

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



**Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département
d'Ingénierie des Systèmes Electriques**

Mémoire de Master

Présenté par:

Melle. LAYADI Soumia
Melle. TARZOUT Nesrine

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Machines Electriques

**Modélisation numérique d'un capteur différentiel
dédié au contrôle non destructif par courants de
Foucault des structures tubulaires**

Soutenu le...devant le jury :

Mme. MZIOU	Nassima	Professeur	UMBB	Président
Mr. HAMEL	Meziane	MCA	UMBB	Encadreur
Mme. ABDESLAM	Djamila	MCA	UMBB	Examineur
Mme. LARABI	Zina	MAA	UMBB	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

ANABIB



Remerciements

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

Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nos chaleureux remerciements vont aussi à Monsieur Meziane HAMEL, MCA à l'UMBB de nous avoir encadré. Nous lui présentons nos sincères remerciements pour avoir dirigé ce travail, pour sa patience, son aide et ses nombreux conseils.

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

Nous tenons également à remercier Madame Djamila ABDESLAME, MCB à l'UMBB, et Madame Zina LARABI MAA a l'UMBB, qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

Nous tenons à remercier toute l'équipe de l'entreprise ANABIB à Réghaia, Madame Hakima, et Monsieur Hilal en particulier pour leur aide, leurs précieux conseils ainsi que pour leur disponibilité et les éclaircissements qu'ils nous ont apportés sur le plan technique.

Dédicaces

Dédicaces

A ma mère qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.

A mon père qui a été mon soleil durant toutes les années d'études et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager à me donner l'aide et à me protéger.

A Mes sœurs et à Mes frères : Samira, Ikram, Mohamed, Rabah, vous êtes toujours dans mon cœur, je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A mes nièces et mes neveux : Islam, Yasser, Amine, Haroun, Farah, Séline, Riham , Kawther.

A ma grand-mère, que Dieu la bénisse.

A mes chers amis : Rania, , Lydia, Chahrazad, Maria, Mariem, , Fetouma et Amina,.

A tous les membres de la famille LAYADI.

A mon binôme et ma meilleure amie Nesrine.

SOUMIA

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma chère mère pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices pendant sa courte vie, que Dieu ait pitié de son âme et l'accueille dans son vaste paradis.

A mon très cher père quia été toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager pour que je sois arrivée à ce point dans mes études.

Qu'il trouve ici toute ma gratitude et mon affection.

A mes chères sœurs : Fadila, Hayat, Meriem, Hassina, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mon frère Yassine et sa femme Sara.

A mes chers frères : Rafik, Abdou et joujou, pour leur appui et leur encouragements.

A mes nièces et me neveux : Adam, Ayoub, Mohammed, Mohammed chihab, tasnim et hanin, que Dieu les protège.

A mes chères amies ikram, chaima, rania, chahrazed, maria.

A mon binôme soumia qui a partagé ce long parcours avec moi.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire, merci d'être toujours là pour moi.

NESRINE

Sommaire

<i>Liste des figures.....</i>	<i>i</i>
<i>Liste des tableaux.....</i>	<i>iv</i>
<i>Liste des symboles</i>	<i>v</i>
<i>Abréviations</i>	<i>vii</i>
<i>Introduction générale.....</i>	<i>1</i>

Chapitre I: Généralités sur le contrôle non destructif

I. 4 Introduction	3
I. 5 Principe de détection d'un défaut	3
I. 6 Les différentes méthodes de CND	4
I. 6. 1 L'examen visuel	4
I. 6. 2 Le ressuage	5
I. 6. 3 Magnétoscopie	6
I. 6. 4 Radiographie	7
I. 6. 5 Thermographie	9
I. 6. 6 Ultrasons	10
I. 6. 7 Le CND par courant de Foucault	11
I. 7 Présentation du CND par Courant de Foucault (CF)	12
I. 7. 1 Principe de fonctionnement	12
I. 7. 2 L'effet de peau	13
I. 7. 3 Facteurs affectant les courants de Foucault	14
I. 7. 4 Mode d'excitations	15
I. 8 Différents types de capteurs inductifs	15
I. 8. 1 Capteur à double fonctions	15
I. 8. 2 Capteur à fonction séparée	16
I. 8. 3 Capteur différentiel	17

I. 9 Domaines d'Applications du CND-CF	17
I. 10 Avantages et inconvénients de la CND-CF	18
I. 11 Conclusion.....	18

Chapitre II: Modélisation numérique des configurations CND-CF

II. 1 Introduction.....	20
II. 2 Intérêt de la modalisation.....	20
II. 3 Mise en équations	21
II. 3. 1 Lois classique de l'électromagnétisme.....	21
II. 3. 1 Equations de Maxwell	22
II. 3. 2 Loi de comportement des milieux	24
II. 3. 3 Condition au limites.....	25
II. 4 Electromagnétisme en régime quasi-stationnaire	25
II. 4. 1 Hypothèses simplificatrices	25
II. 5Modèle magnétodynamique.....	26
II. 5. 1 Formulation en termes de potentiel vecteur magnétique A	26
II. 6 Méthode de résolution.....	28
II. 6. 1 Méthode analytique	28
II. 6. 2 Méthode numérique	28
II. 6. 3 Les étapes du processus de discrétisation d'un problème physique.....	32
II. 7 Techniques decalcul l'impédance	40
II. 7. 1 Hypothèses.....	40
II. 7. 2 Impédance à travers l'induction ou le flux magnétique.....	41
II. 8 Conclusion	43

Chapitre III: Simulation numérique d'un capteur différentiel à CF

III.1 Introduction.....	44
III. 2 Organigramme de calcul.....	45
III. 3 Formulation électromagnétique du problème.....	46
III. 4 Première application :Echangeur de chaleur	47
III. 4. 1 Description de dispositif d'étude.....	47
III. 4. 2 Domaines d'étude et conditions aux limites	49
III. 4. 3 Maillage du domaine.....	50
III. 4. 4 Plaque sans défaut	51
III. 4. 5 Plaque avec défaut.....	52
III. 4. 6 Maillage de domaine	52
III. 4. 7 Distribution des lignes de champ	53
III. 4. 8 Résultats en termes de variation d'impédance.....	54
III. 5 Deuxième application :Tubesferromagnétiques	59
III. 5. 1 Description du problème	59
III. 5. 2 Maillage de domaine	61
III. 5. 3 Résultats en termes de potentiel vecteur magnétique	62
III. 5. 4 Résultats en termes de variation d'impédance.....	63
III. 6 Troisième application : Défaut enfoui et effet de la fréquence	64
III. 6. 1 Géométrie du système.....	65
III. 6. 2 Distributions des lignes de champ magnétique	66
III. 6. 3 Résultats en terme variation de l'impédance	67
III. 7 Conclusion.....	68
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>68</i>

Liste des figures

Figure I.1. Principe de détection d'un défaut.....	4
Figure I.2. L'examen visuel.	5
Figure I.3. Les étapes de contrôle par ressuage.....	6
Figure I.4. Principe de la magnétoscopie.	7
Figure I.5. Principe de la radiographie.....	8
Figure I.6. Un film radiographique d'un défaut (fissure).	8
Figure I.7. Principe de la thermographie.	9
Figure I.8. Principe de CND par ultrason.....	10
Figure I.9. Contrôle par courant de Foucault.	11
Figure I.10.Principe de détection par courant de Foucault.	12
Figure I.11. Répartitions des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la de profondeur z.	14
Figure I.12. Sonde à double fonctions.....	16
Figure I.13. sonde à fonctions séparées récepteur.....	16
Figure I.14. Capteur différentiel.....	17
Figure II.1. Domaine d'étude un problème de CND-CF.....	21
Figure II.2.Grille de maillage par différences finis.....	29
Figure II.3.Maillage de type différences finis.	30
Figure II.4. Les étapes de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis.	33
Figure II.5. Eléments finis de référence à une dimension.....	36
Figure II.6. Eléments finis de référence à deux dimensions (éléments triangulaires).	36
Figure II.7. Eléments finis de référence à deux dimensions (éléments carrés).	37
Figure II.8. Eléments finis de référence à trois dimensions.	37
Figure II.9.Elément de référence utilisé dans PDETool.....	38
Figure II.10. Triangle de Pascal.	38
Figure II.11. Bobine à N spires jointives.	40

Figure.III.1. Organigramme de calcul	45
Figure III.2 Description du problème.....	47
Figure III.3. Dimensions géométriques du système.....	47
Figure III.4. Domaine de résolution et conditions aux limites.....	49
Figure.III.5. Maillage du domaine	50
Figure III.6. La géométrie de système sans défaut.....	51
Figure III.7. Les lignes du potentiel vecteur magnétique A (plaque sans défaut).....	51
Figure III.8. Géométrie de système avec défaut.....	52
Figure III.9. Maillage de domaine (plaque avec défaut).....	52
Figure III.10. Les cartographies des lignes du potentiel vecteur magnétique A pour différentes positions du capteur.....	53
Figure III.11. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs du lift-off.....	54
Figure III.12. Les valeurs maximales de l'impédance pour différentes lift offs.....	55
Figure III.13. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur.....	56
Figure III.14. Les valeurs maximales de l'impédance pour différentes longueurs.....	56
Figure III.15. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la longueur de défaut.....	57
Figure III.16. Les valeurs maximales de l'impédance pour différentes longueurs.....	58
Figure III.17. Défauts des soufflures en radiographie.....	59
Figure III.18. La géométrie du système	61
Figure III.19. Maillage du domaine	61
Figure III.20. Les cartographies des lignes du potentiel vecteur magnétique A au niveau de premier défaut	62
Figure III.21. Les cartographies des lignes du potentiel vecteur magnétique A au niveau de deuxième défaut	62
Figure III.22. Variation de l'impédance des deux défauts en fonction de la position du capteur pour Différentes valeurs de la profondeur.....	63

Figure III.23. La géométrie du système.	65
Figure III.24. Les cartographies des lignes du potentiel vecteur magnétique A pour différentes positions du capteur.....	66
Figure III.25. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour Différentes valeurs de la fréquence.....	67
Figure III.26. Un zoom sur les courbes de la variation de l'impédance pour Différentes valeurs de la fréquence.....	67

Liste des tableaux

<i>Tableau III.1 Caractéristiques géométriques et physiques du système</i>	<i>48</i>
<i>Tableau III.2 Caractéristiques géométriques et physiques du système</i>	<i>60</i>
<i>Tableau III.3 Caractéristiques géométriques et physiques du système</i>	<i>64</i>

Liste des symboles

$\vec{A}$: Potentiel vecteur magnétique (T.m)

$\vec{B}$: Induction magnétique (T)

$\vec{D}$: Induction électrique (C/m²)

$\vec{E}$: Champ électrique (V/m)

f : Fréquence (Hz)

$\vec{H}$: Champ magnétique (A/m)

$\vec{J}$: Densité de courant (A/m²)

$\vec{J}_s$: Densité de courant électrique dans la source (A/m²)

$\vec{J}_c$: Densité de courant de conduction (A/m²)

R : Résistance électrique (Ω)

Z : L'impédance (Ω)

X : Réactance (Ω)

t : Temps (s)

f_v : Fonction définis sur le domaine d'études (Ω).

e : tension induit [v]

φ : Flux magnétique [wb]

V : Potentiel scalaire électrique (V)

ω : Pulsation électrique (rad/s)

$\emptyset$: Potentiel scalaire magnétique (A)

ϵ_0 : Permittivité électrique absolue du vide (F/m)

ϵ_r : Permittivité électrique relative

σ : Conductivité électrique $[(\Omega \cdot m)]^{-1}$

ρ : Densité volumique de charges électriques (C/m³)

ρ_s : La densité surfacique de charge

δ : Épaisseur de peau (m)

μ_0 : Perméabilité magnétique absolue du vide (H/m)

μ : Perméabilité magnétique

μ_r :Perméabilité magnétique relative

Ω : Domaine d'étude

C : la vitesse de la lumière

Γ : Frontière du milieu.

N : Nombre de nœud

n : Vecteur normal

A_j : Valeur de l'inconnue au nœud j

N_j : Fonction d'approximation (d'interpolation) au nœud j

R : Le résidu d'approximation

f_v : Fonction définis sur le domaine d'études (Ω)

ϕ_i : Fonction de pondération ou projection

α_j : Fonction d'interpolation aux nœuds j

r : Rayon de la bobine

ΔZ : Variation de l'impédance

L : Opérateur différentiel.

Abréviations

CND : Contrôle non destructive.

CF : Courant de Foucault.

CND-CF : Contrôle non destructive par courant de Foucault.

EDP : Equation aux dérivées partielles.

MDF : Méthodes des différences finis.

MVF : Méthodes des volumes finis.

MEF : Méthodes des éléments finis.

2D : bidimensionnel.

3D : tridimensionnel.

Introduction générale

Le contrôle non destructif (CND) des matériaux et des produits présente un grand intérêt dans diverses applications d'ingénierie modernes. De nos jours, les attentes en matière de performance des nouveaux dispositifs est en augmentation. Les CND permettent en général l'inspection initiale des pièces industrielles pour confirmer l'intégrité structurelle des composants de sécurité sans causer des dommages. En ce sens, ils permettent un contrôle de la qualité tout en étant rentables. La présence des CND est difficile à percevoir dans la vie quotidienne. Cependant, les CND permettent d'identifier et de prévenir les défaillances des parties de notre vie socialement importantes, telles que les avions, les chemins de fer et les centrales électriques. Il est donc essentiel de maintenir un niveau de qualité uniforme pour éviter les accidents et assurer la sécurité de la vie humaine. En outre, le CND permet de contrôler en service des pièces d'essai avant leur assemblage. Il joue également un rôle majeur dans le cadre du contrôle des processus pour éviter le fonctionnement indésirable et dangereux des systèmes... En combinant tous ces éléments, les fabricants et les autres utilisateurs souhaitent à appliquer des méthodes fiables et précises tout en étant rentables [1].

Parmi les méthodes utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, injection de courant, courants de Foucault) [2].

La technique des courants de Foucault (CF) est largement utilisée dans le domaine du CND, dès lors qu'il s'agit de matériaux électriquement conducteurs. Cette méthode est en effet sensible à des défauts dans l'état géométrique ou électromagnétique d'une pièce, comme des inclusions, des fissures ou les effets de la corrosion. De plus, elle est aisée à mettre en œuvre, robuste dans le cadre des applications industrielles et relativement peu coûteuse [3].

Les capteurs plus couramment utilisés en CND par CF sont les bobines « filaires ». Leur conception est la plus simple à réaliser et la moins coûteuse, caractéristiques qui les rendent très intéressantes pour des applications industrielles. Dans ce type de capteur la grandeur électromagnétique essentiellement exploitée pour la détection de défauts est l'impédance mesurée aux bornes de la bobine.

La modélisation d'une configuration réelle de CND par CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement et fait appel à des méthodes numériques. Parmi celles-ci, la méthode des éléments finis (MEF) qui permet de prendre en compte des géométries

complexes de sondes et de pièces, est l'une des plus utilisée. Elle s'est en effet imposée comme un outil efficace pour résoudre numériquement les problèmes électromagnétiques [4].

L'objectif de ce travail est d'élaborer un programme MATLAB pour la simulation par la méthode des éléments finis d'un capteur différentiel à courant de Foucault et tester son fonctionnement sur différentes configurations axisymétriques.

Ce mémoire est reparti en trois chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre a été consacré à une recherche bibliographique sur les méthodes de CND et leurs principes, Le contrôle basé sur les courants de Foucault est particulièrement détaillé.

Le deuxième chapitre est consacré à la position d'un problème de CND par CF et aux équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électromagnétique dans le système capteur/pièce. La formulation en potentiel permettant de modéliser le système est développée avec sa formulation éléments finis.

Le troisième chapitre est dédié aux applications et résultats du modèle proposé. Il concerne la simulation des différentes configurations tubulaires avec un capteur inductif de type différentiel.

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

***Chapitre I : Généralités
sur le contrôle non
destructif***

I. 4 Introduction

Les matériaux et les produits fabriqués sont souvent testés avant la livraison à l'utilisateur pour s'assurer qu'ils répondront aux attentes et demeureront fiable pendant une période de service donnée. Il est essentiel que tout essai effectué sur un produit destiné à un usage futur ne porte en aucune façon atteinte à ses propriétés et à ses performances. Toute technique utilisée dans ses conditions est appelée méthode de contrôle non destructif CND [5].

Selon la nature du matériau à tester et du phénomène physique mis en jeu, plusieurs techniques sont utilisées ; on distingue la méthode visuelle, ressuage, magnétoscopie, radiographie, ultrasons... etc. et la méthode qui nous s'intéresse est celle qui est basée sur le phénomène des courants de Foucault [6].

Dans ce cadre, nous allons présenter dans ce chapitre les principales techniques de contrôle non destructif et décrire en détail le contrôle non destructif par courants de Foucault, l'objet de notre travail.

I. 5 Principe de détection d'un défaut

Les méthodes de contrôles non destructifs sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. Par conséquent, les phénomènes physiques sont exploités pour détecter la présence d'hétérogénéité dans les matériaux.

Les principes physiques comme l'atténuation, réflexion ou diffraction des ultrasons, atténuation ou diffraction des rayons X ou γ , perturbation des courants de Foucault, sont à la base des contrôles non destructifs qui permettent de caractériser les matériaux (granulométrie, anisotropie, dureté, état de contrainte, fissures superficielles ou profondes).

Les techniques de CND varient selon l'énergie utilisée, énergie mécanique (ultrasons, pénétrants), énergie électromagnétique (radiographie, observation en lumière visible, flux magnétique...), mais elles se caractérisent par les étapes suivantes :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique,
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts,
- Détection de ces modifications par un capteur approprié,
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée [7].

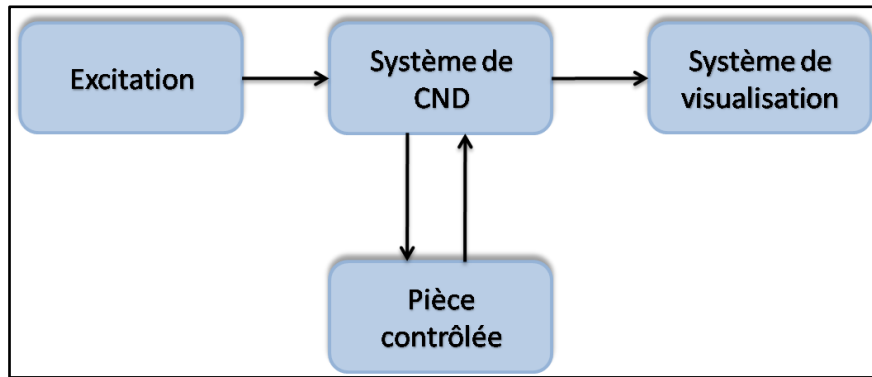


Figure I.1. Principe de détection d'un défaut.

I. 6 Les différentes méthodes de CND

La variété des pièces à inspecter, leurs géométries, leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdisent à une méthode de CND d'être universelle.

Différentes techniques existent, chacune a ses propres avantages et inconvénients. Il ne s'agit pas ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du CND, mais d'esquisser les techniques les plus utilisées dans l'industrie.

Plusieurs méthodes sont utilisées dans l'industrie, et leur domaine d'utilisation s'étend à une variété d'applications. Chacun a son domaine d'action privilégié [8].

I. 6. 1 L'examen visuel

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

L'examen visuel Comme son nom l'indique, repose uniquement sur l'œil averti d'un opérateur pour détecter une anomalie. Une lumière rasante ou un système d'endoscopie peuvent par exemple être utilisés pour renforcer les capacités de détection. Il s'agit de la méthode la plus répandue, souvent préalable à des analyses [9].

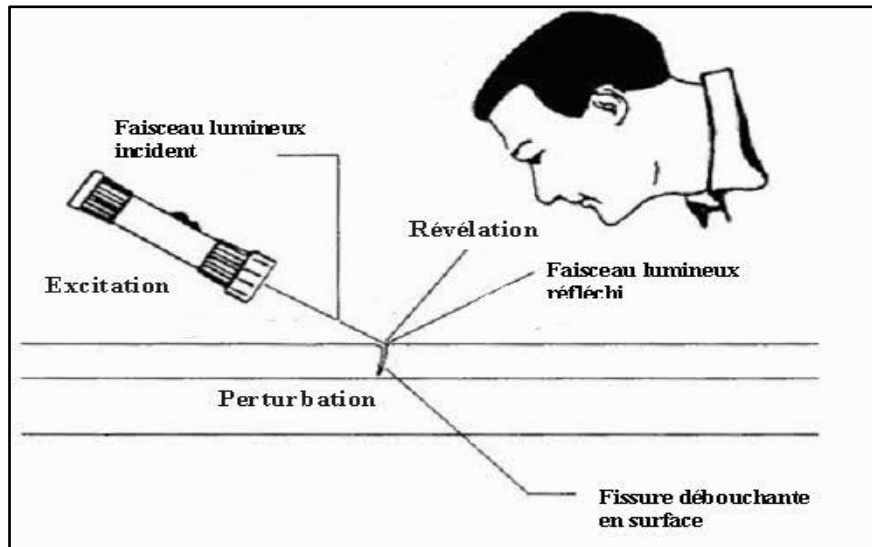


Figure I.2. L'examen visuel.

- **Avantage**
 - Technique rapide, simple et pas coûteuse ;
 - Souplesse d'inspection.
- **Inconvénients**
 - Détection limitée aux défauts visible à la surface ;
 - Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce contrôlée.

I. 6. 2 Le ressuage

Le ressuage est une des méthodes non destructif qui sous certaine conditions d'exécution permet de détecter des indications de coloration ou de fluorescence, ce moyen de contrôle est considéré comme étant le prolongement affiné de l'examen visuel.

Cette méthode est spécifiquement conçue pour détecter les défauts de surface (manque de matière, rayures...). Elle est encore largement utilisé et consiste à appliquer des liquides d'impression colorés ou fluorescents sur des surfaces à inspecter préalablement nettoyées et séchées. Le liquide pénètre dans le capillaire et pénètre dans l'ouverture du défaut. Après le temps nécessaire à la pénétration du liquide d'impression, les pièces sont nettoyées et séchées, puis le fluide est développé. Un bon éclairage (selon le liquide utilisé) permet une inspection visuelle des défauts.

Cependant, cette technique ne permet pas de révéler des défauts non débouchant, ni de donner la géométrie du défaut de manière faible [10].

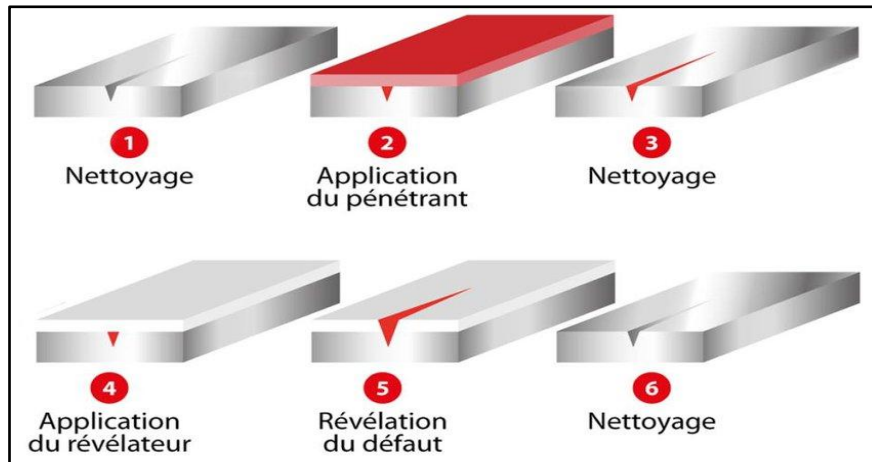


Figure I.3. Les étapes de contrôle par ressuage.

Les tests de pénétration ont un large éventail d'applications car leur processus est facile à utiliser et Détecte la plupart des défauts à la surface des matériaux métalliques Non poreux, et sur d'autres matériaux, à condition qu'ils ne réagissent pas chimiquement avec les pénétrants.

- **Avantage**

- Facile à mise en œuvre ;
- Appliqué sur les matériaux diélectriques ;

- **Inconvénients**

- Limite de l'application sur les matériaux non poreux ;
- Il est impossible de déterminer les dimensions des défauts ;
- La consommation des produits de ressuage peut desservir l'environnement.

I. 6. 3 Magnétoscopie

Cette technique est particulièrement destinée aux pièces ferromagnétiques (fer, fonte...). Elle permet de détecter les défauts superficiels, débouchant en surface ou sous-jacents (très proches de la surface de la pièce). Le principe de cette technique est simple : il consiste à créer un champ magnétique intense à l'intérieur de la pièce. Une poudre magnétique est uniformément répartie par la suite sur la surface de la pièce. Lors de la présence d'un défaut sur son chemin, le champ magnétique est dévié et son intensité augmente en surface. Le champ crée une fuite qui attire les particules de poudre magnétique, signalant ainsi la présence d'un défaut [11].

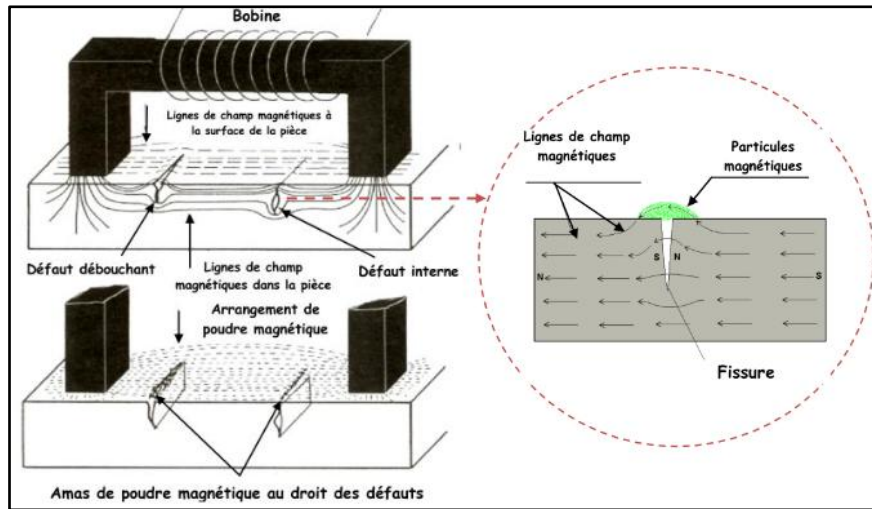


Figure I.4. Principe de la magnétoscopie.

- **Avantage**
 - Simple à mettre en œuvre ;
 - détection des défauts débouchant et des défauts sous-jacents.
- **Inconvénients**
 - Le matériau doit être ferromagnétique ;
 - Détecte les discontinuités de surface et près de la surface uniquement.

I. 6. 4 Radiographie

La radiographie implique l'exposition d'un objet à tester à un rayonnement pénétrant de sorte que le rayonnement traverse l'objet à inspecter et qu'un support d'enregistrement soit placé contre le côté opposé de cet objet. Pour les matériaux plus minces ou moins denses, tels que l'aluminium, le rayonnement généré électriquement (rayons X) est couramment utilisé, et pour les matériaux plus épais ou plus denses, le rayonnement gamma est généralement utilisé.

Le support d'enregistrement peut être un film radiographique industriel ou l'un des nombreux types de détecteurs de rayonnement numériques. Dans les deux cas, le rayonnement traversant l'objet à tester expose le support, ce qui a pour effet final de créer des zones plus sombres où plus de radiations ont traversé la pièce et des zones plus claires où moins de radiations ont pénétré. S'il y a un vide ou un défaut dans la pièce, plus de rayonnement passe à travers, ce qui provoque une image plus sombre sur le film ou le détecteur, comme illustré à la figure I.5 [12].

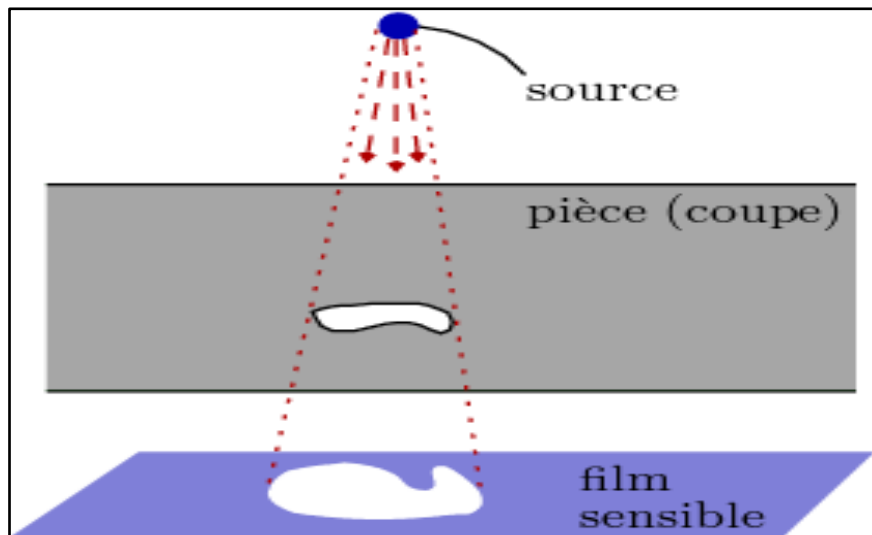


Figure I.5. Principe de la radiographie.

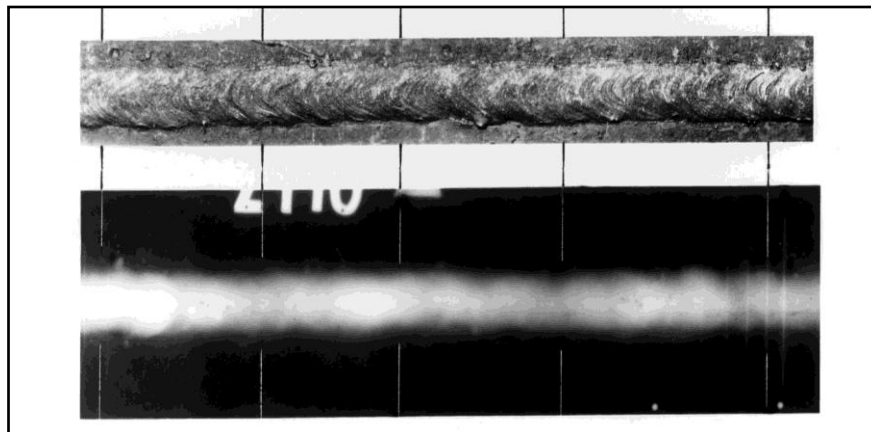


Figure I.6. Un film radiographique d'un défaut (fissure).

- **Avantage**
 - Il est utile sur une grande variété de matériaux ;
 - Possibilité d'archiver les supports d'enregistrement;
 - Des dispositifs pour vérifier la qualité de la radiographie sont disponibles.
- **Inconvénients**
 - Technique coûteuse ;
 - Les rayons X et les rayons gamma sont dangereux sur la santé humaine ;
 - Cela nécessite une compétence considérable pour l'interprétation des radiographies ;
 - Profondeur de défaut ne peut pas être estimée.

I. 6. 5 Thermographie

Le contrôle non destructif par imagerie thermique est utilisé pour détecter les défauts volumiques et les défauts de surface. En produisant un échauffement localisé et homogène dans la structure à contrôler, l'évolution de la température peut être observée à l'aide d'une caméra thermique. De ce fait, la présence de défauts agit comme une barrière au transport de la chaleur dans le matériau et crée des anomalies thermiques détectables par des caméras.

On distingue la thermographie passive où l'apport de la chaleur qui provoque l'élévation de température est extérieur, et la thermographie active qui suppose que le chauffage soit obtenu par une sollicitation mécanique interne [13].

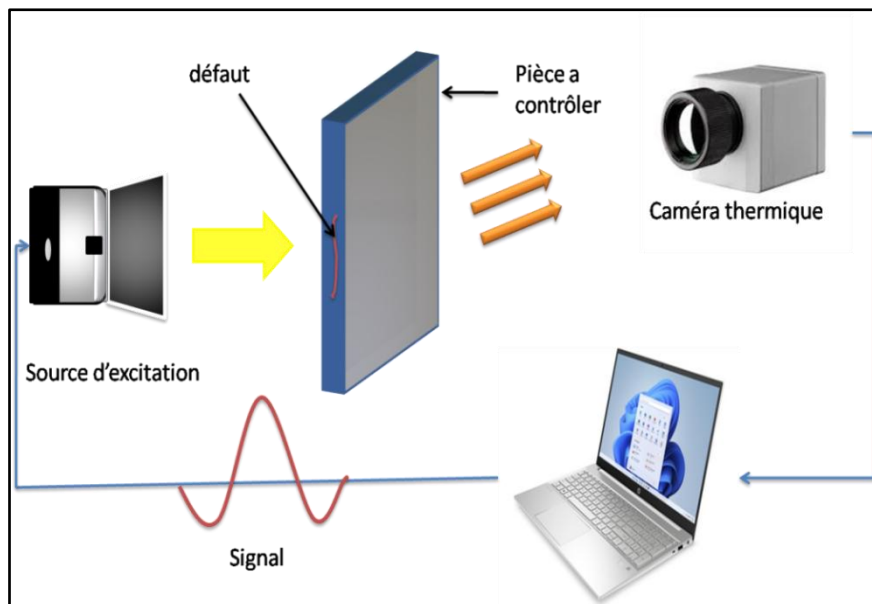


Figure I.7. Principe de la thermographie.

- **Avantage**
 - Méthode relativement rapide et sans contact ;
 - L'archivage de résultats est garanti à l'aide de la caméra infrarouge ;
 - Les cavités sont bien détectées.
- **Inconvénients**
 - Des difficultés de localisation de la profondeur des défauts ;
 - L'interprétation des résultats présente des restrictions pour une automatisation totale de la technique.

I. 6. 6 Ultrasons

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant 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.

Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts en profondeur. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Par contre, c'est une méthode lente car il faut faire un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts.

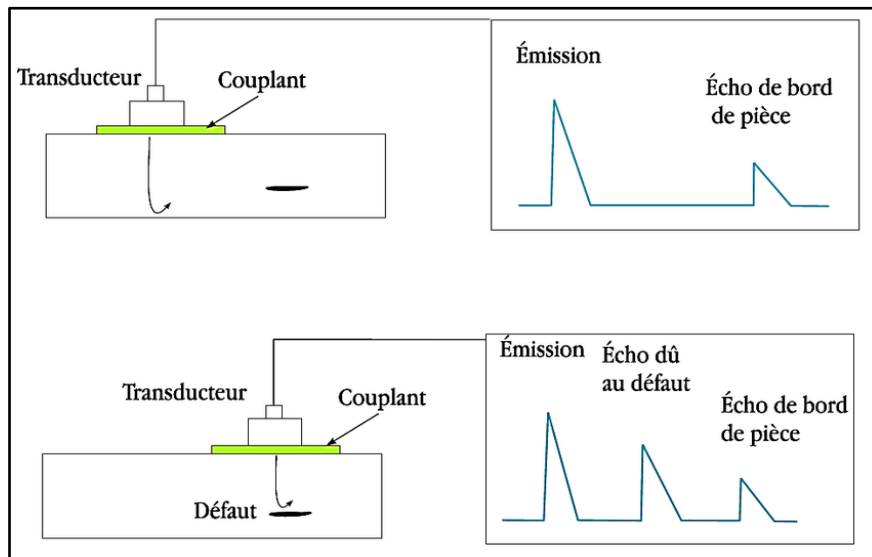


Figure I.8. Principe de CND par ultrason.

Une onde ultrasons est émise par un palpeur placé sur la surface du matériau à contrôler et se propage dans le matériau. Il existe des méthodes par contact (le palpeur est en contact avec la pièce) ou par immersion (la pièce et le palpeur sont immergés dans de l'eau). Dans le cas de la méthode par contact, il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur et la pièce pour assurer la transmission des ondes. Lorsque ces ultrasons rencontrent une interface délimitant deux milieux ayant des impédances acoustiques différentes, il y a réflexion. Les ultrasons réfléchis sont captés par un palpeur (qui peut être le même que l'émetteur) [14].

- **Avantage**
 - Haute sensibilité de détection de défaut ;
 - grand pouvoir de pénétration ;
 - localisation et dimensionnement des défauts.
- **Inconvénients**
 - Technique très coûteuse ;
 - Inspection limitées par la complexité de la forme de la pièce contrôlée ;
 - Il nécessite l'utilisation d'un couplant.

I. 6. 7 Le CND par courants de Foucault

La méthode des courants de Foucault est souvent utilisée pour le contrôle non destructif dans divers domaines de l'industrie.

On appelle courants de Foucault les courants électriques créés dans un objet conducteur, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique dans lequel plongé l'objet, soit par déplacement de cet objet dans un champ magnétique constant. Ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851.



Figure I.9. Contrôle par courant de Foucault.

I. 7 Présentation du CND par Courants de Foucault (CF)

I. 7. 1 Principe de fonctionnement

Le CND par courants de Foucault n'est applicable que sur les matériaux conducteurs. L'élément essentiel est le capteur. Celui-ci est une bobine ou un ensemble de bobines. Ces dernières sont parcourues par un courant d'excitation variable dans le temps. Le capteur génère un champ magnétique d'excitation variable qui dépend de la géométrie et des caractéristiques électromagnétiques de son entourage. Si un matériau conducteur d'électricité baigne dans ce champ, il sera le siège des courants de Foucault.

Ces courants induits créent à leur tour un champ magnétique de réaction négative. Le champ résultant donnera l'image de la répartition et de la valeur des courants induits. La mesure de ce champ ou des courants induits n'est pas directement accessible à l'expérience. On passe par la mesure d'une grandeur dérivée : l'impédance aux bornes du capteur. Cette grandeur nous permettra de caractériser le matériau en ce qui concerne sa conductivité, sa perméabilité, sa géométrie et son état de santé. Suivant ces caractéristiques et les fréquences utilisées, les variations des champs créées par ces courants permettent d'examiner le matériau en surface ou en profondeur [15].

La présence d'un défaut perturbe la circulation des courants de Foucault, autrement la déviation de la circulation des CF proches d'un défaut, modifiera donc le champ magnétique résultant .cette modification entraînant une variation de l'impédance de la bobine.

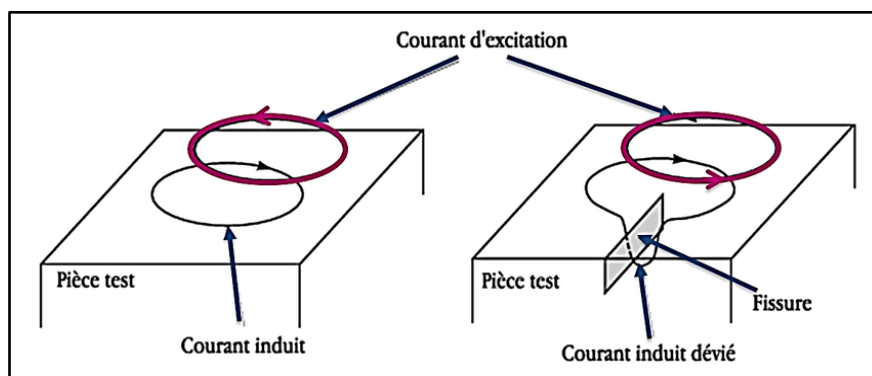


Figure I.10. Principe de détection par courants de Foucault.

I. 7. 2 L'effet de peau

L'intensité de courant de Foucault dans une cible constituée d'un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique σ et une perméabilité magnétique μ , diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle δ souvent nommée épaisseur de peau. En pratique on peut détecter des défauts jusqu'à une profondeur de quelque δ [16].

L'épaisseur de peau est définie :

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

Avec :

σ : Conductivité électrique (s m^{-1}).

μ : Perméabilité magnétique de matériau (H m^{-1}).

f : fréquence d'excitation (Hz).

si on considère une pièce plane infini en épaisseur et en (x,y), excitée par un courant extérieur, de fréquence f , 63% des courants circulent dans l'épaisseur de peau. Le module de la densité de courants dans la pièce est donné par la relation :

$$J(z) = J_s e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

Z : la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce [m]

$J(z)$: le module de la densité de courant à la profondeur z [A].

J_s : le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($Z=0$) [A/m^2].

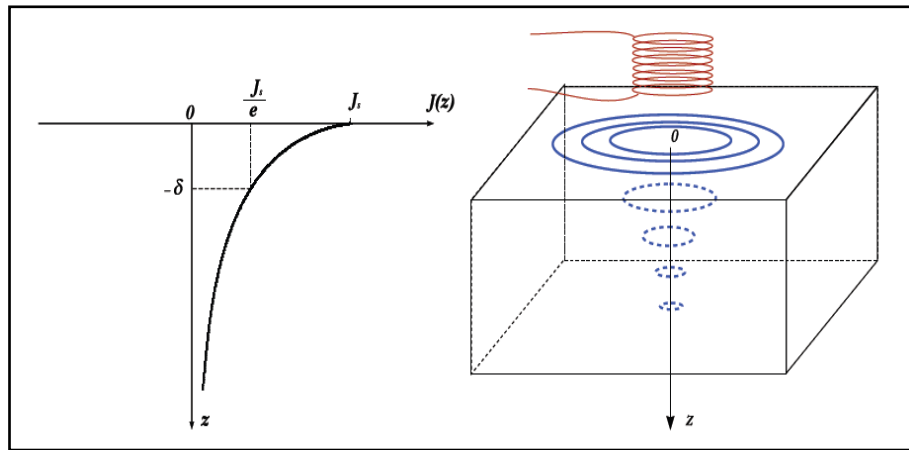


Figure I.11. Répartitions des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la de profondeur z .

I. 7. 3 Facteurs affectant les courants de Foucault

L'amplitude et la distribution des courants de Foucault dans un conducteur donné est influencée par la conductivité, l'amplitude du champ magnétique primaire, la perméabilité du conducteur, les variations géométriques, couplage magnétique, inhomogénéité, discontinuité, fréquence d'essai et effet de peau.

Dans les matériaux non magnétiques, la distribution des courants de Foucault sont fortement influencés par leur conductivité. Dans les matériaux à haute conductivité, forts courants de Foucault sont générés sur la surface du conducteur. Ceci résulte en un champ magnétique secondaire fort, opposé le champ magnétique primaire. Ceci limite la pénétration du champ magnétique primaire dans la profondeur du matériau. Cela signifie que la pénétration de courants dans de bons matériaux conducteurs est limitée. Mais dans des matériaux peu conducteurs, la pénétration en profondeur des courants de Foucault est comparativement plus grande.

Le champ magnétique primaire détermine l'intensité du courant de Foucault induit ainsi que la profondeur de pénétration du courant de Foucault dans le matériau. L'effet de la perméabilité magnétique sur le tourbillon le courant est similaire à celui de la conductivité.

La variation géométrique comme la forme, épaisseur et la présence des matériaux conducteurs à proximité immédiate affectent la distribution des courants de Foucault et le champ magnétique associé [17].

I. 7. 4 Mode d'excitations

On distingue trois types d'excitations pour les bobines de capteurs CF :

A. Excitation mono-fréquence

Cette excitation, consiste à alimenter l'émetteur par un courant sinusoïdal et de fréquence donnée. La fréquence des CF est identique à celle qui leur a donné naissance. Dans le cas d'une détection de défauts, le choix de la fréquence dépend essentiellement de la profondeur des défauts recherchés et du matériau.

B. Excitation multifréquence

Cette excitation peut permettre, par rapport à l'excitation mono-fréquence, de s'affranchir de paramètres perturbateurs du fait que les informations relatives aux matériaux (conductivité électrique, perméabilité magnétique, entrefer ou dimensions d'un défaut) sont potentiellement enrichies par les différentes fréquences utilisées [18].

C. Excitation pulsé

Elle consiste à émettre un champ magnétique à large bande de fréquence. Le courant d'excitation est variable dans le temps. C'est une excitation impulsionnelle de formes rectangulaires, triangulaires ou autres. Toutefois, on préfère utiliser une forme semi sinusoïdale en raison de sa simplicité de mise en œuvre. La décomposition en série de Fourier de l'onde engendre des signaux de fréquences multiples. Cette méthode représente donc une alternative à l'excitation multi fréquence. On utilise l'évolution temporelle des signaux pour extraire des informations. Une telle technique est plus riche en informations qu'en mono fréquence ou en multi fréquences. Cette technique a été utilisée pour évaluer l'épaisseur de revêtement et les dépôts sur les pièces métalliques, pour la détection des défauts profonds et dans le domaine de l'inversion du phénomène [19].

I. 8 Différents types de capteurs inductifs

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

I. 8. 1 Capteur à double fonctions

La plus simple configuration est celui du capteur à double fonctions (capteur à réflexion), ce dernier est constitué d'une seule bobine qui joue le rôle d'une part un émetteur

du champ magnétique (champ primaire), d'autre part un récepteur de la réaction du champ magnétique (champ secondaire) généré par la présence de la pièce. L'exploitation des résultats se fait, par la mesure de l'impédance équivalente du capteur en régime harmonique [20].

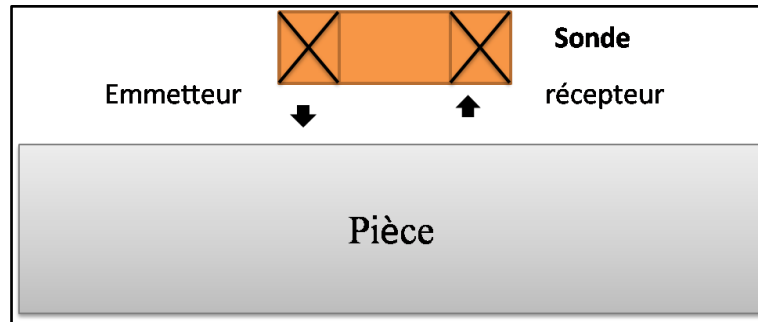


Figure I.12. Sonde à double fonctions.

I. 8. 2 Capteur a fonction séparée

Deux éléments ou groupes d'éléments y assurent séparément les deux fonctions. La grandeur mesurée est une image de la variation du champ électromagnétique.

Les sondes à fonctions séparées sont habituellement plus efficaces que les sondes à fonction double. Elles permettent d'augmenter indépendamment d'une part l'intensité du signal émis en modifiant par exemple la géométrie de l'émetteur, d'autre part la sensibilité au signal reçu et la résolution spatiale en modifiant par exemple la géométrie du récepteur. Enfin, elles sont en général moins sensibles aux perturbations externes [21].

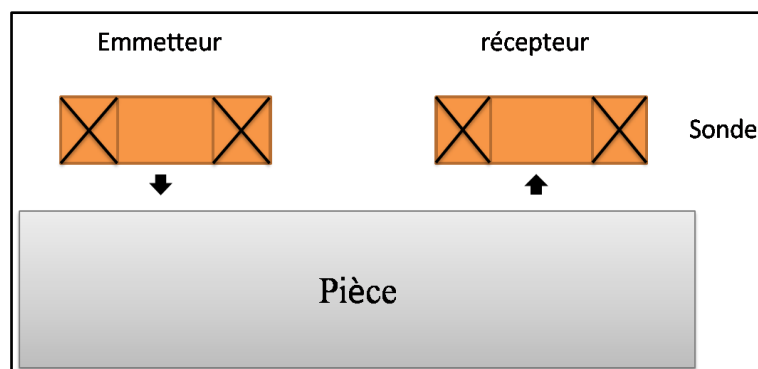


Figure I.13. Sonde à fonctions séparées récepteur.

I. 8. 3 Capteur différentiel

Les capteurs différentiels sont constitués d'au moins deux éléments de mesure rigidement liés dans le capteur. Dans le cas d'un capteur à deux éléments, la mesure différentielle équivaut à comparer deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins. Ce type de capteur est particulièrement utilisé pour détecter des discontinuités lors de son déplacement le long d'une pièce en s'affranchissant des perturbations induites par une variation d'épaisseur ou de conductivité [22].

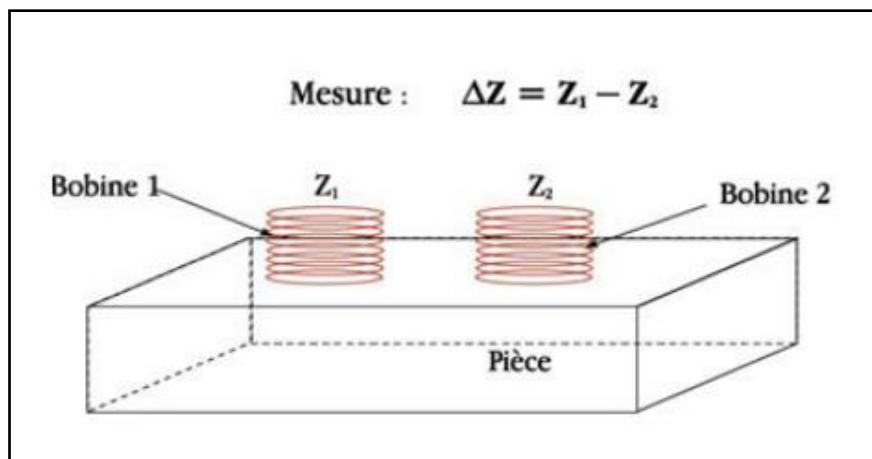


Figure I.14. Capteur différentiel.

I. 9 Domaines d'Applications du CND-CF

Les méthodes d'essai des courants de Foucault sont appliquées à une variété d'applications. En gros, les applications des courants de Foucault peuvent être regroupés en mesure de conductivité (court-circuit, dureté, traitement thermique, ségrégation des alliages, cas évaluation de la profondeur, etc.), essais de discontinuité (fissures, changements dimensionnels, état de surface, etc.) et mesure de l'épaisseur (revêtement, placage, jaugeage de tôle).

On présente ci-dessous quelques applications de la méthode de contrôle par courant de Foucault :

- ✓ Contrôle de filetage.
- ✓ Contrôles de tôles (d'épaisseur de revêtement/matériaux, recherche de défauts)
- ✓ Contrôles de nuances (composition, structure...).
- ✓ Contrôles de traitements thermiques de surface (dureté...).
- ✓ Contrôles de matériaux composites comportant des fibres conductrices

- ✓ Contrôles de soudures qui ne présentent pas de vagues de solidification de soudage trop marquées [23].

I. 10 Avantages et inconvénients de la CND-CF

- **Avantages**

- ✓ Inspection rapide, simple et fiable pour la détection de défauts de surface et de faible profondeur sur des matériaux conducteurs ;
- ✓ Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplant. De même, aucune nuisance ou pollution n'est engendrée ni pour l'utilisateur ni pour l'environnement, contrairement, par exemple au ressuage, largement utilisé, qui nécessite l'application de produits chimiques nocifs ;
- ✓ Ne nécessite pas un contact physique avec la surface de l'objet testé. Par conséquent, une préparation minutieuse de la surface est pas nécessaire ;
- ✓ Très utile pour les contrôles en maintenance (tubes de générateurs de vapeur, remontées mécaniques, ponts suspendus, moteurs d'avions ...) ;
- ✓ Permet d'effectuer des mesures dimensionnelles (mesure d'épaisseur des revêtements isolants ou de conductivité très différente de celle du substrat);
- ✓ Peut être utilisée pour mesurer la conductivité électrique de matériaux ;
- ✓ Transportabilité de l'équipement, coût faible.

- **Inconvénients**

- ✓ Limitées aux matériaux conducteurs d'électricité ;
- ✓ Mesure locale, peut adaptées a des balayages rapides de grande surface planes ;
- ✓ Interprétation des signaux délicate, nécessitant une formation spécifique des opérateurs.

I. 11 Conclusion

Par leurs possibilités de détection, de reconnaissance et de dimensionnement de défauts isolés dans un matériau ainsi que l'estimation de ses caractéristiques microstructurales et propriétés d'emploi, les techniques de contrôle non destructif font partie des outils incontournables de l'évaluation de la qualité des produits

Ce chapitre a été consacré à une recherche bibliographique sur le contrôle non destructif et ses méthodes. La technique qui nous intéresse est celle de courants de Foucault. Dans ce

qui suit, nous allons présenter la modélisation des systèmes CND-CF pour simuler l'interaction entre le capteur et la pièce.

La modélisation numérique est ainsi devenue un acteur important dans la conception des sondes dans le domaine du CND par courants de Foucault, grâce à la performance du matériel informatique, c'est pour ces raisons que le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du CND-CF.

***Chapitre II : Modélisation
numérique des configurations
CND-CF***

II. 1 Introduction

Le développement de toute technologie repose non seulement sur les expérimentations encore nécessaires, mais aussi sur des modèles de simulation qui décrivent le plus fidèlement possible le comportement du dispositif à concevoir. Cela nous permettra de voir l'effet de nos choix (configuration géométrique, propriétés des matériaux) sur le comportement du dispositif sans prototypage.

Le but de ce chapitre est de résumer des équations mathématiques de base qui décrivent les phénomènes électromagnétique impliqués dans le contrôle non destructif par courant de Foucault. Nous introduisant les simplifications de ces équations et les formulations sous-jacentes pour les modèles électromagnétiques statiques et dynamiques dans différentes régions d'un dispositif de contrôle non destructif par courant de Foucault (CND-CF).

II. 2 Intérêt de la modalisation

La modélisation nous permet de rechercher un modèle qui réagit d'une manière semblable au composant qu'on étudie, pour observer ou évaluer une action qu'on souhaite exercer sur ce dernier. Ce modèle permettra de déduire les résultats souhaités.

Le CND par courant de Foucault est largement employé pour inspecter les matériaux électriquement conducteurs. Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier les interactions sonde-pièce et jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances.

La modélisation consiste à créer une représentation mathématique d'un problème réel moyennement certaine hypothèse. Cette présentation permet aux utilisateurs de prévoir le comportement des systèmes étudiés.

La modélisation comporte deux étapes : la première est l'étude et l'analyse du problème et le deuxième est la mise en œuvre d'une solution au problème. La première étape aboutit en CND par CF à des équations aux dérivées partielles (EDP) basées sur les lois de l'électromagnétisme [24].

II. 3 Mise en équations

Un modèle de CND-CF peut être représenté par un système qui se compose de plusieurs parties avec des propriétés physiques différentes. Ce système contient une source ou nous imposons une densité de courant, une région conductrice qui représente la pièce contrôlée ou caractérisée, et une troisième région non conductrice qui représente l'air environnement. La figure (II.1) illustre une représentation de l'ensemble du domaine d'étude [25].

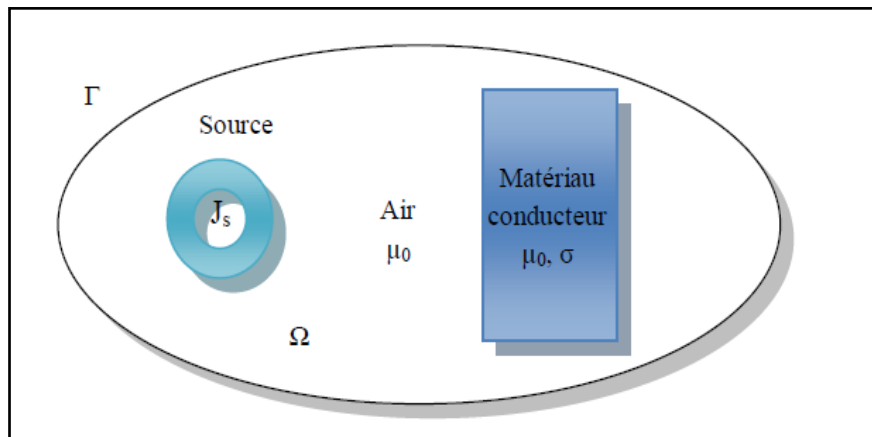


Figure II.1. Domaine d'étude un problème de CND-CF.

Ω : Domaine étude.

$\vec{J}_s$: Densité de courant électrique dans la source.

Γ : Les frontières qui enveloppent le domaine d'étude.

σ : Conductivité électrique.

μ_0 : Perméabilité électrique du vide.

II. 3. 1 Lois classique de l'électromagnétisme

✓ Loi de Faraday

Durant la décennie 1890, des expériences portant sur l'induction électromagnétique ont été réalisées par Michael Faraday (1791-1867) en Angleterre et par Joseph Henry (1797-1878) aux USA. Par une pure expérience, Faraday remarque qu'à chaque fois qu'il y a variation de flux magnétique ou variation du champ d'induction lui-même, un courant est

alors mesuré par le galvanomètre. Cette loi relie la force électromotrice induite e à la variation de flux magnétique φ qui l'engendre.

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

φ : Flux magnétique [wb].

e : Tension induit [v].

t : Temps [s].

✓ Lois de Lenz

Le signe (-) de loi de Faraday à une signification bien précise donnée explicitement par la loi de Lenz. Cette loi a été formulée par Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865) en 1833 à Saint-Petersbourg et éclaire mieux le phénomène d'induction que Faraday avait observé en 1831. C'est une loi qualitative. Elle indique que le sens du courant induit lors d'un phénomène d'induction électromagnétique dans un circuit électrique est tel qu'il s'oppose à la variation du flux initial. Donc la force électromotrice induite s'oppose à l'action qui leur a donné naissance.

✓ Loi de Biot et Savart

L'une des approches de la détermination de la valeur de l'induction B est la loi de Biot et Savart plus compliquée, mais plus générale. Jean Baptiste Biot (1774-1862) et Félix Savart (1791-1841) formulent en 1820 la loi expérimentale qui porte leurs noms. En un point p de l'espace, l'élément de conducteur dl , parcouru par un courant I génère un champ d'induction magnétique élémentaire dB dans le vide. Cette induction est donnée par :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{d\vec{l}}{r^2} \times \vec{r}_u \quad (\text{II.2})$$

II. 3. 1 Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques.

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

C'est vers la fin du 19eme siècle que Maxwell a proposé un ensemble de quatre équations en regroupant les équations de Faraday, Ampère et Gauss. Ces équations relient le champ électrique $\vec{E}$ (ou l'induction électrique $\vec{D}$) et le champ magnétique $\vec{H}$ (ou l'induction magnétique $\vec{B}$) à leurs sources (densité de charge ρ et densité de courant $\vec{j}$) par l'intermédiaire des trois paramètres : la conductivité électrique σ , la perméabilité magnétique μ , la permittivité électrique ε [26].

Equation de Maxwell-Gauss

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.3})$$

Equation de Maxwell-Faraday

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

Equation de conservation de l'induction magnétique

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.5})$$

Equation de Maxwell-Ampère

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.6})$$

$\vec{E}$ (V/m) : Champ électrique.

$\vec{H}$ (A/m) : Champ magnétique.

$\vec{D}$ (C/m²) : Induction électrique.

$\vec{B}$ (T) : Induction magnétique.

ρ (C/m³) : Densité volumique de charge électrique.

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement.

$\vec{j}_c$ (A/m²) : Densité de courant de conduction.

L'équation de Maxwell-Ampère nous montre qu'il y a une relation directe entre le champ électrique, le champ magnétique et les courants électriques.

L'équation de Maxwell-Faraday représente la loi d'induction qui établit la relation 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 soumis à un champ magnétique constant.

Les équations (II.4) et (II.6) définissent le lien qui existe entre les champs et leurs sources.

Par contre, l'équation (II.3) et (II.5) donnent respectivement la notion de conservation de la charge électrique et le champ magnétique.

II. 3. 2 Loi de comportement des milieux

Des relations supplémentaires caractérisant les différents milieux doivent être ajoutées aux équations précédentes. Pour les milieux isotropes, nous avons les formulations suivantes :

- **Relation de milieu**

- **Dans un milieu magnétique**

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Hm.}$$

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu. Pour un milieu amagnétique $\mu_r = 1$.

Pour un milieu magnétique $\mu_r = \mu_r(H)$.

- **Dans un milieu diélectrique**

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (\text{II.8})$$

$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 C^2 = 10^9/36\pi \text{ [F/m]}$: permittivité du vide.

$C = 3.10^8 \text{ m/s}$: vitesse de la lumière.

ε_r : Permittivité relative du milieu considéré.

- **Loi d'Ohm**

Elle exprime la relation qui lie la densité du courant $\vec{J}$ au champ électrique $\vec{E}$ à travers la conductivité σ , elle est donnée par :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.9})$$

II. 3. 3 Conditions aux limites

Afin de réduire les temps de calcul sans altérer la pertinence de la solution, nous avons choisi de réduire le domaine d'étude au quart de la géométrie totale à simuler et de déduire la solution dans tout l'espace par symétrie. Il est donc nécessaire d'appliquer les conditions de symétries électromagnétiques aux extrémités du domaine de travail, afin d'assurer la cohérence de la solution.

Les conditions aux limites s'énoncent de façon générale pour un domaine Ω de frontière Γ avec $\vec{n}$ un vecteur normal (unitaire) à Γ pour la variable u [27].

- Condition de Dirichlet homogène $u \cdot \vec{n} = 0$.
- Condition de Neumann homogène $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$.

II. 4 Electromagnétisme en régime quasi-stationnaire

II. 4. 1 Hypothèses simplificatrices

Les courants de déplacement sont négligeables. En effet les structures électromagnétiques que nous étudions sont caractérisées par les mêmes propriétés diélectriques que celles du vide ($\epsilon_r = 1$). D'autre part, la fréquence de travail dans les opérations de contrôle non destructif ne dépasse pas 1MHz. Le terme de déplacement dans le cas d'une excitation sinusoïdale est :

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial \epsilon_0 \vec{E}}{\partial t} = \frac{\epsilon_0 \partial \vec{E}}{\partial t} = j2\pi f \frac{\epsilon_0}{\sigma} \vec{J} = jR\vec{J} \quad (\text{II.10})$$

La densité surfacique de courant entre les deux milieux est nulle ($J_s = 0$) ;

La densité volumique de charge est considérée nulle ($\rho_s = 0$) ;

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

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.11})$$

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.13})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{II.14})$$

Avec les relations constitutives suivantes :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II.15})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.16})$$

L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ($B_r = 0$) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanent ou de matériau ferromagnétique [28].

II. 5 Modèle magnétodynamique

II. 5. 1 Formulation en termes de potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$

Le problème formulé en termes de champ magnétique ou électrique présente l'inconvénient de la discontinuité possible de ces grandeurs en passant d'un milieu à un autre, par contre le potentiel vecteur magnétique est continu, de plus, il réduit le nombre d'inconnues.

De (II.5) on a :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \rightarrow \exists \vec{A} / \vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{II.17})$$

De l'équation (II.16) on a :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \rightarrow \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (\text{II.18})$$

En combinat (II.17) et (II.13) on aura :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) \quad (\text{II.19})$$

De (II.19) on a :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \rightarrow \exists V \quad \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \quad (\text{II.20})$$

D'où :

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

En combinant (II.21) et (II.9) on aura :

$$\vec{j} = \sigma \vec{\nabla} V - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.22})$$

On pose :

$$\vec{j}_s = -\sigma \vec{\nabla} V \quad (\text{II.23})$$

$$\vec{j} = \vec{j}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.24})$$

De (II.17), (II.18) et (II.24) on peut avoir :

$$\vec{\nabla} \wedge \frac{(\vec{\nabla} \wedge \vec{A})}{\mu} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{j}_s \quad (\text{II.25})$$

II. 6 Méthode de résolution

II. 6. 1 Méthode 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 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. 6. 2 Méthode numérique

Les méthodes numériques les plus connues sont : Méthode des différences finis (MDF), Méthode des volumes finis (MVF), Méthode des éléments finis (MEF).

A. Méthode des différences finis

Le principe de la méthode des différences finis est basé sur l'utilisation d'une discrétisation des équations aux dérivées partielles (EDP). Elle est le plus souvent utilisée dans le domaine temporel, les problèmes harmoniques sont alors traités en prenant comme source une onde harmonique ou par passage d'un signal large-bande dans le domaine fréquentiel.

C'est une méthode numérique permet de calculer une approximation de solution d'une EDP en des points distribués sur une grille. L'objectif est alors de construire des dérivées de fonctions intervenant dans l'EDP à l'aide de valeur discrète de celle-ci à partir de formules de Taylor. L'approximation s'exprime à partir d'opérateur aux différences finis converge vers l'opérateur différentiel lorsque le pas de maillage tend vers 0 (h). On prendra par tous les points en considération mais quelques points correspondant aux nœuds de domaine de

résolution. En fait à partir d'une grille constituant une discrétisation des points qui définissent le maillage par différences finis.

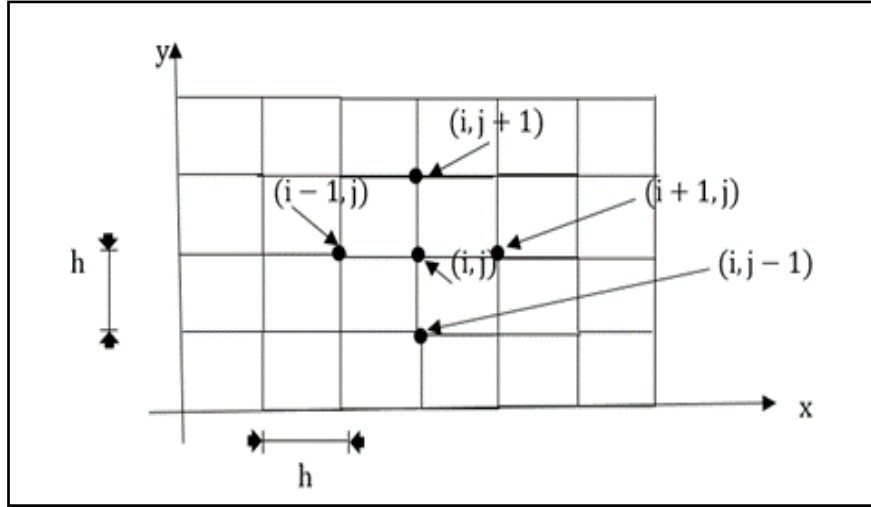


Figure II.2. Grille de maillage par différences finis.

Le maillage des différences finis est représenté par un ensemble des points.

La construction de système des équations algébriques est permise par l'approchement d'équation [29].

- **La discrétisation d'une fonction**

$U(x,y)$ définie en tous points (x, y) du domaine Ω avec les conditions aux limites données sur le contour Γ variables x et y par un ensemble fini de N éléments, remplacer ensuite la fonction $U(x, y)$ par une fonction $U(p)$ définie sur Ω . L'EDP déterminant $U(x, y)$ est donc remplacée par un système fini d'équations simultanées déterminant $U(p)$ [30].

- **Approximation des dérivées**

Un réseau est généralement utilisé.

✓ Dérivée du premier ordre

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_P = \frac{U(E) - U(W)}{2h} \quad (\text{II.26})$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)_P = \frac{U(N) - U(S)}{2h} \quad (\text{II.27})$$

✓ Dérivée du second ordre

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_P = \frac{U(E) + U(W) - 2U(P)}{h^2} \quad (\text{II.28})$$

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)_P = \frac{U(N) + U(S) - 2U(P)}{h^2} \quad (\text{II.29})$$

D'où :

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_P + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)_P &= \frac{U(E) + U(W) + U(N) + U(S) - 4U(P)}{h^2} \\ &= \left[\frac{\partial^2 U}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 y^2} \right]_P \left(\frac{\partial^2 U}{\partial^2 x^2}\right)_P + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial^2 y^2}\right)_P \\ &= (\Delta U)_P \end{aligned} \quad (\text{II.30})$$

Finalement l'expression du Laplacien discrétisé par la méthode des différences finis est comme suit :

$$(\Delta U)_P = \frac{U(E) + U(W) + U(N) + U(S) - 4U(P)}{h^2} \quad (\text{II.31})$$

D'une manière générale :

$$(\Delta U)_{ij} = \frac{U_{i+1,j} + U_{i-1,j} + U_{i,j-1} + U_{i,j+1} - 4U_{ij}}{h^2} \quad (\text{II.32})$$

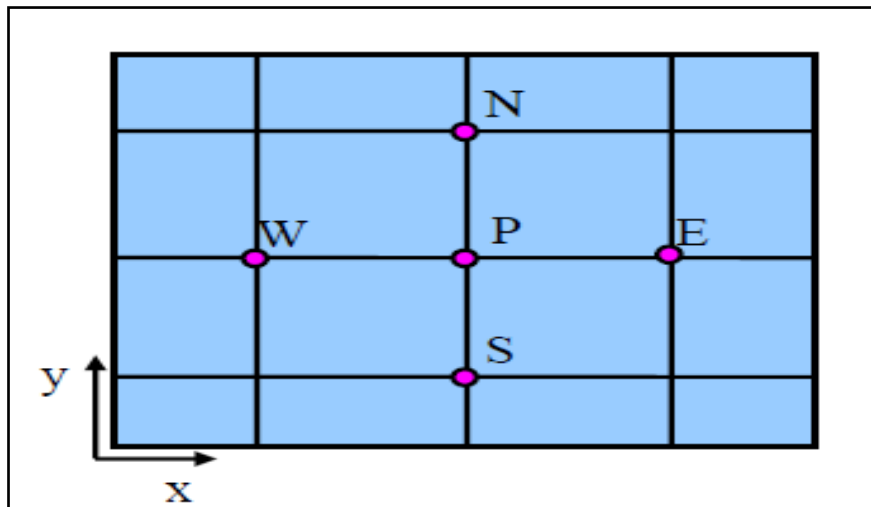


Figure II.3. Maillage de type différences finis.

La méthode des différences finis est très simple à mettre en œuvre. C'est une méthode qui est difficilement applicable aux domaines à géométrie compliquée, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières singulières tels que les carrée et les rectangles.

B. Méthode des éléments finis

La Méthode des Eléments Finis (MEF) est capable d'analyser des distributions de champ magnétique dans tous les dispositifs puisqu'elle peut inclure tous les détails de structure, de matériel et d'excitation. Afin d'obtenir l'exactitude acceptable de l'analyse finie d'élément, le domaine doit être coupé en nombre énorme d'éléments géométriques. On assume que les valeurs de champ sont une fonction simple de la position dans ces éléments, permettant l'interpolation des résultats. Le temps requis pour calculer la distribution de champ, cependant, pourrait être très long, particulièrement dans l'étape d'optimisation de conception, qui a besoin d'un grand nombre d'itérations pour atteindre une conception optimum. C'est seulement possible avec les ordinateurs à grande vitesse avec de grandes RAM (mémoire à accès sélective).

Cette méthode est très couramment employée lors de l'étude des systèmes électromagnétiques complexes. Elle permet d'obtenir des résultats de calcul avec une bonne précision et d'étudier de façon précise la répartition interne du flux magnétique, en prenant en compte les phénomènes de saturation et de création de courants de Foucault à l'intérieur des matériaux [31].

➤ Modélisation et discrétisation

La méthode des éléments finis est donc une procédure générale de discrétisation pour la résolution des problèmes des milieux continus. Donc pour avoir une analyse numérique qui simulera au mieux un problème, il faut effectuer deux opérations essentielles la modélisation et la discrétisation, ces opérations se font en deux temps [32].

La discrétisation ensuite et portent sur les deux aspects principaux du problème pratique.

- Représentation de la géométrie, des charges, des conditions aux limites.
- Choix des éléments finis et du maillage.

II. 6. 3 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 :

$$[M].\{A\}=\{K\} \quad (II.33)$$

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 :**

$$\{A\}=[M]^{-1}\{K\} \quad (II.34)$$

g. Analyse des résultats.

Le synoptique des étapes de la MEF est donné par la figure (II.4) ci dessous.

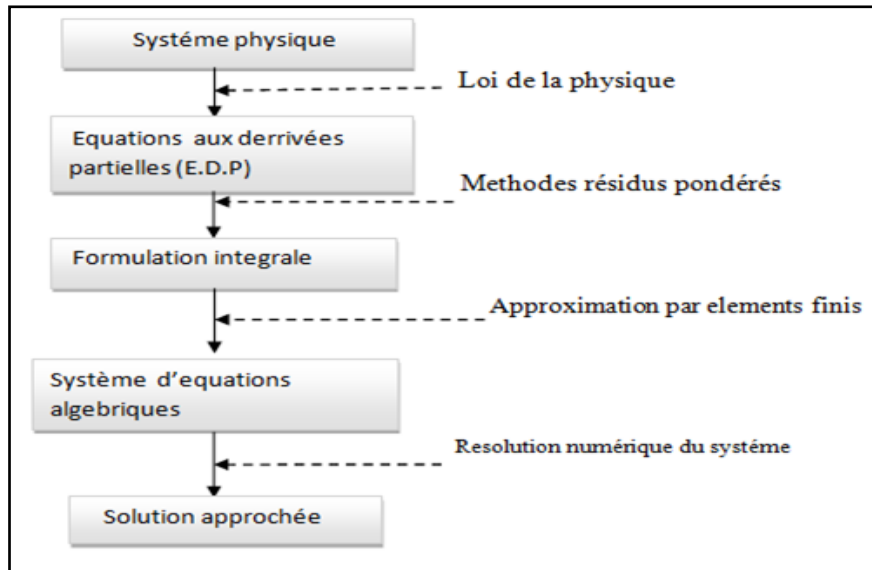


Figure II.4. Les étapes de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis.

➤ **Discrétisation du domaine par élément finis (maillage)**

La méthode des éléments finis consiste à découper le domaine en sous-domaine ou éléments, c'est le maillage.

Le maillage est formé d'éléments finis dont les sommets représentent les points (nœuds) dans lesquels seront calculées les inconnues du problème. Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini, grâce à une simple fonction appelée fonction de forme qui est définie sur chaque élément seul. La forme des éléments est directement liée à la dimension du problème (2D ou 3D). Pour une géométrie en (2D), on utilise généralement des triangles ou des quadrilatérales ; pour une géométrie en (3D), on utilise tétraèdres, les prismes ou hexaèdres. On rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse éléments finis car le cout en corrélation avec la précision des résultats dépend de la méthode de discrétisation et la finesse de cette subdivision en sous-domaines. La fonction d'interpolation nodale, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ces éléments ainsi que les coordonnées géométriques de ces nœuds, joue un rôle important sur la qualité de la solution approchée.

Le potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$ dans un élément peut être approché par des fonctions d'approximations dont l'expression varie d'un type d'élément à un autre. Ces fonctions

d'approximations qui sont généralement de type polynomial doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments [33].

Pour un élément triangulaire de premier ordre, dans le domaine global contenant N nœuds, l'inconnu s'exprime alors :

$$\sum_{j=1}^N N_j A_j \quad (\text{II.35})$$

N : Nombre de nœud.

A_j : Valeur de l'inconnue au nœud j .

N_j : Fonction d'approximation (d'interpolation) au nœud j .

A. Principe de la méthode des éléments finis

Pour résoudre numériquement une EDP, nous utilisons dans ce travail la méthode des éléments finis. Les origines de cette méthode remontent aux années 50 lorsque les ingénieurs l'utilisèrent pour simuler des problèmes de mécanique. Depuis, son champ d'application s'est considérablement étendu. Aujourd'hui, il existe un nombre important de logiciels commerciaux et académiques qui utilisent la méthode des éléments finis comme outil de simulation dans un large spectre de domaines (mécanique, thermique, électromagnétisme...). Le principe de cette méthode repose sur deux points fondamentaux. D'une part, la formulation d'un problème approché par la méthode de Galerkin ; d'autre part, la construction d'un espace d'approximation de dimensions finies. Cette démarche permet d'approcher des fonctions définies sur le domaine d'étude en maillant ce dernier puis en choisissant sur chaque maille une combinaison linéaire de fonctions d'interpolation (polynomiales par exemple). La méthode des éléments finis nécessite, avant tout :

- La transformation de la formulation initiale (dite formulation forte) du problème à résoudre en une autre formulation (dite formulation faible) dont l'ordre de dérivation est plus faible. Cette phase correspond à la mise sous forme variationnelle du problème d'EDP. Dans cette dernière formulation, le problème est posé dans un espace de dimension infinie.
- La deuxième étape de la méthode consiste à poser un problème analogue en dimension finie, à partir d'un maillage du domaine où est définie l'EDP [34].

B. Méthodes des résidus pondérés

La méthode des résidus pondérés est basée sur la détermination des résidus définis par :

$$R = L(A) + f_v \quad (\text{II.36})$$

R : est le résidu d'approximation.

$L(A)$: opérateur différentiel.

f_v : Fonction définis sur le domaine d'études (Ω).

A : Inconnue du problème.

A l'aide de fonction de pondération bien choisies, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en n points du domaine (Ω).

$$\int_{\Omega} R_i \phi_i d\Omega = 0 \quad (\text{II.37})$$

ϕ_i : Fonction de pondération ou projection.

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu. La méthode des résidus pondérés présente un avantage par rapport à la méthode variationnelle, c'est qu'elle ne nécessite pas la connaissance préalable de l'expression énergétique du système.

C. Discrétisation du domaine d'étude

L'approche de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser le domaine d'étude en nombre finis de sous domaines appelés éléments. L'approximation de l'inconnue se fait en en chaque élément des fonctions d'interpolation. La fonction d'interpolation est aussi définie en fonction de la géométrie d'élément qu'on choisit probablement et coïncide avec les nœuds de cet élément relatifs aux valeurs de l'inconnue. On parle alors d'interpolation nodale [35].

▪ Eléments finis réels

Pour des domaines d'étude à une, deux ou trois dimensions, on utilise des éléments de références simples tels que : le triangle, le rectangle, le tétraèdre ; parallélépipède, auxquels on associe un système de coordonnées normé.

Cela permet de définir une fois, pour chaque type d'élément les fonctions d'interpolation. Ces entières, une fois construits, on obtient les fonctions associées au système réel à l'aide des transformations géométriques.

➤ Eléments à une dimension

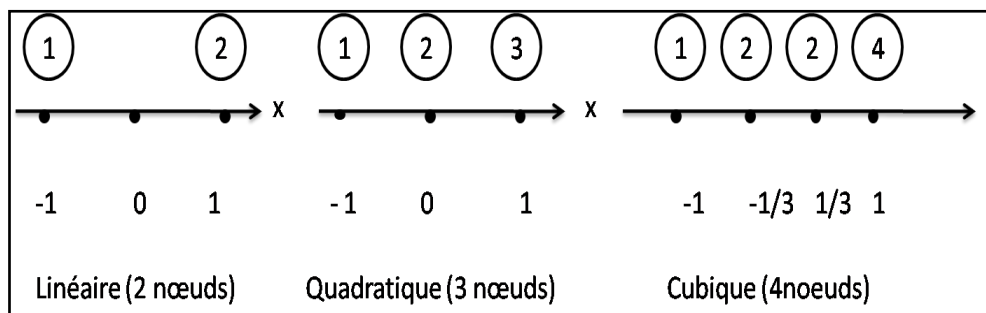


Figure II.5. Eléments finis de référence à une dimension.

➤ Eléments à deux dimensions

✓ Eléments triangulaire

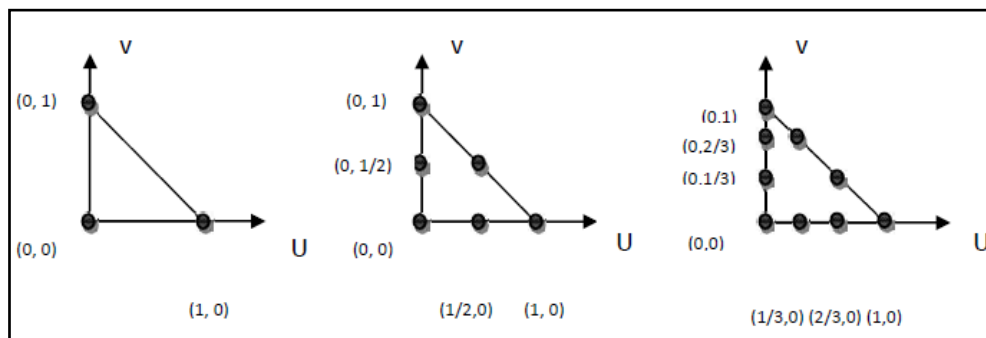


Figure II.6. Eléments finis de référence à deux dimensions (éléments triangulaires).

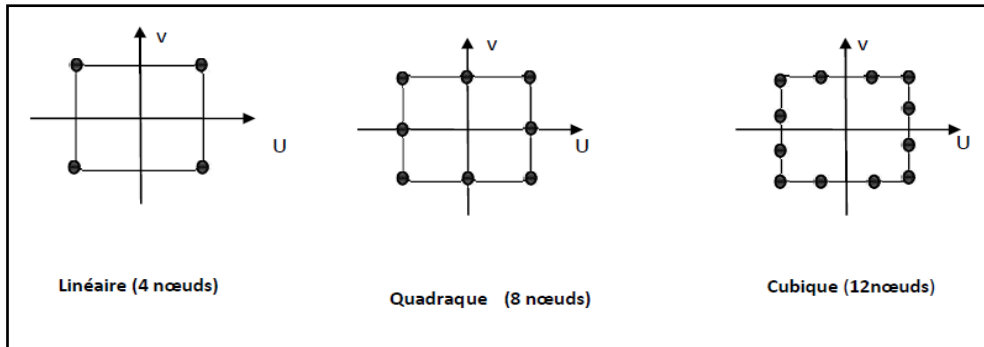
✓ **Eléments carrée**

Figure II.7. Eléments finis de référence à deux dimensions (éléments carrés).

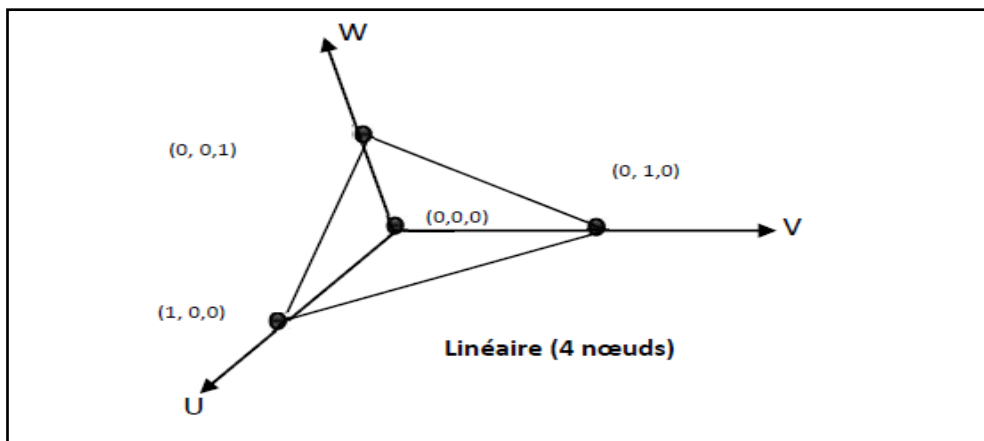
➤ **Eléments à trois dimensions**

Figure II.8. Eléments finis de référence à trois dimensions.

▪ **Elément de référence**

Afin de simplifier la définition des éléments de forme complexe, on introduit la notion de l'élément de référence. Cela permet de ne définir qu'une seule fois, pour chaque type d'élément, les fonctions d'interpolation.

Dans le cas qui nous concerne, c'est-à-dire, l'élément triangulaire linéaire, l'élément de référence est tel que donné dans la figure suivante :

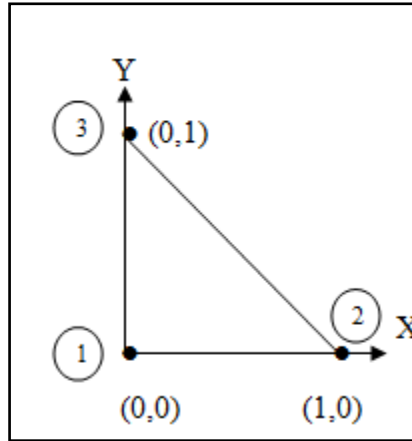


Figure II.9.Elément de référence utilisé dans PDETool.

▪ Fonction d'interpolation

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de pascal, donne ci-dessous:

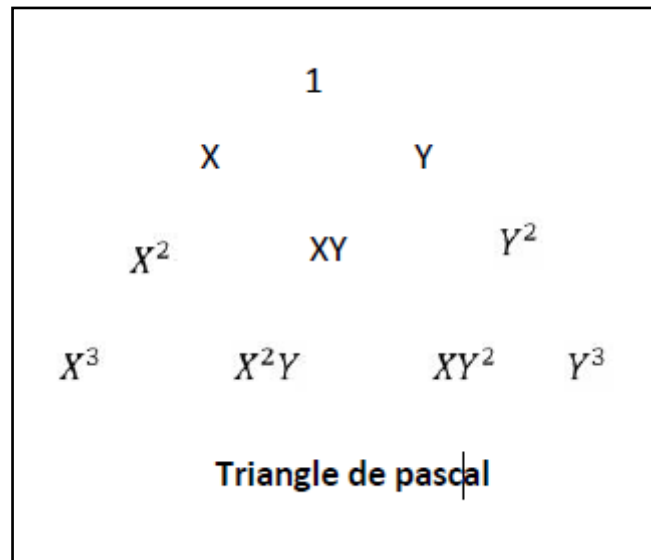


Figure II.10. Triangle de Pascal.

C'est des fonctions construites de tels sorts à obéir aux conditions suivantes :

c.1) Principe de l'état complet

Le nombre de termes de la fonction doit être égal au nombre de nœuds de l'élément.

La fonction doit contenir un terme constant.

c.2) Principe de comptabilité

Ce principe consacre la continuité de la fonction d'interpolation. On cite un exemple de la fonction d'interpolation dans le cas d'un élément carré.

$$U_{(x,y)} = ax + by + cxy + d \quad (\text{II.38})$$

▪ La fonction d'interpolation sur un élément

L'approximation d'une fonction $u(x, y)$ de valeurs u_1 , u_2 et u_3 respectivement aux sommets : (1), (2) et (3) dans le cas d'un élément triangulaire linéaire, est donnée par la formule suivante :

$$U(x, y) = [N_1(x, y)N_2(x, y)N_3(x, y)] \cdot [U_1] \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$$N_1(x, y) = \frac{1}{2T} [(y_3 - y_2) \cdot (x_2 - x) - (x_3 - x_2) \cdot (y_2 - y)]$$

$$N_2(x, y) = \frac{1}{2T} [(y_1 - y_3) \cdot (x_3 - x) - (x_1 - x_3) \cdot (y_3 - y)]$$

$$N_3(x, y) = \frac{1}{2T} [(y_2 - y_1) \cdot (x_1 - x) - (x_2 - x_1) \cdot (y_1 - y)]$$

T : la surface du triangle décrit par les sommets (1), (2) et (3)

Nous remarquons que :

$$N_1(x_1, y_1) = 1$$

$$N_2(x_2, y_2) = 0$$

$$N_3(x_3, y_3) = 0$$

▪ Calcul de la fonction d'approximation

Dans le domaine global contenant N nœuds, l'inconnu s'exprime alors :

$$A = \sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot A_j \quad (\text{II.40})$$

α_j : Fonction d'interpolation aux nœuds j

II. 7 Techniques de calcul l'impédance

II. 7. 1 Hypothèses

Considérant une bobine de section Ω , comportant N spires jointives en série.

La densité de courant est répartie uniformément. la spire élémentaire de la bobine est soumise à une tension (du) et parcourue par une intensité de courant I.

$$I = \iint_{\Omega} \vec{J} \cdot d\vec{\Omega} \quad (\text{II.41})$$

$$I = \frac{J\Omega}{N} \quad (\text{II.42})$$

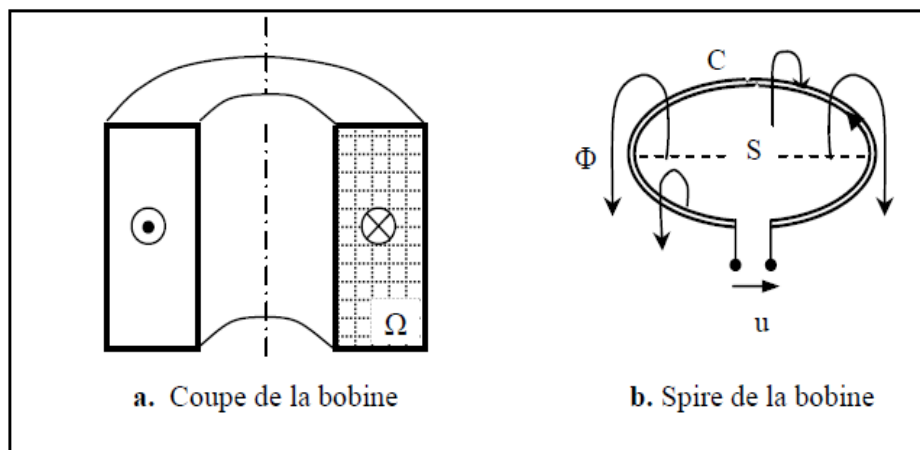


Figure II.11. Bobine à N spires jointives.

La tension totale est la somme des tensions des spires élémentaires (spires disposées en série), elle est donnée par :

$$U = \frac{1}{\Omega} \iint_{\Omega} u \, d\Omega \quad (\text{II.43})$$

Une impédance, peut être formulée par plusieurs formulations, la différence entre ces dernières réside dans la variable d'état utilisée qui est en relation directe avec la configuration du problème et la solution issue de la résolution de des équations de Maxwell [22].

II. 7. 2 Impédance à travers l'induction ou le flux magnétique

En configuration double fonction ou fonctions séparées, L'impédance du bobinage peut être calculée à l'aide d'une méthode générale reposant sur le calcul du flux de l'induction magnétique [23].

Partant de l'équation de Maxwell – Faraday (II.4), après intégration sur la surface S enveloppée par le contour C de la bobine et application du théorème de Stokes, nous obtenons la formule suivante:

$$\int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -j\omega \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (\text{II.44})$$

La tension aux bornes de la bobine, nous faisons la somme de toutes les tensions élémentaires des spires. Ainsi, l'équation (II.44) appliquée à l'ensemble des spires formant la bobine devient :

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \left(\int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \right) d\Omega &= -j\omega \iint_{\Omega} \left(\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \right) d\Omega \\ &= -j\omega \iint_{\Omega} \phi \, d\Omega \end{aligned} \quad (\text{II.45})$$

Sachant que l'impédance électrique peut être évaluée à partir de :

$$Z = R + jX = \frac{1}{I} \iint_{\Omega} \left(\int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \right) d\Omega \quad (\text{II.46})$$

Et en introduisant la forme complexe du flux magnétique, la combinaison des équations (II.45) et (II.46) donne :

$$Z = \frac{\omega}{I} \left(\iint_{\Omega} \text{Im}(\Phi) d\Omega - j \iint_{\Omega} \text{Re}(\Phi) d\Omega \right) \quad (\text{II.47})$$

Les paramètres de l'impédance sont alors :

$$R = \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \text{Im}(\Phi) d\Omega \quad (\text{II.48})$$

$$X = -j \iint_{\Omega} \text{Re}(\Phi) d\Omega \quad (\text{II.49})$$

Où :

$$R = \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \left(\iint_S \text{Im}(\vec{B} d\vec{S}) \right) d\Omega \quad (\text{II.50})$$

$$X = -j \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \left(\iint_S \text{Re}(\vec{B} d\vec{S}) \right) d\Omega \quad (\text{II.51})$$

L'expression de l'impédance ainsi établie peut s'appliquer indifféremment aux capteurs à double fonction ou à fonctions séparées. En introduisant le potentiel vecteur magnétique, les équations (II.50) et (II.51) deviennent comme suit :

$$\text{Re}(Z) = \frac{N^2}{J \cdot S^2} \omega \cdot \iint_S 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \text{Im}(A) \cdot dS \quad (\text{II.52})$$

$$\text{Im}(Z) = \frac{N^2}{J \cdot S^2} \omega \cdot \iint_S 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \text{Re}(A) \cdot dS \quad (\text{II.53})$$

Avec :

r : Rayon de la bobine.

II. 8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation numérique des structures CND-CF par courant de Foucault, un rappel sur les équations de l'électromagnétisme a été fait, par la suite nous avons explicité quelques méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles, La méthode des éléments finis a été expliquée en détail ; A la lumière des caractéristiques de ces méthodes de modélisation, nous constatons que les codes éléments finis font partie des outils couramment utilisés lors de la conception et à l'analyse des produits industriels.

Pour cela le chapitre suivant sera consacré à la simulation numérique d'un capteur différentiel à CF en utilisant en utilisant la méthode des éléments finis.

Chapitre III : Applications et résultats

III.1 Introduction

Dans le domaine du CND par CF, la modélisation par éléments finis (MEF) est devenue un outil majeur dans la conception des sondes et dans l'étude des performances de détection des défauts par courant de Foucault [36].

La simulation a pour but d'étudier les différents défauts produits au niveau d'une pièce conductrice d'électricité. Ces défauts se différencient par leurs caractéristiques géométriques; valeurs, tailles, leurs positions relatives dans la pièce (en surface, au milieu et en profondeur). La détection des défauts et l'étude des paramètres sont traitées par le calcul de la variation de l'impédance aux bornes du capteur par la méthode des éléments finis.

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de simulation numérique d'un capteur différentiel à CF pour différents tubes et pour différentes caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système capteur/tube.

III. 2 Organigramme de calcul

La figure III.1 représente l'organigramme du code de calcul éléments finis effectuées sous l'logicielle MATLAB :

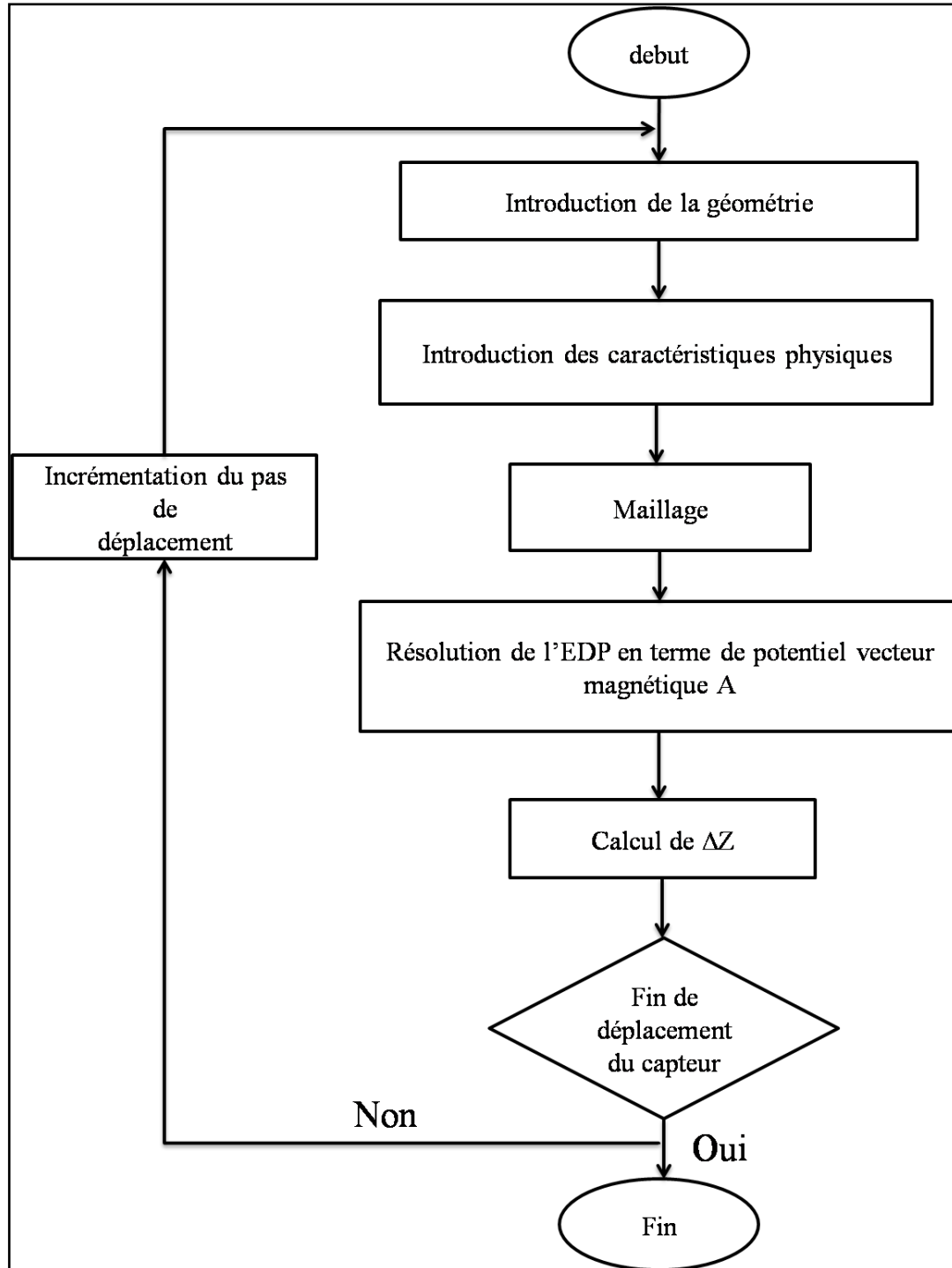


Figure.III.1. Organigramme de calcul.

III. 3 Formulation électromagnétique du problème

Nous avons considéré un problème magnétodynamique en régime harmonique et dont l'équation en termes de potentiel magnétique vecteur est donnée comme suit :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + j\omega\sigma A = J_{sz} \quad (\text{III.1})$$

On adapte l'équation (III. 1) pour le système on obtient :

❖ Dans le capteur :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = +J_{sz} \quad (\text{III.2})$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_{sz} \quad (\text{III.3})$$

❖ Dans la charge

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + j\omega\sigma A = 0 \quad (\text{III.4})$$

❖ Dans l'air

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{III.5})$$

III. 4 Première application : Echangeur de chaleur

III. 4. 1 Description de dispositif d'étude

Les échangeurs de chaleur sont largement utilisés dans les chaudières et les cuves industrielles, leurs tubes fonctionnent à haute température et pression, ce qui entraîne divers types de dégradation y compris l'usure mécanique, la corrosion et les fissures.

Notre première application consiste à simuler un tube de ses échangeurs de chaleur comportant une fissure interne, nous faisons glisser la sonde à l'intérieur du tube et nous récupérons la variation de l'impédance du capteur pour chaque pas de déplacement de ce dernier.

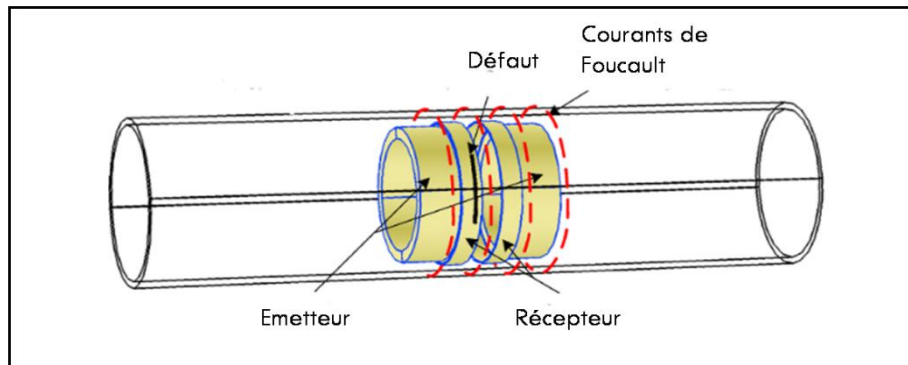


Figure III.2. Description du problème.

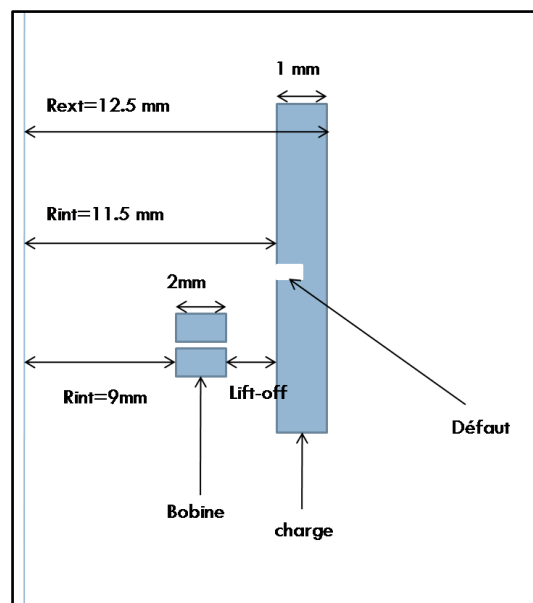


Figure III.3. Dimensions géométriques du système.

Les caractéristiques géométriques et physiques de chaque élément du dispositif sont listées dans le tableau III.1 :

Paramètres	Valeurs
Le capteur	
Nombre de conducteurs	150
Rayon intérieur	9 mm
Rayon extérieur	11mm
Hauteur	2 mm
Largeur	2 mm
Fréquence	100 KHz
Conductivité électrique	$59.10^{+6} [\Omega. m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4\pi.10^{-7} [H/m]$
La charge	
Hauteur	200 mm
Epaisseur	1 mm
Conductivité électrique	$1.10^{+6} [\Omega. m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4\pi.10^{-7} [H/m]$

Tableau III.1.Caractéristiques géométriques et physiques du système.

III. 4. 2 Domaines d'étude et conditions aux limites

La figure III.4 représente le domaine de résolution et les conditions aux limites :

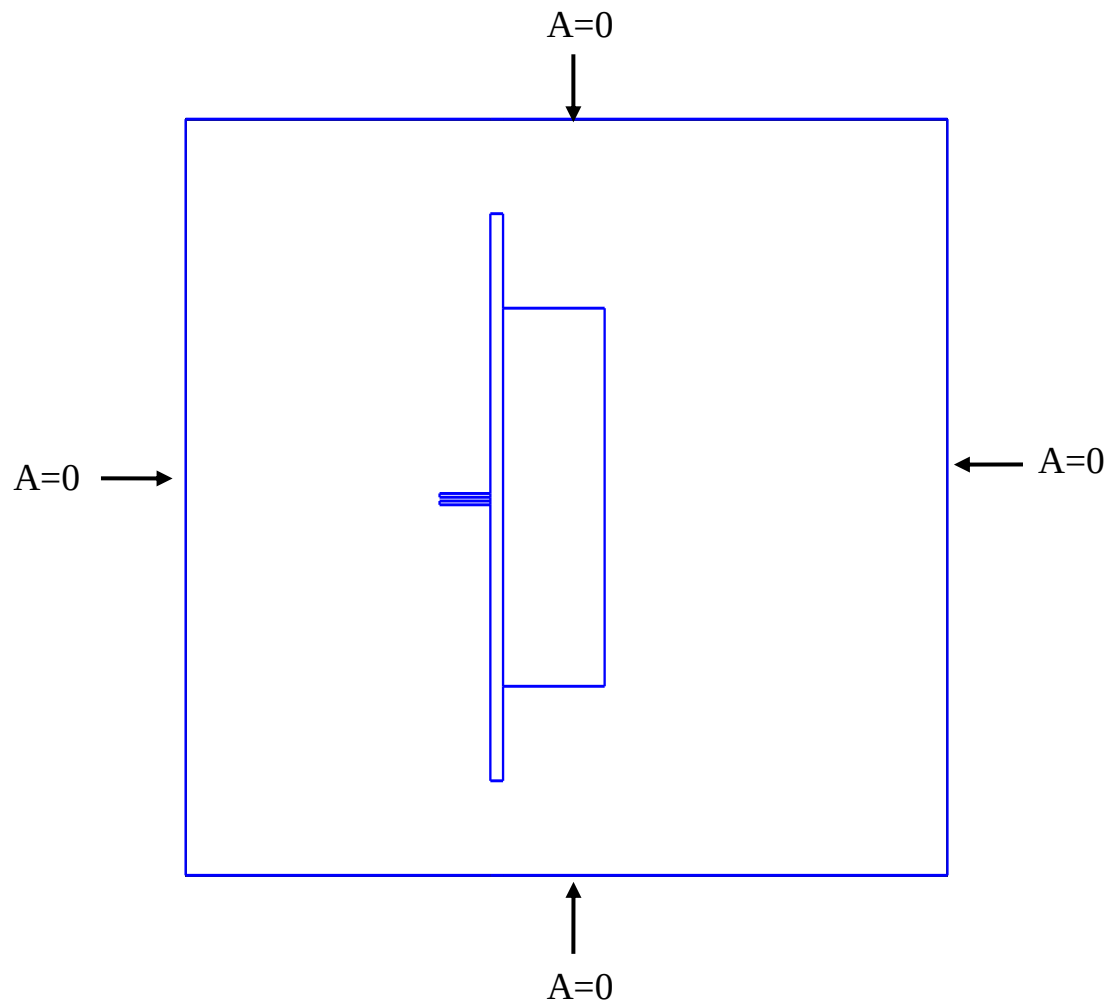


Figure III.4. Domaine de résolution et conditions aux limites.

III. 4. 3 Maillage du domaine

Le maillage de la géométrie d'un capteur différentiel avec deux bobines est représenté sur la figure III.5 :

Le maillage du système considéré est donné par la figure III.5, nous avons concentré le maillage au niveau des parties actives (le capteur, l'entrefer, et la pièce).

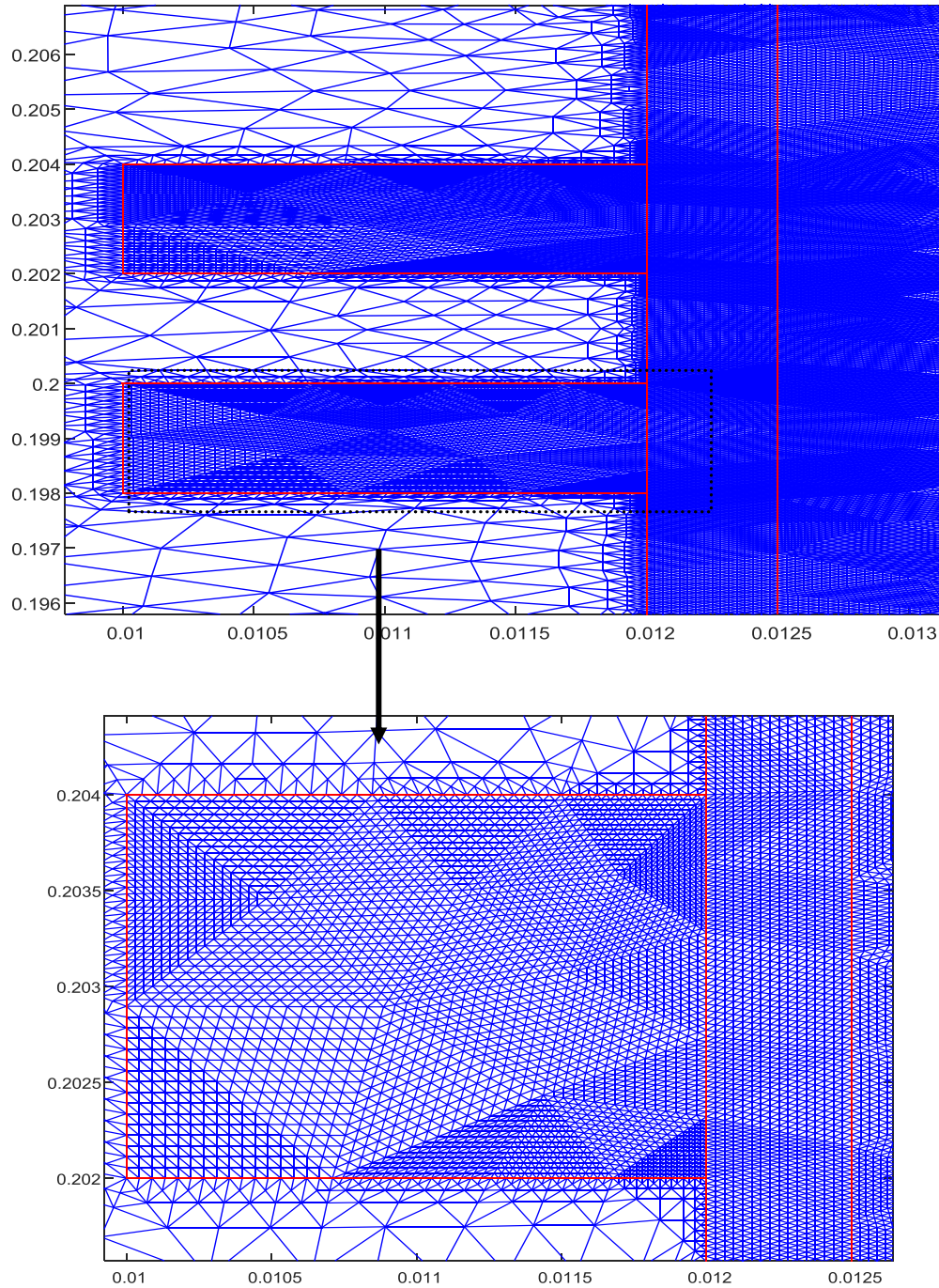


Figure III.5.Maillage du domaine.

III. 4. 4 Plaque sans défaut

On a considéré une plaque sans défaut, on alimentant le capteur avec une fréquence de 100kHz, et on considère un lift off de 0.5 mm.

La géométrie du système simulé est présentée sur la figure III.6 :

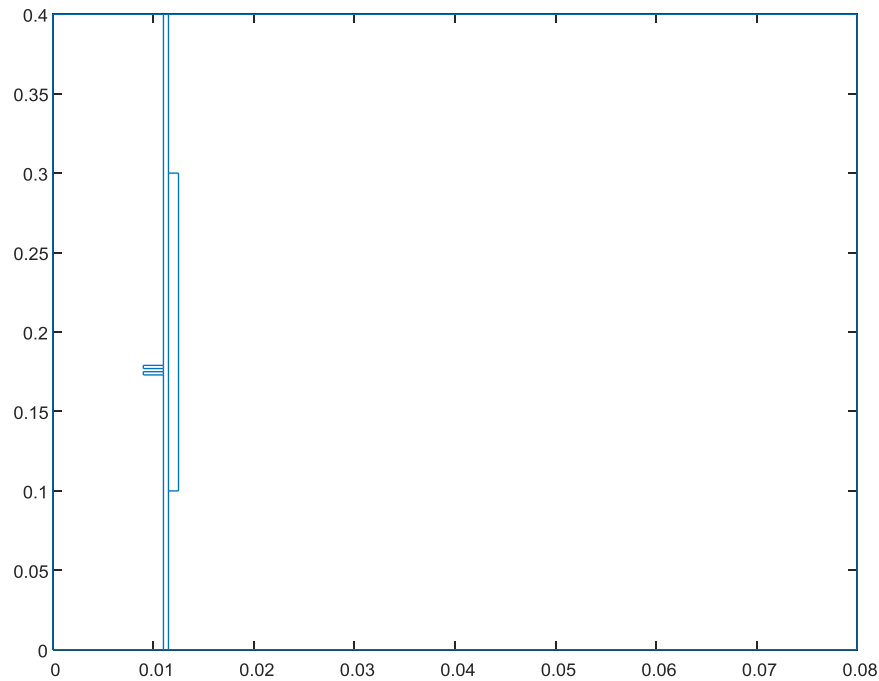


Figure III.6.La géométrie de système sans défaut.

La distribution des lignes de champ autour du capteur est donnée par la figure III.7 :

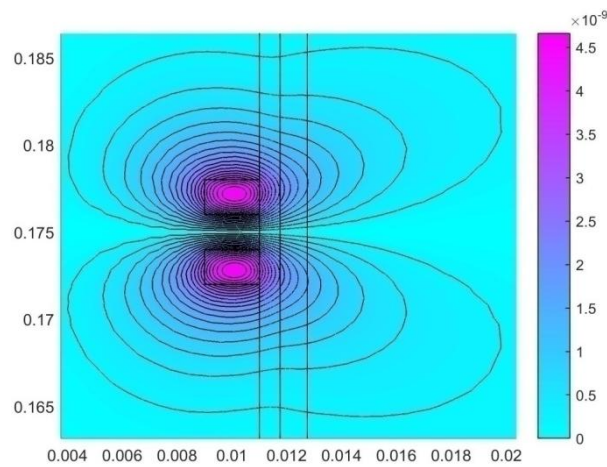


Figure III.7.Les lignes du potentiel vecteur magnétique A (plaque sans défaut).

III. 4. 5 Plaque avec défaut

La géométrie du système avec défaut est illustrée sur la figure III.8 :

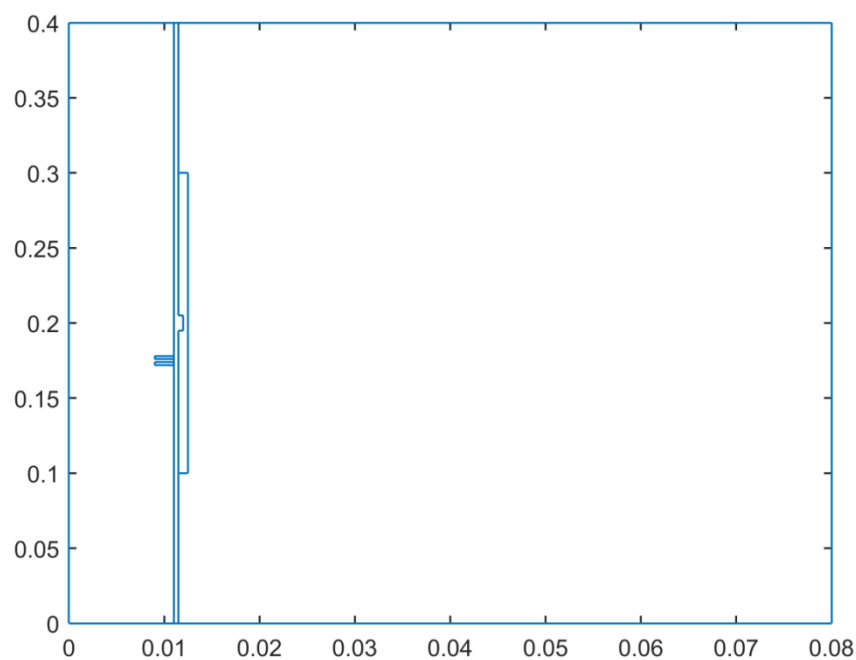


Figure III.8. Géométrie de système avec défaut.

III. 4. 6 Maillage de domaine

Le maillage du système avec défaut est présenté sur la figure III.9 :

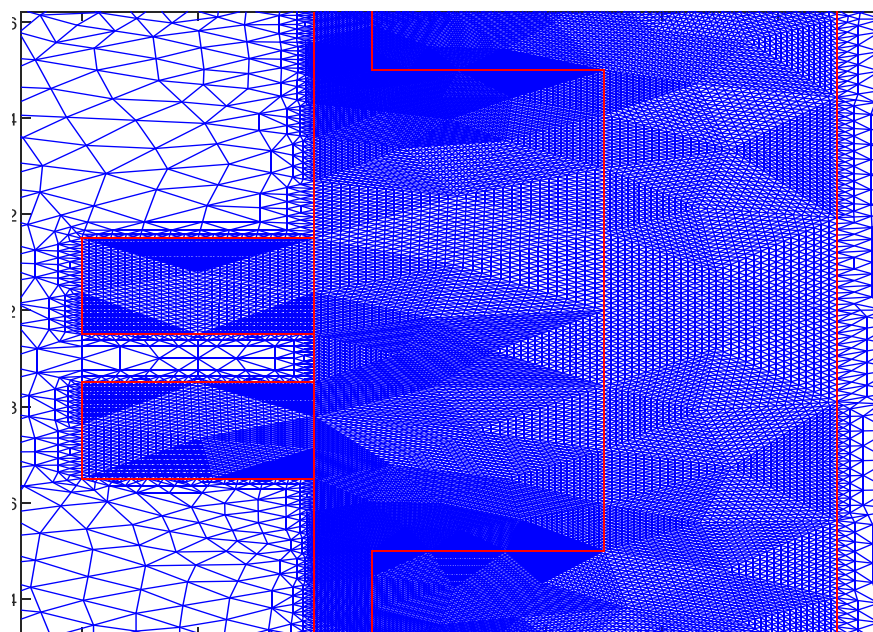


Figure III.9. Maillage de domaine (plaque avec défaut).

III. 4. 7 Distribution des lignes de champ

Les figures ci-dessous montrent la distribution des lignes de champ pour quatre positions de notre capteur :

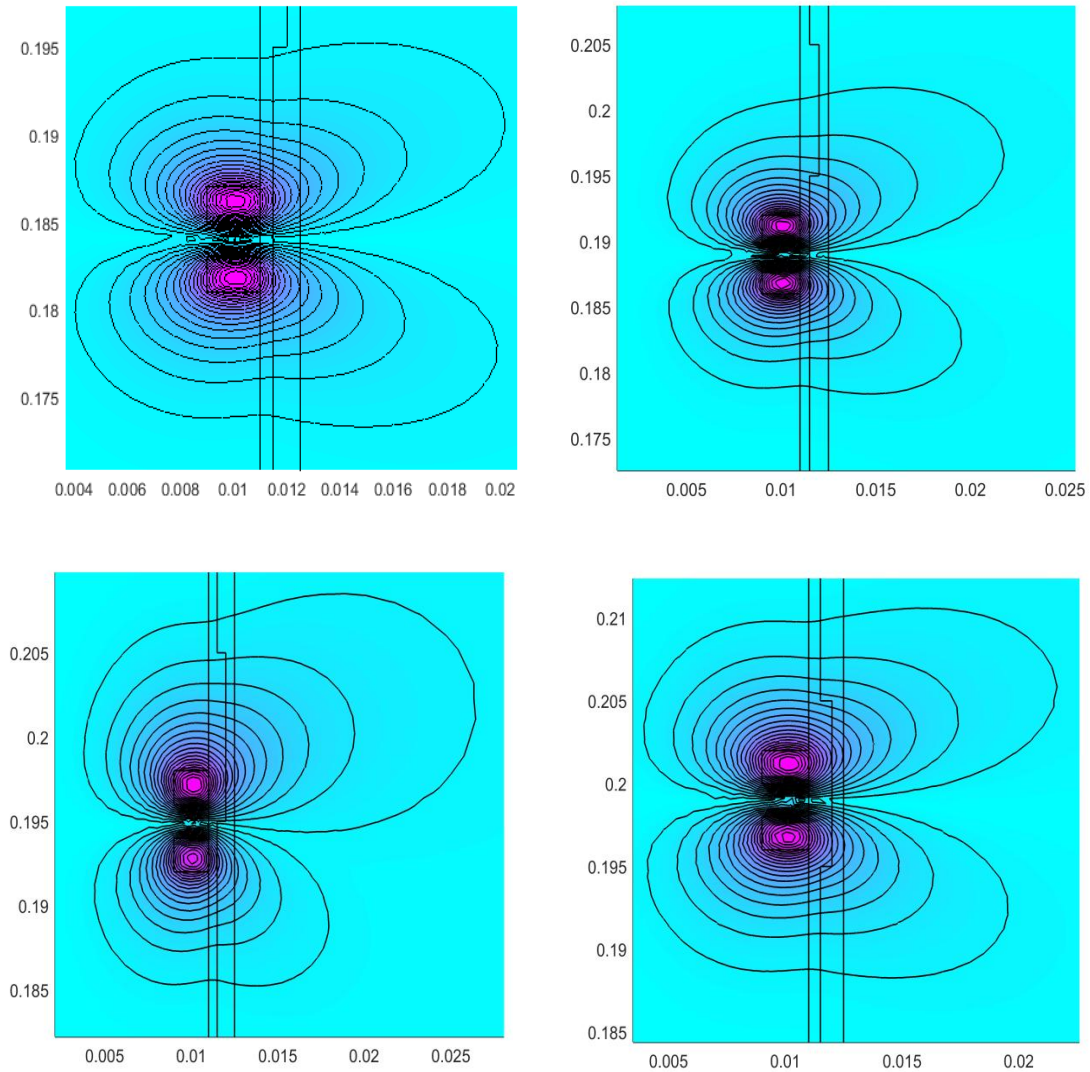


Figure III.10. Les cartographies des lignes du potentiel vecteur magnétique A pour différentes positions du capteur

Nous remarquons une distorsion des lignes de champ au niveau de la zone du défaut, ce qui modifie l'impédance du capteur.

III. 4. 8 Résultats en termes de variation d'impédance

Les signaux de la variation de l'impédance sont obtenus par la relation suivante :

$$\Delta Z = |Z_d - Z_s| \quad (\text{III.6})$$

ΔZ : La variation de l'impédance de capteur.

Z_d : Impédance de la bobine à la position de la zone du défaut.

Z_s : Impédance de la bobine à la position de la zone saine.

A. Effet du lift off

La figure III.11 représente la variation de l'impédance en fonction de la position de capteur en faisant varier la distance entre le capteur et la plaque (lift off) de 0.5 mm, 0.75mm, 1mm, 1.5mm, 2mm, les paramètres géométriques étant fixés ,en obtient les courbes suivantes :

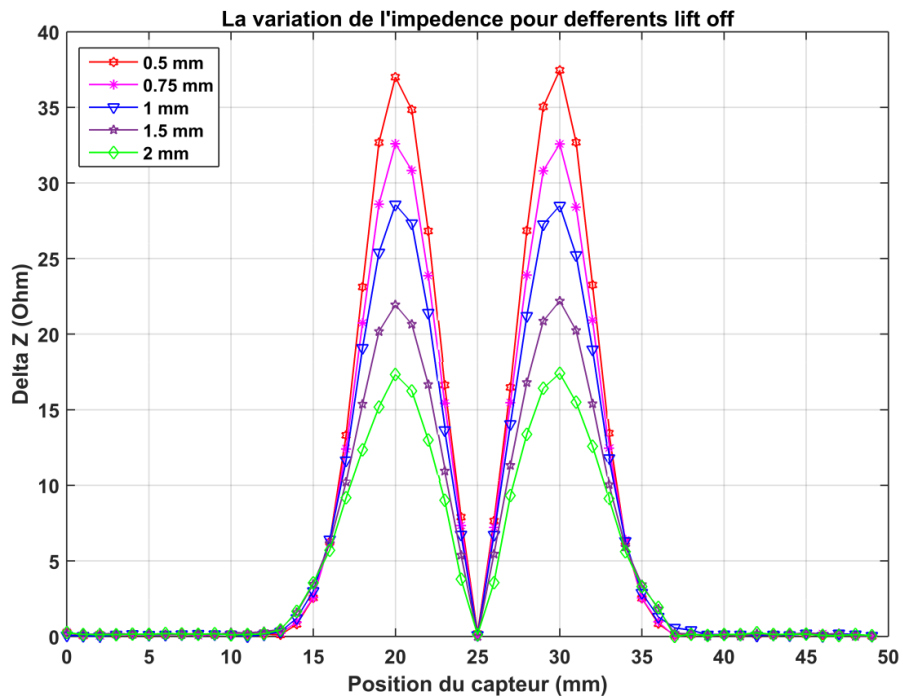


Figure III.11. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs du lift-off.

De la figure III.11 nous remarquons une diminution du signal d'impédance du capteur avec l'augmentation du lift-off. Ceci est expliqué par la diminution du couplage électromagnétique entre le capteur et la plaque à inspecter.

La figure III.12 montre l'évolution de l'impédance maximale en fonction du lift off :

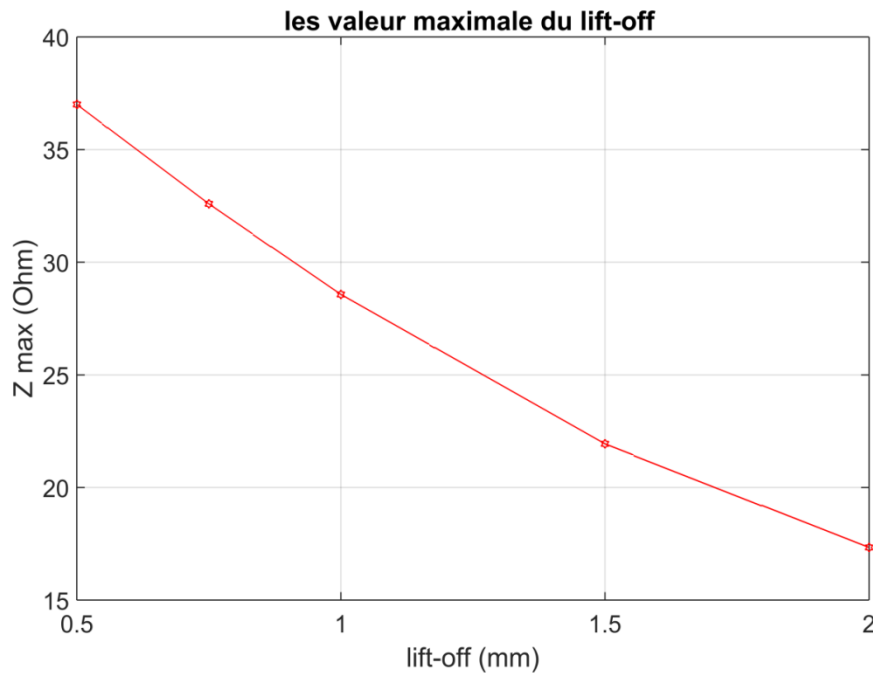


Figure III.12. Les valeurs maximales de l'impédance pour différentes lift off.

B. Effet de la profondeur du défaut

Avec une fréquence étant fixée à 100 KHz et un lift off de 0.5 mm on a fait varier la valeur de la profondeur de défaut avec 10%, 30%, 50%, 80%, 100% de l'épaisseur de tube les résultats de la variations de l'impédance pour ces différentes valeurs sont représenté sur la figure III.13 :

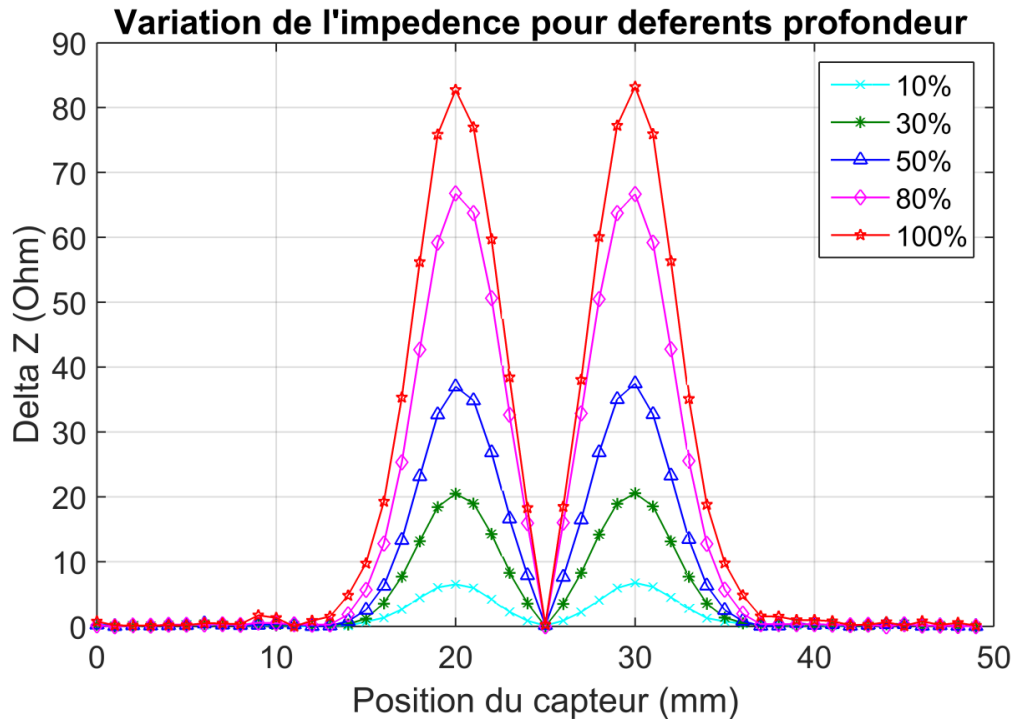


Figure III.13. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur.

La figure III.14, montre l'évolution de l'impédance maximale en fonction de la profondeur du défaut :

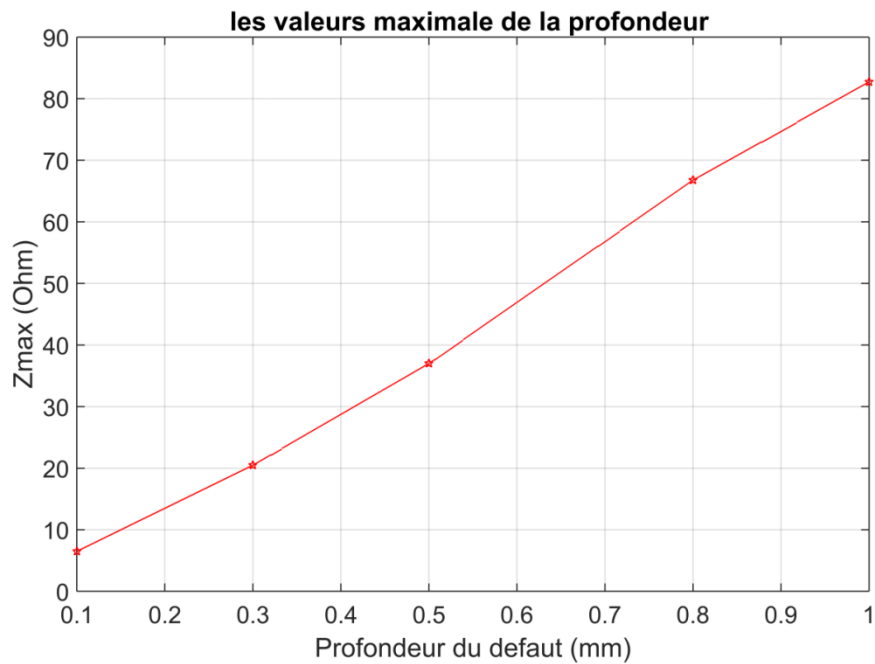


Figure III.14. Les valeurs maximales de l'impédance pour différentes profondeurs.

C. Effet de la longueur de défaut

Dans cette application on a fait varier la longueur de défaut de 10mm jusqu'à 0.5mm comme montre la figure III.15, Le balayage de capteur se fait avec une fréquence de 100 KHz, un lift off de 0.5mm et une profondeur de défaut de 50% de la profondeur du tube.

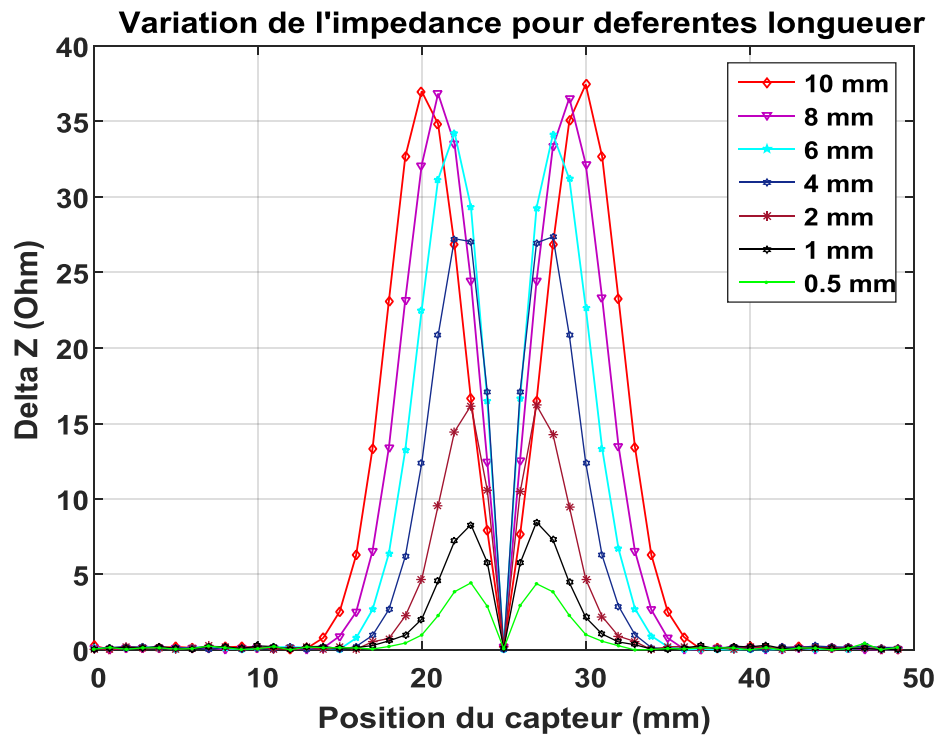


Figure III.15. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la longueur de défaut.

La figure III.16, montre l'évolution de l'impédance maximale en fonction de la longueur de défaut :

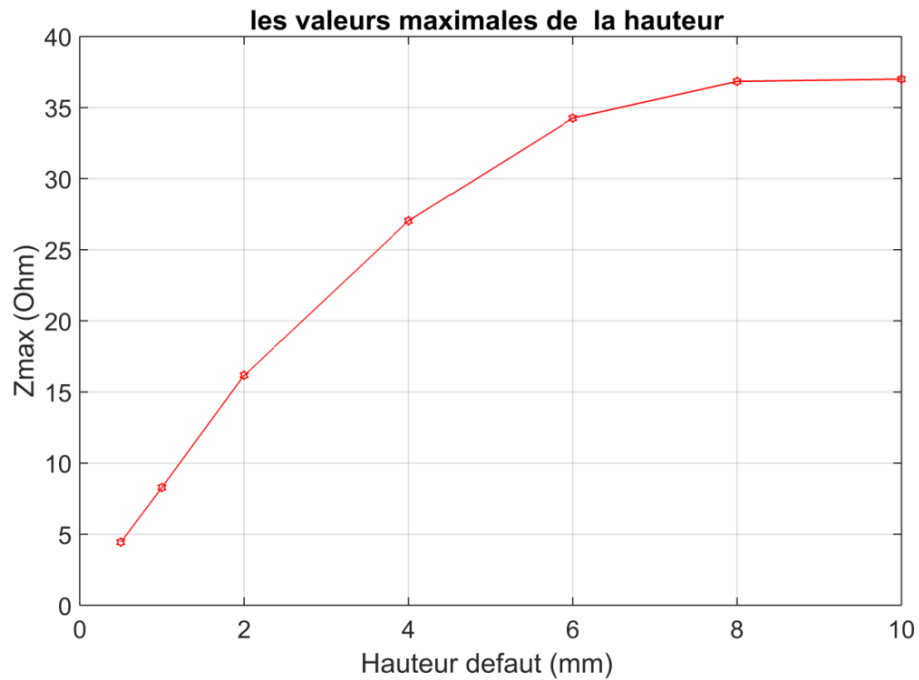


Figure III.16. Les valeurs maximales de l'impédance pour différentes longueurs.

Des figures III.13 et III.15 nous constatons une augmentation de signal du capteur avec l'augmentation des dimensions géométrique du défaut (longueur et profondeur), d'après les figures nous remarquons que plus le défaut est important plus la détection est meilleure.

III. 5 Deuxième application : Tubes ferromagnétiques

III. 5. 1 Description du problème

Ce travail a été effectué à l'entreprise EPE ANABIB SPA dont l'objet sociale est la fabrication des tubes soudés en spirales à partir de feuillets en acier, la prestation de revêtement (extérieur/ intérieur), importation et exportation des tubes en acier, la recherche et développement d'autres procédés de production.

Nous avons pris des défauts au moyen de radiographie (Rayon X), et nous avons proposé de contrôler le tube par la méthode des courants de Foucault.

Une image des défauts par radiographie étaient comme suit :

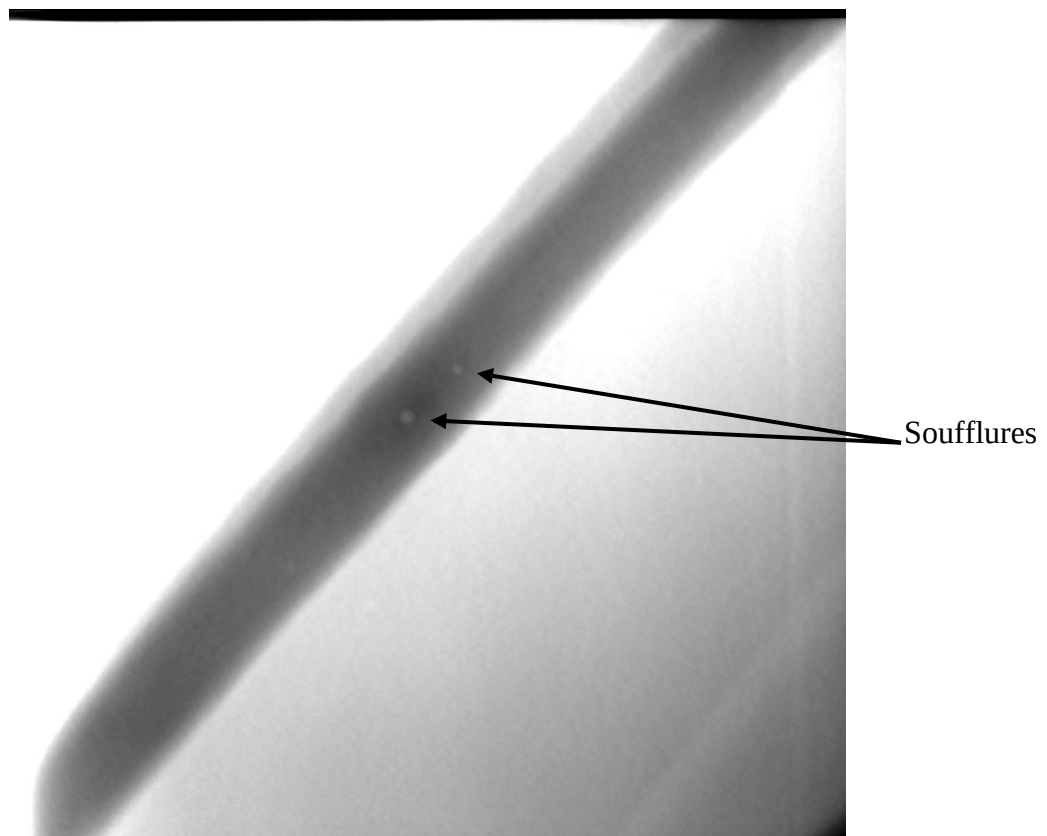


Figure III.17. Défauts des soufflures en radiographie.

Le tube contrôlé est un tube métallique en acier sous la dénomination commerciale X52M. Les paramètres de la cible sont listés dans le Tableau III.2.

Paramètres	Valeurs
Le capteur	
Nombre de conducteurs	150
Rayon intérieur	246,95 mm
Rayon extérieur	248,95 mm
Hauteur	2 mm
Largeur	2 mm
Lift off	0,15 mm
Fréquence	50 KHz
Conductivité électrique	$59.10^{+6} [\Omega. m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4\pi.10^{-7} [H/m]$
La charge	
Rayon intérieur	249,1 mm
Rayon extérieur	256,2 mm
Epaisseur	7,1 mm
Conductivité électrique	$6,99.10^{+6} [\Omega. m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	100 [H/m]
Défauts	
Longueur défaut 1	2,2 mm
Longueur défaut 2	1,3 mm
Profondeur	20%d, 50%d, 70%d, 90%d

Tableau III.2. Caractéristiques géométriques et physiques du système.

Avec une fréquence d'excitation de 50 KHz nous avons fait simuler notre configuration avec un lift off de 0.15 mm, on variant la valeur de la profondeur du défaut de 20%, 50%, 70%, 90% de l'épaisseur de tube.

La géométrie du système simulé est représentée sur la figure III.18 :

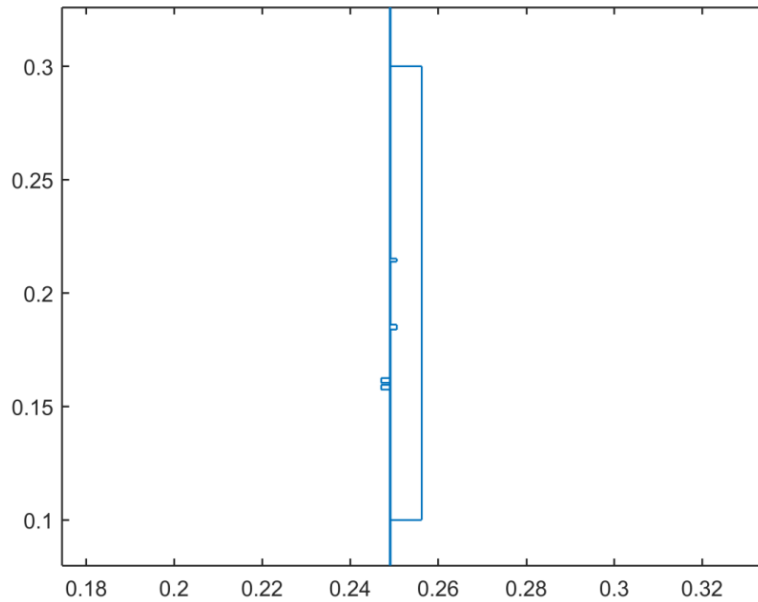


Figure III.18. La géométrie du système.

III. 5. 2 Maillage de domaine

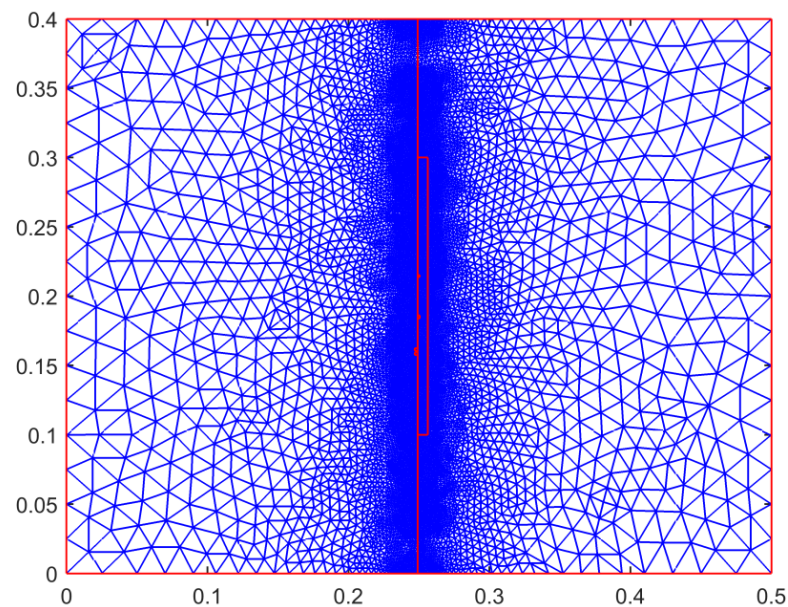


Figure III.19. Maillage du domaine.

III. 5. 3 Résultats en termes de potentiel vecteur magnétique

La distribution des lignes de champ pour différents position du capteur est montrée sur les figures si dessus :

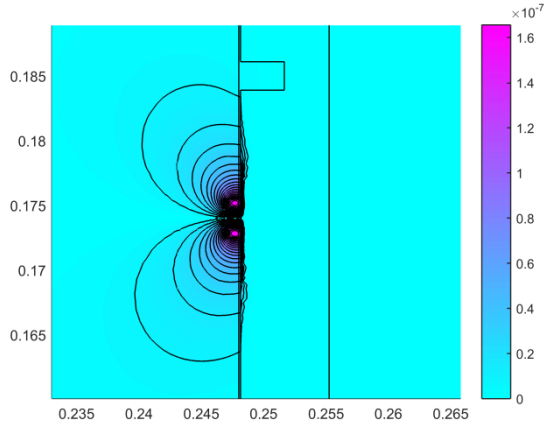


Figure III.20.a. avant le défaut

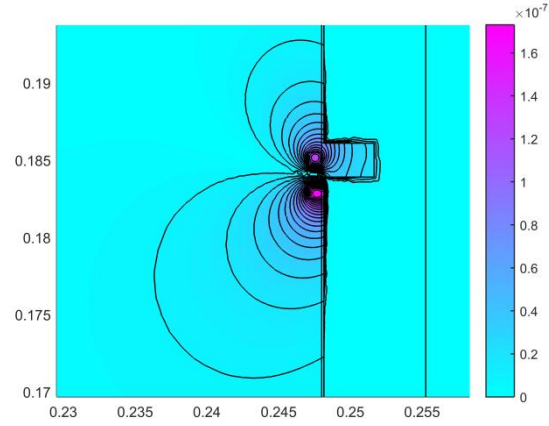


Figure III.20.b. sur le défaut

Figure III.20. Les cartographies des lignes du potentiel vecteur magnétique A au niveau de premier défaut.

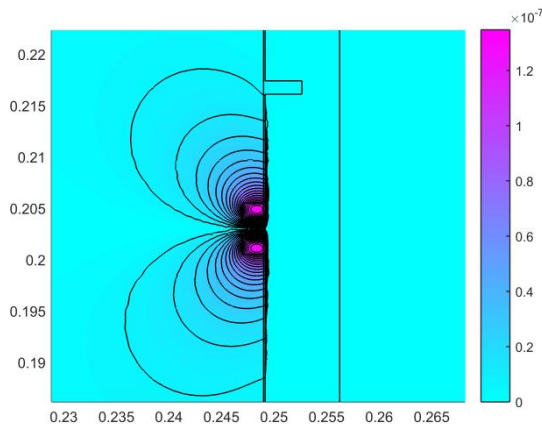


Figure III.21.a. avant le défaut

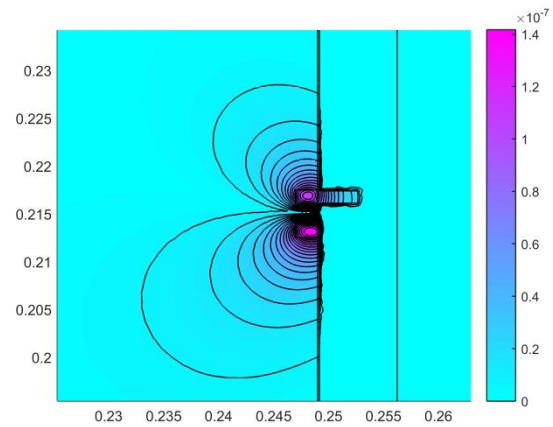


Figure III.21.b. sur le défaut

Figure III.21. Les cartographies des lignes du potentiel vecteur magnétique A au niveau de deuxième défaut.

Nous remarquons aussi, une pénétration très modeste du champ à l'intérieur de tube ceci, est expliquer par l'augmentation de la perméabilité de la pièce.

III. 5. 4 Résultats en termes de variation d'impédance

Avec une fréquence de 50KHz et un lift off de 0.15 mm on a fait varier la valeur de la profondeur de défaut comme suit : 20%, 50%, 70 %, 90% de la profondeur du tube, on a obtenue les résultats montrés dans la figure III.22 :

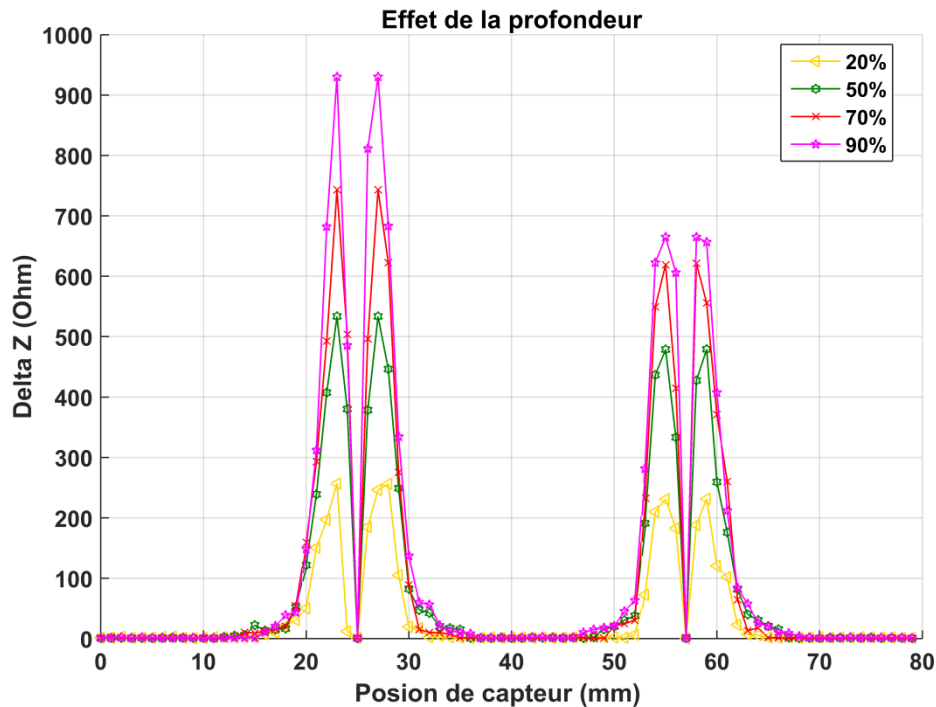


Figure III.22. Variation de l'impédance des deux défauts en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la profondeur.

La figure III.22 montre la variation de l'impédance pour différentes valeurs de la profondeur pour les deux défauts d'une hauteur de 2.2mm et 1.3mm successivement.

La différence entre les courbes est due à la variation de la longueur de ces deux défauts cela signifie que plus les dimensions géométriques du défaut augmentent plus la détection est meilleure.

III. 6 Troisième application : Défaut enfoui et effet de la fréquence

Pour avoir l'effet de la fréquence sur la détection des défauts nous allons utiliser l'algorithme développé pour inspecter des défauts sous cutané.

Nous avons choisi un tube en cuivre comportant un défaut enfoui de 1mm d'épaisseur et une hauteur de 10mm, on a fait un balayage à l'extérieur du tube pour différentes valeurs de la fréquence d'excitation : 100 KHz, 50KHz, 5 KHz.

Les caractéristiques géométriques et physiques de chaque élément du dispositif sont listées dans le tableau III.3 :

Paramètres	Valeurs
Le capteur	
Nombre de conducteurs	150
Rayon intérieur	9.5 mm
Rayon extérieur	11,5 mm
Hauteur	2 mm
Largeur	2 mm
Fréquence	100KHz, 50KHz, 5KHz.
Conductivité électrique	$59.10^{+6} [\Omega.m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4\pi.10^{-7} [H/m]$
La charge	
Hauteur	200 mm
Epaisseur	2 mm
Conductivité électrique	$59.10^{+6} [\Omega.m]^{-1}$
Perméabilité magnétique	$4\pi.10^{-7} [H/m]$

Tableau III.3. Caractéristiques géométriques et physiques du système.

III. 6. 1 Géométrie du système

La géométrie du système simulé est représentée sur la figure III.23 :

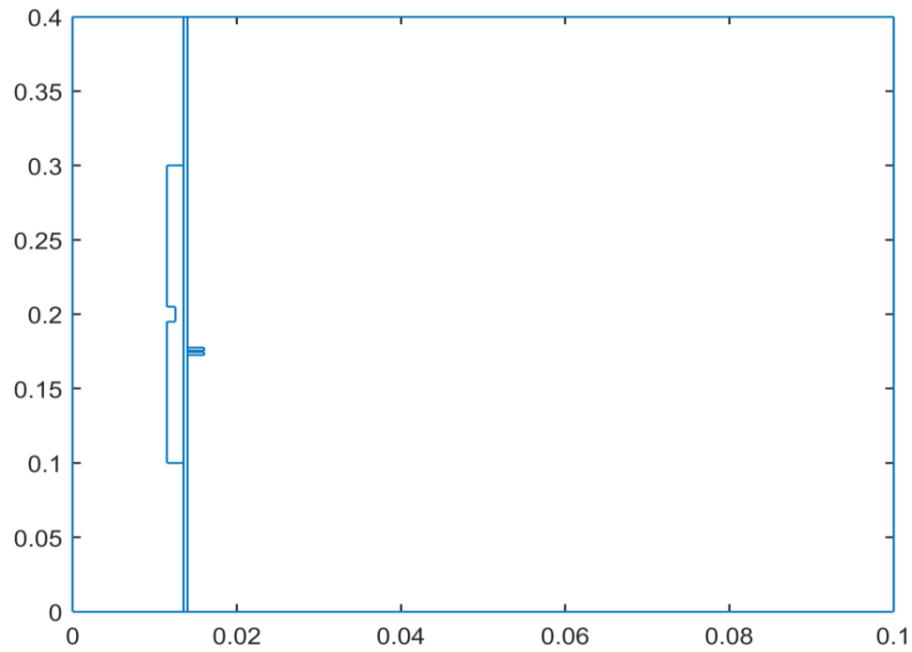


Figure III.23. La géométrie du système.

III. 6. 2 Distributions des lignes de champ magnétique

La distribution des lignes de champ pour différentes positions du capteur est représentée sur les figures ci-dessus :

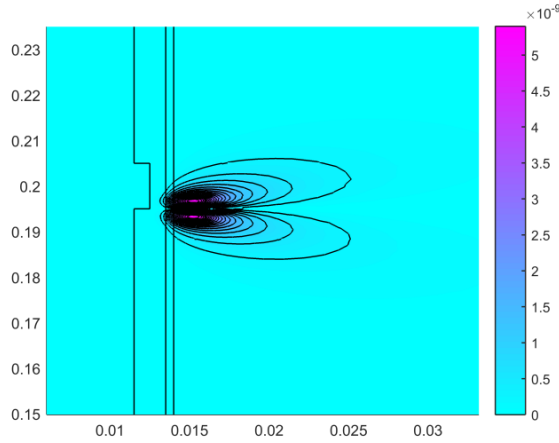


Figure III.24.a. 100 KHz

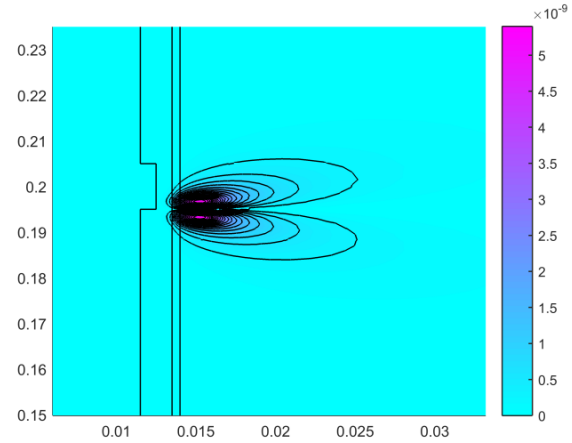


Figure III.24.b. 50 KHz

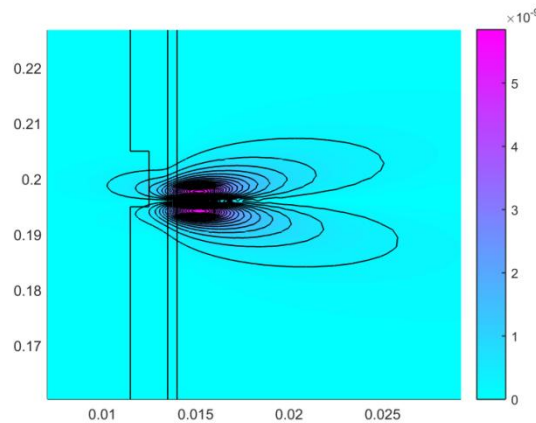


Figure III.24.c.5KHz

Figure III.24. Les cartographies des lignes vecteur magnétique A pour différentes position du capteur.

De la figure III.24 nous constatons aucune déviation des lignes de champ aux fréquences de 100 KHz et de 50 KHz cependant le champ atteint le défaut lorsque la fréquence est baissée à 5 KHz.

III. 6. 3 Résultats en terme variation de l'impédance

La figure III.25 représente la variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la fréquence :

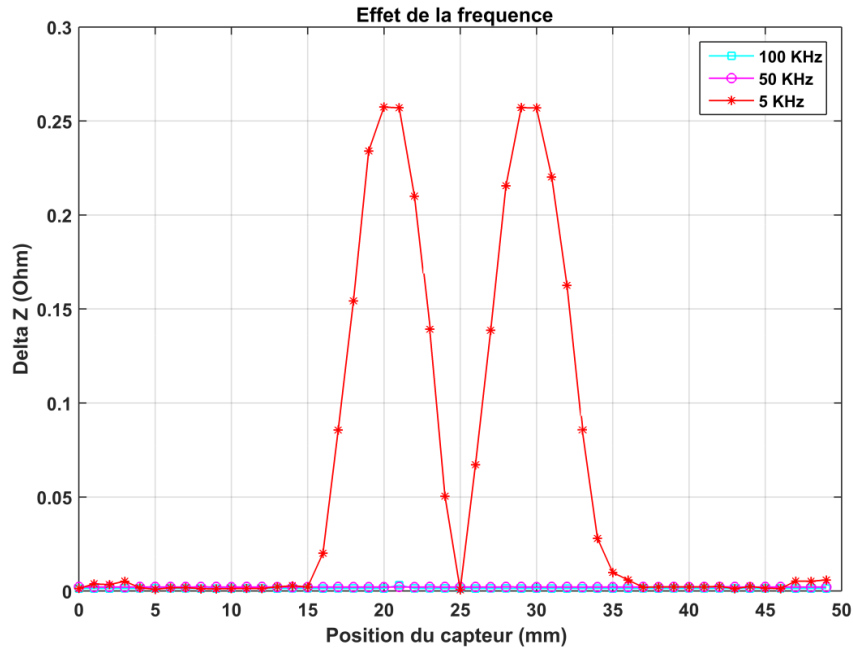


Figure III.25. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la fréquence.

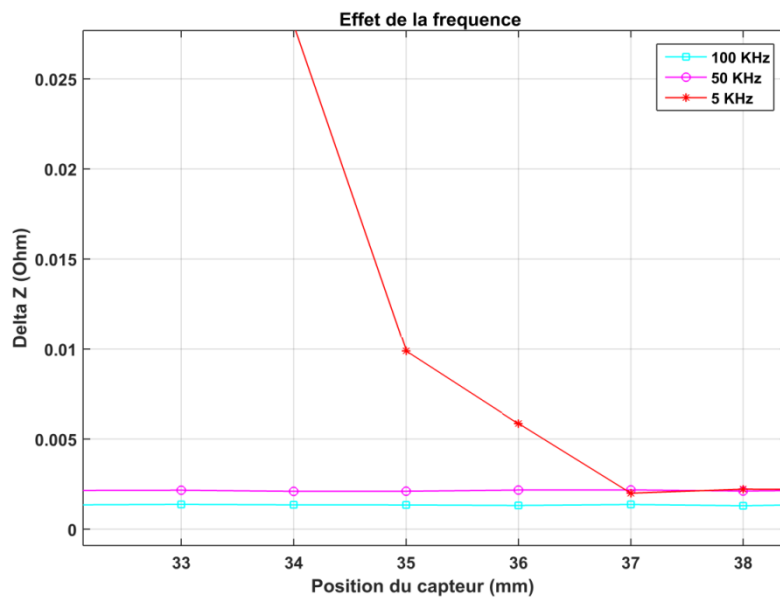


Figure III.26. Un zoom sur les courbes de la variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la fréquence.

Des figure III.25 et III.26, nous remarquons que a la fréquence 100 kHz et 50 kHz il n'y a aucune détection mais à partir de 5 kHz la détection de défaut commence à augmenter.

III. 7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons considéré la simulation numérique d'un système CND-CF axisymétrique comportant un capteur différentiel et une pièce conductrice. Nous avons écrit un code sur MATLAB et nous l'avons sur trois différents tubes pour différents paramètres influents sur le capteur tels que le lift off, la profondeur du défaut et la longueur de ce dernier.

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

Conclusion

générale

Les exigences croissantes en termes de sûreté de fonctionnement d'un produit industriel ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces qui le constituent, conduisant à mettre en place des contrôles qualité de plus en plus poussés.

L'utilisation des courants de Foucault permet un contrôle non destructif fiable, rapides peu coûteux des milieux conducteurs, La simplicité de ce contrôle et sa robustesse d'utilisation en font une technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies.

Avant d'aborder les objectifs de cette étude, une recherche bibliographique sur le contrôle non destructif a été réalisée, La compréhension des phénomènes physiques mis en jeu est l'étape principale de l'élaboration des modèles mathématiques destinés pour la conception de capteurs et d'assurer des contrôles efficaces, pour cela le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation numérique du capteur à courant de Foucault. de même un bref rappel a été consacré aux équations de Maxwell, leurs simplifications relatives aux données géométriques et électromagnétiques et les méthodes générales de résolution du modèle simplifié de Maxwell ainsi que les différentes techniques de calcul d'impédance.

Les applications présentées dans ce mémoire traite de la modélisation par la méthode des éléments finis de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault, un code de calcul sous l'environnement MATLAB a été développé.

Nous avons testé notre code de calcul sur différents type de tubes, L'effet des différents paramètres géométriques et électromagnétiques sur les performances du capteur a été abordé dans les différentes applications, les résultats obtenus concordent bien avec les résultats trouvés dans la littérature.

En termes de perspective, Il serait intéressant de confronter le modèle par une simulation 3D, l'utilisation d'autres logiciels, et de réaliser le dispositif modélisé en utilisant des cartes d'acquisition et les techniques d'intelligence artificielle.

Bibliographies

- [1] H.Brauer, M. Ziolkowski, K.Weise, M. Carlstedt. R.P.Uhlig, M.Zec, «Motion-Induced Eddy Current Techniques for Non destructive Testing and Evaluation», livre, Londre, 2018.
- [2]F. Thollon, «Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques», thèse de doctorat, Lyon, 2007.
- [3]C. Ravat, «Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif», thèse de doctorat, paris, 2008.
- [4] 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.
- [5] J. Blitz, « Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing», livre, 2eme édition, université de Brunel 1997.
- [6] T. Bouchala, «Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les Systèmes de CND par Courants de Foucault», Thèse de Doctorat, Batna, 2014.
- [7] A. Abdou, «Contrôle non Destructif (CND) ; Étude et Modélisation d'un capteur inductif à courant de Foucault», mémoire de magister, Batna, 2018.
- [8] L. Titouah, A. Ziane, « Caractérisation Non Destructive par Courants de Foucault Pulsés d'une rainure par inversion associé à méthode des circuits électriques couplés », mémoire de mastère, Bejaia, 2014.
- [9] D. Rodat, «Simulation opérationnelle en contrôle non destructif», thèse de doctorat, paris, 2018.
- [10]M. Khebbab, «Contribution à l'étude de CND-CF de matériaux hétérogènes faiblement conducteurs à base d'élément finis ", thèse de doctorat, Constantine, 2016.
- [11] H. Zaidi, « Méthodologie pour la modélisation des couches fines et de déplacement en Contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples», thèse de doctorat, paris, 2012.

- [12] H. Mehaddene, «Étude du Contrôle et de l'Évaluation Non-Destructifs dans les Milieux Magnétiques», thèse de doctorat, Tizi Ouzou, 2019.
- [13] A. Assia, « Mise en œuvre d'un modèle analytique numérique pour la détection de défaut à vitesse élevée », Mémoire de magister, Tizi Ouzou, 2015.
- [14] H. Maillou, «contrôle non destructif », Cours, France, 2013.
- [15] M. Hamel, «Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques », mémoire de magister, Tizi Ouzou, 2012.
- [16] C.Zorni, «Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétique de l'expérience au modèle d'interaction», thèse de doctorat, université paris sud, 2012.
- [17] J.Pasard, G.C.Krichanade, «Non destructive test and evaluation of materials», livre, 2eme edition, New Delhi, 2011.
- [18] S.Chaiba, «Détection de défauts profonds dans des Structures Multicouche utilisée dans les actionneurs électriques», thèse de doctorat, SIDI-BEL-ABBES, 2020.
- [19] M. Hamel, «Etude et caractérisation des fissures fines en évaluation Non destructive», thèse de doctorat, Tizi Ouzou, 2018.
- [20] A.Lakhdari, «Modélisation en Volumes Finis de CND des Matériaux Faiblement Conducteurs par Courants de Foucault et de Déplacement » thèse de doctorat, Biskra, 2019.
- [21] T.L. Cung, « Évaluation non-destructive quantitative de structures aéronautiques par la méthode des courants de Foucault », thèse de doctorat École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, France, 2012.
- [22] N. Zemouri, «Etude et Réalisation d'un Système Multi capteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs», mémoire de magister, Tizi Ouzou, 2016.
- [23] J.Prasad, G.C.Krichanade, « non-destructive test and evaluation of materials», livre, 2eme edition, New Delhi, 2011.
- [24] I.Derradji, A.Azouz, « Étude de la détection des défauts dans les structures aéronautiques par capteur à courants de Foucault rotatif » Mémoire de master, Bejaia, 2020.

- [25] A.Bouloudenine, « Etude de dispositifs de CND-CF (Contrôle non destructif par Courants de Foucault) appliqués à la caractérisation de matériaux composites à fibres de carbone », Thèse de Doctorat, Constantine ,2018.
- [26] E. Durand, « Magnétostatique », Masson et Cie, livre, 1968.
- [27] Y.Le Diraison, « Imagerie à courants de Foucault pour l'évaluation non-destructive de structures rivetées aéronautiques », thèse de doctorat, Cachan, 2008.
- [28] S. Zerguini, « Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault », Thèse de doctorat, Constantine.
- [29] D.Dahmani, « Contrôle non destructif application pour matériaux conducteurs », Mémoire de Master, Tizi Ouzou, 2016.
- [30] M.IVANES, R.PERRET, " Eléments de génie électrique - Connaissances de bases et machines statiques", Edition Hermès, Paris, 1994.
- [31] W. Slimane, « Conception d'un Système Multi-Capteurs à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND) », Mémoire de magistère, Batna, 2008.
- [32]A. Merahi, « Etude et réalisation d'un séparateur semi-industriel à courant de Foucault », thèse de doctorat, Sidi Bel Abbès, 2016.
- [33] 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, Tizi Ouzou, 2013.
- [34] N.Benhadda, « Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND) », Thèse de doctorat, Batna, 2015.
- [35]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.
- [36] H. Oudin, «Méthode des éléments finis», cours, Ecole Centrale de Nantes, 2008.

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

Dans ce mémoire, nous présentons une modélisation numérique d'un système de contrôle non destructif par courants de Foucault pour l'inspection des structures tubulaires, l'objectif principal de ce travail est l'élaboration d'un code de calcul par éléments finis implémenté sur logiciel MATLAB pour la modélisation de l'interaction entre un capteur différentiel et un tube comportant un défaut.

Les performances de code de calcul a été testée sur trois différentes pièces conductrices dont l'une est un tube fabriqué par l'entreprise EPE ANABIB.

Mot-clé : CND Contrôle non destructif, CND-CF par courants de Foucault, éléments finis.