

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études De MASTER ACADÉMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Présenté par

Sarah MERZOUKI

Hayet ALI AHMEDI

Thème

Exploitation du logiciel comsol multiphysics pour la détection des défauts présents dans le rotor à cage d'écureuil du moteur asynchrone

Mémoire soutenu publiquement le 23/09/2024 devant le jury composé de :

M BIROUCHE Chafik

MAA, UMMTO, Président

M DICHE Arezki

MAA, UMMTO, Examineur

Mme MOHELLEBI Zehor Epse OUDNI

MCA, UMMTO, Promotrice

Promotion : 2023/2024

Remerciements

Nous commençons par exprimer notre profonde gratitude envers Dieu tout-puissant, pour nous avoir accordé la force et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce travail.

Nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères à Madame OUDNI-MOHELLEBI Zehor, Maître de Conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour la confiance qu'elle nous a témoignée en nous proposant ce sujet de recherche. Sa supervision attentive, son soutien constant tout au long de la rédaction de ce mémoire, ainsi que la riche documentation qu'elle a mise à notre disposition, ont été essentiels à l'aboutissement de ce projet. Nous lui sommes infiniment reconnaissants pour son expertise scientifique, son humanité remarquable et sa capacité à orienter nos recherches avec une grande maîtrise. Sa disponibilité et ses conseils éclairés ont été pour nous une source précieuse d'apprentissage et de guidance, et nous lui en serons éternellement reconnaissants.

Nos remerciements vont également à Monsieur BIROUCHE Chafik, qui a accepté de présider le jury de ce mémoire. C'est pour nous un honneur de bénéficier de son évaluation bienveillante.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à tous les membres du jury, et plus particulièrement à Monsieur DICHE Arezki, pour avoir généreusement accepté d'évaluer notre travail. Leur contribution est une marque d'honneur qui nous touche sincèrement.

Nous n'oublions pas de remercier nos parents, dont les encouragements constants ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de notre parcours.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail. Leur soutien a été inestimable.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents,

Pour tout l'amour, le soutien, et les sacrifices que vous avez faits pour moi. Vous êtes la source de ma force et de ma persévérance. Je vous dois tout.

À mes frères, Moutsa, Malik, Brahim, Samir,

Vous avez toujours été là, à mes côtés, avec vos encouragements et votre amour. Merci pour votre soutien inconditionnel.

À mes sœurs, Taous, Hayet,

Votre tendresse et vos conseils m'ont toujours réconforté. Je vous suis profondément reconnaissant pour tout ce que vous représentez dans ma vie.

À mes neveux, Wassim, Mohamed, Ilyane,

Vous êtes une source de bonheur et de joie. Merci pour votre enthousiasme contagieux qui me rappelle de sourire chaque jour.

À ma petite nièce, Ania,

Ton innocence et ton rire illuminent mon monde. Tu es ma lumière, ma précieuse.

À ma binôme, Hayet,

Merci pour ta patience, ton dévouement et ton travail acharné. Ensemble, nous avons surmonté bien des obstacles, et je ne pouvais rêver d'un meilleur partenaire.

À mes amis, Wiwiz, Sonia, Leticia, Fifi, Lounes, Yahia, Mounir, Hmed, Hamza,

Votre amitié m'a été précieuse tout au long de ce parcours. Merci pour vos rires, vos conseils et votre présence.

À toute la promo 2023/2024,

Nous avons traversé cette aventure ensemble, et chaque instant partagé reste gravé dans ma mémoire. Merci à vous tous pour les moments inoubliables.

Sarah

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*A mes chers parents, pour leur amour et leur soutien
inconditionnel qui m'ont donné la force morale et le bonheur de
me consacrer à mes études*

A mon frère : Raveh pour sa présence et son encouragement

A mes chères sœurs : Tiziri, Nora

*A ma chère cousine : Fahima pour son aide précieuse tout au
long de mon parcours*

*A ma chère binôme : Sarah pour notre complicité et collaboration
précieuse. Ta présence a rendu ce parcours encore plus
enrichissant. Je suis reconnaissante d'avoir eu l'opportunité de
travailler à tes côtés*

A mes amis et camarades : Moumouh, Kenza, Mounir

A tous ceux qui me sont chers et qui m'aiment

A toute la promo 2023 /2024, pour ces moments partagés.

Hayet

Sommaire

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Etat de l'art sur la fiabilité et les différents défauts susceptible de se présenter dans le moteur asynchrone à cage d'écureuil	
INTRODUCTION.....	2
1. La machine asynchrone	3
1.1.Définition de la machine asynchrone	3
2. La construction et fonctionnement de la machine asynchrone.....	4
2.1.Construction	5
2.1.1. Stator de la machine asynchrone	5
2.1.2. Rotor de la machine asynchrone	6
2.2.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	6
3. Bilan des puissances et des pertes	7
3.1.Les différentes puissances	7
3.1.1. La puissance absorbée	7
3.1.2. La puissance électromagnétique.....	7
3.1.3. La puissance mécanique	7
3.1.4. La puissance utile	7
3.2.Les différentes pertes.....	7
3.2.1. Pertes joules statorique.....	7
3.2.2. Pertes joule rotorique	8
3.2.3. Pertes fer.....	8
3.2.4. Pertes par hystérésis	8
3.2.5. Pertes par courants de Foucault.....	8
3.2.6. Les pertes supplémentaires d'extrémités.....	8
3.2.7. Pertes mécaniques	8
3.3.Rendement.....	9
4. Principaux avantages et inconvénients de la machine asynchrone	9
4.1.Les avantages	9
4.2.Les inconvénients	10
5. Types de rotor dans les machines asynchrones	10

Sommaire

5.1.Rotor bobinée	10
5.2.Rotor à cage d'écureuil.....	10
2. Sûreté du fonctionnement du moteur électrique.....	11
2.1.Défaut et défaillance des machines électrique	11
2.1.1. Définition d'un défaut	11
2.1.2. Définition d'une défaillance.....	11
3. Notion de sûreté de fonctionnement.....	11
4. Les défauts affectant la machine asynchrone	12
4.1.Les principaux défauts effectuant le rotor à cage du moteur asynchrone	12
4.2.Les causes des défauts d'un rotor à cage d'écureuil du moteur asynchrone	13
CONCLUSION	14

Chapitre II : Méthodes de détection et d'évolution des défauts

INTRODUCTION.....	15
1. Différents types de défauts	16
1.1. Défauts surfaciques	16
1.1.1. Défauts ponctuels	16
1.1.2. Défauts d'aspect.....	16
1.2.Défauts internes.....	16
1.3.Les symptômes des défauts surfaciques et internes	16
2. Principe de détection des défauts	17
3. Contrôle Non Destructif (CND).....	17
4. Principaux procédés du CND	18
4.1.Méthodes surfaciques.....	18
4.1.1. Les procédés optiques	18
4.1.1.1.Examen visuel	18
4.1.1.1.1. Définition	18
4.1.1.1.2. Principe de l'examen visuel	19
4.1.1.1.3. Domaine d'application	19
4.1.1.1.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par l'Examen Visuel	19
4.1.1.2.Ressuage.....	20
4.1.1.2.1. Définition	20

Sommaire

4.1.1.2.2. Principe de ressuage	20
4.1.1.2.3. Domaine d'application	20
4.1.1.2.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par l'Examen ressuage	21
4.1.2. Procédés électromagnétiques	21
4.1.2.1.Magnétoscopie	21
4.1.2.1.1. Définition	21
4.1.2.1.2. Principe de magnétoscopie	21
4.1.2.1.3. Domaine d'application	22
4.1.2.1.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par magnétoscopie	22
4.1.2.2.Courant de Foucault	22
4.1.2.2.1. Définition	22
4.1.2.2.2. Principe de courant de Foucault	23
4.1.2.2.3. Domaine d'application	23
4.1.2.2.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par courant de Foucault.....	24
4.2.Les méthodes volumiques	24
4.2.1. Ultrasons.....	24
4.2.1.1.Définition	24
4.2.1.2.Principe d'ultrason	25
4.2.1.3.Domaine d'application	25
4.2.1.4.Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par ultrason	25
4.2.2. Radiographie	26
4.2.2.1.Définition	26
4.2.2.2.Principe de radiographie.....	26
4.2.2.3.Domaine d'application	27
4.2.2.4.Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par radiographie	27
4.2.3. La thermographie	27
4.2.3.1.Définition.	27
4.2.3.2.Principe de la thermographie.....	27
4.2.3.3.Domaine d'application	28
4.2.3.4.Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par thermographie.....	28
4.2.4. L'émission acoustique.....	28
4.2.4.1.Définition	28
4.2.4.2.Principe de l'émission acoustique	29

Sommaire

4.2.4.3. Domaine d'application	29
4.2.4.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par l'émission acoustique.....	29
5. La comparaison entre les méthodes de détection	30
6. Evaluation non destructive (END)	31
CONCLUSION	32

Chapitre III : Méthodes numériques et contrôle non destructif par courant de Foucault

INTRODUCTION.....	33
1. Nature du contrôle non destructif par courant de Foucault	34
2. Principe de contrôle par courants de Foucault	34
2.1. L'effet de peau.....	35
2.2. Exemple de pièce contrôlée en Contrôle Non Destructif par courant de Foucault	36
3. Types de capteur à courant de Foucault	37
4. Signaux d'excitations et d'exploitation	37
4.1. Excitation mono – fréquence.....	38
4.2. Excitation multi – fréquence	38
4.3. Excitation pulsé	38
5. La gamme de fréquence	38
5.1. Basse fréquence.....	38
5.2. Moyenne fréquence	38
5.3. Haute fréquence.....	38
6. Limites de contrôle non destructif par courant de Foucault	39
7. Méthodes de résolutions	39
7.1. Méthode analytique	39
7.2. Méthode semi-analytique	40
7.3. Méthode numérique.....	40
7.3.1. La méthode des différences finies	40
7.3.2. Méthode des éléments de frontières	41
7.3.3. Méthode sans maillage	41
7.3.4. Méthode des intégrales de volume	41
7.3.5. Méthode des éléments finis	42
7.3.5.1. Éléments Finis et Logiciels	43

Sommaire

8. Modélisation du dispositif de CND par CF.....	43
8.1.Equations de Maxwell.....	44
9. Interprétation des résultats.....	45
10. Logiciel comsolmultiphysics 5.4.....	45
10.1.Définition du logiciel Comsol multiphysics	45
10.2.Présentation du logiciel Comsol multiphysics 5.4	46
10.3.Les avantages du logiciel COMSOL Multiphysics 5.4.....	47
10.4.Les inconvénients du logiciel COMSOL Multiphysics 5.4	47
10.5.Description de l'interface comsolemultiphysics	47
10.6.Description des différentes étapes de simulation.....	48
10.6.1. Définition d'un modèle (3D, 2D, 1D... etc).....	49
10.6.2. Définir la géométrie.....	49
10.6.3. Attribution des matériaux aux différents domaines.....	50
10.6.4. Choisir la ou les physiques	50
10.6.5. Choix d'une étude.....	51
10.6.6. Le maillage	51
10.6.7. Résoudre et afficher les résultats.....	52
CONCLUSION	53

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

INTRODUCTION.....	54
1. Description du dispositif à analyser	55
2. Dimensionnement de notre dispositif.....	55
3. Configuration du dispositif à contrôler sous COMSOL MULTIPHYSICS 5.4	57
3.1. Création d'un modèle en trois dimensions (3D)	57
3.2. Configuration de notre géométrie en tenant compte des dimensions.....	57
3.3.Ajout des matériaux (Air, Cuivre, Aerometal).....	58
3.4.Configuration de la physique	58
3.5.Configuration de la bobine.....	59
3.6.Configuration du maillage adéquat pour la simulation	60
3.7.Sélection d'un domaine d'étude.....	60
4. Simulation	61

Sommaire

5. Interprétation des résultats de la tension	62
5.1.Tension de la plaque sans défaut.....	62
5.1.1. Interprétation	64
5.2.Tension de la plaque avec défaut	65
5.2.1. Interprétation	67
5.3.Déterminer ΔU	68
5.3.1. Résultat obtenue	68
5.3.2. Interprétation	70
6. Interprétation des résultats de l'impédance	71
6.1.Impédance pour la plaque sans défaut.....	71
6.1.1. Interprétation	73
6.2.Impédance de la plaque avec défaut.....	74
6.2.1. Interprétation	76
6.3. Déterminer ΔZ	76
6.3.1. Résultat obtenue	77
6.3.2. Interprétation	79
CONCLUSION	80
CONCLUSION GENERALE	81
Références	

La liste de figure

La liste de figure

Figure I.1. Moteur asynchrone [2].....	3
Figure I.2. Construction de la machine asynchrone [20]	4
Figure I.3. Stator de la machine asynchrone [9]	5
Figure I.4. Rotor du moteur asynchrone [9].....	6
Figure I.5. Bilan des puissances et des pertes de la machine asynchrone [21]	9
Figure I.6. La réparation du défaut dans la machine asynchrone [16]	12
Figure II.2. Système visuel [28]	19
Figure II.3. Principe de CND par ressuage [29].....	20
Figure II.4. Principe de CND par magnétoscopie [29].....	21
Figure II.5. Principe de CND par courant de Foucault [31].....	23
Figure II.6. Principe de CND par ultrason [33].....	25
Figure II.7. Principe de CND par la radiographie [28]	26
Figure II.8. Principe de CND par thermographie [23]	28
Figure II.9. Principe de CND par l'émission acoustique [25]	29
Figure III.10. Principe de contrôle par courant de Foucault [42].....	35
Figure III.11. L'effet de peau et champs magnétique [46]	36
Figure III.12. Exemple de pièces contrôlé en CND par CF [49].....	36
Figure III.13. Capteur inductif [47].....	37
Figure III.14. Les différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF [51]	42
Figure III.15. Schéma descriptif d'un problème type de CND par CF [51] [23]	43
Figure III.16. Comsol Multiphysics [23] [63].....	46
Figure III.17. Interface du logiciel comsol [63]	48
Figure III.18. Choix d'un modèle du rotor à cage d'écureuil en 3D [23] [63]	49
Figure III.19. Géométrie 3D [23] [63]	49
Figure III.20. Ajouter un matériau [23][63].....	50
Figure III.21. Ajouter une physique	50
Figure III.22. Ajoute une étude	51
Figure III.23. Le maillage.....	51

La liste de figure

Figure III.24. Affichage de tous les résultats de simulation [23]	52
Figure 25. Plaque à contrôler	55
Figure 26. Modèle en 2D de notre géométrie.....	56
Figure 27. Modèle en 3D de notre géométrie.....	56
Figure 28. Modèle vierge en 3D.....	57
Figure 29. Modèle en 2D de notre géométrie.....	57
Figure 30. Matériaux affecté à la géométrie	58
Figure 31. Choix de l'isolant magnétique	58
Figure 32. Paramétrage de la bobine	59
Figure 33. Paramétrage du millage.....	60
Figure 34. Configuration de l'étude	60
Figure 35. Densité de flux magnétique à 100 kHz	61
Figure 36. Valeur de Tension obtenue à 100 kHz.....	61
Figure 37. Valeur de l'impédance obtenue à 100 kHz.....	61
Figure 38. Tension U en fonction du déplacement X à 60 Hz	62
Figure 39. Tension U en fonction du déplacement X à 60 KHz	63
Figure 40. Tension U en fonction du déplacement X à 100KHz	64
Figure 41. Tension U en fonction de déplacement X à 60 Hz avec défaut	65
Figure 42. Tension U en fonction de déplacement X à 60 KHz avec défaut	66
Figure 43. Tension U en fonction du déplacement X à 100 KHz avec défaut.....	67
Figure 44. DeltaU en fonction du déplacement X à 60 Hz	68
Figure 45. DeltaU en fonction du déplacement X à 60 KHz	69
Figure 46. DeltaU en fonction du déplacement X à 100 KHz	70
Figure 47. Impédance Z en fonction du déplacement X à 60 Hz.....	71
Figure 48. Impédance Z en fonction du déplacement X à 60 KHz.....	72
Figure 49. Impédance Z en fonction du déplacement X à 100 KHz	73
Figure 50. Impédance Z en fonction de déplacement X à 60 Hz avec défaut.....	74
Figure 51. Impédance Z en fonction de déplacement X à 60 KHz avec défaut.....	75
Figure 52. Impédance Z en fonction de déplacement X à 100 KHz avec défaut.....	76

La liste de figure

Figure 53. DeltaZ en fonction du déplacement X à 60 Hz.....	77
Figure 54. DeltaZ en fonction du déplacement X à 60 KHz.....	78
Figure 55. DeltaZ en fonction du déplacement X à 100 KHz.....	79

Les abréviations

Les abréviations

U : La tension d'alimentation [V]

I : Le courant absorbé [A]

Φ : Le déphasage entre la tension et le courant [degré]

P_{js} : Les pertes joule statorique [W]

P_{fer} : Les pertes fer statorique [W]

P_e : La puissance active fournie au rotor [W]

P_{jr} : Les pertes joule rotorique [W]

P_{mec} : La puissance mecanique [W]

P_m : Les pertes par le frottement et la création [W]

K_h : Le coefficient des pertes par hystérisais spécifique du matériau

f : La fréquence du réseau [HZ]

B_{max} : L'induction maximale dans l'entrefer [T]

e : l'épaisseur de la tôle magnétique [mm]

v : volume de la tôle magnétique [mm³]

CND : Contrôle Non Destructif

END : Evaluation Non Destructif

CNDF : Contrôle Non Destructif par le courant de Foucault

MAS : Machine Asynchrone

CEN : Comité Européen de Normalisation

ISO : Organisation internationale de normalisation

ω : La fréquence angulaire du courant alternatif.

EDP : équations aux dérivées partielles

Les abréviations

CF : Courant de Foucault

DF : différences finies

E : Champ électrique (V/m)

H : Champ magnétique (A/m)

D : Induction électrique (C/m^2)

B : Induction magnétique (T)

J_c : Densité du courant de conduction (A/m^2)

$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$: Densité de courant du déplacement

ρ : Densité volumique de charge électrique (C/m^3)

ε₀ : la permittivité du vide $1/\mu_0 \text{C}^2 = 10^9/36\pi$ (F/m)

ε : la permittivité électrique $\epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

ε_r : la permittivité relative

C : la vitesse de la lumière $3 \cdot 10^8$ (m/s)

μ₀ : perméabilité magnétique à vide $4\pi 10^{-7}$ (Hm)

μ : perméabilité magnétique $\mu = \mu_0 \mu_r$ (Hm^{-1})

μ_r : perméabilité magnétique relative.

σ : conductivité électrique (S/m)

ΔU : les changements dans la tension en fonction de la position x.

U_{defaut} : tension de la plaque avec défaut en fonction du déplacement.

U : tension de la plaque sans défaut en fonction du déplacement.

Introduction Générale

Les moteurs asynchrones à cage d'écureuil sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leur robustesse, leur fiabilité et leur faible coût de maintenance. Cependant, comme toute machine électrique, ils sont sujets à différents types de défauts pouvant affecter leur fonctionnement et leur durée de vie. Parmi ces défauts, la casse des barres rotoriques est l'un des plus fréquents et des plus dommageables.

La détection précoce de ces défauts est donc cruciale pour éviter les pannes imprévues et réduire les coûts de maintenance. Dans ce contexte, la simulation numérique par éléments finis à l'aide de logiciels comme COMSOL Multiphysics s'avère un outil puissant pour modéliser les phénomènes électromagnétiques et mécaniques dans les machines asynchrones, identifier les signatures des défauts et prévoir leur évolution.

Ce mémoire se propose d'exploiter les capacités de COMSOL Multiphysics pour étudier la fiabilité des moteurs asynchrones à cage d'écureuil et détecter les défauts de casse de barres rotoriques, défauts rupture de barres d'anneau rotoriques et défauts de court-circuit rotoriques.

Il s'articule autour de quatre chapitres :

- Etat de l'art sur la fiabilité et les différents défauts susceptibles de se présenter dans le moteur asynchrone à cage d'écureuil.
- Méthodes de détection et d'évolution des défauts.
- Méthodes numériques et contrôle non destructif par courants de Foucault en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics.
- Simulation et interprétation des résultats

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur la fiabilité et les défectueux
défauts susceptible de se présenter dans le
moteur asynchrone à cage d'écureuil

CHAPITRE I Etat de l'art sur la fiabilité et les différents défauts susceptibles de se présenter dans le moteur asynchrone à cage d'écureuil

INTRODUCTION

La machine asynchrone est un élément essentiel dans le domaine de l'électrotechnique, offrant une conversion efficace d'énergie électrique en énergie mécanique.

La compréhension de la structure du stator et du rotor est importante pour appréhender le fonctionnement des machines électriques. En analysant la manière dont le stator et le rotor interagissent, on peut saisir les principes fondamentaux qui régissent la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique.

De plus, l'analyse des différentes puissances et pertes, comme les pertes joules et fer, permet de quantifier son rendement et son efficacité.

En étudiant les avantages et inconvénients de la machine asynchrone, notamment sa simplicité de construction et ses limitations, on peut évaluer son adéquation avec différentes applications.

En étudiant les types de rotor, comme le rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil, on comprend comment ces variations ont une influence sur les performances de la machine.

Une étude détaillée de la machine asynchrone est essentielle pour optimisée sa maintenance et sa fiabilité.

1. La machine asynchrone

1.1. Définition de la machine asynchrone

La machine asynchrone, également appelée machine à induction, est une machine électrique fonctionnant sous courant alternatif sans liaison directe entre son stator et son rotor. Contrairement aux machines synchrones, sa vitesse de rotation n'est pas nécessairement proportionnelle à la fréquence du courant qui la traverse. Ces machines sont largement utilisées dans divers secteurs tels que le transport, l'industrie et l'électroménager. Initialement conçues comme moteurs, elles sont de plus en plus employées comme génératrices, notamment dans des applications comme les éoliennes. Pour démarrer en courant monophasé, elles requièrent un système spécifique et sont principalement alimentées par des courants triphasés pour des puissances supérieures à quelques kilowatts. La machine asynchrone est appréciée pour sa simplicité de conception, sa facilité d'utilisation et d'entretien, sa robustesse et son coût abordable, en faisant un choix courant pour des puissances allant de quelques watts à plusieurs kilowatts. [1]



Figure I.1. Moteur asynchrone [2]

2. La construction et fonctionnement de la machine asynchrone

Le moteur asynchrone est constitué principalement de deux amateurs coaxiales l'une est fixe l'autre est mobile

- Stator (partie fixe) : Un paquet statorique feuilleté ferromagnétique qui contient des enroulements polyphasés placés dans des encoches, formant le "primaire de la machine".
- Rotor (partie tournante) : Un rotor feuilleté à cage d'écureuil ou équipé d'un bobinage généralement polyphasé avec le même nombre de paires de pôles que le stator, constituant le "secondaire de la machine". [2]



Figure I.2. Construction de la machine asynchrone [20]

2.1.Construction

2.1.1. Stator de la machine asynchrone

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Pour les petites machines, ces tôles sont découpées en une seule pièce, tandis que pour les machines de plus grande puissance, elles sont découpées par sections. Les tôles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Elles sont ensuite assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique. Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être raccordés en étoile ou en triangle sur certains moteurs. Ils peuvent également être insérés de manière imbriquée, ondulée ou encore concentrique. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants, qui peuvent être de différents types selon l'utilisation de la machine asynchrone. Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. [3] [4] [5]



Figure I.3. Stator de la machine asynchrone [9]

2.1.2. Rotor de la machine asynchrone

Le rotor d'une machine asynchrone, également connu sous le nom d'induit et constituant la partie mobile, a pour fonction de diriger le flux provenant du stator et de générer le champ tournant rotorique. Similaire au stator, le rotor est composé d'un ensemble de tôles ferromagnétiques isolées entre elles pour former le circuit magnétique. Il est séparé du stator par un entrefer de faible épaisseur variant généralement entre 0,4 et 2 mm. Le rotor tourne à une vitesse inférieure à celle du champ tournant, contribuant ainsi au fonctionnement de la machine asynchrone. [6]

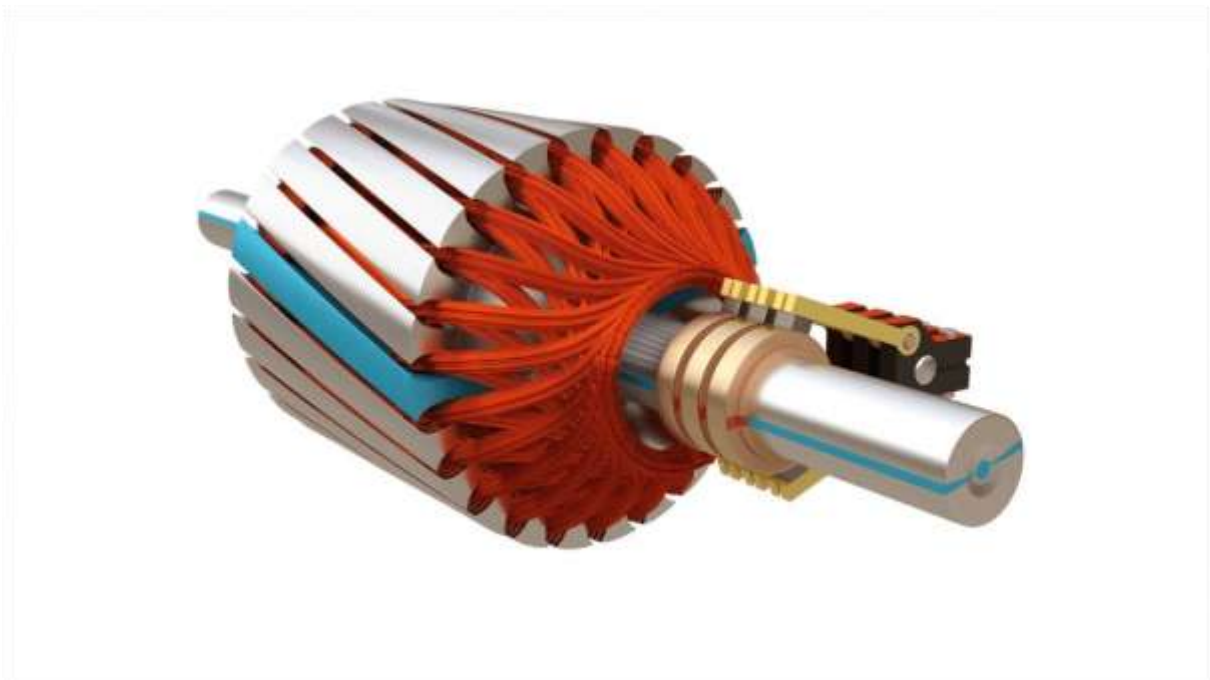


Figure I.4. Rotor du moteur asynchrone [9]

2.2.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Les moteurs asynchrones convertissent l'énergie électrique du courant alternatif en énergie de mécanique de rotation. Lorsque le stator est alimenté par un système triphasé, un champ tournant se crée à la vitesse de synchronisme dans l'entrefer, induisant une force électromotrice dans les enroulements du rotor qui sont court-circuités, générant des courants induits. Conformément à la loi de Lenz, l'action électromagnétique sur le rotor tend à s'opposer à la cause de ces courants. Le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, mais à une vitesse inférieure, tentant de le rattraper sans jamais pouvoir tourner à la même vitesse, c'est pour cela on l'appelle une machine asynchrone. [3] [7]

3. Bilan des puissances et des pertes

Lorsque la tension (U) est appliquée au circuit (y) En faisant passer un courant (i), on peut définir plusieurs puissances.

3.1. Les différentes puissances

3.1.1. La puissance absorbée : Le moteur absorbe la puissance active. [9]

$$P_{ab} = \sqrt{3}.U.I.\cos \varphi \quad [\text{W}] \quad (1)$$

3.1.2. La puissance électromagnétique : La puissance transmise au rotor est fournie par le champ tournant.

$$P_e = P_{ab} - (P_{js} + P_{fer}) \quad [\text{W}] \quad (2)$$

3.1.3. La puissance mécanique : Le rotor d'une machine électrique est plus fort que la puissance électromagnétique qu'un moteur, moins les pertes de puissance causées par les résistances internes du rotor. [9]

$$P_{mec} = P_e - P_{jr} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

3.1.4. La puissance utile : La puissance mécanique disponible pour entrainer la charge est légèrement inférieure à P_{mec} en raison des pertes mécaniques.

$$P_u = P_{mec} - P_m \quad [\text{W}] \quad (4)$$

3.2. Les différentes pertes

Lorsque le moteur tourne, le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique est accompagné de plusieurs pertes qui influencent directement le rendement du moteur.

3.2.1. Pertes joules statorique : Les pertes électriques sont dissipées par effet joules. Les enroulements sont différents en fonction du carré des courants circulant dans ces enroulements. [9]

$$P_{js} = 3.R_s.I_s^2 \quad [\text{W}] \quad (5)$$

3.2.2. Pertes joule rotorique : ils'agit d'un moteur asynchrone à rotor bobiné

$$P_{jr} = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 \text{ [W]} \quad (6)$$

Et dans le cas d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil :

$$P_{jr} = M_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \text{ [W]} \quad (7)$$

3.2.3. Pertes fer : Elles se produisent dans tous les organes du moteur où le flux est différent. Les pertes se concentrent principalement sur le stator, car ils dépendent de la fréquence rotorique qui est faible.

3.2.4. Pertes par hystérésis : Les raisons sont dues au fait que les domaines du métal présentent une certaine constante de temps avant de s'orienter, il existe un retard entre l'application du champ et l'apparition de l'induction.

$$P_H = K_h \cdot f \cdot B_{\max}^2 \text{ [W/KG]} \quad (8)$$

3.2.5. Pertes par courants de Foucault : Les pertes par courant Foucault proviennent des changements temporels dans le flux qui entraînent des changements de masse dans leur masse. Ces f.e.m sont des courants qui se fermentent dans la masse du fer.

$$P_F = K_f \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \cdot e^2 \cdot v \text{ W/Kg]} \quad (9)$$

3.2.6. Les pertes supplémentaires d'extrémités : Les tôles et une partie de la culasse sont endommagées par le flux de fuite des têtes de bobines statoriques, ce qui entraîne des pertes importantes par courant de Foucault.

3.2.7. Pertes mécaniques : Elles sont proportionnelles à la vitesse de rotation, et regroupent les pertes en frottement et en ventilation.

3.3. Rendement

La machine asynchrone a un rendement défini comme la puissance mécanique utile produite par le moteur (P_u) divisée par la puissance électrique absorbée par le moteur (P_a). Le rendement, est indiqué sur la plaque signalétique du moteur. Pour les gros moteurs, le rendement peut atteindre environ 98%. [10]

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad [\%] \quad (10)$$

Le bilan des puissances et des pertes (énergétique) est représenté par le diagramme suivant :

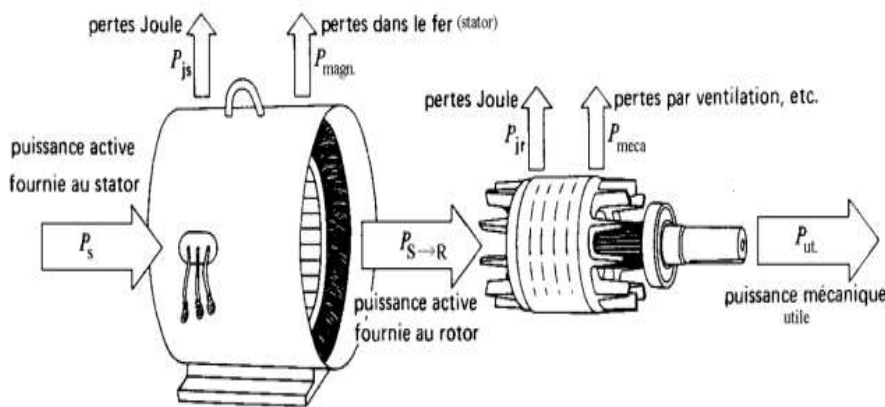


Figure I.5. Bilan des puissances et des pertes de la machine asynchrone [21]

4. Principaux avantages et inconvénients de la machine asynchrone

4.1. Les avantages : il y a plusieurs avantages dans le moteur asynchrone [11]

- Mise en œuvre simple
- Courant de démarrage faible
- Coût de fabrication abordable
- Opération fiable
- Taille compacte
- Efficacité de fonctionnement élevée, surtout avec un convertisseur
- Bonne adaptabilité aux exigences de transmission industrielle
- Possibilité de générer diverses protections pour différents environnements
- Robustesse et faible entretien grâce à l'absence de collecteur

4.2. Les inconvénients : parmi les inconvénients de la machine asynchrone [11]

- Couple de démarrage plus faible
- À-coups lors du démarrage
- La variation de vitesse (nécessite d'un variateur de vitesse)
- Besoin d'un entretien soutenu
- Difficulté à maintenir le couple en cas de variation de charge
- Génération de courants harmoniques avec les procédés de variation de vitesse

5. Types de rotor dans les machines asynchrones

Les différents types de moteurs asynchrones ne sont distincts que par le rotor, d'où il possède deux principaux types de rotor.

5.1. Rotor bobiné

Le rotor bobiné, également appelé rotor à bagues, est un cylindre feuilleté avec des encoches sur sa surface externe. Ces encoches contiennent un enroulement triphasé qui a le même nombre de pôles que le stator. Ce bobinage est connecté en étoile et relié à des bagues situées sur l'arbre de la machine. Trois balais isolés frottent sur ces bagues, permettant de connecter le bobinage du rotor à un rhéostat de démarrage pour le bon démarrage du moteur. [6]

5.2. Rotor à cage d'écureuil

Le rotor à cage d'écureuil est un composant crucial des moteurs asynchrones à cage d'écureuil. Il est composé de barres conductrices en aluminium ou en cuivre encastrées dans sa surface, ce qui constitue une cage d'écureuil. Ce type de rotor permet la production d'un champ magnétique propre, induit par le champ du stator, ce qui entraîne le mouvement du rotor. Les moteurs à cage d'écureuil sont largement employés dans l'industrie en raison de leur simplicité, de leur robustesse et de leur capacité à maintenir une vitesse constante. [7]

2. Sûreté du fonctionnement du moteur électrique

La sûreté de fonctionnement est un enjeu important pour les machines asynchrones et permet d'identifier les défauts

2.1. Défaut et défaillance des machines électrique

2.1.1. **Définition d'un défaut :** Les défauts dans les systèmes industriels ou techniques peuvent être causés par des erreurs de fabrication ou des conditions de fonctionnement inappropriées. Il est important de détecter et corriger les défauts pour garantir la qualité et la fiabilité des produits. [12]

2.1.2. **Définition d'une défaillance :** La défaillance se produit quand une entité ne peut pas remplir une fonction requise. Une fois qu'une entreprise est en panne, elle se sent en panne. La défaillance se réfère au passage d'un état à un autre, par opposition à la panne. [13]

3. Notion de sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est définie comme la capacité d'une entité à effectuer une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions spécifiques. Cette aptitude est étudiée de manière statique et dynamique en anticipant, opérant et expérimentant les systèmes, en tenant compte des probabilités et des conséquences des défaillances. L'approche de la sûreté de fonctionnement est basée sur des concepts fondamentaux qui ont évolué au fil du temps, formant ainsi un vocabulaire spécifique à cette discipline. L'utilisation de ce lexique de base est une introduction cruciale à ce domaine scientifique. [13] [14]

❖ Fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité

La disponibilité est une composante de la sûreté de fonctionnement qui peut se décrire en termes de fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité. [15]

- **Fiabilité :** C'est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation
- **Disponibilité :** C'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite.
- **Maintenabilité :** C'est l'aptitude d'un système à être entre terme « en remise en marche ».

CHAPITRE I Etat de l'art sur la fiabilité et les différents défauts susceptibles de se présenter dans le moteur asynchrone à cage d'écureuil

- Sûreté : C'est l'aptitude d'un système à garantir la sécurité de l'utilisateur et de son environnement.

4. Les défauts affectant la machine asynchrone

Les défauts de la machine asynchrone affectent le stator et le rotor. Ces défauts sont notamment des défauts rotoriques représentent jusqu'à 22% des défauts des machines asynchrones de moyenne puissance. [16]

4.1. Les principaux défauts affectant le rotor à cage du moteur asynchrone

Les différents défauts présents dans le rotor à cage de la machine asynchrone peuvent avoir une influence significative sur sa performance. Parmi ces défauts, on retrouve notamment :

- Rupture des barres du rotor : Le rotor à cage d'écureuil est un des défauts les plus couramment étudiés. Cette rupture peut avoir des conséquences graves, comme des variations des grandeurs rotoriques, des vibrations anormales, et des perturbations dans le fonctionnement global de la machine. [17]
- Défaut de court-circuit rotorique : Les courts-circuits dans le rotor, surtout dans une configuration à cage d'écureuil, peuvent causer des perturbations électromagnétiques et mécaniques, affectant la fiabilité et la durabilité de la machine asynchrone.
- Rupture de portion d'anneau : La rupture de portion d'anneau est un autre défaut rotorique qui peut se manifester de manière prévisible ou intempestive. Ce problème peut être différent et nécessite une détection rapide pour éviter des problèmes. [17]

Ces défauts au niveau du rotor doivent être détectés et diagnostiqués de manière précise pour assurer le bon fonctionnement de la machine asynchrone et éviter des dommages plus importants.

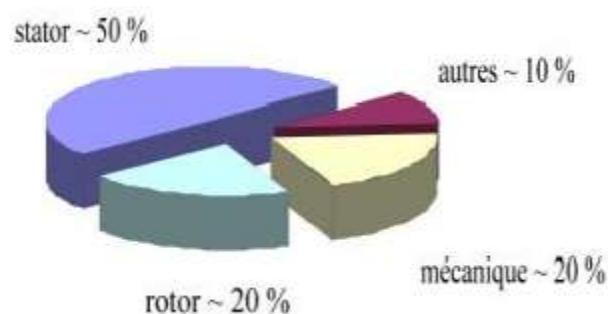


Figure I.6. La réparation du défaut dans la machine asynchrone [16]

4.2. Les causes des défauts d'un rotor à cage d'écureuil du moteur asynchrone

Les causes des défauts rotoriques d'un rotor à cage de la machine asynchrone peuvent être diverses et incluent : [18]

- Rupture des barres rotoriques
- Excentricité
- Effets thermiques et électromagnétiques

En prenant en compte ces causes potentielles, il est possible de mettre en place des stratégies de maintenance préventive pour prévenir ces défauts et assurer la fiabilité de la machine asynchrone à rotor à cage. [19]

En général, les défauts rotoriques sont significatifs et nécessitent des techniques de diagnostic adaptées de préférence non destructif pour assurer la maintenance prédictive des machines asynchrones.

CONCLUSION

En conclusion, la machine asynchrone à cage d'écureuil est un élément essentiel de l'électrotechnique, largement utilisé pour sa facilité d'installation, son bon rendement et sa fiabilité. Son choix dépend de plusieurs critères normalisés tels que la puissance nominale, le service nominal et la tension d'alimentation. Les défauts rotoriques, tels que la rupture de barres, peuvent impacter son fonctionnement, soulignant l'importance de la maintenance préventive. La sûreté de fonctionnement de ces machines est cruciale, nécessitant une surveillance et un diagnostic réguliers pour assurer leur bon état de marche et garantir leur fiabilité dans divers secteurs industriels.

CHAPITRE II :

Méthodes de détection et d'évaluation des défauts

INTRODUCTION

Le chapitre représente un panorama complet des méthodes de la détection et l'évaluation des défauts dans les matériaux et les structures sont des éléments fondamentaux pour garantir la sécurité et la fiabilité des produits. Ces défauts, qu'ils soient surfaciques tels que les défauts ponctuels et les défauts d'aspect, ou internes, peuvent présenter des symptômes variés nécessitant des techniques de contrôle non destructif (CND) adaptées pour les identifier et les caractériser. Le CND regroupe un ensemble de méthodes qui permettent de détecter et de caractériser les défauts sans altérer l'objet inspecté, se divisant en méthodes surfaciques comme l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie et les courants de Foucault, et en méthodes volumiques telles que les ultrasons, la radiographie, la thermographie et l'émission acoustique [24] [37].

Chaque technique de CND présente des avantages et des inconvénients en termes de domaine d'application, de sensibilité et de coût, ce qui influence le choix de la méthode en fonction des caractéristiques du matériau, de la géométrie de la pièce et du type de défaut recherché. Au-delà de la simple détection, l'évaluation non destructive (END) permet de caractériser la nature, la taille et la gravité des défauts détectés, facilitant ainsi la prise de décisions appropriées en matière de maintenance ou de réparation. Cette étape revêt une importance cruciale pour garantir l'intégrité et la sécurité des structures et des équipements [37] [38].

1. Différents types de défauts

Il est possible de trouver un grand nombre de défauts. Cependant, en fonction de la nature de la situation. Nous pouvons présumer les défauts de la pièce, du matériau, de la manière dont elle a été travaillée ou traitée. Les essais non destructifs peuvent permettre de déceler [22].

1.1. Défauts surfaciques

Les objets, qui peuvent être observés directement mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes [23].

1.1.1. Défauts ponctuels : Les pièces peuvent avoir des changements dans la structure, comme les criques, les piqûres, les fissures et les craquelures. Cela est dangereux pour le plan technologique et peut causer une rupture de la pièce. Ils nécessitent des méthodes non destructives sensibles comme le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons pour leur détection [24].

1.1.2. Défauts d'aspect : Les défauts se manifestent par des paramètres géométriques ou physiques qui rendent le produit inutilisable. Le contrôle visuel est possible pour ces défauts, mais des contrôles optiques automatiques sont requis pour les remplacer [24].

1.2. Défauts internes

Les imperfections internes sont des différences de natures, de formes et de dimensions diverses, situées dans le volume du matériau ou de la pièce. Dans le secteur des métaux, il peut s'agir de fissures internes, de porosités, de bulles d'air ou d'autres incrustations qui peuvent nuire à la qualité des pièces moulées, forgées, laminées ou soudées. Dans d'autres cas, il suffit de constater la présence d'un corps étranger dans une enceinte ou dans un produit emballé [23] [24].

1.3. Les symptômes des défauts surfaciques et internes

- Augmentation de la température
- Vibrations anormales
- Bruit anormal
- Fluctuations de performance
- Augmentation de la consommation d'énergie

2. Principe de détection des défauts

Les méthodes de CND se basent sur la perturbation d'un champ physique par un défaut dans le matériau. Différents phénomènes physiques peuvent être utilisés, comme l'atténuation des rayons X, la réflexion des ultrasons, ou la perturbation des courants de Foucault [25].

Le principe est d'exciter le matériau avec une source d'énergie (mécanique, électromagnétique, thermique) et d'analyser la réponse pour détecter d'éventuelles hétérogénéités. Cela permet de contrôler l'homogénéité du matériau, contrairement à une simple mesure d'une grandeur physique [25].

Le processus de détection de défauts comporte généralement deux étapes:

- La détection et la localisation du défaut, pour déterminer s'il y a un défaut et où il se situe
- L'identification du défaut, pour estimer son type et son ampleur

3. Contrôle Non Destructif (CND)

Le Contrôle Non Destructif (CND), appelé également Essais Non Destructif ou Evaluation Non Destructive (END), est une méthode d'inspection qui consiste à évaluer l'intégrité et la santé d'un matériau ou d'une pièce sans altérer ni détruire l'élément contrôlé. Cette approche, qui est utilisée dans divers secteurs industriels tels que l'aéronautique, l'aérospatiale, le nucléaire, la pétrochimie, ou l'automobile, vise à détecter les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi, ou la conformité d'une pièce à son usage prévu. Ces contrôles peuvent être effectués en fabrication, en réception de pièces, ou en service pour suivre l'évolution des défauts au fil du temps. Les procédures de CND sont basées sur des normes internationales (CEN ou ISO) et nécessitent souvent la certification du personnel de contrôle pour garantir l'objectivité, la reproductibilité et la fiabilité des techniques utilisées [26].

4. Principaux procédés du CND

Les méthodes de contrôle non destructif sont nombreuses, mais les plus souvent employés peuvent être classés en deux familles principales en fonction de leur type d'anomalie est recherchée dans la pièce [25].

❖ Méthodes surfaciques :

- Examen visuel.
- Ressuage.
- Magnétoscopie.
- Courant de Foucault.

❖ Méthodes volumiques :

- Ultrasons.
- Radiographie.

Il existe d'autres méthodes qui sont plus globales et en temps réel. En particulier :

- La thermographie.
- L'émission acoustique.

4.1.Méthodes surfaciques

Les méthodes surfaciques se divisent en deux procédés distincts : les procédés optiques et les procédés électromagnétiques [25].

4.1.1. Les procédés optiques : Ils sont repartis comme suit :

4.1.1.1.Examen visuel

4.1.1.1.1. Définition

Est une méthode de contrôle non destructif qui consiste à observer un objet ou un matériau directement pour détecter des anomalies ou des défauts visibles à l'œil nu. C'est la première méthode employée en CND qui permet un premier diagnostic avant d'aller plus loin avec d'autres tests ou contrôles non destructifs.

Elle est simple, rapide et économique, mais peut présenter des difficultés en termes de résolution de la vue et de qualité de la surface de la pièce observée [27].

4.1.1.1.2. Principe de l'examen visuel

L'examen visuel permet de déterminer l'absence d'anomalies visibles, comme des fissures, soufflures, manques de fusion ou jeux dans un mécanisme. Le contrôle visuel est généralement composé de plusieurs étapes : vérifier la conformité de la pièce au plan de fabrication et détection d'anomalies dans la pièce et/ou son fonctionnement. L'examen visuel nécessite de bonnes conditions d'éclairage (minimum 350 lux) et une distance d'observation raisonnable (< 60 cm) sous une incidence de 30° pour être efficace. Il est possible d'utiliser des instruments comme une loupe, un éclairage mobile, un pied à coulisse ou un gabarit pour faciliter l'observation. Lorsque la zone à contrôler ne peut pas être accessible directement, on utilise un endoscope [27].



(a) Miroir d'inspection (b) Système visuel

Figure II.1. Système visuel [28]

4.1.1.1.3. Domaine d'application

Cela est applicable pour tous les matériaux et pour les défauts débouchant.

4.1.1.1.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par l'Examen Visuel

❖ Les avantages

- Souplesse de mise en œuvre
- Ce type de contrôle beaucoup plus efficace, rapide et fiable.

❖ Les inconvénients

- Un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface.
- Définition incomplète des critères.
- Complémentaire à une autre technique.

4.1.1.2. Ressuage

4.1.1.2.1. Définition

Le ressuage est une technique de contrôle non destructif qui se base sur les mouillages et la capillarité d'une substance liquide sur un corps solide. Ce procédé est composé d'un liquide traceur qui pénètre dans les défauts qui se trouvent à la surface d'une pièce, ce qui permet de les révéler [26].

Le ressuage est effectué en deux étapes principales :

- L'application du liquide pénétrant sur la surface de la pièce.
- L'application d'un révélateur.

4.1.1.2.2. Principe de ressuage

Le contrôle par ressuage est une méthode d'inspection qui consiste à appliquer un liquide d'imprégnation colorée ou fluorescente sur une surface propre et sèche. Le liquide pénètre en capillarité dans les défauts de la surface, avec une vitesse et une étendue de pénétration influencées par des facteurs tels que la tension superficielle, la cohésion du liquide, l'adsorption, la viscosité, le temps, la température et l'état de surface du matériau. Après une courte pénétration, l'excès de liquide est éliminé par lavage. La surface est ensuite séchée et recouverte d'un révélateur qui attire le liquide retenu dans les défauts, ce qui les permet de les détecter visuellement [22].

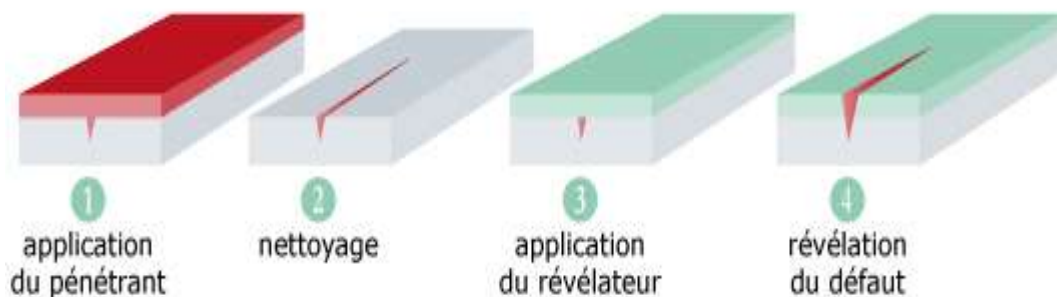


Figure II.2. Principe de CND par ressuage [29]

4.1.1.2.3. Domaine d'application

Le contrôle par ressuage est utilisé dans de nombreux domaines industriels, tant en fabrication qu'en maintenance, pour détecter les défauts débouchant en surface, quel que soit la nature du matériau.

4.1.1.2.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par l'Examen ressuage

❖ Les avantages

- Simplicité de mise en œuvre.
- Prix modique dans une application manuelle.
- Localisation des défauts de surface et appréciation de leur longueur.
- Possibilité d'automatisation.

❖ Les inconvénients

- Pas de détection de défauts internes.
Pas d'appréciation de la profondeur des défauts.
- Interprétation délicate.
- Non utilisables sur les matériaux poreux.

4.1.2. Procédés électromagnétiques

4.1.2.1. Magnétoscopie

4.1.2.1.1. Définition

La magnétoscopie est une technique de contrôle non-destructif, complémentaire du ressuage qui permet de détecter des défauts de surface, débouchant ou légèrement sous-jacents. Elle est plus rapide et fiable, mais ne s'applique que sur les matériaux ferromagnétiques [27].

4.1.2.1.2. Principe de magnétoscopie

Son principe est fondé sur l'aimantation de la pièce à contrôler, ce qui crée des fuites magnétiques au niveau des défauts. Ces fuites sont alors mises en évidence par l'utilisation de particules magnétiques colorées ou fluorescentes [27].

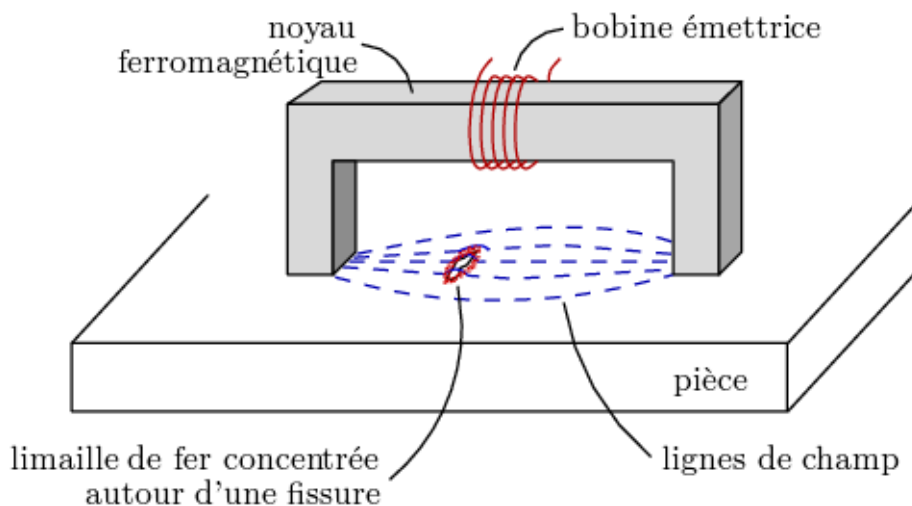


Figure II.3. Principe de CND par magnétoscopie [29]

4.1.2.1.3. Domaine d'application

C'est une méthode largement utilisée dans de nombreux secteurs comme l'aéronautique, l'automobile, le nucléaire, la mécanique, etc.

4.1.2.1.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par magnétoscopie

❖ Les avantages

- Simplicité de mise en œuvre.
- Localisation des défauts de surface ou légèrement sous-jacents et appréciation de leur longueur.
- Possibilité d'automatisation.

❖ Les inconvénients

- Pas de détection de défauts internes.
- Pas d'appréciation de la profondeur des défauts.
- Interprétation délicate.
- Utilisables que sur les matériaux ferromagnétiques.
- Sensibilité fonction de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction.

4.1.2.2. Courant de Foucault

4.1.2.2.1. Définition

Les contrôles non destructifs (CND) par courants de Foucault sont une méthode essentielle pour évaluer les matériaux conducteurs sans les endommager. Cette technique consiste à créer des courants induits dans le matériau contrôlé, appelés courants de Foucault, qui circulent localement et perturbent en présence d'anomalies, ce qui permet de détecter des défauts de surface ou sous-jacents. Les courants de Foucault fournissent une grande précision et une sensibilité élevée pour détecter des défauts de petite taille et de faible profondeur [30].

4.1.2.2.2. Principe de courant de Foucault

Lorsqu'un corps conducteur est placé dans un champ magnétique variable, des courants induits se développent en circuit fermé à l'intérieur de celui-ci : c'est les courants de Foucault. Les éléments circulent localement dans le matériau et ont une distribution qui dépend du champ magnétique, de la géométrie et des caractéristiques électriques et magnétiques de la pièce.

En cas de défaut, les courants de Foucault sont perturbés, ce qui entraîne une variation de l'impédance du capteur qui dépend de la nature et de la dimension de l'anomalie. L'analyse de cette variation d'impédance fournit les indications nécessaires au contrôle [26] [30].

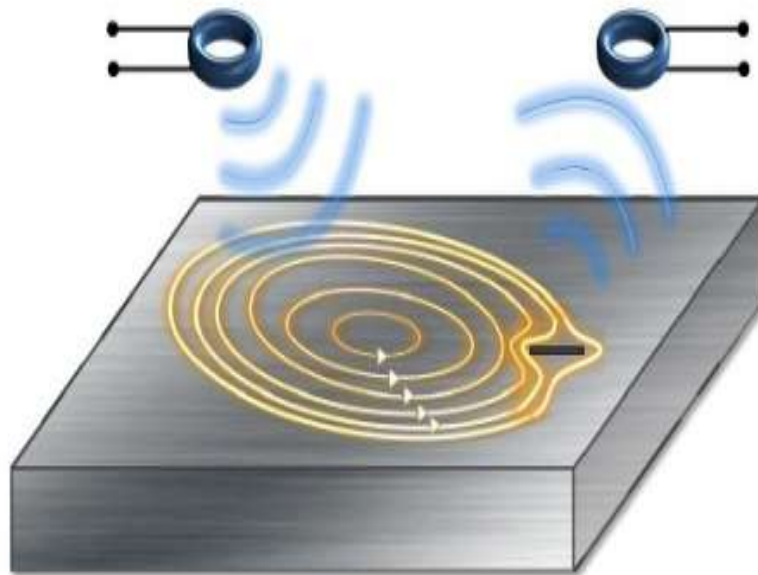


Figure II.4. Principe de CND par courant de Foucault [31]

4.1.2.2.3. Domaine d'application

Les contrôles par courants de Foucault sont largement utilisés dans divers secteurs industriels tels que l'aéronautique, spatiale, automobile, ferroviaire, nucléaire, énergie, mécanique, métallurgie, pétrochimie et sidérurgie [30].

4.1.2.2.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par courant de Foucault**❖ Les avantages**

- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement enfuis (quelques mm) dans tout matériau conducteur.
- Rapidité de balayage et de détection.
- La simplicité de leur mise en œuvre.
- Aucune préparation particulière de la surface contrôlée.
- Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplant.
- Aucune nuisance ou pollution.
- Traitement informatique avec stockage des données de modélisation.

❖ Les inconvénients

- Sensibilité aux variations de perméabilité magnétique du matériau
- Efficacité limitée aux matériaux conducteurs
- Incapacité à détecter les défauts parallèles à la surface
- Nécessité d'interpréter les signaux pour distinguer les indications pertinentes
- Difficulté pour inspecter de grandes surfaces
- Coût potentiellement élevé des équipements avancés
- Nécessité d'un nettoyage rigoureux des surfaces avant inspection
- Profondeur de détection des fissures limitée

4.2. Les méthodes volumiques : Ils sont repartis comme suit**4.2.1. Ultrasons****4.2.1.1. Définition**

Les ultrasons représentent des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le contrôle non destructif par ultrasons est une méthode qui permet de caractériser l'épaisseur ou la structure interne d'une pièce à l'aide d'ondes acoustiques à haute fréquence, généralement entre 500 kHz et 20 MHz [25] [32].

4.2.1.2. Principe d'ultrason

Le principe est d'émettre et de propager une onde ultrasonore dans la pièce à inspecter, puis de recueillir et d'analyser les échos engendrés par réflexion ou diffraction sur les obstacles rencontrés par l'onde, comme les défauts, les interfaces entre matériaux ou la surface de la pièce [32].

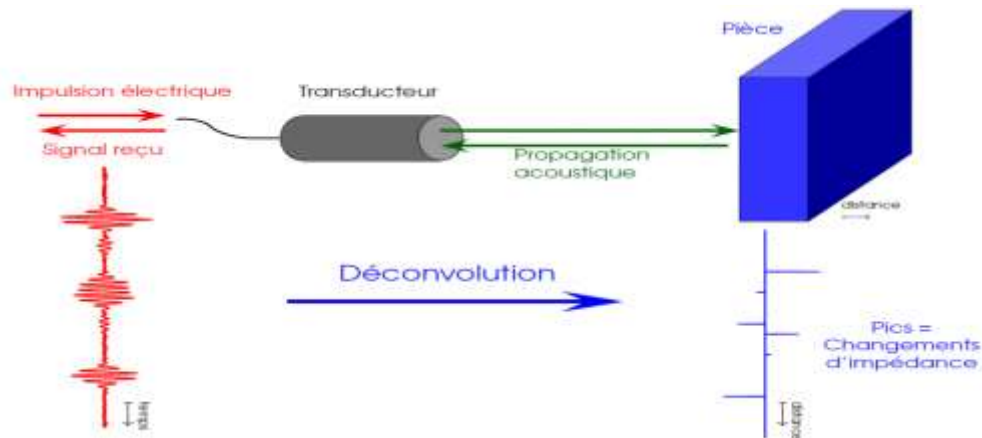


Figure II.5. Principe de CND par ultrason [33]

4.2.1.3. Domaine d'application

Les ultrasons ont de nombreuses applications dans divers domaines industriels tels que le contrôle des assemblages boulonnés, la surveillance de la corrosion, l'identification des métaux et la caractérisation des polymères en production [34].

4.2.1.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par ultrason

❖ Les avantages

- Méthode de contrôle rapide.
- Adaptée aux zones d'accès difficiles.
- Détection, localisation et dimensionnement des défauts.
- Acquisition et analyse en temps réel.
- Haute sensibilité de détection des défauts.
- Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge).
- Sauvegarde numérique des données.

❖ Les inconvénients

- Une méthode qui nécessite une expérience un très haut niveau de technicité ;
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- Inspection limitée par la complexité de la forme de la pièce contrôlée.

4.2.2. Radiographie**4.2.2.1. Définition**

La radiographie est une méthode de contrôle non destructif (CND) qui permet d'obtenir une image de la densité de matière d'un objet en le traversant par un rayonnement électromagnétique, généralement des rayons X ou gamma. Cette technique permet de visualiser les manques de matière du volume de l'objet contrôlé sur une image à deux dimensions, ce qui permet d'identifier des discontinuités planes en fonction de l'épaisseur traversée [26].

4.2.2.2. Principe de radiographie

La radiographie est similaire à celle du domaine médical. La méthode permet de profiler l'absorption par la matière des rayonnements électromagnétiques ionisants. L'examen de la structure ou de l'état interne d'un objet par radiographie consiste à le traverser par un rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde (rayon X ou rayon γ) et accueillir le rayonnement résiduel non absorbé sur un récepteur approprié ; un film dans la plupart des cas [25].

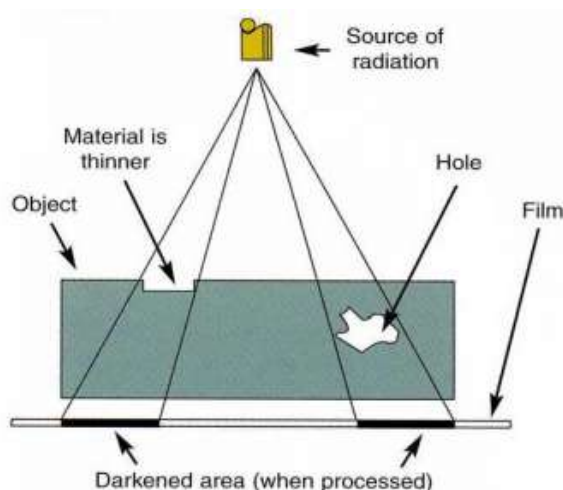


Figure II.6. Principe de CND par la radiographie [28]

4.2.2.3. Domaine d'application

La radiographie en CND est un outil qui permet de contrôler la santé interne des pièces, de détecter des défauts de fabrication, d'évaluer la corrosion, et d'assurer la conformité et la qualité des composants dans divers secteurs industriels critiques [22].

4.2.2.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par radiographie

❖ Les avantages

- Facilité de repérage des discontinuités internes
- Résultats rapides
- Bonne sensibilité de dépistage des défauts
- Archivage des données sur film

❖ Les inconvénients

- Exposition aux rayonnements
- Précision diagnostique limitée
- Agents de contraste
- Dose élevées en radioscopie
- Impassibilité de biopsie

4.2.3. La thermographie

4.2.3.1. Définition

La thermographie est un contrôle non destructif permettant de repérer et d'étudier les changements de température à la surface d'un matériau ou d'une structure [22].

4.2.3.2. Principe de la thermographie

Le principe est basé sur l'excitation du matériau par l'apport d'énergie (mécanique, photonique, chauffage par induction, air chaud, etc.) qui permet une diffusion de la chaleur dans le matériau. Les défauts ou hétérogénéités présentes dans le matériau pourraient perturber la diffusion thermique, ce qui se traduit par des variations de température détectables en surface à l'aide d'une caméra infrarouge [22].

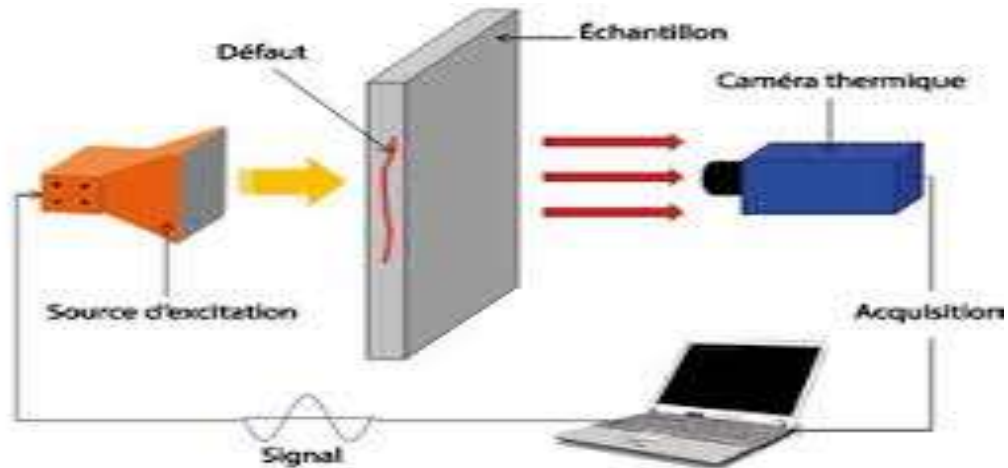


Figure II.7. Principe de CND par thermographie [23]

4.2.3.3. Domaine d'application

La thermographie active en contrôle non destructif est souvent utilisée pour détecter les défauts de surface et les subsurfaciques sur des matériaux métalliques et composites.

4.2.3.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par thermographie

❖ Les avantages

- Possibilité d'effectuer un contrôle sans contact et automatisable
- Détection rapide des défauts en temps réel
- Contrôle possible sur des épaisseurs importantes
- Pas besoin d'accès à toutes les faces de la pièce

❖ Les inconvénients

- la lenteur du contrôle.
- le coût de l'investissement et la difficulté de l'étape d'interprétation des résultats.

4.2.4. L'émission acoustique

4.2.4.1. Définition

L'émission acoustique est un processus de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à une sollicitation. En d'autres termes, l'émission acoustique est comparable à l'activité sismique enregistrée sur la terre. Les signaux acoustiques sont détectés et analysés afin d'obtenir des informations sur la présence de défauts [25].

4.2.4.2. Principe de l'émission acoustique

L'émission acoustique a des caractéristiques différentes par rapport aux techniques ultrasonores classiques. Contrairement aux ultrasons où la source est contrôlée par l'opérateur, l'émission acoustique n'est pas contrôlée et survient de manière spontanée. Par exemple, elle peut être causée par une fissure. L'émission acoustique est une méthode de contrôle qui ne se détruit pas en temps réel et qui suit les changements dans les matériaux. Elle permet de détecter des erreurs en temps réel et de suivre leur progression, ce qui la rend utile pour la détection de défauts invisibles à d'autres techniques de CND [35].



Figure II.8. Principe de CND par l'émission acoustique [25]

4.2.4.3. Domaine d'application

La principale application industrielle de l'émission acoustique est le contrôle des équipements métalliques sous pression et des réservoirs de stockage

4.2.4.4. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par l'émission acoustique

❖ Les avantages

- Contrôle global de la structure (volumique)
- Détection et localisation des défauts évolutifs en temps réel
- Suivi dans le temps de l'évolution des défauts
- Prévention des risques industriels
- Contrôle des structures en service
- Sensibilité élevée pour détecter des phénomènes invisibles aux autres techniques CND comme la fissuration
- Analyse en temps réel de ce qui se passe dans la matière

❖ Les inconvénients

- Nécessité de compétences variées en physique des matériaux, instrumentation, traitement du signal, analyse et traitement des données
- Interprétation des résultats plus complexe que pour les matériaux métalliques du fait de la diversité des sources d'endommagement dans les composites
- Nombre limité d'acteurs spécialisés en EA freinant le développement de procédures standardisées
- Coût de l'investissement dans les systèmes d'émission acoustique

5. La comparaison entre les méthodes de détection

Les méthodes de détection des défauts dans le Contrôle Non Destructif (CND) peuvent être classées en deux catégories : les procédés volumiques et les procédés surfaciques. Les techniques volumiques, comme les ultrasons, la radiographie, la thermographie et l'émission acoustique, permettent de repérer les imperfections internes, débouchantes ou non. Les méthodes surfaciques telles que le ressuage, la magnétoscopie, l'examen visuel et les courants de Foucault sont idéales pour repérer les défauts endommagés ou proches de la surface.

Il est crucial de comparer ces différentes méthodes pour choisir la méthode la plus appropriée. Les ultrasons sont sensibles et précis pour détecter des défauts dans le volume des pièces, tandis que le ressuage est efficace pour détecter les défauts en surface. Les défauts internes sont visualisés en 2D par la radiographie, mais ils sont exposés aux rayonnements. La thermographie active offre de bonnes perspectives pour les défauts de surface et subsurface qui requièrent une excitation thermique. Les courants de Foucault sont distingués par leur capacité à détecter des défauts près de la surface, tels que les fissures, les inclusions ou les variations de densité, offrant une détection précise des anomalies superficielles [22] [36].

6. Evaluation non destructive (END)

La caractérisation quantitative des défauts est importante pour comprendre la mécanique de rupture des matériaux. De nombreuses méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) détectent les défauts surfaciques ou débouchant en surface, ainsi que les fissures cachées dans les matériaux diélectriques, mais ces méthodes ne permettent pas toujours d'accéder aux dimensions réelles des défauts. C'est pourquoi il y a une forte demande pour une caractérisation plus quantitative que qualitative des défauts.

L'évaluation non destructive se distingue du CND en fournissant une caractérisation plus quantitative. Le CND a pour objectif de détecter et de localiser les défauts, tandis que l'END, en tant que problème inverse, est partie des résultats du CND pour récupérer des paramètres tels que la forme et les dimensions des défauts. Cette approche, utilisant des méthodes d'inversion comme les réseaux de neurones avec la rétro propagation, permet d'obtenir une compréhension plus approfondie des défauts et de leurs caractéristiques, ce qui contribue à une meilleure évaluation de l'intégrité des matériaux [25].

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a abordé les différentes méthodes de détection et d'évaluation des défauts, soulignant leur importance cruciale pour garantir la sécurité et la fiabilité des produits. Les techniques de contrôle non destructif (CND) et d'évaluation non destructive (END) offrent des outils précieux pour détecter et caractériser les défauts, ce qui permet de prendre des décisions éclairées pour la maintenance et la gestion de la qualité des systèmes techniques [39].

Chapitre III

Méthodes numériques et contrôle non destructif par courant de Foucault

Introduction

Le contrôle non destructif par courant de Foucault (CND) est une méthode de contrôle non destructive qui utilise des courants induits dans des matériaux conducteurs électriques pour détecter des défauts superficiels et sous-surface. Le contrôle non destructif est basé sur les principales méthodes du Contrôle Non Destructif (CND) et en particulier celle des courants de Foucault, ensuite donner les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par courants de Foucault,

Le principe de contrôle repose sur l'effet de peau, qui fait que les courants induits tendent à se rassembler à la surface des matériaux conducteurs électriques. Les capteurs employés peuvent être standard ou adaptés sur mesure, et les signaux d'excitation et d'exploitation peuvent être mono-fréquence, multi-fréquence ou pulsés, avec une gamme de fréquences allant des basses fréquences aux hautes fréquences selon la profondeur de détection souhaitée. Les limites incluent la nécessité d'un matériau conducteur et la résolution des défauts détectables. Les méthodes de résolution utilisées sont analytiques, semi-analytiques ou numériques. La méthode numérique est utilisée pour résoudre les problèmes de contrôle, et des logiciels tels que COMSOL Multiphysics offrent une plus grande souplesse de paramétrage des configurations à modéliser et des approximations à prendre en compte [49] [64].

1. Nature du contrôle non destructif par courant de Foucault

Le contrôle non destructif par courants de Foucault est une méthode de contrôle qui consiste à créer des courants dans un matériau conducteur en présence d'un champ magnétique variable. Ces courants, appelés courants de Foucault, se déplacent localement dans le matériau et sont perturbés par la présence d'anomalies, ce qui modifie l'impédance du capteur. L'analyse de cette variation d'impédance permet de détecter les défauts et de les endommager [40].

2. Principe de contrôle par courants de Foucault

Le contrôle par courants de Foucault repose sur l'induction électromagnétique. Des courants induits, appelés courants de Foucault, sont créés par un champ magnétique variable appliqué à un matériau conducteur et circulent dans des boucles perpendiculaires au flux magnétique [41] [42].

Ces courants de Foucault produisent leur propre champ magnétique, qui est opposé au champ d'excitation, selon la loi de Lenz. Cela permet de réduire l'impédance du bobinage inducteur [42].

En cas de défaut, la circulation des courants de Foucault est perturbée, ce qui provoque une variation locale de conductivité qui se traduit par une variation d'impédance détectable [42].

L'analyse de la variation d'impédance, présentée dans un diagramme, permet de détecter et de caractériser les défauts sans endommager le matériau [41].

Les courants de Foucault sont également utilisés pour évaluer la conductivité des matériaux et l'épaisseur des revêtements [41][42].

L'intensité et la répartition des courants de Foucault dépendent de certains paramètres tels que [42] :

- La conductivité électrique.
- Perméabilité magnétique.
- Fréquence de travail.
- Couplage entre le conducteur (échantillon à contrôler) et le capteur.
- Défauts dont la présence se manifestent à travers une combinaison complexe des paramètres précédents.

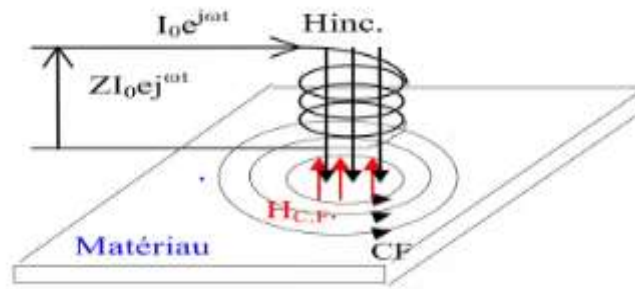


Figure III.1. Principe de contrôle par courant de Foucault [42]

2.1.L'effet de peau

L'effet de peau, également connu sous le nom d'effet pelliculaire ou effet Kelvin, est un phénomène électromagnétique qui se produit dans les conducteurs électriques parcourus par un courant alternatif. Les courants de Foucault se rassemblent souvent à la surface des corps conducteurs, ce qui est appelé 'effet de peau'. Cela signifie que les courants se concentrent près de la surface, ce qui rend le conducteur plus résistant aux hautes fréquences. [43]

L'épaisseur de peau est une distance à partir de la surface d'un matériau conducteur où l'intensité des courants de Foucault diminue d'un facteur $1/e$ (environ 37%) par rapport à la surface. Cette épaisseur est fonction de la fréquence d'inspection, Elle dépend de la fréquence (f), de la perméabilité magnétique (μ) et de la conductivité électrique (σ) du matériau selon la formule suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

ω est la fréquence angulaire du courant alternatif.

L'effet de peau augmente la résistance du conducteur à haute fréquence car seulement une partie de la section transversale est utilisée par le courant. Cela entraîne des pertes de joule plus importantes. Pour éviter cela, on peut utiliser des conducteurs creux, des câbles fin et des matériaux qui peuvent causer un problème [43] [44] [45].

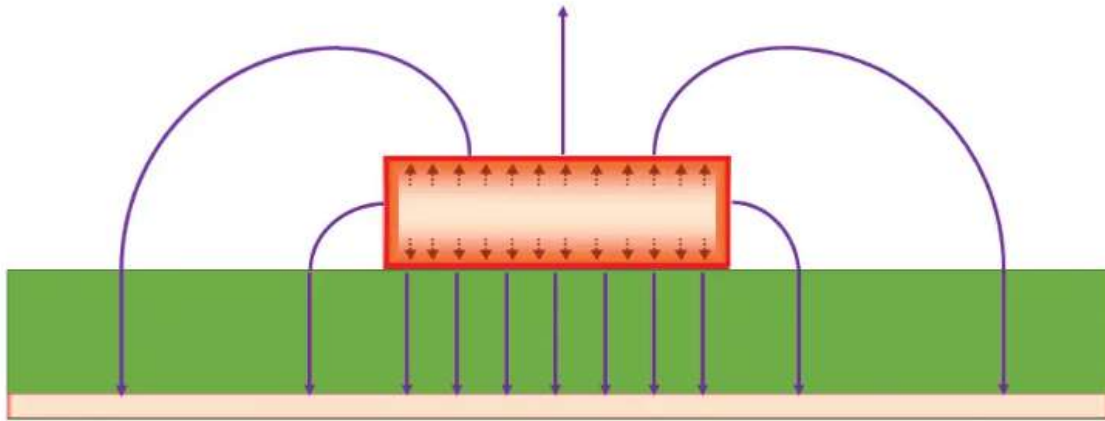


Figure III.2. L'effet de peau et champs magnétique [46]

2.2.Exemple de pièce contrôlée en Contrôle Non Destructif par courant de Foucault

Le contrôle non destructif (CND) est utilisé dans divers domaines industriels pour vérifier l'intégrité des structures. Il existe trois types de contrôles : en production, en qualité et en maintenance. Le contrôle en fabrication permet de détecter les défauts pendant la production des pièces. Le contrôle de qualité permet de vérifier que les pièces sont en conformité avec les spécifications techniques après leur fabrication. Le contrôle en maintenance permet de détecter les défauts présents dans des pièces critiques [45] [47] [48].



Figure III.3. Exemple de pièces contrôlé en CND par CF [49]

3. Types de capteur à courant de Foucault

Les capteurs utilisés pour un contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault sont des capteurs inductifs, on appelle capteur le dispositif effectuant un contrôle non destructif. En fonction du type, ce capteur peut être composé d'un ou plusieurs éléments qui surveillent les variations de l'impédance du champ magnétique créé par un courant de haute fréquence. Le type de capteur utilisé en contrôle non destructif (CND) par courant de Foucault est généralement un capteur à bobine unique ou multi-bobines. Cette sonde contient un fil de cuivre qui est excité par un courant électrique, ce qui produit un champ magnétique oscillant à la même fréquence que le courant circulant dans le fil. Lorsqu'elle est placée à proximité d'un matériau conducteur, des courants opposés aux courants du fil de cuivre sont induits dans le matériau, appelés courants de Foucault. Les défauts dans le matériau ont un impact négatif sur les trajets de ces courants de Foucault, ce qui permet de les détecter à l'aide de la sonde. Les capteurs à courants de Foucault peuvent être utilisés pour déterminer l'épaisseur de matériaux, détecter des défauts superficiels et des fissures à faible profondeur, ainsi que pour mesurer la conductivité des matériaux [40] [45] [47].

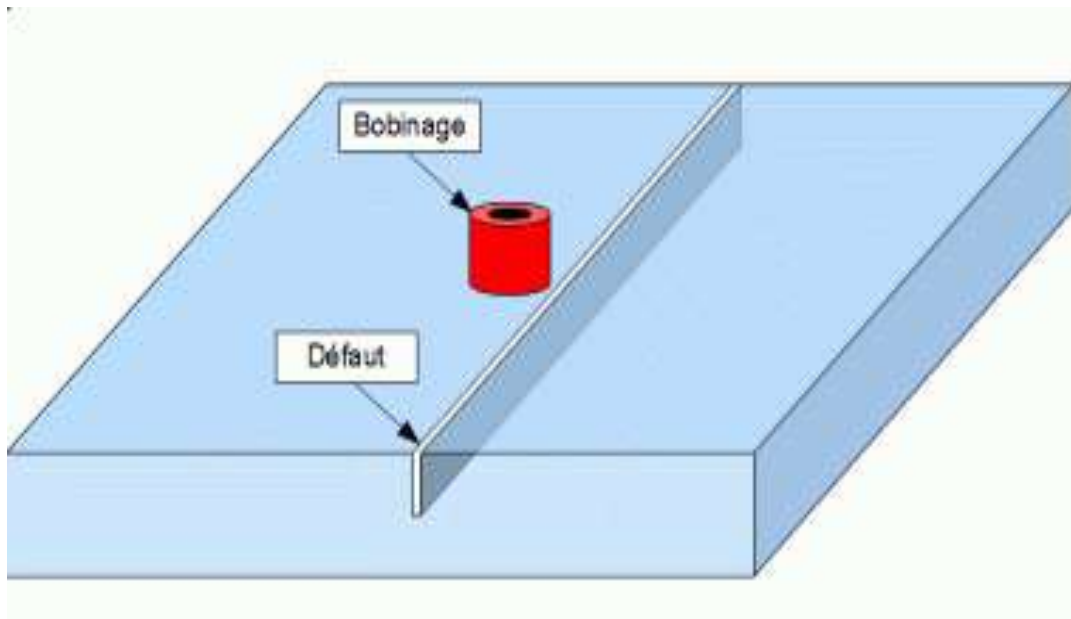


Figure III.4. Capteur inductif [47]

4. Signaux d'excitations et d'exploitation

On distingue trois types d'excitation pour les bobines des capteurs en contrôle non destructif en courant de Foucault [40] :

- Excitation mono fréquence.
- Excitation multifréquence.
- Excitation pulsée.

4.1. Excitation mono fréquence

Ce mode utilise un champ magnétique variable à une fréquence unique afin d'insérer des courants de Foucault dans le matériau. Cela permet de détecter des défauts longs tels que la corrosion, l'usure ou l'érosion [40].

4.2. Excitation multifréquence

Ce mode utilise des champs magnétiques variable à plusieurs fréquences pour inciter des courants de Foucault dans le matériau. Cela permet d'identifier des défauts à différentes tailles et profondeurs [40].

4.3. Excitation pulsée

Ce mode est basé sur des impulsions de courant pour exciter les courants de Foucault dans le matériau. Cela est très utile pour détecter des défauts superficiels et pour améliorer la sensibilité de la méthode [40].

Les impulsions peuvent être utilisées pour examiner une gamme de profondeurs simultanément, ce qui fournit plus d'informations sur le profil du défaut.

5. La gamme de fréquence

La fréquence utilisée dans le contrôle non destructif par courants de Foucault dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature des matériaux à contrôler, la profondeur de pénétration souhaitée et les caractéristiques des défauts à détecter. Voici une liste des fréquences utilisées en général [23] [40] [42] :

5.1. Basse fréquence : est de 30-300 kHz, qui permet de contrôler le volume et de mesure de conductivité dans les matériaux non ferromagnétiques. Cette gamme permet une plus grande pénétration [23].

5.2. Moyenne fréquence : est de 300 kHz à 1 MHz est utilisée pour contrôler des matériaux ferromagnétiques et pour des applications où une balance entre profondeur de pénétration et sensibilité est nécessaire [40].

5.3. Haute fréquence : est de 1 MHz à 30 MHz, réservée aux applications nécessitant une grande sensibilité et une faible profondeur de pénétration, telles que les contrôles en surface [42].

Ces plages de fréquences permettent de manipuler les matériaux sans les détruire, grâce aux courants de Foucault permettant de détecter les imperfections et les propriétés électriques, magnétiques et géométriques des échantillons [42].

6. Limites de contrôle non destructif par courant de Foucault

Malgré son efficacité dans la détection de défauts superficiels dans des pièces de géométrie simple, Le contrôle non destructif par courants de Foucault présente certaines limites :

- Sensibilité à la géométrie de la pièce
- Profondeur de pénétration limitée
- Influence des propriétés électromagnétiques du matériau
- Complexité de mise en œuvre

Pour optimiser son utilisation, il est nécessaire de bien maîtriser les paramètres d'excitation [40].

7. Méthodes de résolutions

La compréhension des phénomènes physiques présents dans le domaine du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF) permet d'élaborer un modèle mathématique qui permettra de prédire la réponse de la sonde en fonction des paramètres de la cible, qui doivent être connus. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell, qui sont des équations aux dérivées partielles (EDP) qui décrivent les phénomènes électromagnétiques impliqués dans le CND par CF. La méthode de résolution des équations différentielles utilise des techniques analytiques et numériques afin de trouver des solutions précises et efficaces [50].

Voici les différents types de méthodes utilisées :

7.1.Méthode analytique

La méthode de résolution analytique est un processus qui utilise des équations analytiques pour résoudre des problèmes mathématiques. Elle est fréquemment utilisée pour des problèmes linéaires ou non-linéaires, où des hypothèses simplifiées peuvent être faites. Cependant, elle est limitée par la complexité des problèmes et la non-linéarité. Pour résoudre des problèmes plus complexes, elle est souvent combinée avec d'autres méthodes, comme la résolution numérique. La résolution analytique des équations de Maxwell offre l'avantage de fournir des résultats précis rapidement. Cependant, la complexité des configurations de CND par CF rend souvent une solution analytique impossible à obtenir, soit très complexe et coûteuse en ressources de calcul. Dans ce cas, il est possible de recourir à des méthodes numériques pour résoudre les problèmes [51] [52].

7.2.Méthode semi-analytique

La méthode semi-analytique est un processus qui combine des approches analytiques et numériques pour résoudre des problèmes mathématiques complexes. Elle utilise des équations analytiques pour décrire les phénomènes physiques et des techniques numériques pour résoudre les équations obtenues. Cette méthode hybride permet d'obtenir des expressions analytiques faciles à résoudre et de réduire le temps de simulation tout en ayant des résultats assez proches de la réalité [23] [53].

- Méthode des circuits couplés.
- Méthode de multi-transformateurs.

7.3.Méthode numérique

La résolution analytique des équations de Maxwell est avantageuse car elle permet d'obtenir des résultats très précis. Toutefois, la complexité des configurations de CND par CF rend souvent impossible d'obtenir une solution analytique. Une alternative est de mettre en œuvre des méthodes numériques permettant d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées, comprenant des géométries quelconques de pièces, de défauts et de capteurs [50].

Les méthodes numériques utilisées pour résoudre les équations de Maxwell sont les suivantes :

7.3.1. La méthode des différences finies

La méthode des différences finies (DF) est une technique numérique historiquement la première qui résout numériquement les équations aux dérivées partielles (EDP) Elle a pour but de définir le domaine étudié par un maillage rectangulaire de points, puis d'approximative les dérivées partielles par des différences divisées entre les valeurs de l'inconnue en ces points voisins. Cette méthode empirique, bien que simple à mettre en œuvre, permet de résoudre efficacement les problèmes de physique qui impliquent des EDP, comme les équations de la chaleur, des ondes ou des fluides. En dépit d'une erreur de discrétisation et d'une complexité accrue pour des géométries complexes, la méthode des différences finies est une approche numérique puissante grâce à ses principes de consistance, stabilité et convergence [54] [55].

7.3.2. Méthode des éléments de frontières

Elle s'appuie sur la méthode plus générale des équations intégrales. Les équations qui ont des dérivées partielles sont remplacées par des équations intégrales. Les fonctions de Green, noyaux de ces intégrales, représentent une réponse ponctuelle (réponse impulsionnelle) dans le contexte de la géométrie étudiée. L'incertitude de leur détermination limite l'application de cette méthode à des géométries canoniques. Cette méthode n'est applicable que si les courants de Foucault se développent sur une profondeur qui peut être considérée comme négligeable devant les autres dimensions (excitation à haute fréquence, profondeur de pénétration nulle) [50].

7.3.3. Méthode sans maillage

La méthode numérique sans maillage est une approche qui permet de résoudre des problèmes physiques sans avoir à utiliser de maillage. Elle a pour objectif de reconstruire une fonction continue à partir des valeurs discrètes prises par cette fonction sur un nuage de points du domaine. Cette méthode est particulièrement efficace pour les problèmes qui nécessitent des grandes déformations ou des frontières libres, où le maillage traditionnel peut être difficile à gérer [56] [57].

Les méthodes sans maillage peuvent être divisées en deux catégories principales

- Méthodes utilisant le principe des noyaux régularisant
- Méthodes utilisant le principe des moindres carrés mobiles

7.3.4. Méthode des intégrales de volume

La méthode des intégrales de volumes repose sur la résolution des équations intégrales. Une fois que les fonctions de Green correspondant à la géométrie étudiée sont obtenues, les champs électrique et magnétique dus à l'interaction capteur-cible sont déterminés par convolution entre ces fonctions de Green et les sources électriques ou magnétiques mises en jeu. En pratique, ces équations intégrales sont discrétisées par la méthode des moments : les champs et les grandeurs constitutives électromagnétiques sont supposés constants dans des cellules élémentaires cubiques. La résolution numérique s'effectue alors par inversion itérative de ce système d'équations algébriques [51].

7.3.5. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode qui permet de modéliser les phénomènes électromagnétiques en raison de son capacité à s'adapter à des géométries complexes et à prendre en compte les non-linéarités. Les éléments finis, comme la méthode des différences finies (MDF), permettent d'améliorer considérablement la précision des calculs en utilisant différents types de fonctions d'interpolation pour représenter les variables. L'objectif est de diviser l'espace en régions élémentaires (éléments) dans lesquelles la grandeur recherchée, généralement le potentiel magnétique, est approximative par un polynôme. Le maillage peut être composé de triangles ou de rectangles aux sommets sur lesquels les valeurs de l'inconnue sont calculées, supposant une variation linéaire dans chaque élément.

La méthode des éléments finis est puissante, mais elle présente certains inconvénients. Elle entraîne des systèmes algébriques de grande taille, nécessitant une grande capacité mémoire et des temps de calcul élevés. De plus, sa mise en œuvre est difficile et requiert des compétences spécifiques [58].

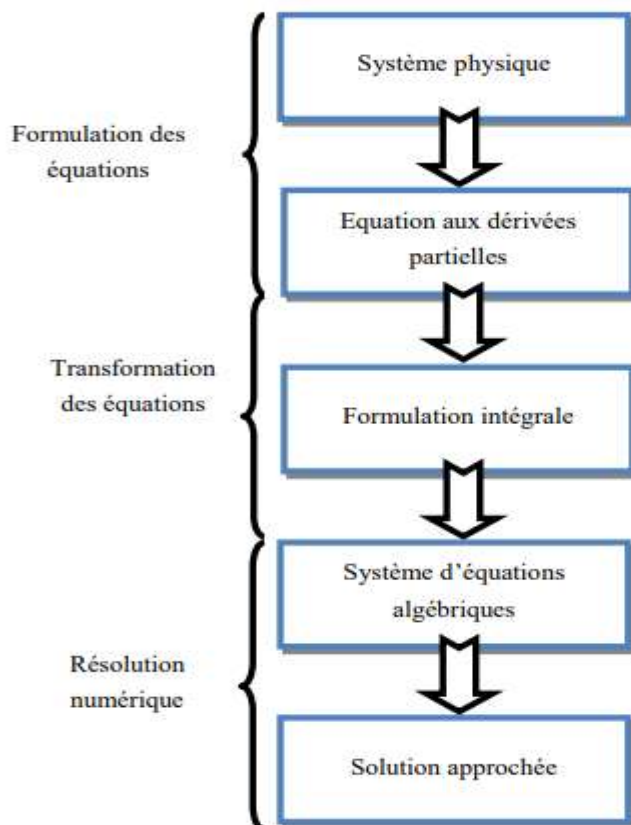


Figure III.5. Les différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF [51]

7.3.5.1.Éléments Finis et Logiciels

Les logiciels d'éléments finis sont composés d'algorithmes pour résoudre les équations aux dérivées partielles. Les maillages permettent de déterminer un problème en créant un maillage, puis de calculer les déplacements et les efforts à chaque nœud du maillage. Les résultats peuvent être utilisés pour analyser et améliorer les performances des systèmes physiques [59].

Donc la méthode des éléments finis est une technique numérique puissante qui permet de résoudre des équations aux dérivées partielles et de simuler le comportement de systèmes physiques complexes.

8. Modélisation du dispositif de CND par CF

La géométrie du système de CND par CF, qui est régie par les équations de Maxwell en régime linéaire harmonique, peut être décomposée en quatre zones [51] [23].

Zone 1 : zone inductrice (bobine, fil,...) dans lesquelles circulent des courants sources J_s .

Zone 2 : zone conductrice, caractérisée par une perméabilité μ et une conductivité δ , qui le siège des courants induits.

Zone 3 : zone d'espace environnant où il n'y a ni courant induit ni courant source, c'est de l'air. La totalité de cette géométrie forme le domaine d'étude Ω de frontière Γ_L .

Zone 4 : zone conductrice magnétique (noyau en ferrite,...) pour canaliser le flux magnétiques.

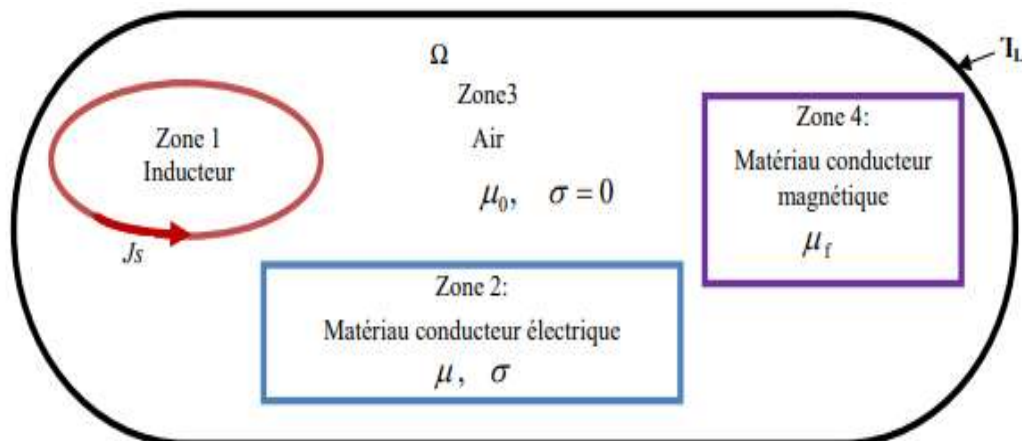


Figure III.6. Schéma descriptif d'un problème type de CND par CF [51] [23]

Ces quatre zones sont importantes pour comprendre le fonctionnement du système de CND par CF et pour concevoir des capteurs efficaces pour détecter les défauts dans les matériaux.

8.1. Equation de Maxwell

Les équations de Maxwell sont un ensemble de quatre équations fondamentales qui décrivent les phénomènes électromagnétiques. Cette synthèse des travaux réalisés dans le XIXe siècle a été formulée par James Clerk Maxwell (1831-1879) vers 1875. Ces équations lient entre eux les champs électrique et magnétique et sont la base de résolution de tout problème électromagnétique [51] [60].

Voici une analyse détaillée des équations de Maxwell :

Equation de Maxwell-Gauss	$div \vec{D} = \rho$	$\iint_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\iiint_v \rho d\tau}{\epsilon_0}$	Elle exprime que la divergence du champ électrique \vec{E} est proportionnelle à la densité volumique de charges ρ , avec ϵ_0 la permittivité du vide
Equation de Maxwell- Faraday	$rot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad Ou \begin{cases} e = \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} \neq 0 \\ et \phi = \iint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \end{cases}$	Elle traduit le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday, en reliant le rotationnel du champ électrique aux variations temporelles du champ magnétique \vec{B}
Équation de Maxwell-Flux	$div \vec{B} = 0$	$\phi = \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	Elle exprime que le champ magnétique est un champ sans source, autrement dit que le flux magnétique à travers une surface fermée est toujours nul
Équation de Maxwell-Ampère	$rot \vec{H} = \vec{J}_s + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\begin{cases} \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \iint_s (\vec{j} + \vec{j}_d) \cdot d\vec{S} \\ D'ou \vec{j}_d = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{cases}$	Elle généralise la loi d'Ampère en ajoutant un terme de courant de déplacement $\epsilon_0(\partial \rightarrow E)/\partial t$ qui assure la cohérence de l'édifice unifié

Ces équations relient le champ électrique E (ou l'induction électrique D) et le champ magnétique H (ou l'induction magnétique B) à leurs sources (densité de charge ρ et densité de courant J) par l'intermédiaire des trois paramètres : la conductivité électrique σ , la perméabilité magnétique μ , la permittivité électrique ε . Ces équations sont donc essentielles pour comprendre et modéliser le comportement du champ électromagnétique dans divers domaines [51] [60].

9. Interprétation des résultats

Les résultats du contrôle par courants de Foucault sont obtenus indirectement en connaissant la valeur de l'impédance du capteur au cours du contrôle. Le diagramme d'impédance, qui représente la partie inductive en fonction de la partie résistive, est un outil essentiel pour l'interprétation des résultats. L'évolution de ce diagramme dépend de la fréquence et de la présence de défauts, ce qui permet de détecter et de caractériser les anomalies. L'évaluation des résultats du CND-CF nécessite une analyse approfondie des signaux produits et des paramètres mesurés, en prenant en compte les spécifications de qualité établies et les risques associés aux défauts détectés [61].

10. Logiciel Comsol Multiphysics 5.4

10.1. Définition du logiciel Comsol Multiphysics

Le logiciel COMSOL Multiphysics est un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis (FEM). Il permet de modéliser différents phénomènes physiques tels que l'électrostatique, l'écoulement de fluides ou la déformation des matériaux. Initialement développé comme une toolbox de Matlab, il a maintenant son propre environnement graphique pour le dessin des géométries et l'affichage des résultats en post-traitement. La version 5.4, sortie en 2018, apporte de nouvelles fonctionnalités comme COMSOL Compiler, qui permet de compiler les applications créées avec l'Application Builder en fichiers exécutable, sans restriction de licence. Le Composite Materials Module est un module d'addition pour modéliser les matériaux composites. Les améliorations de stabilité et de performance sont disponibles dans COMSOL Multiphysics, COMSOL Server, et COMSOL Client. De nouvelles fonctionnalités de base incluent des paramètres multiples, des couleurs pour les sélections, et des exportations en glTF, entre autres. La dernière version de COMSOL 5.4 est la 388, sortie en juin 2019. Elle résout de manière discrète les équations aux dérivées partielles en découpant les domaines en éléments finis, ce qui permet une solution approchée [62].

10.2. Présentation du logiciel Comsol Multiphysics 5.4

Au démarrage du logiciel COMSOL Multiphysics, il apparaît un navigateur de modèle. Ce navigateur permet de définir les modèles physiques qui seront utilisés pour la simulation. Ce navigateur permet également de choisir la dimension de l'espace, ce qui peut inclure des options telles que 2D, 2D axisymétrique ou 3D. Cette étape initiale est cruciale pour définir les paramètres de base de la simulation et pour sélectionner les modèles appropriés pour le problème étudié [62].



Figure III.7. Comsol Multiphysics [23][63]

Il existe plusieurs versions de ce logiciel, on cite :

- COMSOL 5.3
- COMSOL 5.4
- COMSOL 5.5
- COMSOL 4.3

Dans notre étude, nous avons utilisé la version 5.4 qui apporte un assez bon niveau de clarté à notre simulation [63].

10.3. Les avantages du logiciel COMSOL Multiphysics 5.4

COMSOL est un outil qui permet de résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP)

Il a des avantages [23] [63].

- Multiphysiques (généricité, couplages mécaniques des fluides, électromagnétisme, mécaniques des structures, thermique).
- Utilise la méthode des éléments finis (MEF).
- Nombre illimité d'interactions entre des différentes applications physiques.
- Contient la plupart des équations à dérivé partielle.
- Utilise une interface graphique.
- Peu de programmation.
- Le couplage avec une interface MATLAB est possible.

10.4. Les inconvénients

- Il manque de certaines fonctions utiles comme le dérivé...etc.
- Nécessité de disposer d'un ordinateur puissant et performant (carte graphique, espace RAM...)

10.5. Description de l'interface Comsol Multiphysics

L'interface COMSOL, appelée le Bureau, présente une vue d'ensemble claire du modèle à tout moment. Elle utilise une conception fonctionnelle et esthétique pour simplifier la modélisation de réalités complexes. Le Bureau affiche seulement les outils spécifiques à la tâche en cours, éliminant ainsi l'incertitude lors de la construction du modèle et organisant les simulations. Il est composé de fenêtres telles que le Constructeur de modèle, les Paramètres, les Graphiques, les Messages, l'Avancement et l'Aide, qui peuvent être affichées selon les besoins [63].

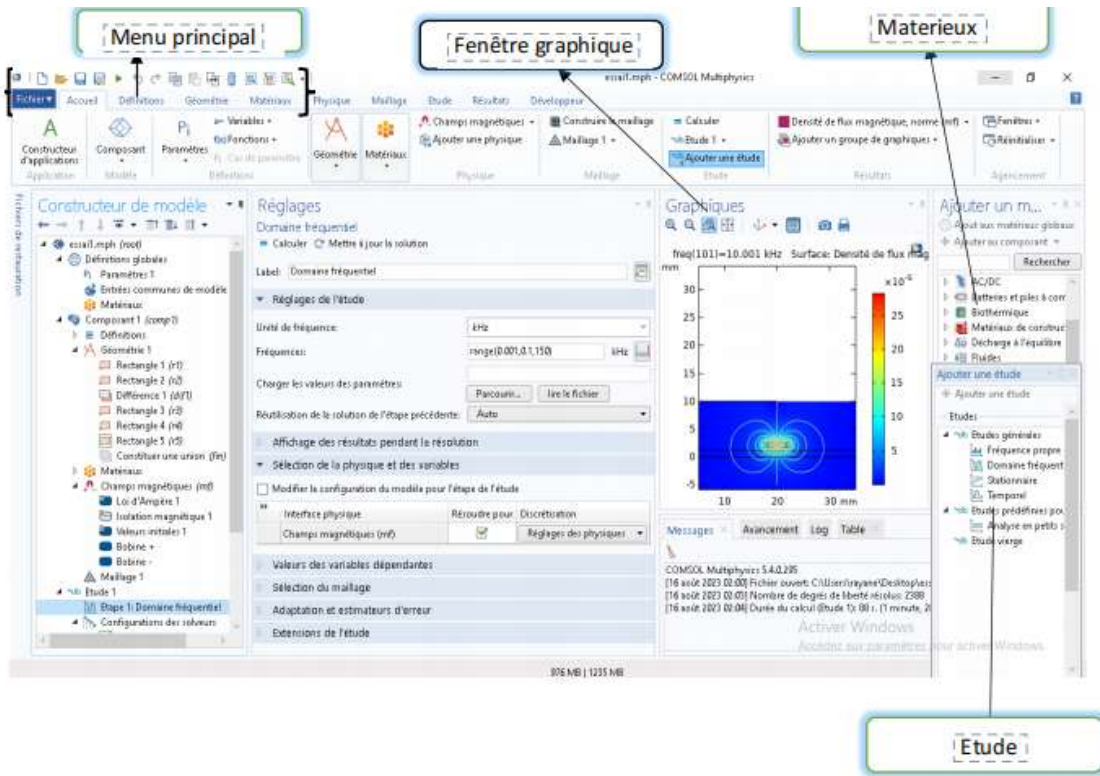


Figure III.8. Interface du logiciel comsol [63]

10.6. Description des différentes étapes de simulation

Pour commencer une simulation avec COMSOL, suivez ces étapes [63].

1. Ouvrez COMSOL : Double-cliquez sur l'icône de COMSOL dans le bureau pour l'ouvrir.
2. Passer dans le Constructeur du modèle :
 - Sélectionner les branches : Dans le Constructeur du modèle, vous pouvez passer par les branches dans l'ordre suggéré par leur position par défaut, à partir du haut vers le bas.
 - Sélectionner et définir chaque branche : Si vous avez besoin de plus de contrôle, vous pouvez sélectionner et définir chaque branche individuellement.

Ces étapes nous permettent de commencer à modéliser et à simuler avec COMSOL [63].

10.6.1. Définition d'un modèle (3D, 2D, 1D...etc)

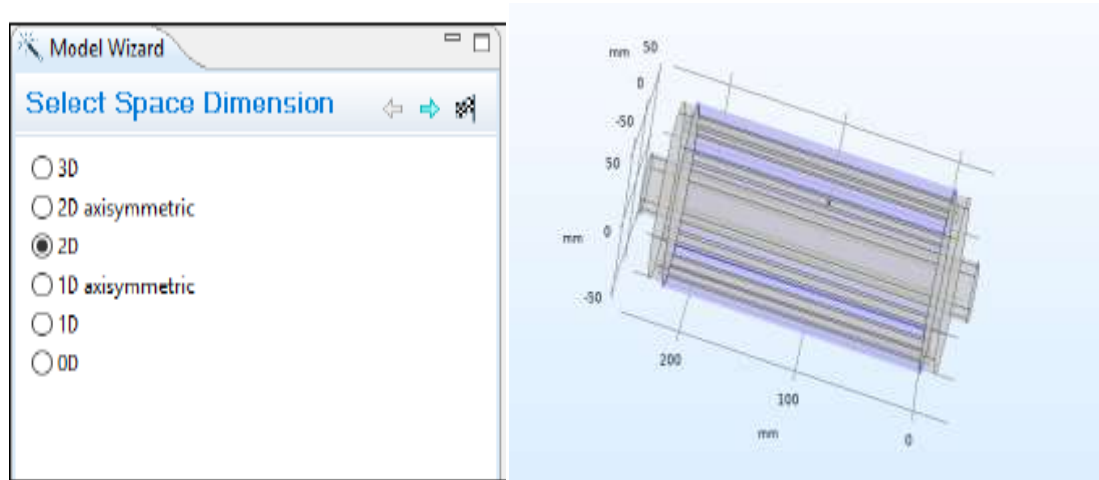


Figure III.9. Choix d'un modèle du rotor à cage d'écuriel en 3D [23][63]

10.6.2. Définir la géométrie

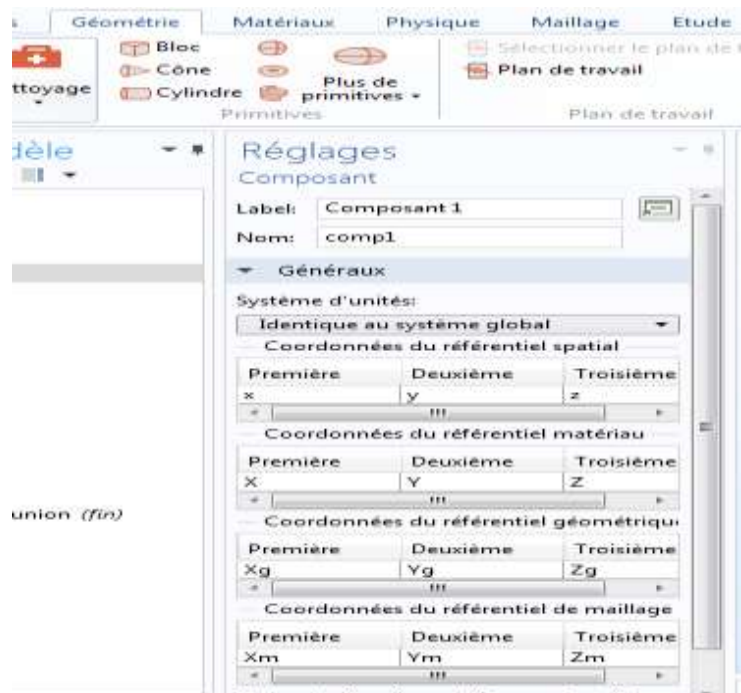


Figure III.10. Géométrie 3D [23][63]

10.6.3. Attribution des matériaux aux différents domaines

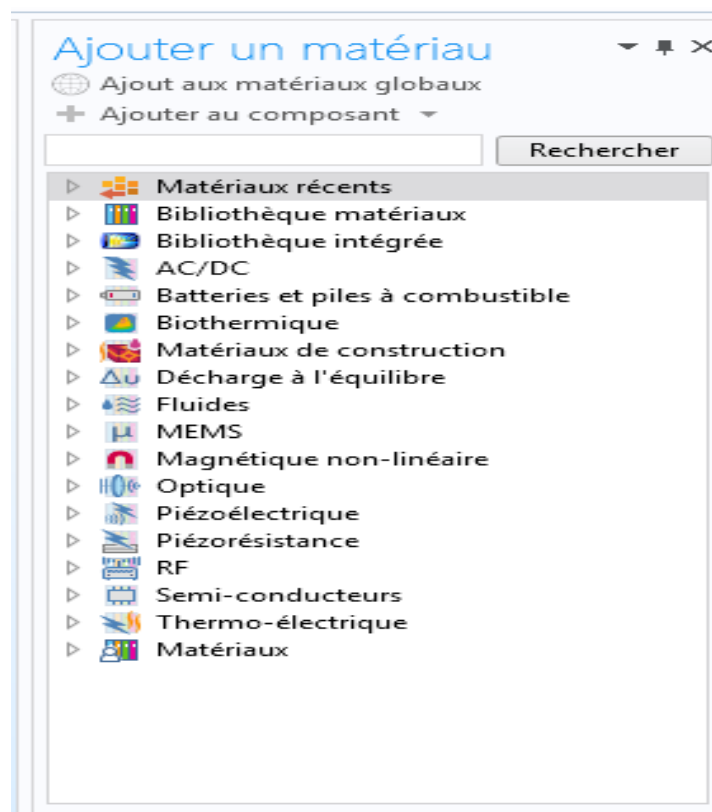


Figure III.11. Ajouter un matériau [23][63]

10.6.4. Choisir la ou les physiques

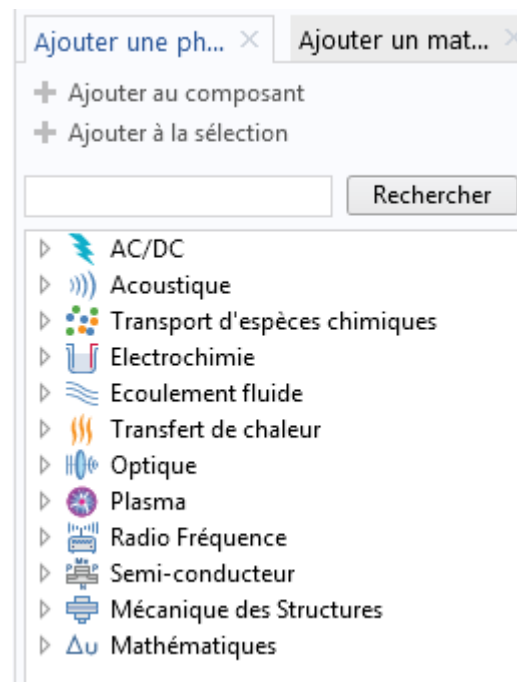


Figure III.12. Ajouter une physique

10.6.5. Choix d'une étude

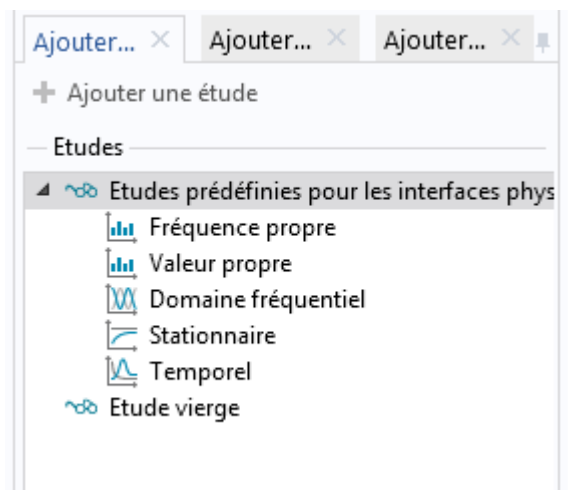


Figure III.13. Ajoute une étude

10.6.6. Le maillage

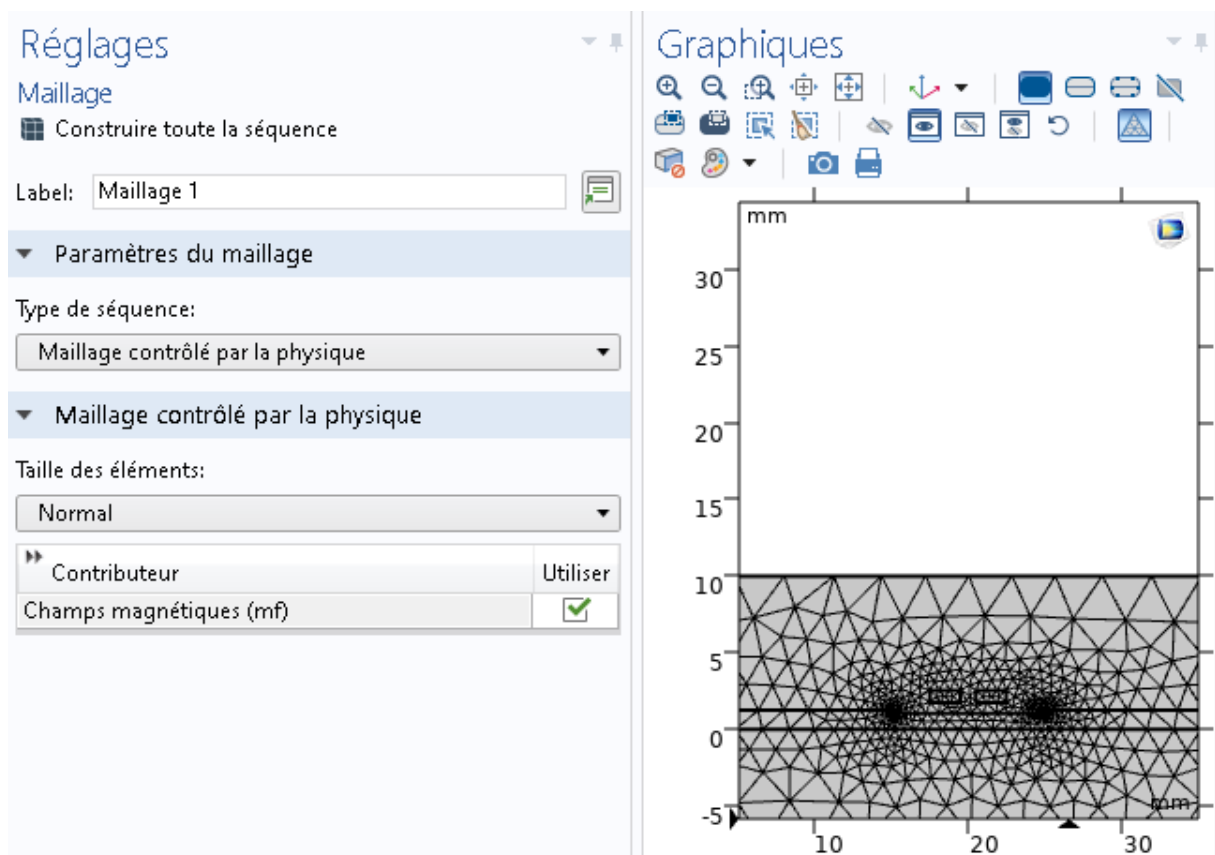


Figure III.14. Le maillage

10.6.7. Résoudre et afficher les résultats

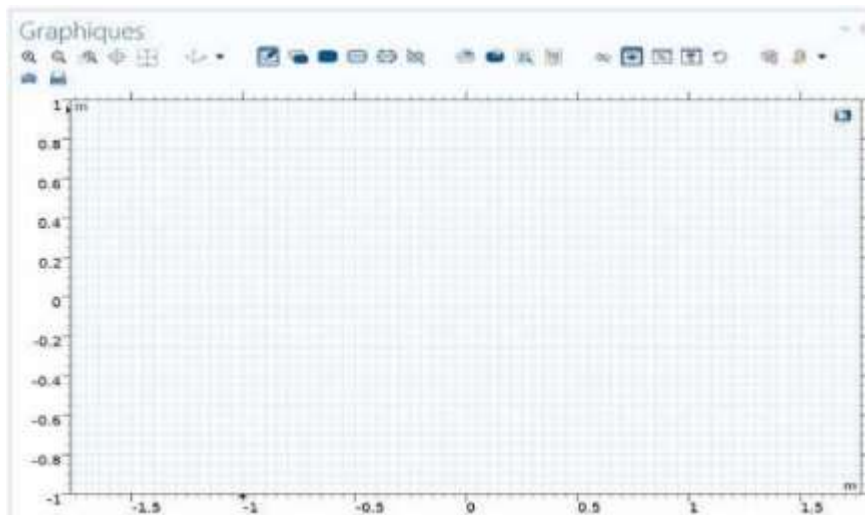


Figure III.15. Affichage de tous les résultats de simulation [23]

C'est l'ensemble des solutions mises à disposition pour la visualisation et l'analyse des résultats. Les séquences du solveur créent automatiquement des ensembles des données de solution [63].

CONCLUSION

Le contrôle non destructif par courants de Foucault est une méthode efficace pour détecter des défauts dans des matériaux conducteurs électriques sans les endommager. Cette méthode repose sur le phénomène de l'induction électromagnétique, où un champ magnétique variable induit des courants électriques dans le matériau.

Les méthodes numériques telles que la méthode des différences finies, la méthode des éléments de frontières, et la méthode des éléments finis permettent de résoudre des équations de Maxwell et de simuler les phénomènes électromagnétiques.

Le logiciel Comsol Multiphysics 5.4 est un outil puissant qui permet de modéliser et de résoudre ces problèmes de manière précise. Cependant, cette méthode nécessite une compréhension approfondie des principes physiques et des méthodes numériques pour être utilisée de manière efficace.

Chapitre IV :

Simulation et interprétation

INTRODUCTION

L'analyse de la tension par le contrôle non destructif (CND) utilisant des courants de Foucault est cruciale pour l'inspection des matériaux conducteurs. Cette méthode, fondée sur l'électromagnétisme, permet de détecter des défauts tels que des bulles d'air et des variations de tension.

Dans notre étude, nous avons simulé un dispositif avec une plaque en Aérometal, c'est un matériau composite de type CFRP, qui signifie Carbon Fiber Reinforced Polymer ou Polymère Renforcé de Fibres de Carbone. Ce matériau est composé de fibres de carbone intégrées dans une matrice polymère, généralement une résine époxy. Les fibres de carbone confèrent au composite sa résistance et sa rigidité, tandis que la matrice sert à maintenir les fibres ensemble.

Aérometal un matériau ayant une conductivité de 50 000 S/m, à l'aide de COMSOL Multiphysics 5.4. Nous avons dimensionné ce dispositif et configuré la simulation pour analyser l'évolution de la tension en fonction de la fréquence, sur une plage allant de [60 Hz à 150 000 Hz].

Les résultats obtenus permettront de comparer les tensions des plaques avec et sans défaut, facilitant ainsi le calcul de la différence ΔU . Cette analyse fréquentielle détaillée nous donnera un aperçu précis du comportement de la tension en présence d'une bulle d'air, un défaut courant dans les matériaux conducteurs. Les conclusions tirées de cette étude seront essentielles pour optimiser les techniques de contrôle non destructif par courants de Foucault.

1. Description du dispositif à analyser

Comme la montre clairement la Figure IV.1, notre principal objet d'étude sera cette plaque, qui présente un défaut significatif sous la forme d'une bulle d'air de type elliptique centrée.

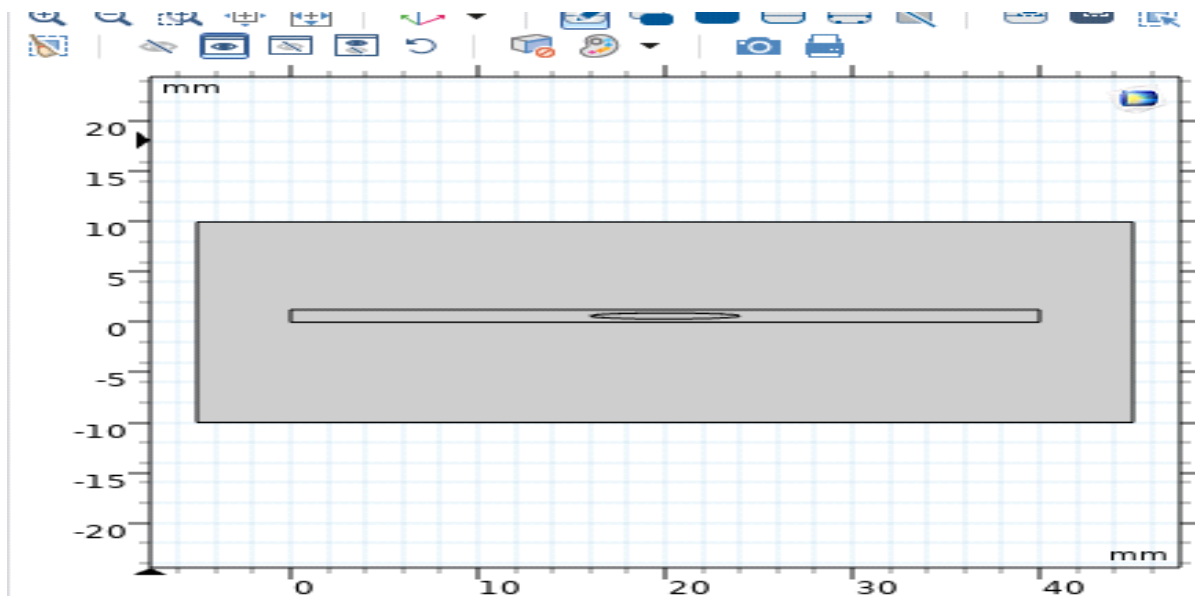


Figure 1. Plaque à contrôler

2. Dimensionnement de notre dispositif

Notre dispositif est caractérisé par une série de paramètres fondamentaux qui définissent sa configuration et son fonctionnement particuliers. Ces paramètres, choisis avec soin, sont essentiels pour garantir la précision et l'efficacité de notre système. En analysant cette configuration de manière approfondie, nous pouvons mettre en lumière les éléments principaux qui la constituent et saisir comment ils interagissent pour réaliser nos objectifs.

	Capteur	Plaque	Default	Domaine
Largeur [mm]		40	4	50
Hauteur [mm]		1.25	0.3	20
Conductivité électrique [S/m]	$5.99 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^4$	10^{-14}	10^{-16}
Perméabilité relatif	1	1	1	1
Diamètre intérieure [mm]	1.2			
Diamètre extérieur [mm]	3.2			
Lift-off [mm]	0.5			

Tableau IV.1. Tableau représentatif de la géométrie.

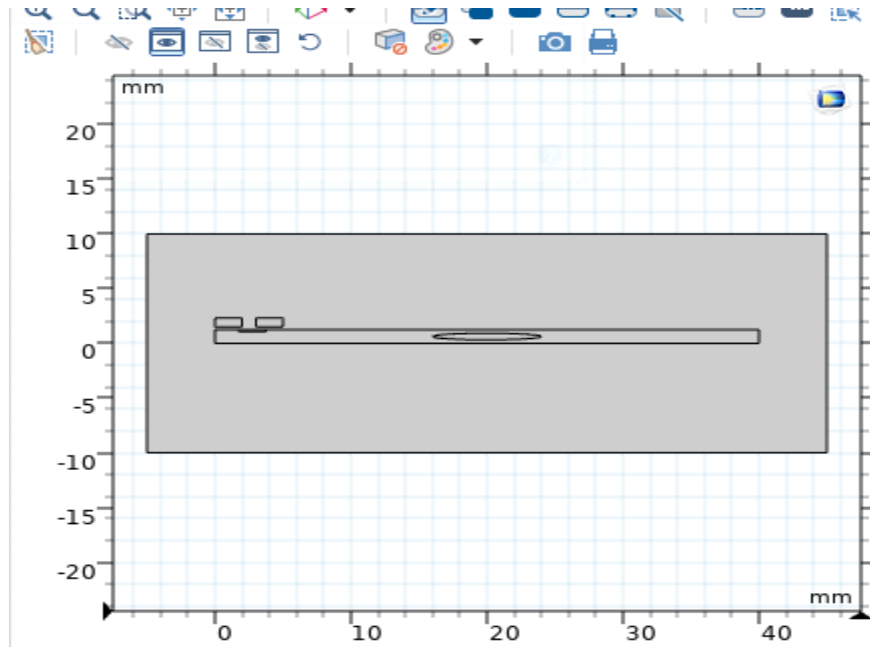


Figure 2. Modèle en 2D de notre géométrie

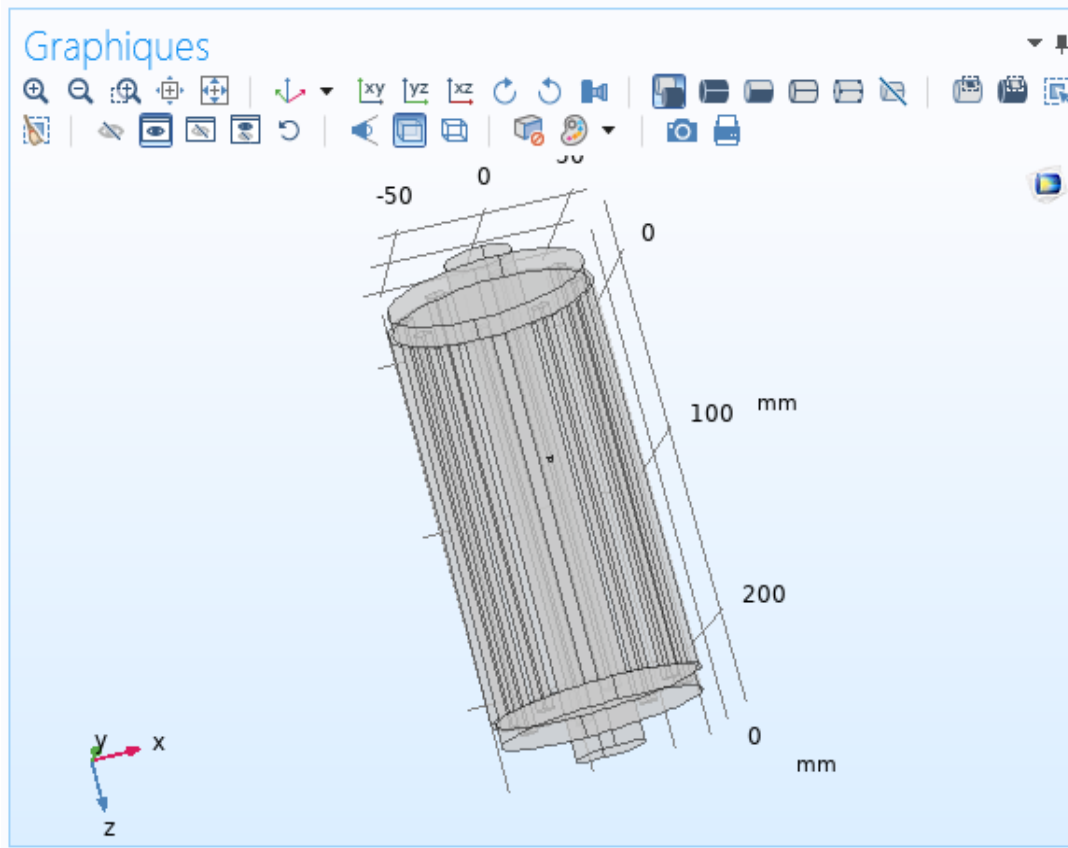


Figure 3. Modèle en 3D de notre géométrie

3. Configuration du dispositif à contrôler sous COMSOL MULTIPHYSICS 5.4

Afin d'y parvenir à simuler le dispositif et d'obtenir des résultats exploitables, nous suivons les étapes suivantes :

3.1. Création d'un modèle en deux dimensions (3D)

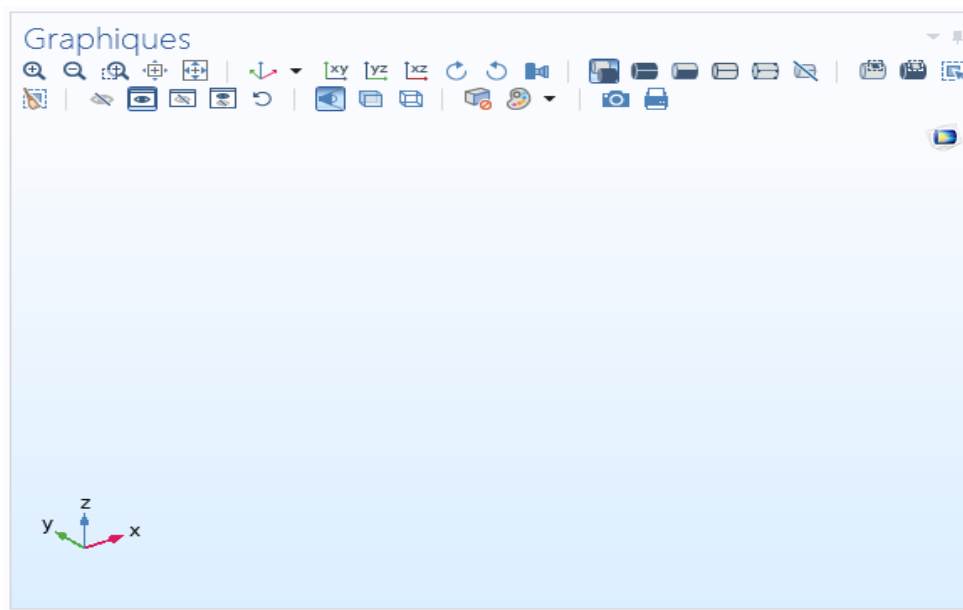


Figure 4. Modèle vierge en 3D

3.2. Configuration de notre géométrie en tenant compte des dimensions

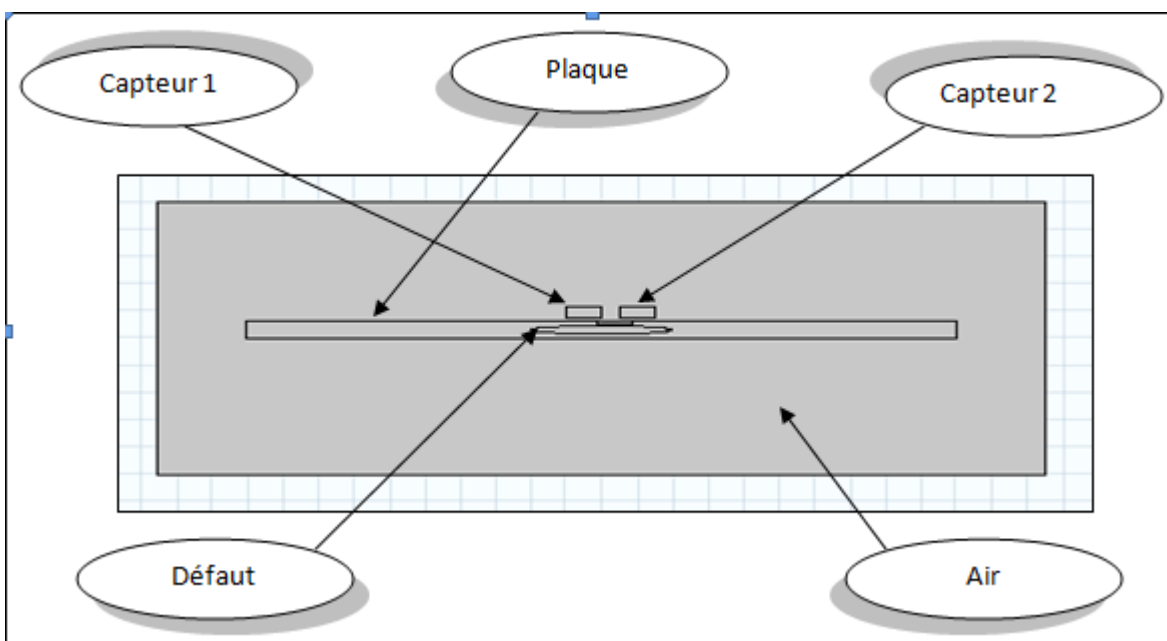


Figure 5. Modèle en 2D de notre géométrie

3.3.Ajout des matériaux (Air, Cuivre, Aerometal)

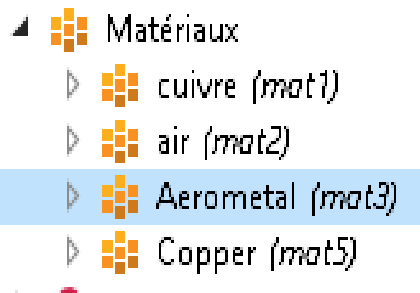


Figure 6. Matériaux affecté à la géométrie

3.4.Configuration de la physique

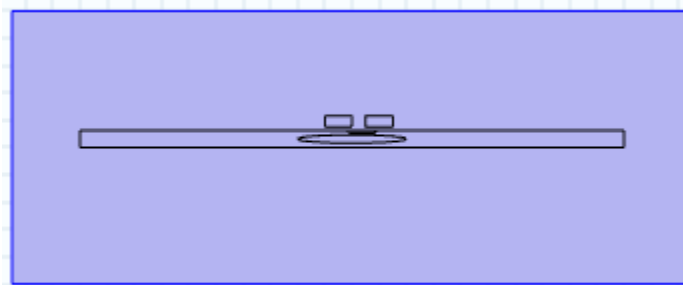


Figure 7. Choix de l'isolant magnétique

3.5. Configuration de la bobine

Réglages

Bobine

I_{coil} A

▼ Conducteur multispire homogénéisé

Nombre de spires:

N

Conductivité des spires de la bobine:

σ_{coil} S/m

Aire de la section d'une spire de la bobine:

a_{coil} m²

▼ Champ magnétique

Relation constitutive:

$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$

Perméabilité relative:

μ_r

▼ Champ électrique

$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$

Permittivité relative:

ϵ_r

Figure 8. Paramétrage de la bobine

3.6. Configuration du maillage adéquat pour la simulation

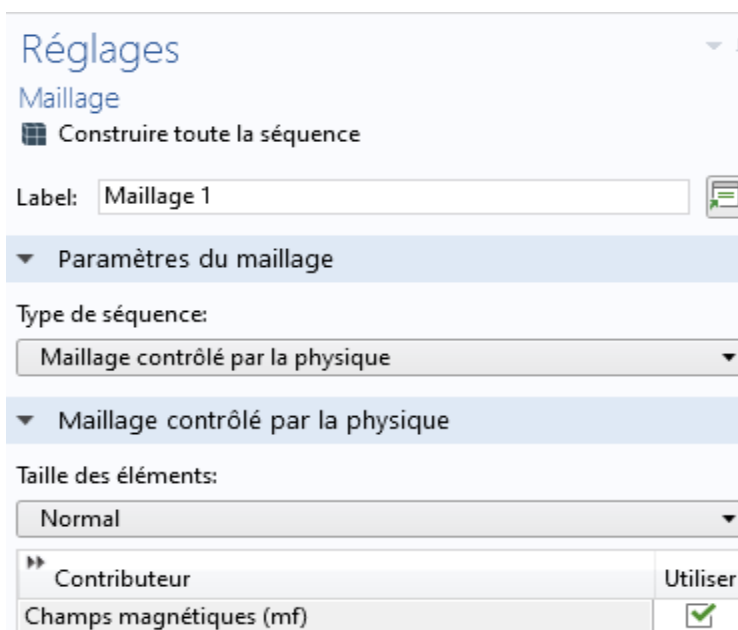


Figure 9. Paramétrage du maillage

3.7. Sélection d'un domaine d'étude

Nous devons choisir une analyse dans le domaine fréquentiel, ce qui nous donnera la possibilité de travailler sur les différentes fréquences. Nous allons établir une plage de fréquences allant de 60 Hz à 100 000 Hz.

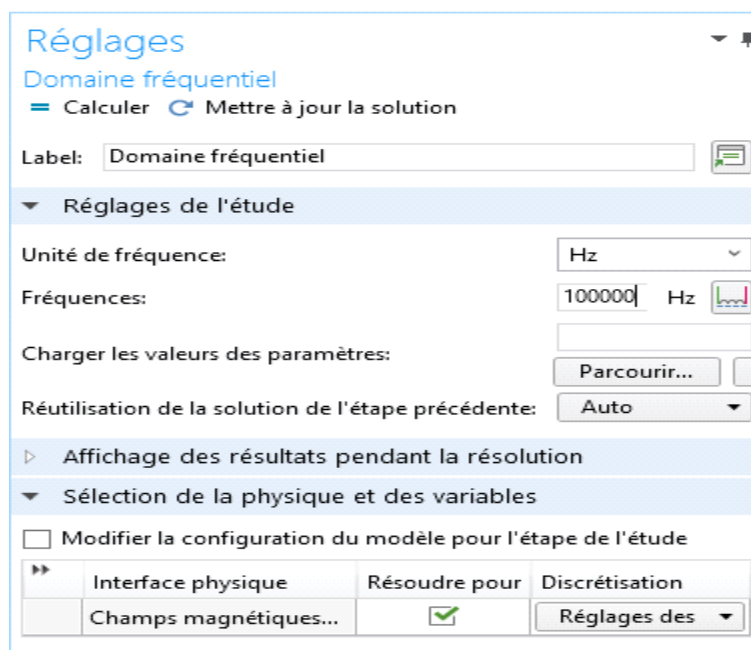


Figure 10. Configuration de l'étude

4. Simulation

Exemple de simulation sur la plaque avec défaut à 100 kHz :

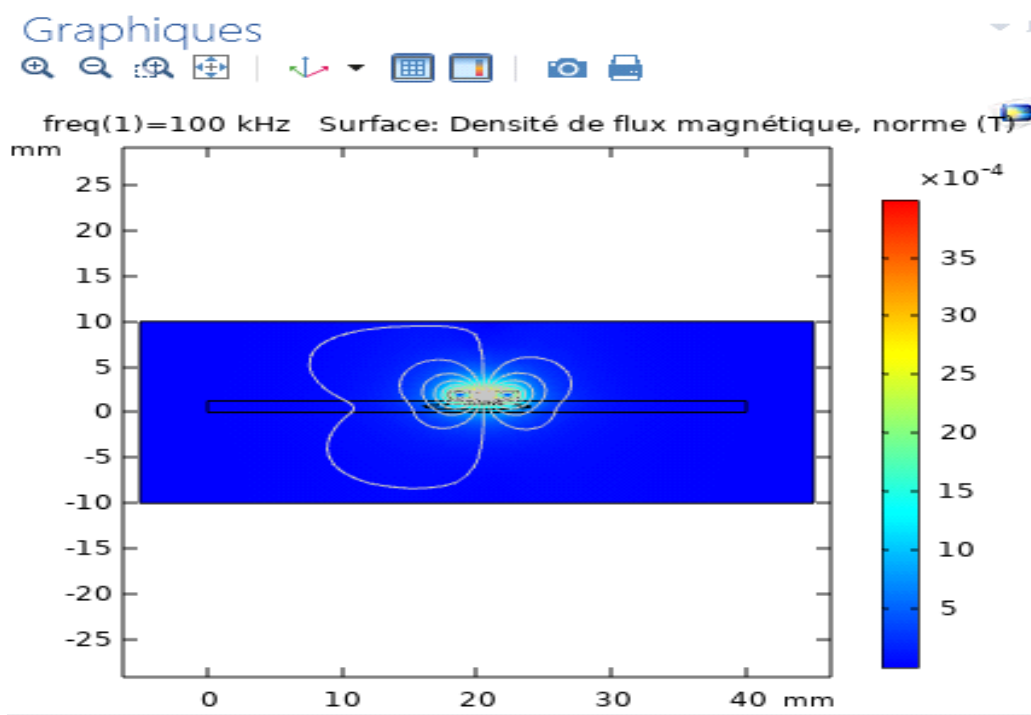


Figure 11. Densité de flux magnétique à 100 kHz

Avancement		Log		Table 1	
8.85	8.5	850	0.85		
$e-12$	$e-1$	$e-3$			
freq (kHz)	U (V)				
100.00	1.6381				

Figure 12. Valeur de Tension obtenue à 100 kHz

freq (Hz)	Z (Ω)	realZ (Ω)	imagZ (Ω)
1.0000E5	2.7524	-0.60053	-1.2858

Figure 13. Valeur de l'impédance obtenue à 100 kHz

5. Interprétation des résultats de la tension

Après avoir simulé notre dispositif sous COMSOL Multiphysics 5.4, tant pour les différentes plaques avec défaut que sans défaut, nous avons obtenu les résultats suivants.

5.1. Tension pour la plaque sans défaut :

Nous avons effectué des mesures de tension U à différentes fréquences sur cette plaque, permettant d'obtenir des résultats significatifs sur une large plage allant de [60 Hz à 100 000 Hz]. Ces données offrent un aperçu détaillé du comportement de la tension U dans différentes conditions fréquentielles.

- Pour 60 Hz

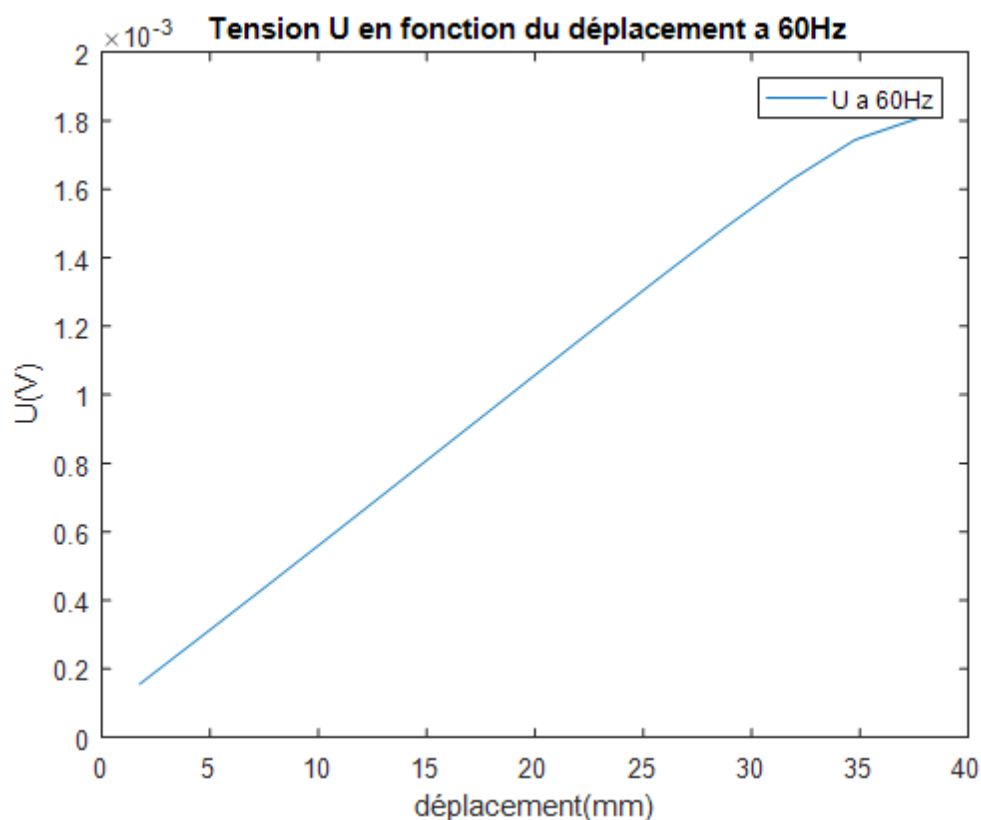


Figure 14. Tension U en fonction du déplacement X à 60 Hz

- Pour 60000 Hz

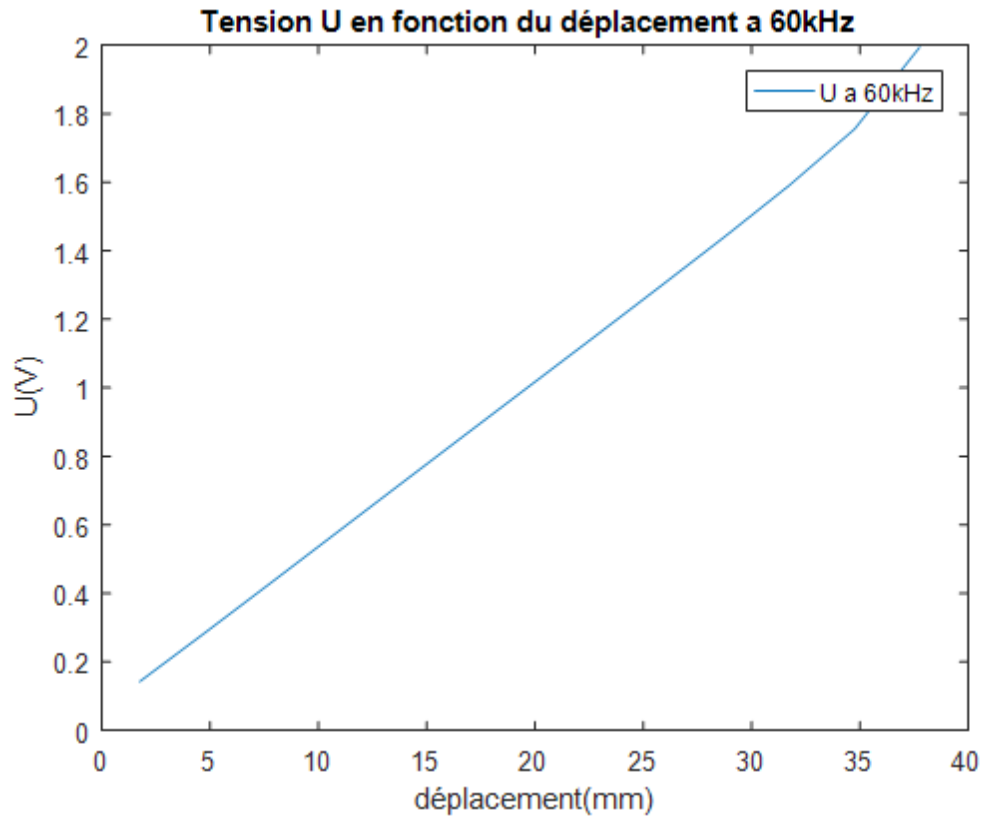


Figure 15. Tension U en fonction du déplacement X à 60 KHz

- Pour 100000 Hz

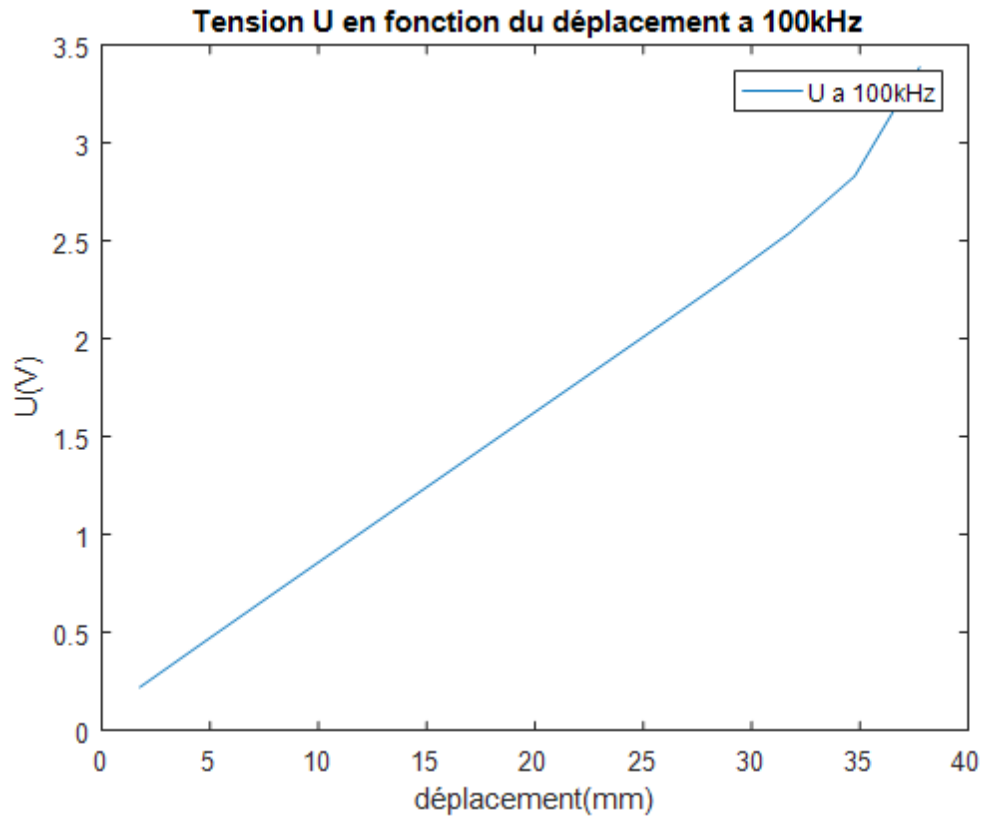


Figure 16. Tension U en fonction du déplacement X à 100KHz

5.1.1. Interprétation

Les résultats indiquent clairement que la tension mesurée sur une plaque sans défaut augmente avec la fréquence. Sur les trois graphiques, on observe une progression où la tension initialement commence presque à zéro avant d'atteindre un maximum. A basse fréquence, la réponse est limitée, tandis qu'à des fréquences intermédiaires et élevées, où la plaque devient beaucoup plus réactive. Cela met en évidence l'importance de la fréquence dans le comportement dynamique des matériaux.

5.2. Tension pour la plaque avec défaut :

Sur cette plaque nous avons récupéré les résultats de la tension U à différentes fréquences

- Pour 60 Hz

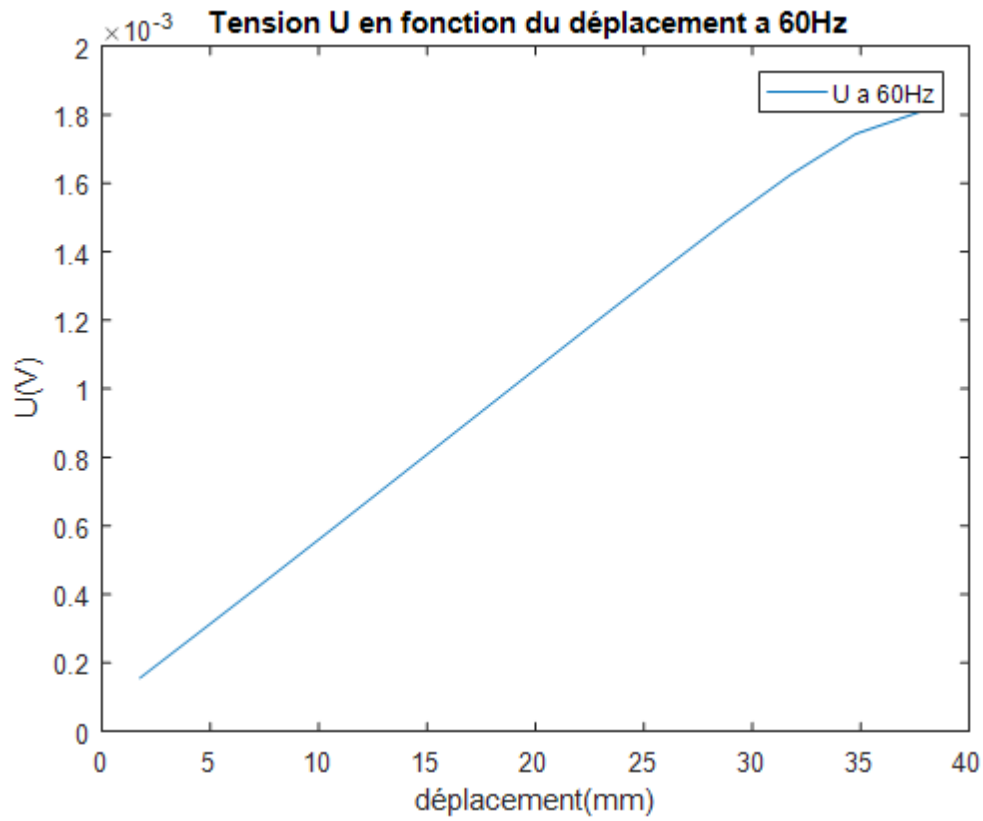


Figure 17. Tension U en fonction de déplacement X à 60 Hz avec défaut

- Pour 60000 Hz

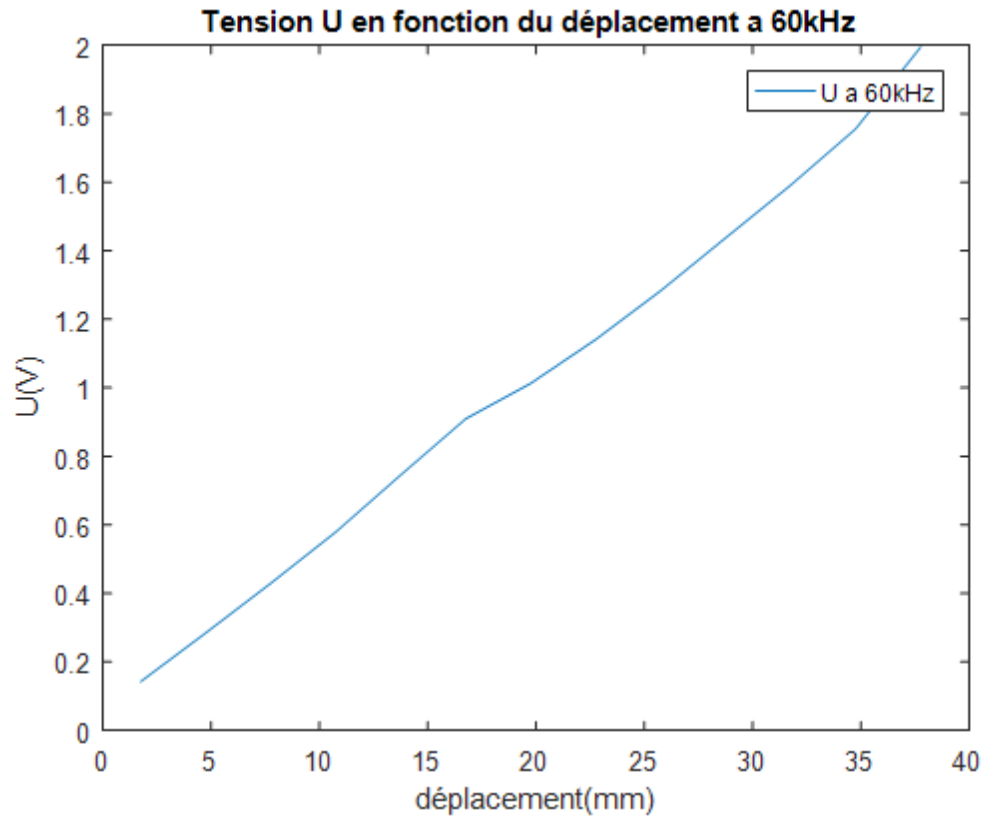


Figure 18. Tension U en fonction de déplacement X à 60 KHz avec défaut

- Pour 100000 Hz

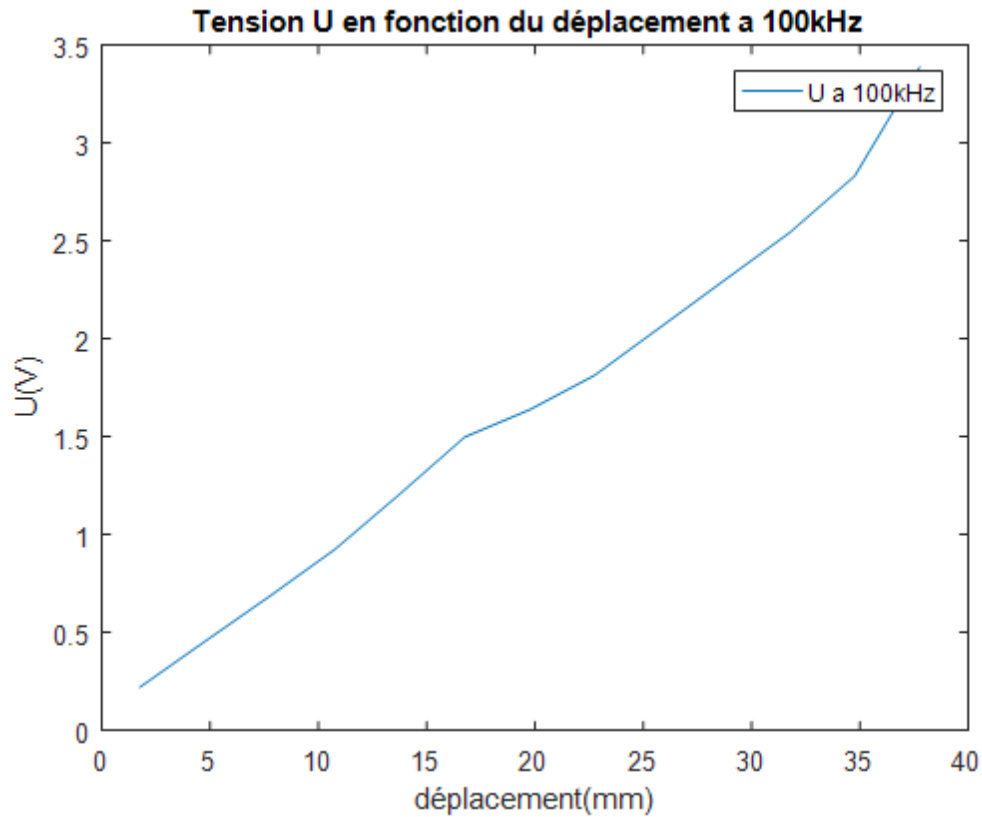


Figure 19. Tension U en fonction du déplacement X à 100 KHz avec défaut

5.2.1. Interprétation

Pour la plaque présentant un défaut, les résultats indiquent que la tension mesurée augmente avec la fréquence sur les trois graphiques. À basse fréquence, l'effet du défaut est négligeable, tandis qu'à haute fréquence, il devient nettement plus significatif. Cette tendance est cohérente avec les principes de la physique des matériaux et des ondes, qui montrent que les défauts impactent davantage la réponse du système à des fréquences élevées.

5.3.Déterminer ΔU

Grâce aux résultats de la simulation, nous pouvons désormais calculer la variation $\Delta U(x)$, ce qui nous aidera à comprendre comment la tension évolue en fonction de la position x .

Nous avons :

$$\Delta U(x) = U_{\text{defaut}}(x) - U(x)$$

$U_{\text{defaut}}(x)$: tension de la plaque avec défaut en fonction du déplacement.

$U(x)$: tension de la plaque sans défaut en fonction du déplacement.

5.3.1. Résultat obtenue

- Pour 60 Hz

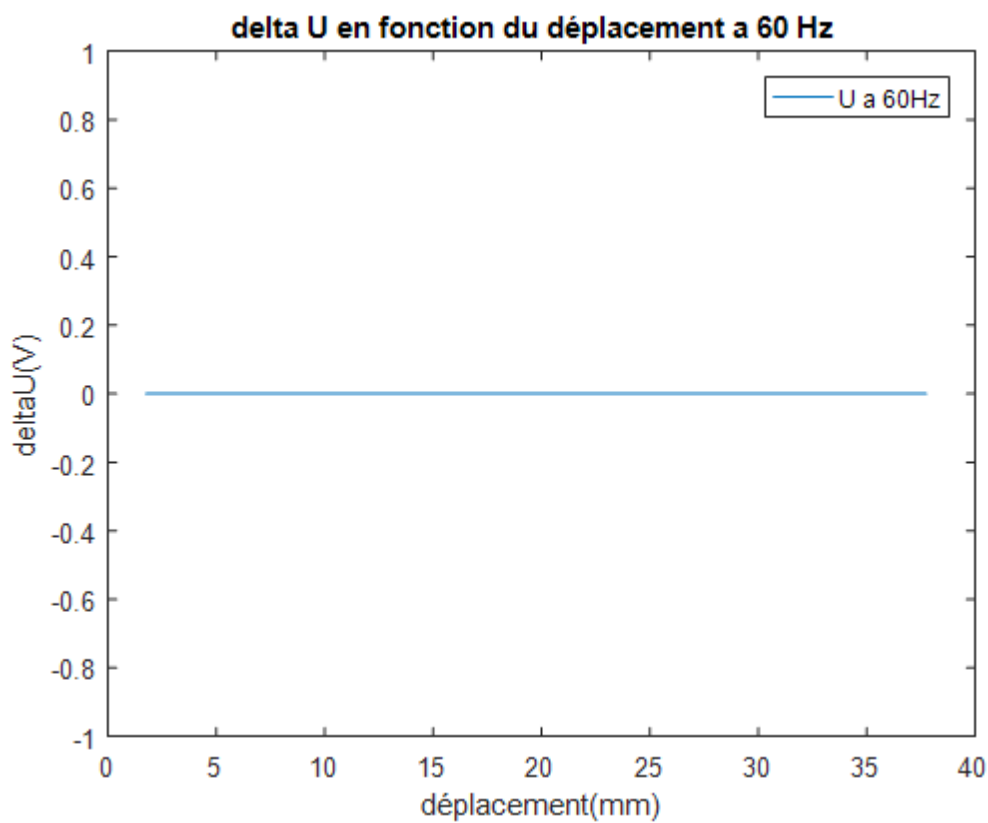


Figure 20. DeltaU en fonction du déplacement X à 60 Hz

- Pour 60000 Hz

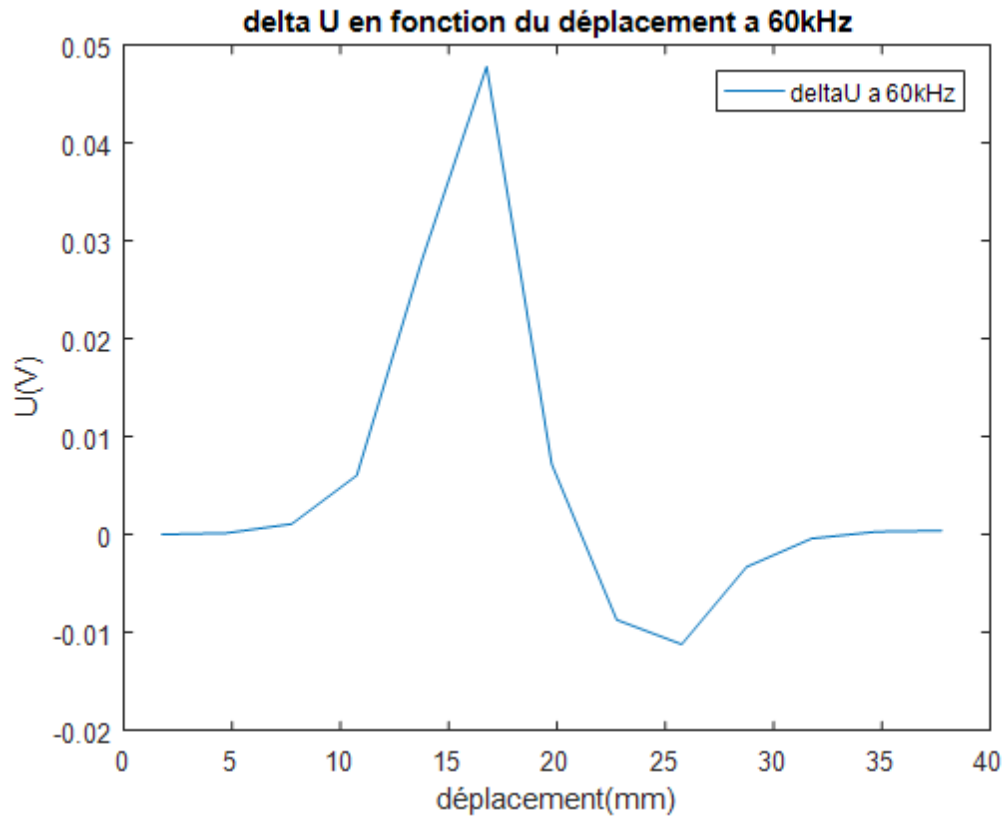


Figure 21. DeltaU en fonction du déplacement X à 60 KHz

- Pour 100000 Hz

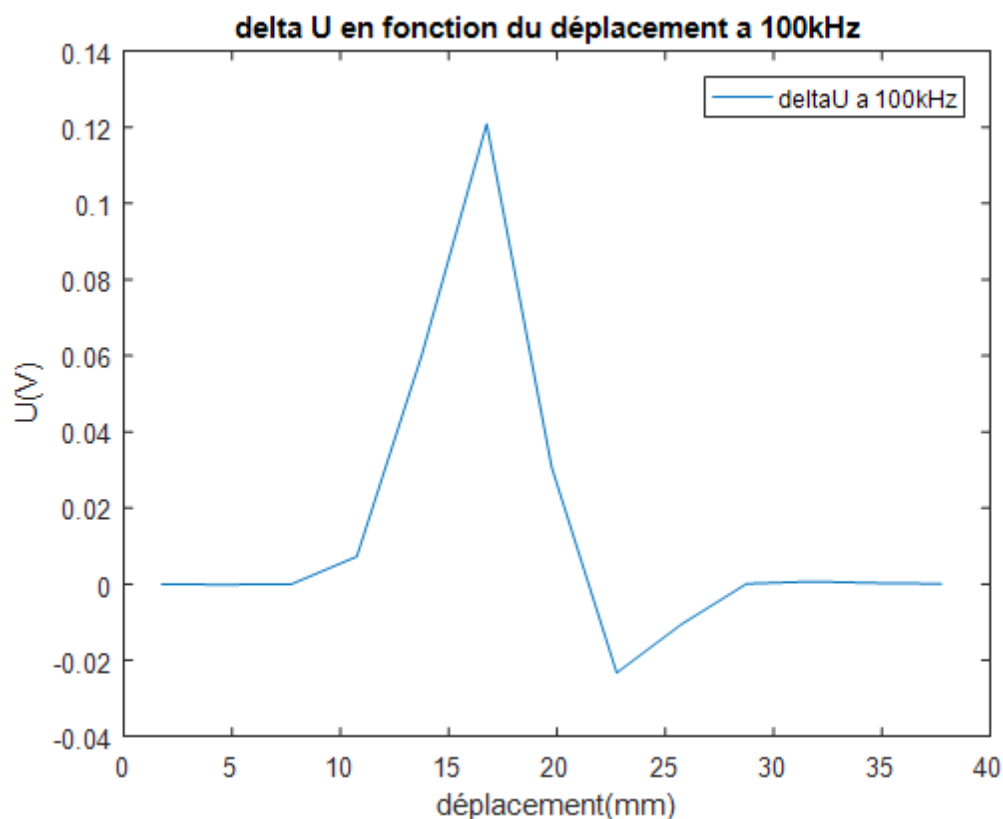


Figure 22. DeltaU en fonction du déplacement X à 100 KHz

5.3.2. Interprétation

- Pour 60 Hz

À cette fréquence, il est évident que la tension U reste constante, ce qui nous amène à conclure qu'une méthode de contrôle non destructif par courants de Foucault n'est pas efficace à basse fréquence.

- Pour 60000 Hz

À 60 kHz, les variations montrent à la fois des fluctuations positives et négatives. Les valeurs initiales sont faibles, ce qui indique une réponse stable. Cependant, une augmentation des valeurs commence à la position 6, suggérant une sensibilité accrue aux défauts. Entre les positions 8 et 11, les fluctuations négatives peuvent signaler des perturbations ou des défauts dans le système. Ces résultats indiquent que la méthode de mesure est efficace à cette fréquence pour détecter des anomalies, ce qui est essentiel pour la surveillance et le diagnostic des matériaux.

- Pour 100000 Hz

À 100 kHz, les valeurs montrent une variation significative, avec une stabilité initiale suivie d'une augmentation marquée à certaines positions. La présence d'une valeur maximale à la position 6, où un défaut est localisé au centre de la plaque, suggère une sensibilité accrue aux anomalies dans cette zone. Les fluctuations négatives observées à d'autres positions peuvent indiquer des perturbations dans le système. Ces résultats démontrent que la méthode de mesure est efficace pour détecter des anomalies dans le matériau, ce qui est essentiel pour garantir la qualité et la sécurité des applications

6. Interprétation des résultats de l'impédance

Après avoir simulé notre dispositif sous Comsol Multiphysics 5.4 pour les différentes plaques (sans défaut et avec défaut), nous avons obtenu les résultats suivants :

6.1. Impédance pour la plaque sans défaut :

Sur cette plaque nous avons récupéré les résultats suivants pour l'impédance Z à différentes fréquences :

- Pour 60 Hz

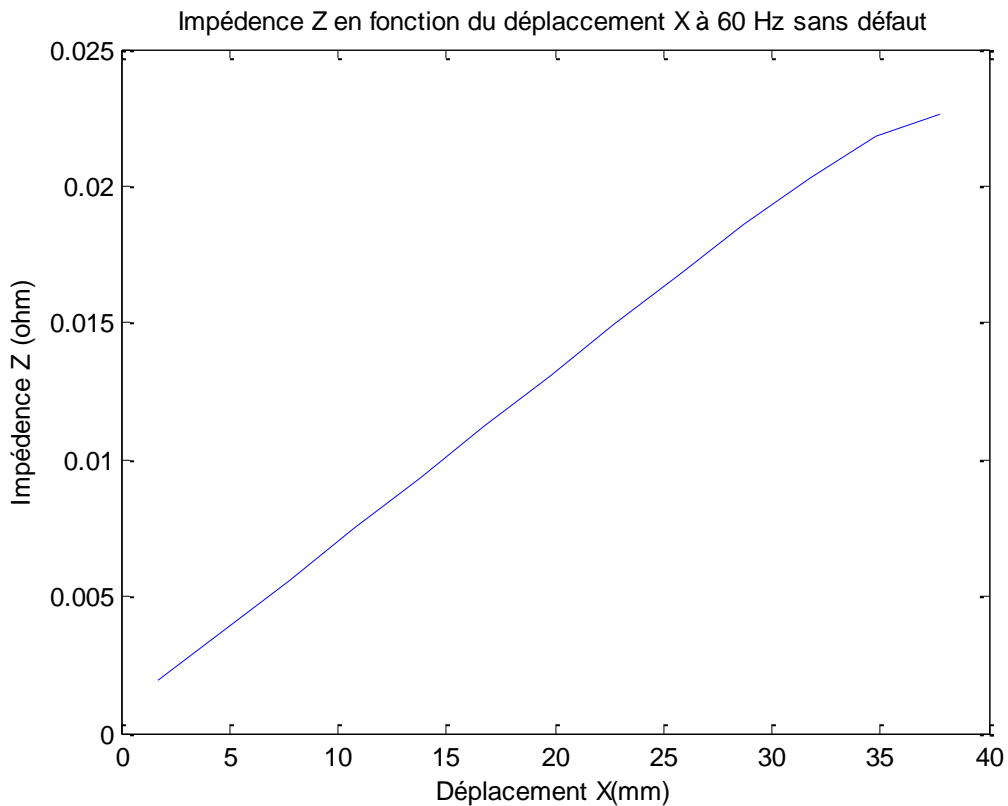


Figure 23. Impédance Z en fonction du déplacement X à 60 Hz

- Pour 60000 Hz

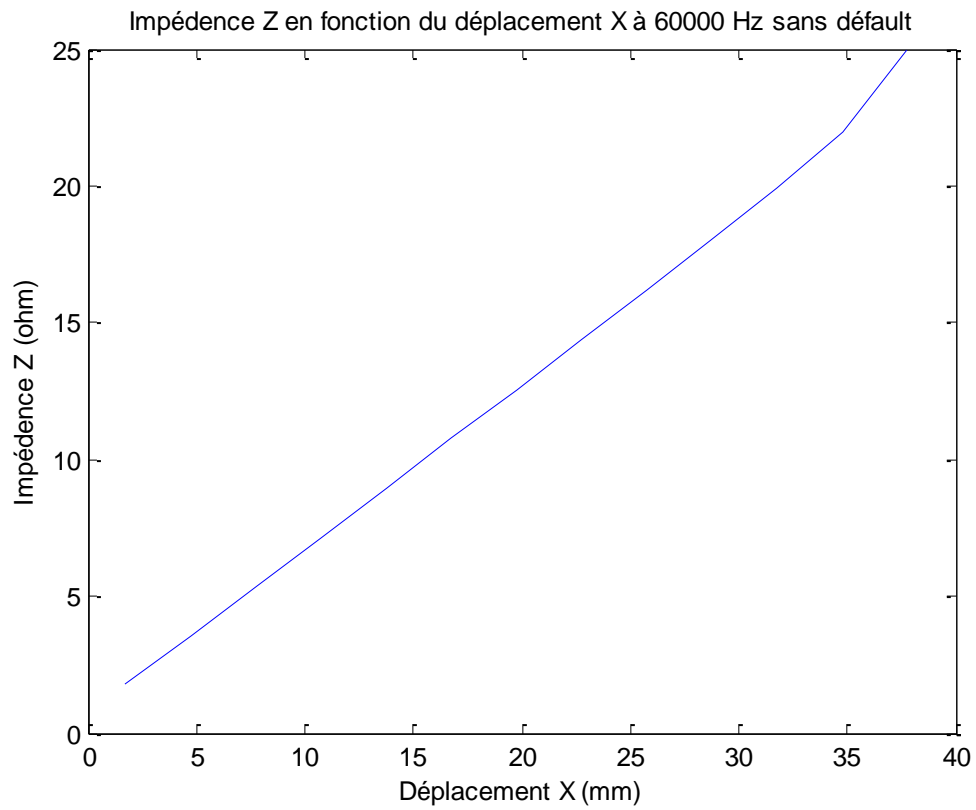


Figure 24. Impédance Z en fonction du déplacement X à 60 KHz

- Pour 100000 Hz

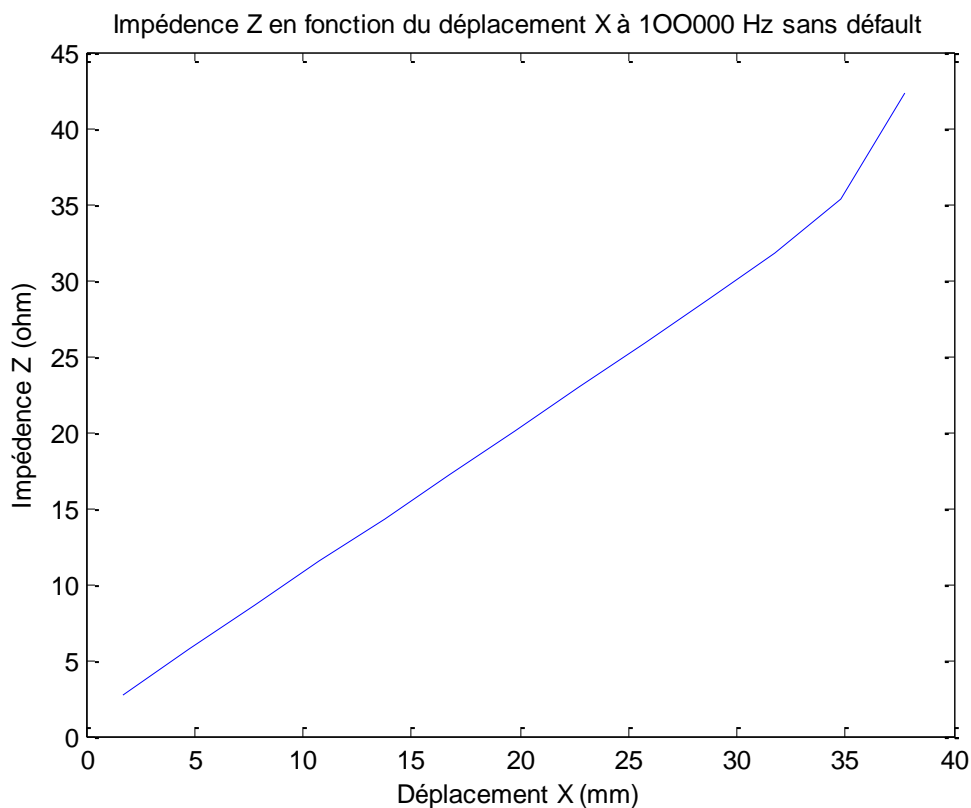


Figure 25. Impédance Z en fonction du déplacement X à 100 KHz

6.1.1. Interprétation

On observe clairement que l'impédance Z augmente avec la fréquence. À basse fréquence, l'impédance est faible, ce qui indique une bonne conductivité. À des fréquences intermédiaires, elle augmente considérablement, atteignant des valeurs élevées à haute fréquence, ce qui montre une résistance accrue au passage du courant. Cette évolution met en évidence le passage d'un comportement capacitif à un comportement inductif dominant. En résumé, l'impédance d'un circuit augmente avec la fréquence, ce qui signifie que les effets inductifs surpassent les effets capacitifs. Cela est essentiel pour la conception des systèmes de détection.

6.2. Impédance pour la plaque avec défaut :

Sur cette plaque nous avons récupéré les résultats de l'impédance Z comme avant :

- Pour 60 Hz :

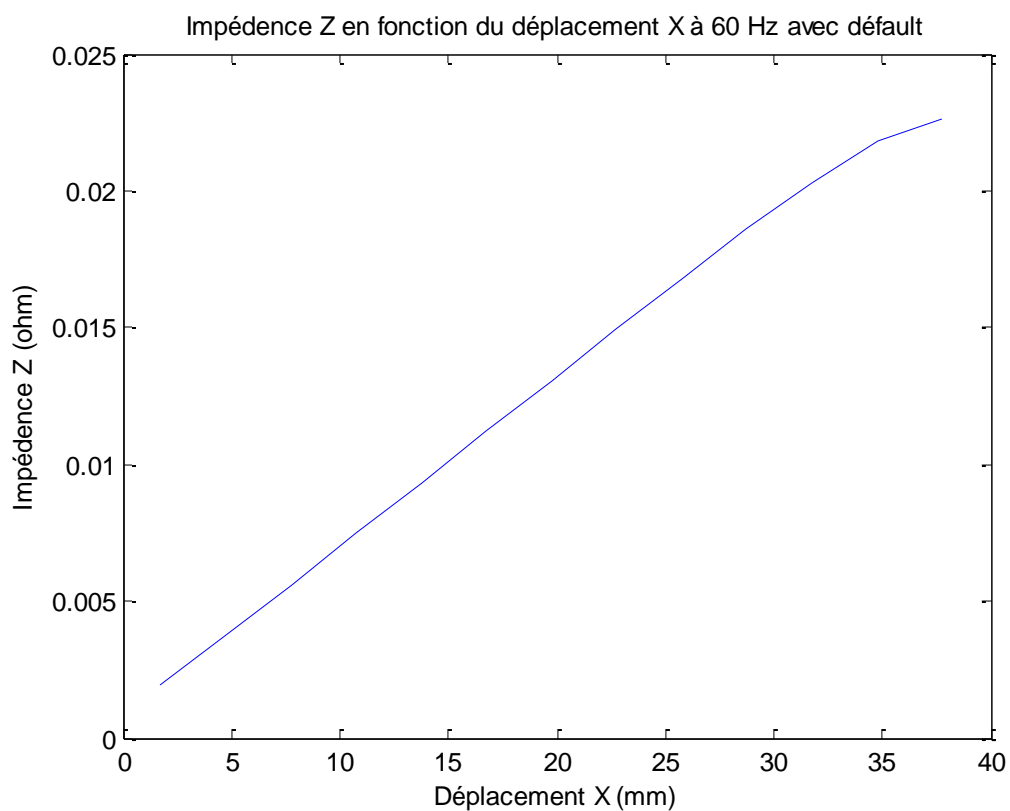


Figure 26. Impédance Z en fonction de déplacement X à 60 Hz avec défaut

- Pour 60000 Hz

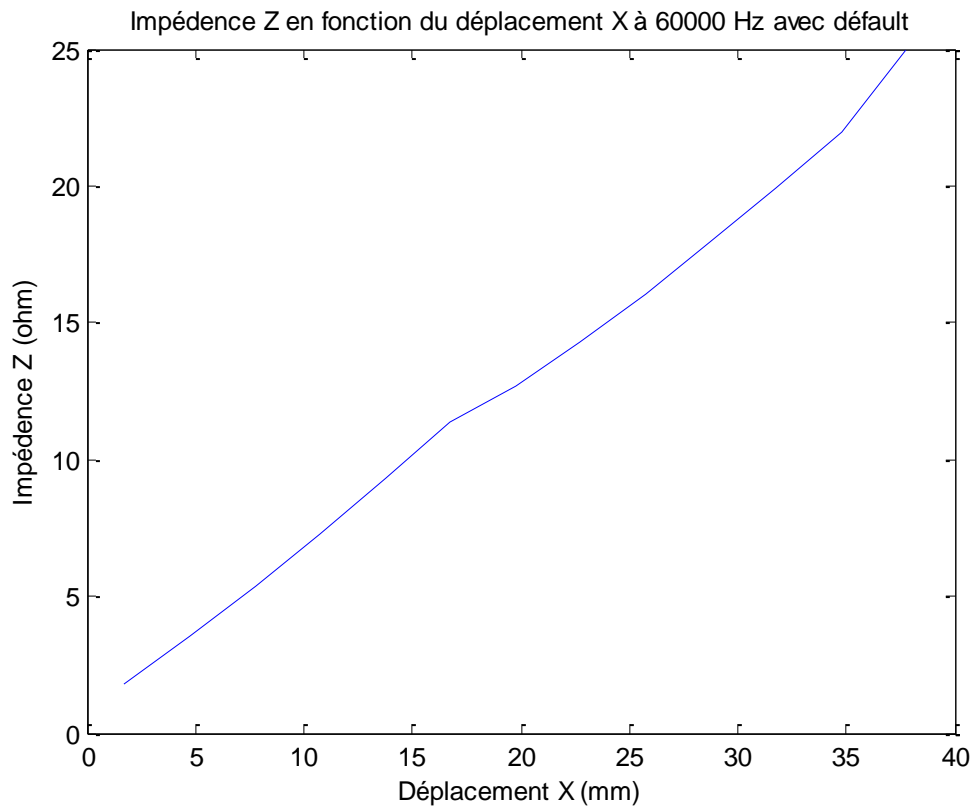


Figure 27. Impédance Z en fonction de déplacement X à 60 KHz avec défaut

- Pour 100000 Hz :

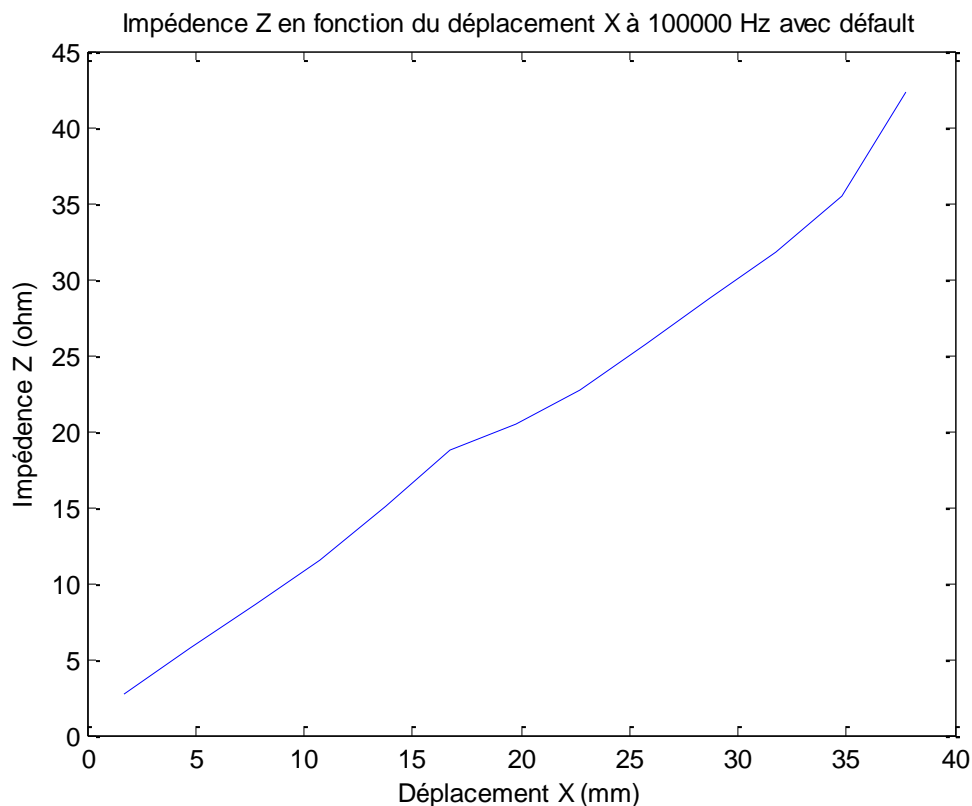


Figure 28. Impédance Z en fonction de déplacement X à 100 KHz avec défaut

6.2.1. Interprétation

On constate que les valeurs d'impédance pour la plaque avec défaut sont légèrement supérieures à celles de la plaque sans défaut. Ces résultats indiquent que la présence de défauts modifie l'impédance, en particulier à des fréquences plus élevées. Cela est essentiel pour les applications de détection, car les variations d'impédance peuvent révéler la présence et la nature des défauts dans le matériau.

6.3. Déterminer ΔZ

Avec les résultats obtenus lors de la simulation en aura calculé maintenant le $\Delta Z(x)$ avec :

$$\Delta Z = Z_{\text{défaut}} - Z(x)$$

$Z_{\text{défaut}}$: Impédance de la plaque avec défaut en fonction du déplacement

$Z(x)$: Impédance de la plaque sans défaut en fonction du déplacement

6.3.1. Résultat obtenue

- Pour 60 Hz

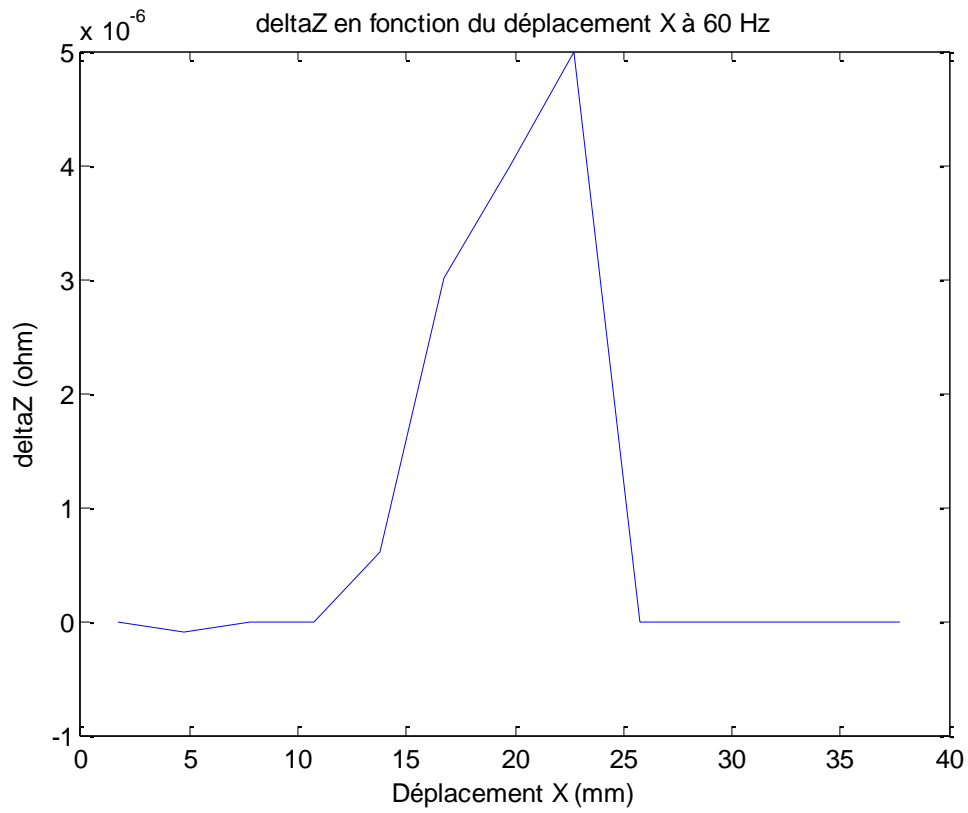


Figure 29. DeltaZ en fonction du déplacement X à 60 Hz

- Pour 60 KHz

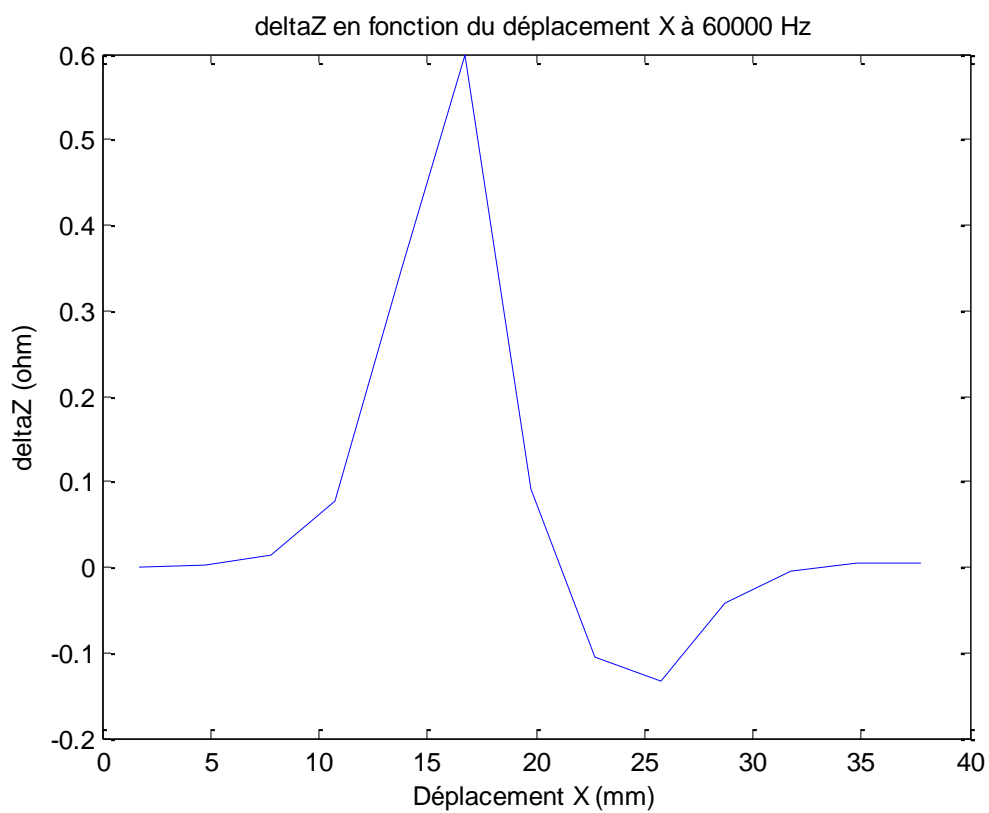


Figure 30. DeltaZ en fonction du déplacement X à 60 KHz

- Pour 100 KHz

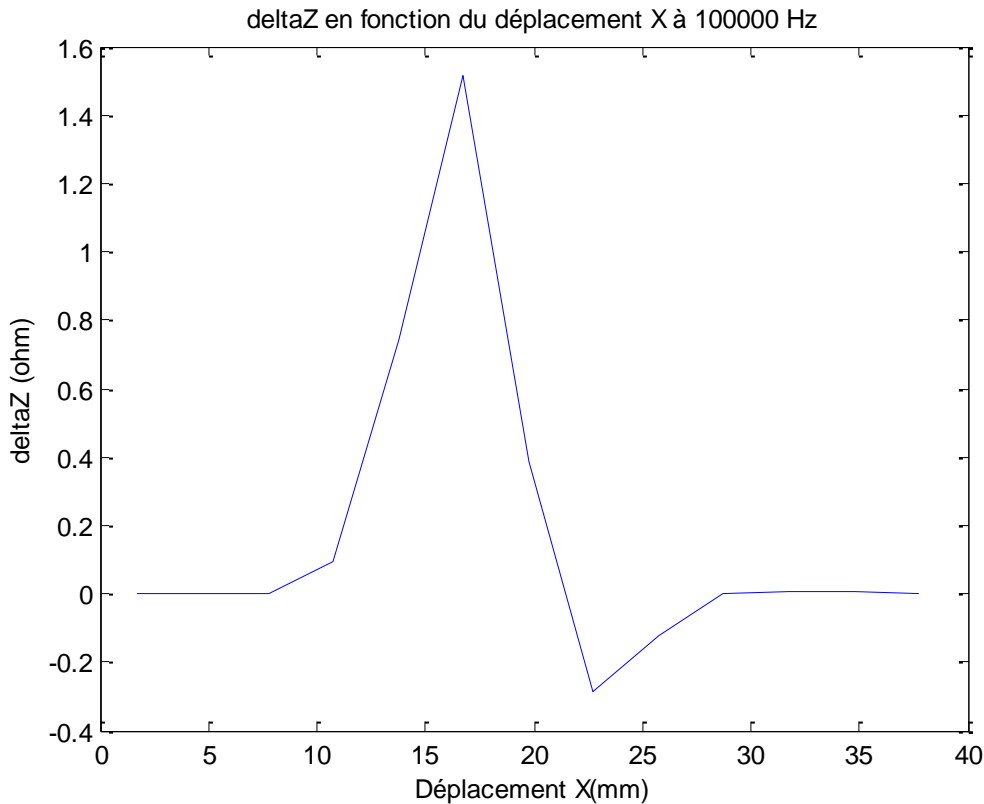


Figure 31. DeltaZ en fonction du déplacement X à 100 KHz

6.3.2. Interprétation

- **A 60 Hz** : les valeurs de ΔZ sont majoritairement nulles, avec quelques valeurs positives atteignant un maximum de 0.5000. Cela indique une faible impédance, ce qui reflète une bonne conductivité du matériau. Cette faible impédance suggère que le système est très réactif aux courants de Foucault, indiquant que les défauts n'affectent pas significativement la réponse à basse fréquence.
- **A 60 KHz** : Dans ce cas-ci on voit que , les valeurs de ΔZ varient de 0.0008 à -0.1330, indiquant que le système réagit aux vibrations. Les fluctuations montrent que les interactions au sein du matériau deviennent plus complexes. ces variations révèlent que le système est sensible aux vibrations, et les valeurs négatives sont essentielles pour l'analyse des défauts et l'optimisation des techniques de détection.
- **A 100 KHz** : Dans cette situation il est évident qu'il existe des variations de ΔZ montrent des fluctuations significatives, allant de -0.0003 à 1.5130. Ces variations indiquent que le système réagit aux vibrations, révélant des comportements dynamiques complexes. Les valeurs négatives signalent des variations de phase, suggérant la présence de défauts dans le matériau. Ces fluctuations mettent en évidence des interactions internes, ce qui implique que les défauts influencent la réponse électrique du matériau. En résumé, ces résultats sont essentiels pour l'analyse et la détection des anomalies.

CONCLUSION

Le contrôle non destructif par courants de Foucault est une méthode efficace et sans contact, utilisée principalement dans les secteurs aéronautique et automobile pour détecter les anomalies de surface. Cette technique repose sur l'induction de courants dans des matériaux conducteurs, ce qui permet de repérer les défauts sans endommager la pièce. Un élément crucial de cette méthode est la fréquence d'excitation. Des études montrent qu'à basse fréquence, la détection est difficile, tandis qu'à des fréquences élevées, la sensibilité et la précision augmentent. En ajustant cette fréquence, on peut affiner la zone de détection, améliorant ainsi la fiabilité des résultats.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En conclusion, ce travail a mis en lumière l'importance cruciale des techniques de détection avancées, comme les courants de Foucault, pour assurer la maintenance et la fiabilité des moteurs asynchrones, en particulier pour les rotors à cage d'écureuil. L'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics s'est révélée particulièrement efficace pour la modélisation et la simulation des phénomènes électromagnétiques, permettant une identification précise des défauts sans endommager les matériaux. Les résultats obtenus confirment l'utilité de ces approches pour une maintenance préventive efficace dans un contexte industriel.

Ce mémoire souligne également le rôle clé de la simulation numérique dans l'optimisation des processus de maintenance, tout en ouvrant des perspectives pour de futures recherches. Celles-ci pourraient se concentrer sur l'amélioration des méthodes de simulation et l'intégration de nouvelles techniques de détection afin d'assurer une meilleure performance et durabilité des systèmes électrotechniques. Ces avancées permettront d'accroître la fiabilité des équipements dans divers secteurs industriels, renforçant ainsi la sécurité et la compétitivité des infrastructures techniques.

Références

- [1] Ch. Rahmoune, « Electrotechnique fondamentale II », Cours Maintenance industrielle, Université de Boumerdes, 2021.
- [2] Dj. Akkou, M. Boumediene. « Optimisation d'une série de moteurs asynchrones à cage d'écureuil », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2008.
- [3] A. Bassaid, A. Bouzouar, M. Seghir, « Modelisation des contraintes thermiques d'un moteur asynchrone à cage sous FEMM », Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [4] W. Benatta, Fz. Rahmani, Kh Chenni. « Diagnostic des défauts rotoriques de la machine asynchrone par la technique du Périodogramme. Mémoire Master, Université Salhi Ahmed de Naama, 2020.
- [5] T. Merzouki. «Modélisation couplée électrique magnétique mécanique des machine asynchrone à cage en régime transitoire par la méthode des éléments finis ». Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.
- [6] N. Belahcel, F. Chebli. « Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil pourvue de cales ferromagnétique ». Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [7] B. Boukhari, T. Amini. « Calcule des pertes fers dans la machine asynchrone ». Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [8] A. Henka, M. Ghenbaz, K. Benali. « Commande scalaire d'une machine asynchrone triphasée ». Mémoire Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2020.
- [9] O. Hadj Saadi, S. Djoumakh. « Identification Des Paramètres D'un Moteur Asynchrone à Rotor Bobiné ». Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [10] R.Meziane, N. Ouerdi. « Etude et commande de la machine asynchrone ». Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2008.
- [11] S. Belkacem, O. Mekherbeche. « Etude comparative sur la commande électrique de la machine asynchrone application Véhicule électrique ». Mémoire Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2020.

Références

- [12] N. Moha. : « Détection et correction des défauts dans les systèmes orientés objet. Génie logiciel [cs.SE]. Thèse doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2008.
- [13] Kh.Makara. « Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : détection des courts-circuits par suivi paramétrique. Automatique / Robotique ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse – INPT, 2009.
- [14] D. Rolo, P. Lénéel . « Théorème vivant. Entretien avec Cédric Villani » Article Éditions Martin Média, Dans Travailler 2015/1(n° 33) 2, pages 105 à 120.
- [15] R. khaldi. «Diagnostic de pannes dans les installations électrique ».Cours, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [16] M. Sadki. «Diagnostic des defaults de la machine asynchrone par analyse spectrale ». Article, Université Mohamed V-école Mohammadia d'ingénieurs, 2016.
- [17] E. Schaeffer, S. Bachir. « Modélisation des défaut de bobinage de la machine asynchrone pour son diagnostic ». Mémoire Master, Université Hermès science, Diagnostic des machines électriques, 25 juin 2013.
- [18] A. Bouaicha, B. Rabie. « Diagnostic de défauts rotorique d'une machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil ». Mémoire Master, Ecole nationale Polytechnique.
- [19] H. Cherif. « Détection des défauts statorique et rotorique de la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et on delletes ». Mémoire Magister, Université Mohamed khider de Biskra, 2014.
- [20] J. Vaïssette. « Moteur asynchrone : tout (vraiment tout) ce que vous devez savoir sur le moteur du futur ». Article, Fanatique d'Excel, adepte de Camus & ingénieur en mécanique, 2021.
- [21] N. Arkoub, B. Salé Bourkaou. « Amélioration des performances du démarrage d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil avec insertion des pièces ferromagnétiques dans les encoches rotoriques ». Mémoire Master, Université Abderahmane Mira Bejaia, 2017.
- [22] K. Kada, T. Gharabi. «Contrôle non destructif ». Mémoire Master, Université ahmed doraya Adrar, 2018.

Références

- [23] L. Hemdane, O. Guenoun. « Evaluation de défauts d'un composite en alliage utilisée dans l'aéronautique par le procédé du contrôle non destructif par courant de Foucault ». Mémoire Master, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2023.
- [24] L. Bidi. « Contrôle non destructif (CND) ». Cours, Université frères Mentouri Constantine 1, 2019.
- [25] A. Harouz. « Reconstitution de défauts complexes avec la méthode des réseaux de neurones. Application pour les évaluation non destructive ». Thèse doctorat Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [26] J. Dumont-Fillon. « Contrôle non destructif (CND) ». Techniques de l'ingénieur, 2023.
- [27] HB. Boujemaa. « Examain visuel et magnétoscopie ». Cours Université Msila, 2018.
- [28] H. Mehadden. « Étude du Contrôle et de l'Évaluation Non-Destructifs dans les Milieux Magnétiques ». Thèse doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Thèse doctorat, 2019.
- [29] H. Bouyer. « Contrôle Non Destructif ». Techniques de l'ingénieurs. Mars, 2022.
- [30] E. Bouaddallah, M. Matallah. « Réalisation d'une maquette didactique pour les mesures CND (courant Foucault) ». Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouaregla, 2022.
- [31] C. Zorni. « Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèled'interaction ». Thèse doctorat, Université Paris-Sud 11, 2012.
- [32] W. Slimane. « Coception d'un système Multi-Capteurs à courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) ». Mémoire Magister, Université El Hadj Lakhdar Batna, 2008.
- [33] S. Bourjuignon, S. Moussaoui, T. Adjamian. « Contrôle non destructif par ultrasons ». Article. Campus centrale Nantes, 2019.
- [34] MS. Soudani. « Contrôle Non Destructif Par Ultrasons Analyse et Diagnostic ». Mémoire Magister, Université Cheikh El-Arbi Tébessi Tébessa, 2009.
- [35] N. Boulay. « Modélisation des capteurs d'émission acoustique en vue de la simulation d'un contrôle. Mécanique des matériaux ». Thèse doctorat. Université Paris-Saclay, 2017.

Références

- [36] M. Georges, C. Thizy, J. Lewandowski, L. Scheed, L. Mouret, R. Dubé, P. Venegas, I. Jorge, I. Lopez, Ph. Demy. « Comparaison de techniques CND émergentes sur des pièces aéronautiques en matériaux composites ». 13e colloque international francophone sur les mesures et techniques optiques pour l'industrie, Orléans, 2013
- [37] M. Zeddani. « Localisation des défauts dans les structures par Ultrason ». Mémoire Master, Université 8 mai 1945 de Guelma, 2015.
- [38] A. Trillon. « Reconstitution de défauts à partir de données issues de capteur à Courant de Foucault avec modèle direct Différentiel ». Thèse doctorat, Université de Montréal, 2010.
- [39] T. Lagouge. « Méthode appliquée à la détection des défauts sur les systèmes mécaniques dans un objectif de maintenance prédictive des systèmes industriels par l'analyse des vibrations ». Thèse doctorat, Université Johannesburg, 2006.
- [40] E. Bouabdellah, M. Matallah, « Réalisation d'une maquette didactique pour les mesures CND en courant Foucault ». Mémoire Master Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022.
- [41] M. Sedai. « Le CND par Courants de Foucault ». Cours, Université Mohamed Khidher Biskra, 2005.
- [42] J. Dumont. « Contrôle non destructif par Courants de Foucault ». Techniques de l'ingénieur, 1996
- [43] M. Belkadi, H. Houassine. « Calcul des Pertes par courants de Foucault dans une tôle ferromagnétique d'un transformateur ». Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2008.
- [44] R. Khatir. « Matériaux du Génie Electrique ». Cours Ecole Supérieure en Génie Electrique et Energétique d'Oran, 2017.
- [45] Ch. Zorni. « Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques de l'expérience au modèle d'interaction ». Thèse doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2012.
- [46] M. Pereira. « Forçages électromagnétiques dans les métaux liquides ». Thèse doctorat, Université Sorbonne, 2018.

Références

- [47] 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 Master, Université A. Mira Bejaia, 2014.
- [48] S. Layadi , N. Tarzout. «Modélisation numérique d'un capteur différentiel dédié au contrôle non destructif par courants de Foucault des structures tubulaires». Mémoire Master Université M'hamed Bougara de Boumerdes, 2022.
- [49] A. Hammouda. « Approche physique dans la détermination de caractéristiques des matériaux en contrôle non destructif par courant de Foucault ». Mémoire magister, Université Saad Dahleb, 2003.
- [50] A. Abbassi. «Etude pour la Réalisation d'un Banc D'essai Destiné pour la Détection de Défauts et la Caractérisation des Matériaux de l'aéronautique». Thèse doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 20 octobre 2022.
- [51] A. Abdelhak. «Contrôle non Destructif (CND) étude et modélisation d'un capteur inductif à courant de Foucault». Mémoire Magister, Université Batna 2, 08 février 2018.
- [52] F. Bouali. « Utilisation d'une méthode semi-analytique pour l'étude du contrôle non destructif en régime pulsé ». Mémoire Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [53] P. Mottard. « Méthodes semi-analytiques en vibration non linéaire ». Thèse doctorat, Université Laval Québec, 2011.
- [54] F. Tercha F. Yousfi. «Approximation par différences finies de l'équation de transport étude comparatives». Mémoire master, Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued, 2018.
- [55] Y. Shi. « Résolution numérique des équations de Saint-Venant par la technique de projection en utilisant une méthode des volumes finis dans un maillage non structuré ». Mémoire Master, Sciences de la Terre. Université de Caen, 2006.
- [56] J. Yvonnet. « Nouvelles approches sans maillage basées sur la méthode des éléments naturels pour la simulation numérique des procédés de mise en forme ». Thèse doctorat, Mécanique. Arts et Métiers Paris Tech, 2004.
- [57] Marc DufLOT. « Application des méthodes sans maillage en mécanique de la rupture appliquées ». Thèse doctorat. Université de Liège, 2004.
- [58] BENHADDA Nabil. «Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND) ». Mémoire Magister. Université Hadj Lakhdar de Batna, 16 mai 2015.

Références

- [59] O. Hervé. « Méthode des éléments finis ». Mémoire Master , Ecole Centrale de Nantes, 2008.
- [60] Y. Daf. «Etude par Méthode Stochastique de l'effet de distribution du conducteur sur les performances d'un dispositif électromagnétique ». Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [61] S. Layadi, N. Tarzout. « Modélisation numérique d'un capteur différentiel dédié au contrôle non destructif par courants de Foucault des structures tubulaires ». Mémoire Master, Université M'hamedBougara De Boumerdes, 2022.
- [62] A. Merouani. «Simulation d'une cellule solaire thermo-voltaïque à base du GaSb». Mémoire Master. Université Saad Dahlab de Blida 1, 19 juin 2017.
- [63] M. Dakhli. «Exploitation du logiciel comsolmultiphysics en vue la détection de défaut surfacique dans le contrôle non destructif par courant de Faoucault». Mémoire Master, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2023.
- [64] L. Bakai. « Contrôle non destructif par courant de Foucault (application aux pièces cylindriques et plaques muni d'un alésage ». Mémoire Master, Université Mouhamed Boudiaf Mesila, 2018.
- [65] R. May, I. Louaifi. « Modélisation par éléments finis du contrôle non destructif par courants de Foucault à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics ». Mémoire Master, Université d'Abderrahmane Mira de Bejaia, 2022.

Résumé

Ce mémoire explore l'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics pour détecter les défauts dans la cage d'écureuil d'un moteur asynchrone. Les défauts dans cette partie du moteur peuvent nuire à ses performances. L'objectif est de développer une méthode basée sur la simulation numérique pour localiser ces défauts, notamment à travers l'analyse des courants de Foucault, une technique de contrôle non destructif. En combinant modélisation électromagnétique et mécanique dans COMSOL, ce travail propose une approche innovante pour la maintenance prédictive des moteurs asynchrones, offrant ainsi une meilleure fiabilité et une plus longue durée de vie aux équipements industriels.

Abstract

This thesis explores the use of COMSOL Multiphysics to detect defects in the squirrel cage of asynchronous motors. It focuses on developing a simulation-based method for defect identification using eddy current testing, a non-destructive technique. The work includes a review of motor reliability, common defects, and detection methods, followed by numerical simulations to model and analyze these defects. The results demonstrate that COMSOL is a powerful tool for improving defect detection and predictive maintenance in industrial motors.