b>Broches E/S numériques</b>	14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM)
<b>Broches d'entrées analogiques</b>	6
<b>Tension de fonctionnement</b>	5V
<b>Tension d'alimentation (recommandée)</b>	7-12V
<b>Tension d'alimentation (limites)</b>	6-20V
<b>Intensité maxi disponible par broche E/S (5V)</b>	40mA
<b>Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V</b>	50mA
<b>Mémoire programme Flash</b>	32 KB
<b>Mémoire SRAM</b>	2KB
<b>Mémoire EEPROM</b>	1KB

### **IV.3.2 Les mémoires**

➤ **Mémoire flash**

Elle est de 32 ko dont 0,5 ko sont utilisés pour le boot loader, son programme de démarrage. Cette mémoire est l'équivalent du disque dur pour l'ordinateur. C'est la place que nous avons pour stocker le programme.

➤ **SRAM**

Équivalent à la mémoire RAM, elle sert à stocker le résultat des variables. Sa taille est de 2 ko. Comme la RAM, cette mémoire est volatile, à l'extinction de la carte, les valeurs disparaissent.

➤ **EEPROM**

Mémoire en dur, elle permet de sauvegarder des valeurs de variables et ceci même à l'extinction de la carte. Sa taille est de 1 KB. Comme une carte SD, le nombre de réécritures est limité [28]

### **IV.4 La machine à commande numérique**

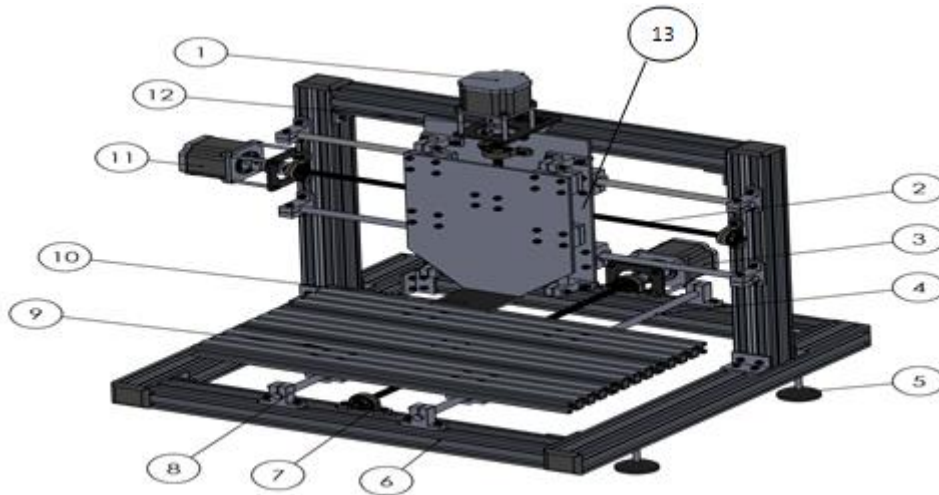
La machine à commande numérique (CNC) nous a permis d'assurer l'opération de balayage de la pièce par le capteur. Avec ses moteurs pas à pas de haute qualité, cette machine nous offre la possibilité d'effectuer des scans de précision. La figure(IV.5) montre la vue globale de notre système d'acquisition monté sur la CNC.



**Figure IV.5 :** La vue globale de notre système d'acquisition monté sur la CNC

**IV.4.1 La structure de la CNC**

La conception de la structure de la machine a été faite sous le logiciel Solid Works [32]. Ce dernier est un modéleur 3D utilisé pour la conception paramétrique. Il génère tous types de pièces, d'assemblages et des mises en plan. Il peut aussi générer des maquettes numériques et illustre les mouvements. La machine a été réalisée pour répondre au besoin du CND-CF de pièces industrielles.



**Figure IV.6 : La conception de la machine CNC**

**Tableau IV.3 : La nomenclature de la machine CNC**

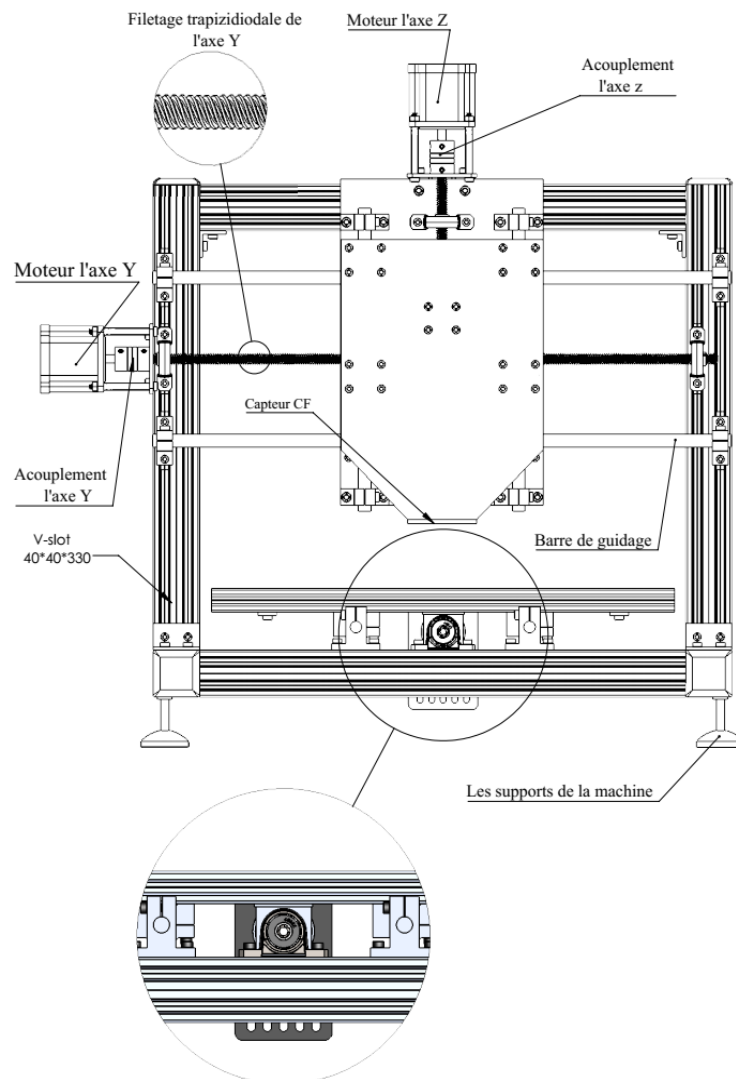
n°	Désignation	Quantité
1	Moteur l'axe Z	1
2	Tige fileté hélicoïdale	3
3	Moteur l'axe X	1
4	Barre de guidage Lignières	6
5	Pied de fixation le châssis	4
6	Le châssis en aluminium	1
7	Palis avec roulement	6
8	Support de fixation les barres	12
9	Table (chariot(X))	1
10	Capteur CF de l'axe Z	1
11	Moteur l'axe Y	1
12	Accouplement	3
13	Chariot (Z)	1

L'architecture de cette machine possède trois degrés de liberté, suivant l'axe X, Y et Z, en tenant compte des moteurs pas à pas, montés sur chaque axe pour assurer les déplacements longitudinale et transversal et vertical des trois chariots fixés sur les axes de déplacement.

Dans cette application nous intéressons aux déplacements des deux chariots X et Z :

Chariot Z : l'installation de ce chariot permet le déplacement vertical de la machine, il est également pourvu d'une pièce pour fixer et contrôler des outils, dans notre cas il s'agit d'un capteur.

Chariot X : il porte une table conçue de tenir et positionner un objet (pièce) sur lequel le travail est destiné, il assure également un déplacement longitudinal suivant son axe (X).



**Figure IV.7** : Vue de face de la machine

### IV.5 Le logiciel Arduino

Le logiciel de programmation de la carte Arduino de code (langage proche de C). Une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte à travers de la liaison USB. Le câble USB alimenté à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information, ce programme appelé IDE Arduino. [29]

Le Logiciel Arduino ou l'Espace de Développement Intégré (IDE) Arduino, est disponible gratuitement et open-source, téléchargeable sur le site officiel d'Arduino.

#### IV.5.1 Présentation de «IDE »

L'environnement de développement intégré, dédié au langage Arduino et à la programmation des cartes Arduino, permet :

- d'écrire et compiler des programmes pour la carte Arduino
- de programmer la carte Arduino (y transférer les programmes)
- de communiquer avec la carte Arduino [30]

Interface de logiciel se présente de la façon suivante :

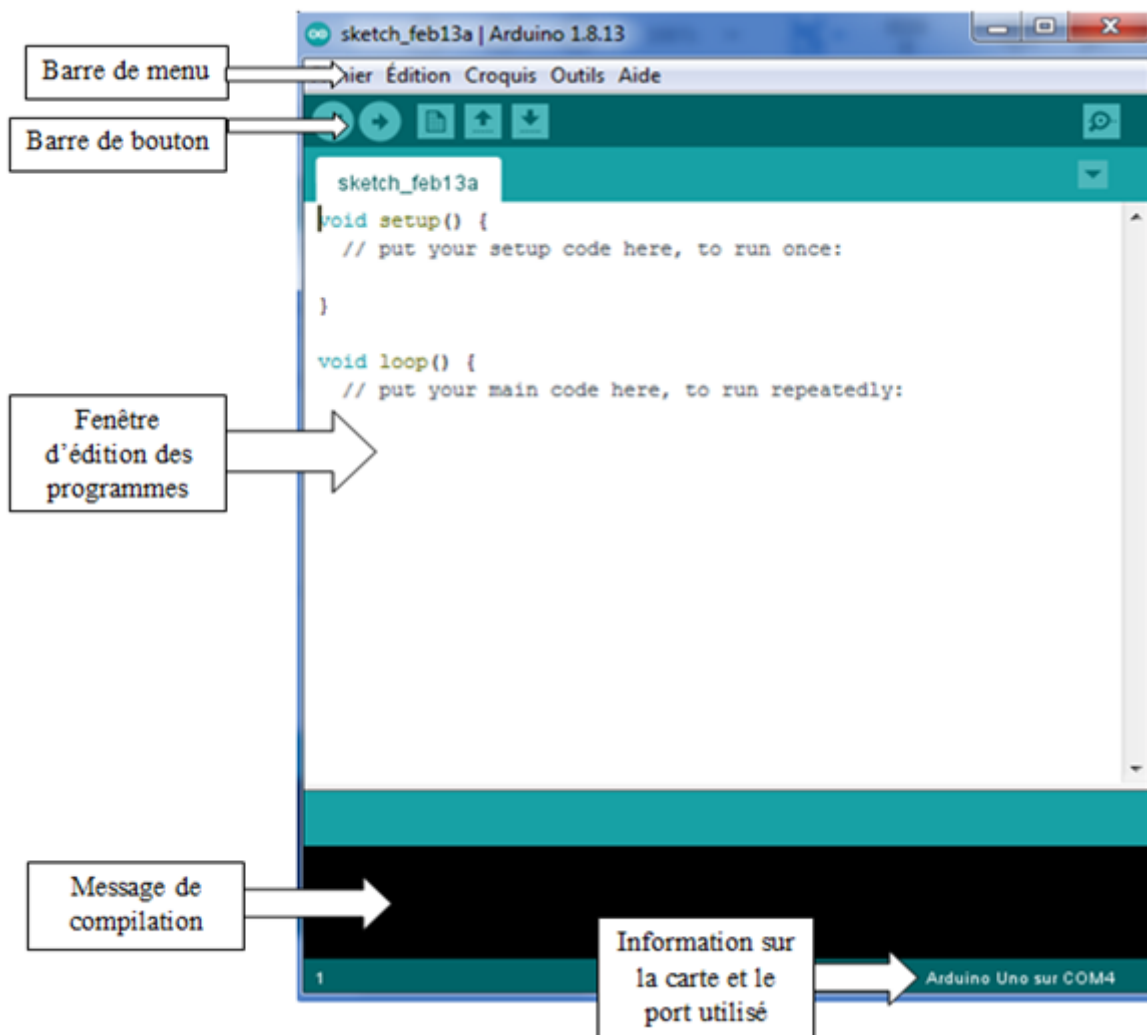


Figure IV.8 : Les éléments de l'interface Arduino IDE

### IV.5.2 Description de la barre de boutons

La barre de boutons permet un accès rapide aux fonctions usuelles, elle est représentée par la Figure suivante :

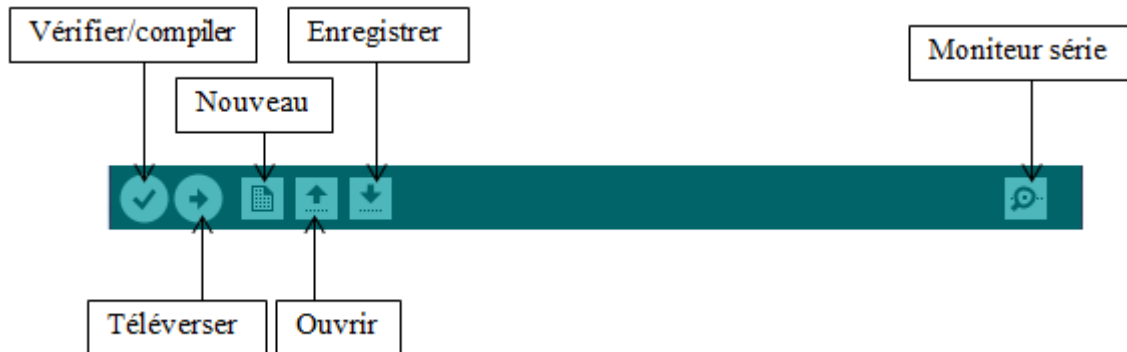


Figure IV.9 : Barre de boutons

- **Vérifier/compiler** : Vérifie le code à la recherche d'erreur de syntaxe.
- **Nouveau** : Crée un nouveau code (ouvre une fenêtre d'édition vide).
- **Ouvrir** : Ouvre la liste de tous les programmes exemples.
- **Sauvegarder** : Enregistre le programme.
- **Téléverser** : Compile le code et le transfert vers la carte Arduino.
- **Moniteur Série** : Ouvre la fenêtre du moniteur série.

### IV.5.3 Programmer avec Arduino

Un programme utilisateur Arduino est une suite d'instructions élémentaires sous forme textuelle, ligne par ligne.

La carte lit puis effectue les instructions les unes après les autres, dans l'ordre défini par les lignes de code.

### IV.5.4 Structure du programme

- **En tête** : déclaration des variables, des constantes, indication de l'utilisation de Bibliothèques.
- **Un setup** (initialisation) : cette partie n'est lue qu'une seule fois, elle comprend les fonctions devant être réalisées au démarrage (utilisation des broches en entrées ou en sortie,...)
- **Une loop** (boucle) : cette partie est lue en boucle, C'est ici que les fonctions sont réalisées et qui constitue le programme principal [31].

➤ Interface du logiciel de la machine CNC

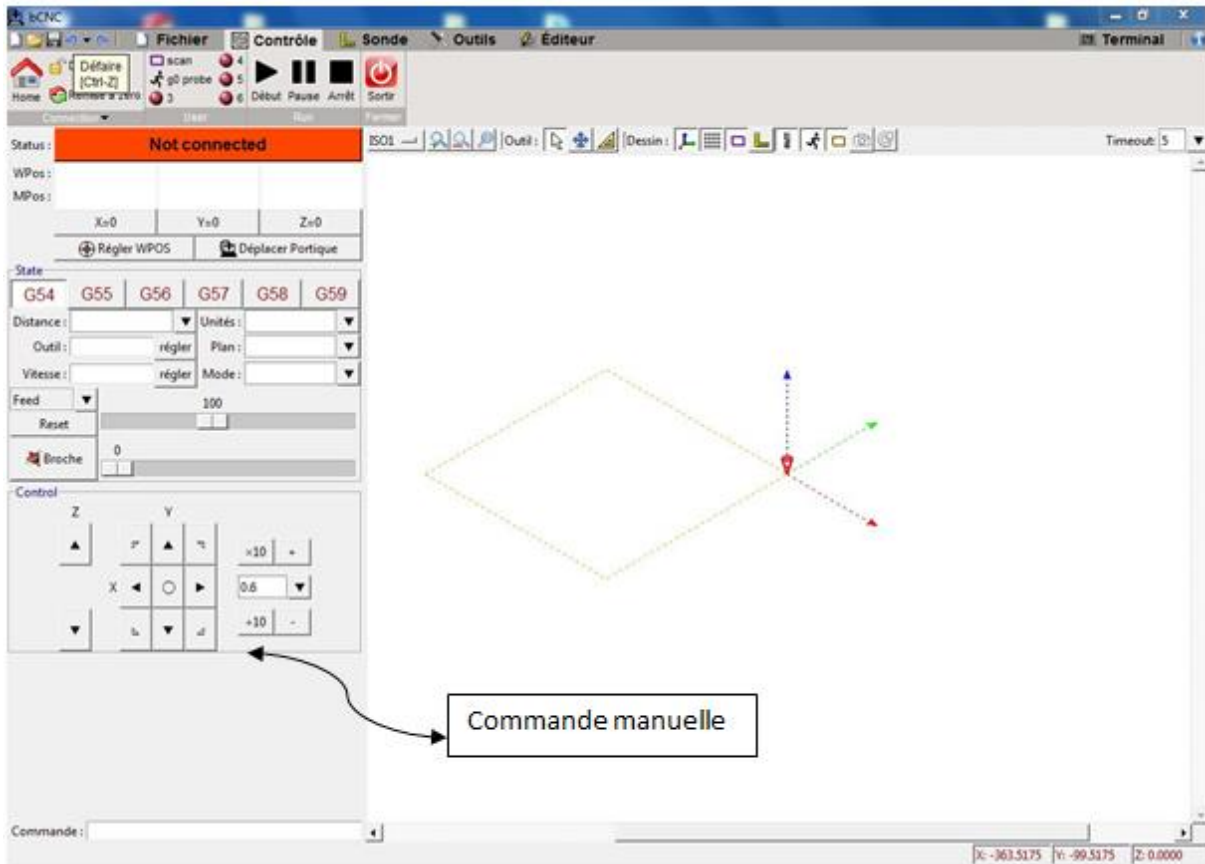


Figure IV.10 : Interface du logiciel de la machine CNC

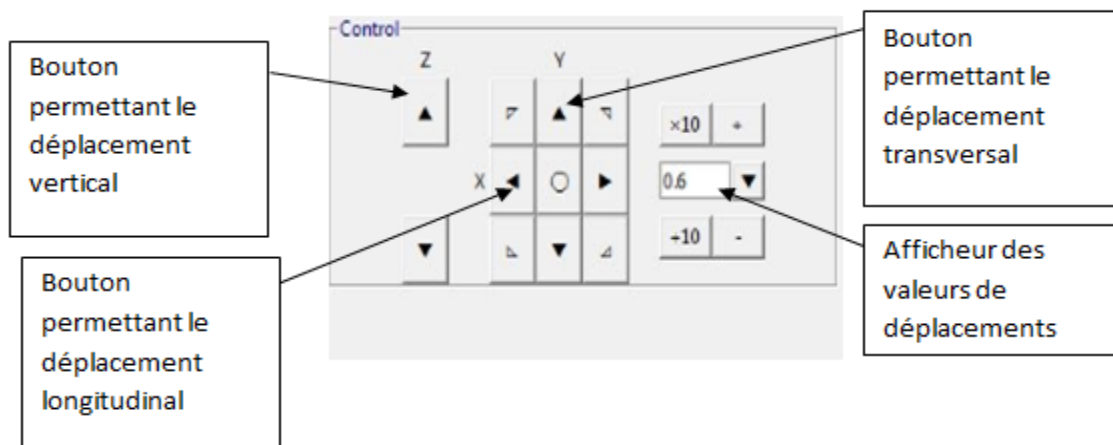


Figure IV.11 : La partie commande manuelle du logiciel.

## IV.6 Redressement et filtrage

Notre circuit d'acquisition contient un ensemble de composants électroniques reliés au capteur afin d'assurer le traitement du signal de la tension et l'injecter par la suite dans la carte Arduino qui fera l'acquisition des données. la figure IV.12, montre le schéma synoptique du circuit raccordé à la carte.

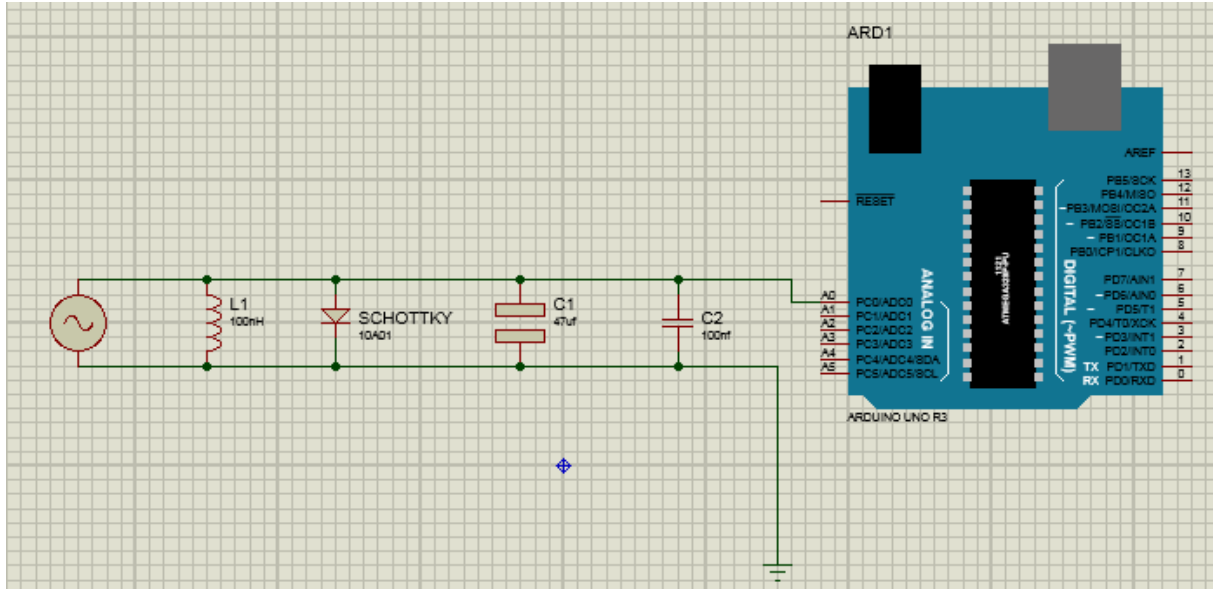


Figure IV.12 : Circuit électronique équivalent

## IV.7 Application et résultats

Cette application a été mise en œuvre dans le cadre de l'acquisition de la réponse d'un capteur à CF. Il s'agit d'une bobine à air qui se déplace au-dessus d'une plaque en cuivre comportant deux fissures orientées selon l'axe Ox.

Nous avons utilisé la CNC en plaçant la plaque à contrôler sur la table fixée au chariot X, qui assure le balayage suivant cette direction. Le capteur lui est fixé à une tête qui elle-même est montée sur l'axe Z, qui se déplace verticalement dans le but de varier lift-off.

### IV.7.1 Variation de lift-off

Les résultats obtenus sont traité dans l'application (PLX-DAQ-v2.11) qui permet la liaison avec Arduino. Les courbes obtenues montrent la variation de la tension du capteur au cours du processus de contrôle. Nous avons considéré trois lift-off différents et les résultats sont donnés dans la figure IV.13

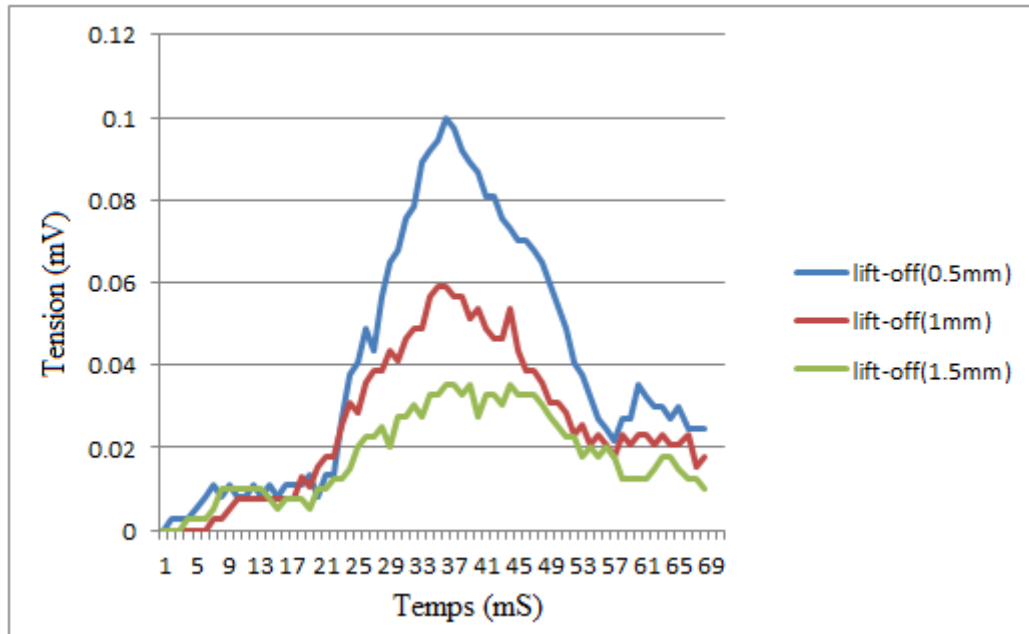


Figure IV.13 : Superposition des courbes de la variation de la tension pour un défaut de 12mm

#### IV.7.2 Variation de la fréquence d'excitation

Cette expérience est relative à la modification de la fréquence d'excitation du capteur. La figure IV.14 montre les résultats expérimentaux pour trois fréquences différentes.

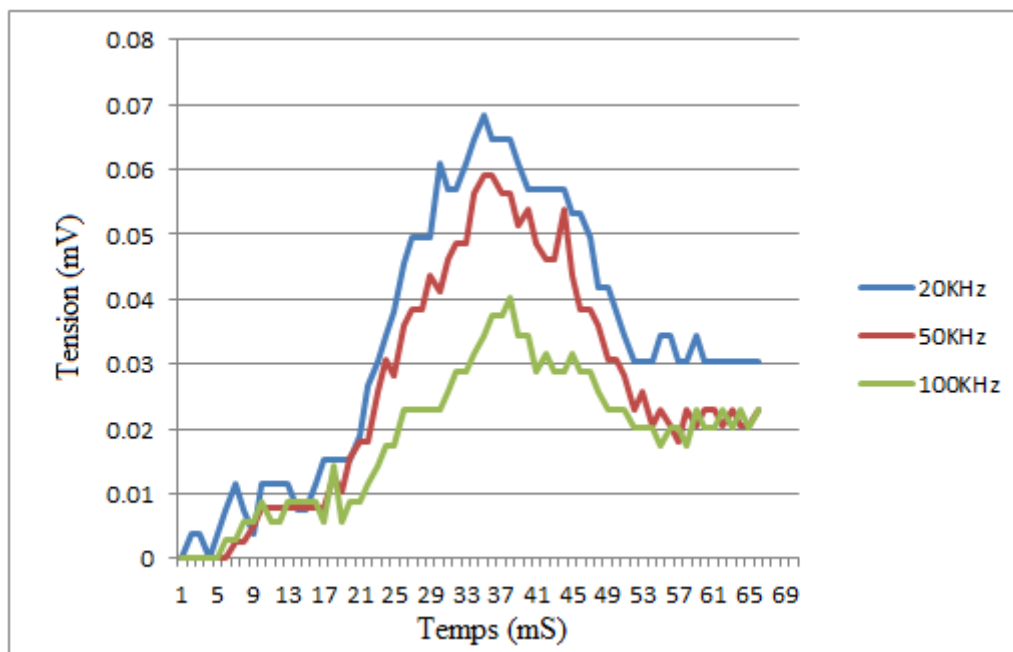


Figure IV.14 : Superposition des courbes de la variation de la fréquence pour un défaut de 12mm

### IV.7.3 Variation de la longueur du défaut

La troisième validation est relative au cas du changement de la longueur du défaut. Nous avons fait des scans pour deux défauts de longueurs 12mm et 16mm avec un lift-off de 1mm. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure IV.15

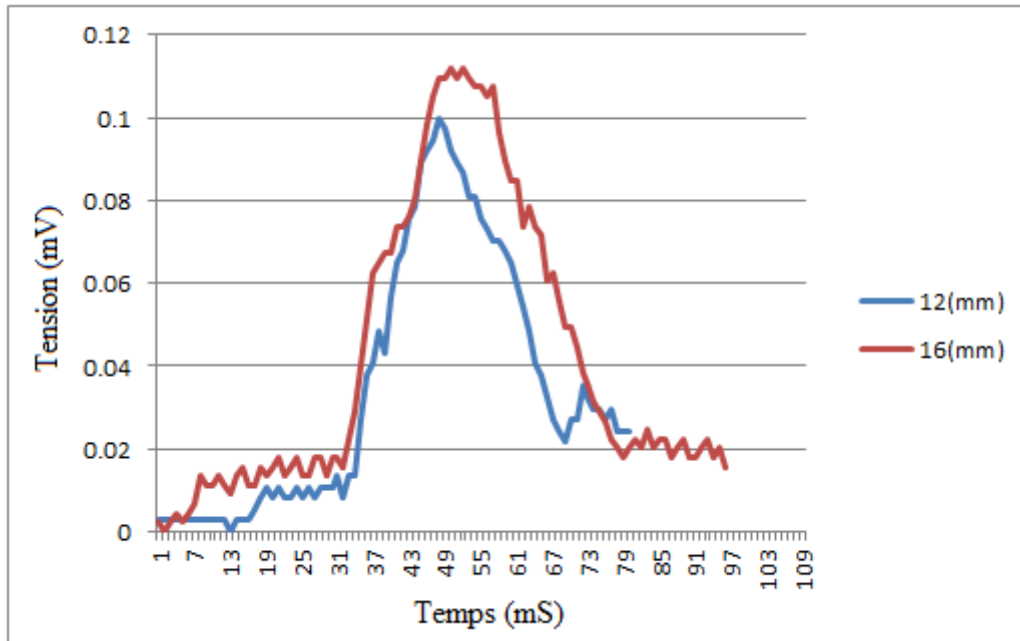


Figure IV.15 : Superposition des courbes de la variation de la longueur

Le système d'acquisition mis en place nous a permis de réaliser l'acquisition en temps réel de la tension du capteur en utilisant une carte d'acquisition et un circuit électronique pour le traitement du signal injecté dans cette dernière. Les résultats obtenus concordent bien avec les ceux trouvés dans la littérature et ceux obtenus par simulation.

### IV.8 Conclusion

Dans cette dernière partie de notre travail, nous avons procédé au CND-CF d'une pièce en cuivre qui présente deux défauts en surface.

Une instrumentation a été développée et mise en place pour l'accomplissement de cette tâche. Le dispositif développé a permis d'obtenir les signaux générés par les CF à travers l'évaluation de l'impédance de notre capteur en déplacement.

Différents essais ont été réalisés pour différents paramètres du système et les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'existence des défauts dans la pièce scannée.

# Conclusion générale

# Conclusion générale

Le contrôle non destructif par courants de Foucault est l'une des techniques de détection de défauts les plus fiables pour le contrôle des matériaux conducteurs. Le phénomène moteur du CND par Courants de Foucault est l'induction électromagnétique.

Dans ce travail, nous avons fait l'étude et la réalisation d'un dispositif de détection de défauts par CF. Une stratégie a été élaborée afin de contrôler des pièces réalisées de matériaux conducteurs présentant des fissures débouchantes.

On a initié notre projet par la modélisation numérique du système (capteur+ pièce fissurée) utilisant la méthode des éléments finis. L'impédance du capteur a été choisie comme grandeur caractéristique qui nous renseigne sur l'état de santé de la pièce inspectée. Cette modélisation nous a permis d'étudier la sensibilité du capteur aux différentes dimensions de la fissure et a montré que dans le cas des défauts de type fissure, on peut tirer les renseignements suivants :

- Le signal CF dépend fortement des dimensions de la fissure.
- Le signal CF dépend fortement de la distance capteur-pièce (lift-off).

Sur le plan expérimental, un dispositif CND-CF a été réalisé en montant une chaîne d'acquisition sur une machine à commande numérique. Ce dispositif permet de réaliser l'acquisition en temps réel de l'impédance des capteurs en utilisant une carte Arduino et son environnement de programmation. Les résultats obtenus pour différents tests sont en accord avec ceux obtenus par simulation et avec ceux trouvés dans la littérature.

En termes de perspectives, un travail sur la chaîne d'acquisition permettra l'élimination des bruits et l'amélioration du conditionnement des signaux du capteur à CF. Par rapport à la machine CNC nous proposons de réduire encore ses vibrations ainsi que l'amélioration du positionnement de ses différents axes.



# bibliographie

# Bibliographie

- [1] B. Helifa, «contribution à la simulation du CND par courant de Foucault en vue de la caractérisation des fissures débouchantes», thèse de Doctorat, Nantes, 2012.
- [2] A. Bounia, H.Hadibi, «Etude du CND par courant de Foucault appliqués aux cas des pièces conductrices et isolantes », mémoire de Master, Bejaia, juin 2018.
- [3] Y.Choua, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault », thèse de doctorat, Paris, 2009.
- [4] W. Slimane, « Conception d'un Système Multi-Capteurs à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND) », Mémoire de magister, Batna, 2008.
- [5] I.N. El Ghouli, « Réalisation D'un Banc D'essais Pour l'inversion Des Signaux En Contrôle Non Destructif Par Courants De Foucault », thèse de doctorat, Biskra, 2016.
- [6] C. Gaoui, « Modèles neuronaux pour le CND à flux de fuite magnétique», Mémoire de Master, Jijel, 2019.
- [7] M. Aggab, «Etude du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault et simulation par la méthode des éléments finis», mémoire de Master, Oum El Bouaghi, 2016.
- [8] N. Zemouri, « Etude et Réalisation d'un Système Multi capteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs», Mémoire de Magister, Tizi-Ouzou, 2012.
- [9] D. Benjamin, «Développement de capteurs flexibles à courants de Foucault : applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique», thèse de doctorat, Paris, 2016.
- [10] M.Hamel, «Etude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive», thèse de doctorat, Tizi-Ouzou, 2018.
- [11] A. Ouamour, A. Zamoum, «Application de la méthode des éléments finis pour la simulation 3D d'un dispositif de détection de défauts dans les matériaux conducteurs», mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2018.
- [12] H.Zaidi, «Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples», Thèse de doctorat, Paris, 2012.
- [13] V.Doiat, «contribution à la modélisation de système de contrôle non destructif par courant de Foucault» ; thèse de doctorat, Nantes, 2007.
- [14] A-L. Lekhdari, « étude et modélisation de capteurs en CND par courant de Foucault : application à la détection des fissures», mémoire de magister, Biskra, 2011.

- [15] Y. Jayet, « Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques », thèse de doctorat, 1995.
- [16] A.T.Phung, « développement de formations électromagnétique éléments finis 3D pour la modélisation des dispositifs en fréquence élevé », thèse de doctorat, Grenoble, 2006.
- [17] H.Gareh, « Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques par la Méthode des Volumes Finis », mémoire de Master, Biskra, 2013.
- [18] A. Hamadou, A. Nessissen, « Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil », mémoire de Master, Khemis Miliana, 2015.
- [19] C. Outmani, A.B. Ould abdelkader, « Recherche d'un modèle de comportement magnéto élastique de vibration et modélisation numérique. Application aux transformateurs de puissance triphasés », mémoire de Master, Tizi-Ouzou, 2017.
- [20] F.Hocini, « association de la commande pour l'étude par éléments finis des phénomènes magnéto-élastique et vibration dans les systèmes électrotechniques », thèse de doctorat, Tizi-Ouzou, 2013.
- [21] A. Ardjal, « Modélisation par éléments finis 2D du contrôle non destructif par courant de Foucault en vue de la caractérisation de défauts complexes », Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, 2013.
- [22] O.A.Safer, « étude et modélisation de capteur à courant de Foucault pour le control non destructif CND », mémoire de magister, M'Sila, 1014.
- [23] R.Brahim, « 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, Nantes, 2009.
- [24] C. Golovanov, « Développement de formulations éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique: application à la simulation de dispositifs électromagnétiques en mouvement », thèse doctorat, Grenoble, 1997.
- [25] T. Merzouki, « Modélisation Couplée Electrique-Magnétique- Mécanique des Machines Asynchrones à Cage en Régime Transitoire par la Méthode des Eléments Finis », Mémoire de magister, Tizi-Ouzou, 2009.
- [26] H.Chetouane, A. Benamira antar, « Etude paramétrique d'une machine synchrone à aimants par logiciel ANSYS Maxwell », mémoire de Master, Jijel, 2018/2019.
- [27] T.F. Ratiarison, « mesure de la tension 220V alternative sous Arduino », mémoire de fin d'études, d'Antananarivo, 27 Septembre 2017.
- [28] [https://www.locoduino.org/spip.php?id\\_article=69&page=imprime](https://www.locoduino.org/spip.php?id_article=69&page=imprime) consulté le 13/2/2021.

**[29]** I. Malha, « Conception et réalisation d'un système domotique par GSM », mémoire de Master, Tizi-Ouzou, 2017.

**[30]** M. Kenza, A. Katia, « Commande d'un ascenseur à base d'Arduino », mémoire de Master, Bejaia, 2018.

**[31]** M. Nourelhouda, « Étude et réalisation d'un système intelligent pour la commande d'éclairage public et surveillance de quelques paramètres atmosphériques », mémoire de Master, Oum El Bouaghi, 2018.

**[31]** A. Boucette, « Conception et réalisation d'une CNC dédiée au CND par courants de Foucault », mémoire de Master, Tizi-Ouzou, 2020.

# Résumé

# Résumé

Ce travail de mémoire concerne le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) dans ses deux aspects expérimental et modélisation.

Une simulation par la méthode des éléments finis 3D d'une structure (CND-CF) est réalisée sous l'environnement ANSYS-Maxwell. Cette structure comporte une bobine à noyau d'air placée au-dessus d'une pièce conductrice comportant des défauts de faible ouverture (fissures), qui sont fréquemment rencontrés en CND. 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.

Un bond d'essai a été réalisé incluant l'instrumentation adéquate dédiée à l'acquisition de l'impédance du capteur. Le mouvement de balayage est assuré par une machine à commande numérique (CNC) et l'ensemble CNC/Chaîne d'acquisition est géré par une carte Arduino.

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