

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Saad Dahlab Blida 1

Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales

Département : Construction Aéronautique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Aéronautique

Option : structure

THEME

**Simulation d'une procédure de CND-CF appliquée à une
Structure Multicouches**

Proposé et dirigé par :

Dr. Bennoud Salim

Dr. Sari Elkahina

Réalisé par :

Mr .Bounoua khalil

Promotion : 2022 / 2023

DEDICACES

Je dédis le présent travail à

Mes parents,

Ma famille,

Et à tous mes amis

ملخص:

في مشروع نهاية الدراسة هذا ، تم تخصيص دراسة محاكاة الاختبار الغير مدمر بواسطة تيارات فوكو على هيكل متعدد الطبقات بواسطة برنامج داخلي.

تبدأ المذكرة بمراجعة المراجع حول الأسس النظرية للاختبار غير المدمر بواسطة تيارات فوكو ، ودراسة مبدأ تشغيل تيارات فوكو وتفاعلها مع الهياكل متعددة الطبقات. كما تمت دراسة خصائص العيوب التي يمكن اكتشافها والمواد التي تشكل طبقات الهيكل الهدف الرئيسي هو تحليل فعالية هذا الإجراء في الكشف عن العيوب وتوصيفها في هيكل متعدد الطبقات من خلال تعديل المعلمات التالية: تردد التيار، الناقلية ، سمك الطبقة ، التفاعل بين الطبقات ، المسافة بين المجس والطبقة ، طول تشقق الطبقة ، عمق تشقق الطبقة ومقارنة النتائج المستخرجة.

RESUME :

Dans ce projet de fin d'études, une étude a été consacrée à la simulation d'un contrôle non destructif par Courants de Foucault sur une structure multicouche au moyen d'un **code interne**.

Le mémoire débute par une revue de la littérature sur les fondements théoriques du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault, et l'étude du principe de fonctionnement des Courants de Foucault et de leur interaction avec les structures multicouches. Les propriétés des défauts détectables et les matériaux qui composent les couches de la structure ont également été étudiés.

L'objectif principal est d'analyser l'efficacité de cette procédure dans la détection et la caractérisation des défauts présents dans une structure multicouche, en modifiant les paramètres suivants : fréquence du courant, conductivité, épaisseur de la couche, interaction entre les couches, distance entre la bobine et la couche, longueur et profondeur de la fissure de la couche, et en comparant les résultats extraits.

ABSTRACT:

In this project, a study was devoted to the simulation of a Non-Destructive Testing by Eddy Currents on a multilayer structure using a **house code**.

The study begins with a review of the literature on the theoretical foundations of Non-Destructive Testing by eddy currents, and the study of the operating principle of eddy currents and their interaction with multilayer structures. The properties of detectable defects and the materials that make up the layers of the structure have also been studied.

The main objective is to analyze the effectiveness of this procedure in the detection and characterization of defects present in a multilayer structure, by modifying the following parameters: current frequency, conductivity, thickness of the layer, interaction between the layers, distance between the coil and the layer, length and depth of the crack of the layer and by comparing the extracted results.

REMERCIEMENTS

*Je remercie **Dieu** avant tout.*

Je tiens à remercier très chaleureusement mes encadreurs

***Mr : BENNOUD SALIM, Mme : SARI ELKHAHINA** pour leur aide et leurs conseils le long de ce travail, et pour leur disponibilité.*

*Je remercie très chaleureusement **Mon père et ma mère** et toute ma **famille**.*

Un grand remerciement est également présenté à tous les enseignants du l'institut d'aéronautique et des études spatiales

SOMMAIRE

DEDICACES.....	<u>2</u>
RESUME :.....	<u>3</u>
REMERCIEMENTS	<u>4</u>
SOMMAIRE	<u>5</u>
LISTE DES TABLEAUX.....	<u>6</u>
LISTE DES FIGURES	<u>7</u>
NOMENCLATURE DES SYMBOLES	<u>8</u>
INTRODUCTION GENERALE.....	<u>9</u>
CHAPITRE I : Généralité sur le Contrôle Non Destructif et les structures Aéronautique	<u>11</u>
I.1. Introduction.....	<u>11</u>
I.2. Différentes méthodes de CND	<u>11</u>
I.2.1 Examen Visual	<u>12</u>
I.2.2 Ressuage.....	<u>13</u>
I.2.3 Radiographie	<u>14</u>
I.2.4 Thermographie	<u>14</u>
I.2.5. Ultrasons.....	<u>15</u>
I.2.6 Magnétoscopie.....	<u>16</u>
I.2.7 Thermo- inductive	<u>17</u>
I.2.8 Contrôle par laser	<u>18</u>
I.2.9 Contrôle par Courants de Foucault.....	<u>18</u>
I.3 Structures Aéronautiques	<u>20</u>
I.3.1. classification structurale	<u>20</u>
I.3.1.1. Structure primaire	<u>20</u>
I.3.1.2. Structure secondaire	<u>21</u>
I.3.1.3. Structure tertiaire	<u>21</u>
I.3.2. Eléments structuraux	<u>21</u>
I.3.2.1. Fuselage.....	<u>21</u>
I.3.2.2. ailes.....	<u>22</u>

I.3.2.3. empennage.....	23
I.3.3. Différentes structures	24
I.3.3.1. structures discrètes utilisées en aéronautique	24
I.3.3.2. structures continues utilisées en aéronautique.....	24
I.3.3.3.Structures métalliques	25
I.3.3.4. Structures Composites.....	27
I.4.Conclusion	32
CHAPITRE II : Analyse sur l'état de l'art de l'utilisation des Courants de Foucault	33
II.1.introduction.....	33
II.2.Techniques avancées de détection	33
II.2.1. Capteurs multiplexés.....	34
II.2.2. Capteurs à balayage	34
II.2.3. Techniques d'imagerie	35
II.2.4. Intelligence artificielle et apprentissage automatique.....	35
II.2.5. Techniques de traitement du signal avancé.....	35
II.3. Types de capteurs CND	35
II.3.1 Type de capteur suivant la structure	35
II.3.2.Type de capteur suivant la forme	35
II.3.3.Type de capteur selon sa fonction.....	36
II.3.4.Type de capteur suivant le mode de contrôle.....	36
II.4. Modes d'excitation	37
II.5. Types et origines des défauts	37
II.5.1. Hétérogénéités et défauts	37
II.5.2. Défauts de surface.....	38
II.5.2.1. Défauts ponctuels	38
II.5.2.2. Défauts d'aspect.....	38
II.5.3. Défauts internes.....	38
II.5.4. Origines des défauts	39
II.6. défauts spécifiques de structures multicouches	39
II.6.1.Défaillance de l'adhérence entre les couches	39
II.6.2.la corrosion.....	40
II.6.2.1 La corrosion galvanique.....	40
II.6.2.2 La corrosion sous revêtement.....	41

II.6.2.3 L'effet de barrière	41
II.7. Avantages du CND par Courants de Foucault.....	42
II.8. Limites du CND par Courants de Foucault	42
II.9. Conclusion	43
CHAPITRE III : Modélisation du CND-CF appliquée à une structure multicouche.....	44
III.1. Introduction	44
III.2. Plan d'impédance normalisée.....	44
III.3. Intérêt de la modélisation	45
III.4. Modélisation électromagnétique d'un problème de CND-CF	46
III.4.1. Équations de Maxwell	46
III.4.2. Formulations électromagnétiques	47
III.4.2.1. Formulation en champ magnétique.....	49
III.4.2.2. Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique	49
III.4.3. Lois constitutives	49
III.4.4. Conditions aux limites	50
III.4.5. Conditions de continuité	50
III.4.6. Conditions de Jauge	50
III.4.7. Hypothèses simplificatrices	51
III.4.8. Champs et potentiels.....	51
III.5. Principe des capteurs inductifs	52
III.6. Réponses d'un capteur par CF.....	53
III.6.1. A partir l'énergie magnétique emmagasinée et des pertes Joule	53
III.6.2. A partir l'énergie électromagnétique de la bobine	53
III.6.3. A partir la tension aux bornes du récepteur	54
III.7.Méthodes numériques de résolution.....	54
III.7.1.La méthode des différences finies	55
III.7.2. La méthode des éléments de frontières.....	55
III.7.3. La méthode des intégrales de volumes	55
III.7.4. La méthode des volumes finis	55
III.7.5.La méthode des éléments finis.....	56
III.7.5.1 Principe de la méthode variationnelle.....	56
III.7.5.2 Principe de Formulation résidus pondérés	56
III.8. Conclusion.....	58

CHAPITRE IV : Résultats et discussions	<u>59</u>
IV.1. Introduction	<u>59</u>
IV.2. organigramme de code interne utilisé	<u>59</u>
IV.3. Configuration de test	<u>61</u>
IV.4.Résultats et discussions	<u>61</u>
IV.4.1. Structure multicouche sans défaut	<u>61</u>
IV.4.2. Structure multicouche avec défaut	<u>63</u>
IV.4.3. Influence de la fréquence.....	<u>63</u>
IV.4.4. Influence de la conductivité.....	<u>66</u>
IV.4.5. Influence de l'épaisseur des plaques	<u>70</u>
IV.4.6.Influence de l'écartement (GAP) des plaques	<u>73</u>
IV.4.7. Influence de la distance bobine-pièce (LIFT-OF)	<u>75</u>
IV.4.8. Influence des propriétés de la fissure	<u>76</u>
IV.4.8.1. Influence de la longueur de la fissure	<u>76</u>
IV.4.8.2. Influence de la profondeur de la fissure.....	<u>77</u>
IV.5.Conclusion.....	<u>79</u>
CONCLUSION GENERALE	<u>81</u>
REFERENCES	<u>82</u>

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1.Paramètres du cas étudié	<u>61</u>
Tableau IV.2.Variation de l'impédance normalisée pour différentes conductivités de la couche intérieure	<u>69</u>
Tableau IV.3.Variation des parties réelles pour différentes écartement(GAP)	<u>75</u>

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Contrôle Visual.....	12	
Figure I.2.a. Principe de Ressuage [1].....	13	
Figure I.2.b. Les étapes d'application du Ressuage.....	13	
Figure I.3. Contrôle par radiographie [2].....	14	
Figure I.4. Contrôle par thermographie.....	15	
Figure I.5.a. Principe des Ultrasons [8].....	15	
Figure I.5.b. Matériel d'Ultrasons.....	16	
Figure I.6. Contrôle par magnétoscopie.....	17	
Figure I.7. Contrôle par Thermo-inductive [2].....	17	
Figure I.8.a. Principe des Courants de Foucault.....	18	
Figure I.8.b. Matériel des Courants de Foucault.....	19	
Figure I.9. Différents dispositifs d'un fuselage [8].....	21	
Figure I.10. Vue d'un fuselage d'avion [8].....	22	
Figure I.11. Vue d'une aile avion [8].....	23	
Figure I.12. Exemple d'empennage classique [8].....	23	
Figure I.13. Structures continues utilisées en aéronautiques.....	25	
Figure I.14. Schéma d'analyse des contraintes que subit la 'centrale wing box' d'un avion (vue de profil) [29] ...	26	
Figure I.15. Schéma d'analyse des contraintes subies par la 'centrale wing box' du même avion en vue de face	26	
Figure I.16. Diagramme de structure composite.....	27	
Figure I.17. Distribution des matériaux composites dans les avions civils.....	28	
Figure I.18. Constitution d'une structure monocouche.....	29	
Figure I.19.a. Structure multicouche en aluminium (trappe de train de Boeing 737-800).....	30	
Figure I.19.B. Constitution d'une structure composite multicouche (stratifié) [32].....	30	
Figure I.20. Désignation d'une structure composite multicouche (stratifié) [17].....	32	
Figure II.1. Multiplexeur à relais 16- ou 32- voies [29].....	34	
Figure II.2. Capteur à balayage linéaire H3662 Fife [2].....	34	
Figure II.3. Défauts de surface.....	38	
Figure II.4. Schéma de la corrosion galvanique survenue autour d'un boulon fait d'un alliage de cuivre posé sur une plaque en aluminium [31].....	40	
Figure II.5. La corrosion sous revêtement.....	41	
Figure III.1. Plan d'impédance normalisé.....	45	
Figure III.2. Représentation de la génération de Courants de Foucault par une bobine inductrice-it.....	46	
Figure III.3. Capteur à Courant de Foucault	Figure III.4. Capteur Magnétique.....	52
Figure IV.1. Dispositif expérimental.....	61	
Figure IV.2. Variation de la partie réelle pour différentes épaisseurs de la couche inférieure avec l'absence de défaut.....	62	
Figure IV.3. Variation de la partie imaginaire pour différentes épaisseurs de la couche inférieure avec l'absence de défaut.....	62	
Figure IV.4. Variation de l'impédance normalisée pour différentes épaisseurs de la couche inférieure avec l'absence de défaut.....	63	

<u>Figure IV.5.Variation de la partie réelle pour déférentes fréquences</u>	<u>64</u>
<u>Figure IV.6.Variation de la partie imaginaire pour déférentes fréquences</u>	<u>64</u>
<u>Figure IV.7.Variation de l'impédance normalisée pour déférentes fréquences.....</u>	<u>64</u>
<u>Figure IV.8.Variation de la partie réelle pour déférentes fréquences</u>	<u>65</u>
<u>Figure IV.9.Variation de la partie imaginaire pour déférentes fréquences</u>	<u>65</u>
<u>Figure IV.10.Variation de l'impédance normalisée pour déférentes fréquences.....</u>	<u>66</u>
<u>Figure IV.11.Variation de la partie réelle pour déférentes conductivités de la couche extérieure.....</u>	<u>66</u>
<u>Figure IV.12.Variation de la partie imaginaire pour déférentes conductivités de la couche extérieure</u>	<u>67</u>
<u>Figure IV.13.Variation de l'impédance normalisée pur déférentes conductivités de la couche extérieure.....</u>	<u>67</u>
<u>Figure IV.14.Variation de la partie réelle pour déférentes conductivités de la couche inférieure</u>	<u>68</u>
<u>Figure IV.15.Variation de la partie imaginaire pour déférentes conductivités de la couche inférieure.....</u>	<u>68</u>
<u>Figure IV.16.Variation de l'impédance normalisée pour déférentes conductivités de la couche inférieure</u>	<u>68</u>
<u>Figure IV.17.Variation de la partie réelle pour déférentes épaisseurs de la couche extérieure</u>	<u>70</u>
<u>Figure IV.18.Variation de la partie imaginaire pour déférentes épaisseurs de la couche extérieure</u>	<u>70</u>
<u>Figure IV.19.Variation de l'impédance normalisée pour déférentes épaisseurs de la couche extérieure.....</u>	<u>71</u>
<u>Figure IV.20.Variation de la partie réelle pour déférentes épaisseurs de la couche inférieure.....</u>	<u>71</u>
<u>Figure IV.21.Variation de la partie imaginaire pour déférentes épaisseurs de la couche inférieure.....</u>	<u>72</u>
<u>Figure IV.22.Variation de l'impédance normalisée pour déférentes épaisseurs de la couche inférieure</u>	<u>72</u>
<u>Figure IV.23.Variation de la partie réelle pour déférentes écartement (GAP).....</u>	<u>73</u>
<u>Figure IV.24.Variation de la partie imaginaire pour déférentes écartement (GAP)</u>	<u>73</u>
<u>Figure IV.25.Variation de l'impédance normalisée pour déférentes écartement (GAP).....</u>	<u>74</u>
<u>Figure IV.26.Variation de la partie réelle pour déférentes distances bobine-pièce (LIFT-OF).....</u>	<u>75</u>
<u>Figure IV.27.Variation de la partie imaginaire pour déférentes distances bobine-pièce (LIFT-OF).....</u>	<u>75</u>
<u>Figure IV.28.Variation de l'impédance normalisée pour déférents distance bobine-pièce (LIFT-OF)</u>	<u>76</u>
<u>Figure IV.29.Variation de la partie réelle pour déférentes longueur de la fissure</u>	<u>76</u>
<u>Figure IV.30.Variation de la partie imaginaire pour différentes longueur de la fissure</u>	<u>77</u>
<u>Figure IV.31.Variation de l'impédance normalisée pour déférentes longueur de la fissure</u>	<u>77</u>
<u>Figure IV.32.Variation de la partie réelle pour différentes profondeur de la fissure</u>	<u>78</u>
<u>Figure IV.33.Variation de la partie imaginaire pour déférentes profondeur de la fissure</u>	<u>78</u>
<u>Figure IV.34.Variation de l'impédance normalisée pour déférentes profondeur de la fissure.....</u>	<u>79</u>

NOMENCLATURE DES SYMBOLES

F_c	étant la force critique
F_t	est la force de frottement,
F_n	est la force normale
M	est le coefficient de frottement
\vec{H}	Vecteur champ magnétique
\vec{B}	Vecteur induction magnétique
\vec{E}	Vecteur champ électrique
\vec{D}	Vecteur induction électrique
$\overline{j_{ind}}$	Densité de courants de Foucault
\vec{j}_s	Densité de courantes sources
$\overline{j_{sur}}$	Module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$)
\vec{n}	Vecteur normal à une surface
j	Nombre imaginaire ($j^2 = -1$)
\vec{A}	Potentiel vecteur magnétique
V	Potentiel scalaire électrique
\vec{T}	Potentiel vecteur électrique
Φ	Potentiel scalaire magnétique
R	Résistance électrique
X	Réactance
L	L'inductance propre

F	fréquence des signaux
t	temps
ω	Pulsation du courant d'excitation
ϵ_0	Permittivité électrique absolue du vide
ϵ_r	Permittivité électrique relative
σ	Conductivité électrique
P	densité de charge volumique
Δ	épaisseur de peau
μ_0	Perméabilité magnétique absolue du vide
μ_r	Perméabilité magnétique relative
Γ	frontière du milieu
$\vec{\nabla}$	Opérateur gradient
$\vec{\nabla} \cdot$	Opérateur divergence
$\vec{\nabla} \wedge$	Opérateur rotationnel
N	nombre de spires de la bobine
I_s	courant d'excitation instantané
I_0	valeur maximale du courant d'excitation
J_0	valeur maximale de la densité du courant d'excitation
r_e	Rayon externe de la bobine
r_i	Rayon interne de la bobine
h	hauteur de la bobine
e	épaisseur de la plaque

z	profondeur considérée à l'intérieur de la pièce
Z	impédance du capteur
Z_0	impédance du capteur à vide
ΔZ	variation de l'impédance
λ	longueur d'onde
Ω	domaine d'étude
Ω_s	région source
Ω_c	région conductrice
$\bar{\sigma}$	Tenseur de conductivité électrique
σ_L	Conductivité longitudinal
σ_T	Conductivité transversale aux fibres
σ_{ZZ}	Conductivité selon l'épaisseur du pli
\vec{j}^*	indconjugué du vecteur \vec{j}
ρ_{sur}	est la densité surfacique de charge
\vec{B}^*	conjugué du vecteur \vec{B}
P_j	puissance active dissipée dans la charge
$\bar{\rho}$	Tenseur de résistivité de la charge en CFRP
δ	déterminant de la matrice de résistivité

W_m Énergie magnétique dans tout le domaine d'étude

ΔR partie réelle de la variation de l'impédance

ΔL Variation de l'inductance

ΔX partie imaginaire de la variation de l'impédance

ΔZ Variation de l'impédance

θ angle d'orientation des fibres

B_r Induction magnétique rémanente

INTRODUCTION GENERALE

Les Techniques de Contrôle Non Destructif (CND) consistent à établir l'état d'intégrité d'une structure, appelée structure « cible », sans la dégrader. L'intérêt principal de ces techniques est de répondre néanmoins à des enjeux majeurs de la société de développement technologique, tels que la sécurité des systèmes industriels et des personnes aussi bien que la fiabilité de ces systèmes [1].

Ces techniques vont du simple examen visuel à des méthodes complexes faisant appel à différents domaines de la physique (optique, électromagnétique, thermique, ultrasonores, rayons ionisants...). Elles sont exploitées dans de très nombreux secteurs industriels, dont les secteurs nucléaires et aéronautiques, pour des raisons de sécurité évidentes, mais également pour des raisons économiques [2].

La détection de défauts dans les structures aéronautiques et spatiales suscite un grand intérêt, que ce soit durant la phase de fabrication ou bien lors des opérations de maintenance. Les moyens pour contrôler l'intégrité de ces structures doivent donc être rapides, précis, fiables, à faible coût, et le plus miniaturisés possible [1-2]. Le CND par capteurs à Courants de Foucault est bien adapté à la détection de défauts dans les structures multicouches en aluminium. Cette technique est basée sur l'analyse des changements de l'impédance globale de la bobine dans les environs du défaut. La configuration du dispositif électromagnétique est constituée par capteur (bobine) absolue ou un capteur différentiel placé à l'extérieur ou à l'intérieur d'un tube conducteur, [1-2].

La technique des Courants de Foucault (CF) est largement utilisée dans le domaine du CND, dès lors qu'il s'agit de matériaux électriquement conducteurs. Elle représente par exemple environ la moitié des contrôles dans le domaine de l'aéronautique. Cette méthode est en effet sensible à des défauts dans l'état géométrique ou électromagnétique d'une pièce est connue, comme des inclusions, des fissures ou les effets de la corrosion. De plus, elle est aisée à mettre en œuvre, robuste dans le cadre des applications industrielles et relativement peu coûteuse. Cependant, le besoin grandissant de fiabilité et de rapidité pour les opérations d'inspection requiert le développement de nouveaux systèmes de contrôle [1].

L'objectif visé par ce travail est l'étude et la simulation d'un système de contrôle par Courants de Foucault sur des structures multicouches dans le but est d'optimiser par la suite les meilleurs caractéristiques relatives à ce système permettant de concevoir des capteurs et des structures plus fiables et plus sécurisées. Ce mémoire est organisé autour de plusieurs chapitres :

* Le premier chapitre consiste à présenter des généralités sur le CND et les différentes structures en aéronautique.

* Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse sur l'état de l'art de l'utilisation et la modélisation du problème de CND par CF et aux équations de Maxwell permettant d'obtenir l'évolution des champs électriques et magnétiques dans le domaine d'étude.

* Le troisième chapitre est focalisé sur la formulation et la modélisation du problème de CND-CF et aux équations de Maxwell.

* Le quatrième chapitre sera réservé à la simulation, et aux résultats de simulation obtenus.

**Le mémoire terminera par une conclusion générale et des perspectives pour la continuité de ce travail.

CHAPITRE I : Généralité sur le Contrôle Non Destructif et les structures Aéronautique

I.1. Introduction

Dans le contexte des systèmes industriels, l'évaluation et le contrôle des équipements jouent un rôle crucial pour garantir la fiabilité et la sécurité. Que ce soit pendant la fabrication, l'utilisation en service ou lors des opérations de maintenance, il est essentiel de mettre en place des méthodes de caractérisation et d'inspection. Parmi ces méthodes, les techniques de Contrôle Non Destructif (CND) offrent la possibilité d'examiner les propriétés physiques et géométriques des pièces, ainsi que d'étudier le cycle de vie des matériaux et des structures, le tout sans les endommager.

Grâce aux efforts fournis par les chercheurs du domaine, actuellement le CND s'applique presque sur tous les matériaux, qu'ils soient homogènes comme l'aluminium ou non comme les composites CFRP et GFRP (matériaux composites à fibre de verre). Ce développement a contribué fortement à éviter l'arrêt des chaînes de production, les accidents divers tels que les crashes d'avions, la détérioration voire l'explosion des sites nucléaire et pétroliers, Les gains ainsi réalisés, sans interruption des processus, sont considérables aussi bien sur le plan économique qu'en terme de sauvegarde des vies humaines. Ce chapitre présente les différentes techniques de CND et ses domaines d'application ainsi qu'une présentation des structures multicouche. Notre présentation se concentrera spécifiquement sur l'application de l'approche CND-CF aux structures multicouches.

I.2. Différentes méthodes de CND

A partir de la deuxième guerre mondiale, la fabrication des dispositifs et composants industriels a connu une évolution en constante augmentation. Ceci a motivé le développement de techniques et d'outils de contrôle, et notamment de contrôle non destructif spécialisé. Ces techniques et approches ont une interdépendance avec la nature physique des matériaux utilisés pour la pièce contrôlée, le type d'information recherchée, ainsi qu'avec les conditions de mise en œuvre du processus [3].

La diversité des matériaux utilisés et des phénomènes manipulés par les instruments a motivé le développement d'une grande variété de techniques de CND parmi lesquelles nous pouvons citer le ressage, la radiographie, la thermographie, les ultrasons, le bruit Barkhausen et les méthodes

électromagnétiques. De même que l'on peut distinguer plusieurs configurations de capteurs pour la même technique CND adaptée à différentes configurations géométriques ou de procédures de fonctionnement et traitement [3].

I.2.1 Examen Visual

I.2.1.1 Principe

Chronologiquement l'examen visuel est le plus ancien. Cette procédure techniquement très simple fait toutefois appel à une véritable expertise et à un sens aigu de l'observation des agents qui l'effectuent. L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. En examen préalable, l'inspection visuelle d'un objet, d'une structure ou d'un assemblage tel qu'une soudure permettra de guider un observât expérimenté dans la définition d'une autre technique [3].

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect inadmissibles pour des produits plats du types tôles, tissus, verres,...etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limites de différentes natures, que nous allons examiner et justifiant l'utilisation de toute une gamme de procédés de contrôle optique (éclairage, loupe, miroir, ...) [4,5].

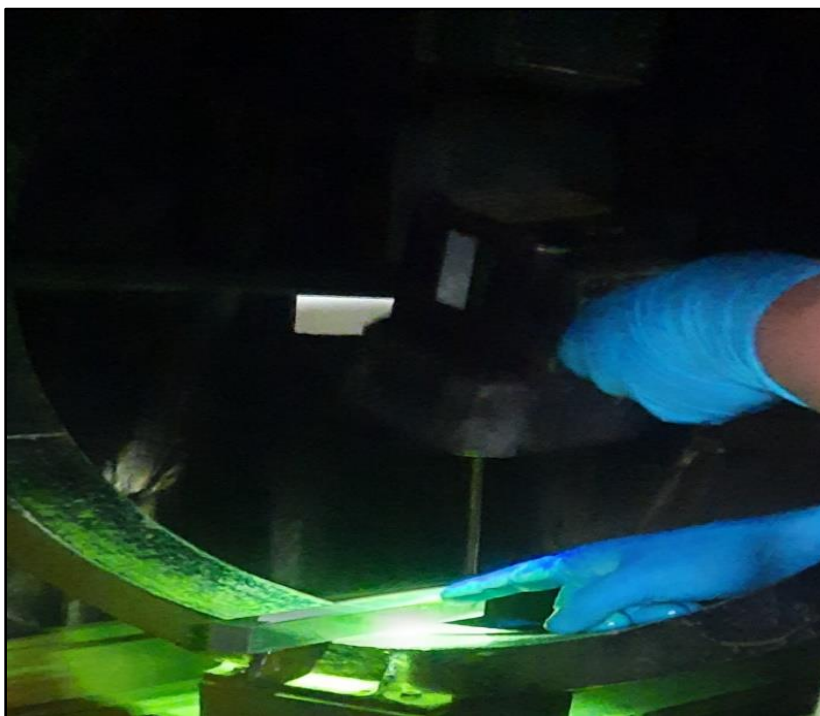


Figure I.1. Contrôle Visual

I.2.2 Ressuage

I.2.2.1 Principe

C'est une technique destinée à révéler la présence de fissures en surface de pièces planes ou quasi-planes. Elle consiste à badigeonner la cible avec un liquide fluorescent, qui pénètre dans les fissures (Figure I.2), [5] Après nettoyage de la cible, un révélateur est appliqué et en réagissant avec le liquide restant dans les fissures, Va la révélé.

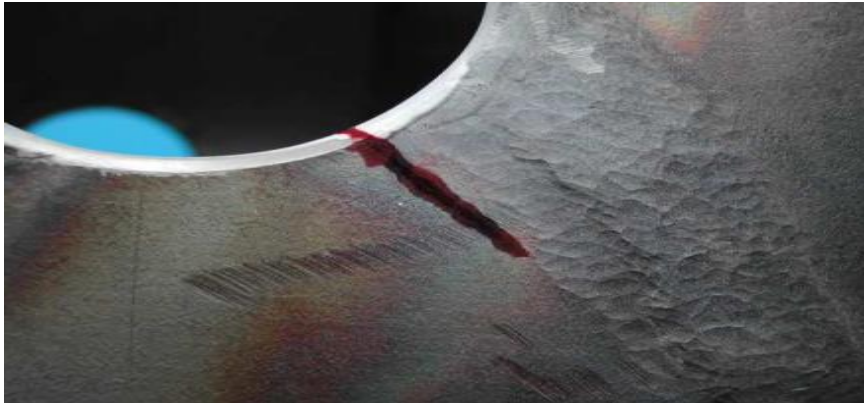


Figure I.2.a.Principe de Ressuage [1]



Figure I.2.b. Les étapes d'application du Ressuage

I.2.3 Radiographie

I.2.3.1 Principe

Le contrôle par radiographie consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement ionisant (rayons X ou γ) et à recueillir le signal atténué sur un récepteur (film photographique ou capteur électronique) qui convertit ce rayonnement en une image visible. Les rayonnements subissent une absorption proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé (Figure I.3). Ce contrôle peut s'appliquer à de très nombreux types de matériaux pour mettre en évidence et dimensionner des hétérogénéités telles que des porosités, des soufflures, des amas d'inclusions, des criques, des fissures, des manques de pénétration en soudure..., au stade de la production ou en maintenance. Les défauts se présentant perpendiculairement à la direction du faisceau sont plus difficilement détectables [6].

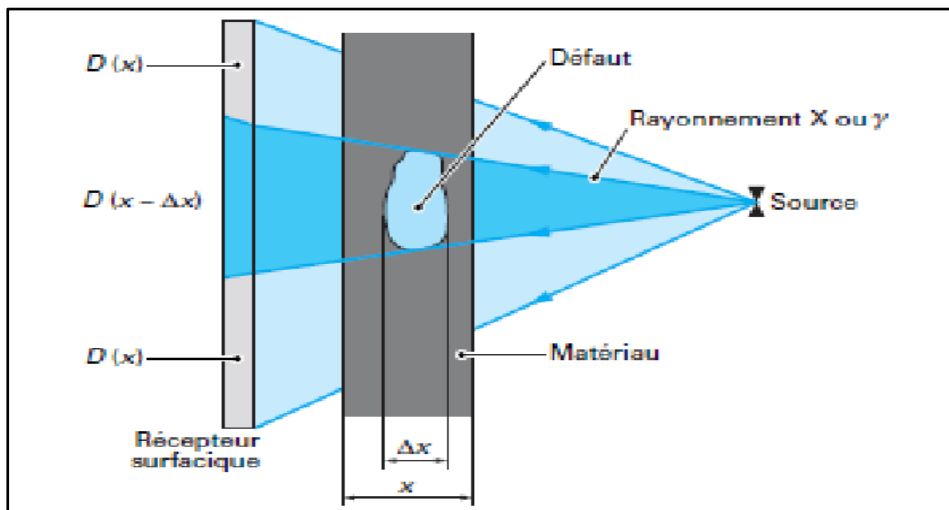


Figure I.3. Contrôle par radiographie [2]

I.2.4 Thermographie

I.2.4.1 Principe

Cette technologie est applicable pour le contrôle de défauts volumiques et de défauts de surface. Le contrôle par thermographie consiste à produire dans la structure à tester un échauffement local homogène et à observer l'évolution de la température après un certain temps de latence. Les défauts présents constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques pouvant être détectées par une caméra infrarouge (Figure I.4). L'observation et la stimulation peuvent s'effectuer sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages) et pour le contrôle de matériaux céramiques, qui sont des conducteurs de chaleur relativement médiocres [6].

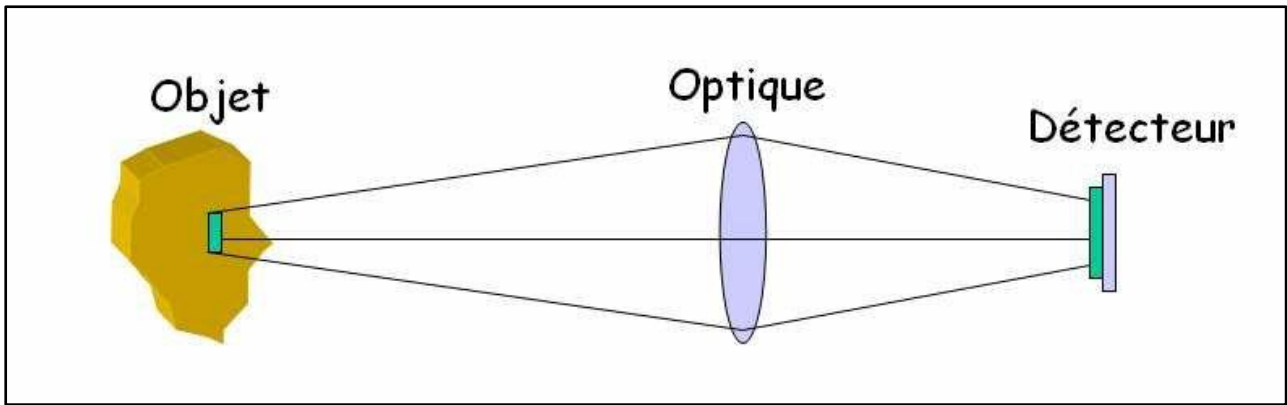


Figure I.4. Contrôle par thermographie

I.2.5. Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises (Figure I.5.). Le contact entre le transducteur et la cible n'est jamais parfait ; il existe une couche d'air les séparant. La quasi-totalité de l'énergie émise par le transducteur à l'interface air matériau ne pénètre pas à l'intérieur du matériau. Il y a ainsi nécessité de déposer un couplant (eau, huile par exemple) entre le transducteur et le matériau [3].

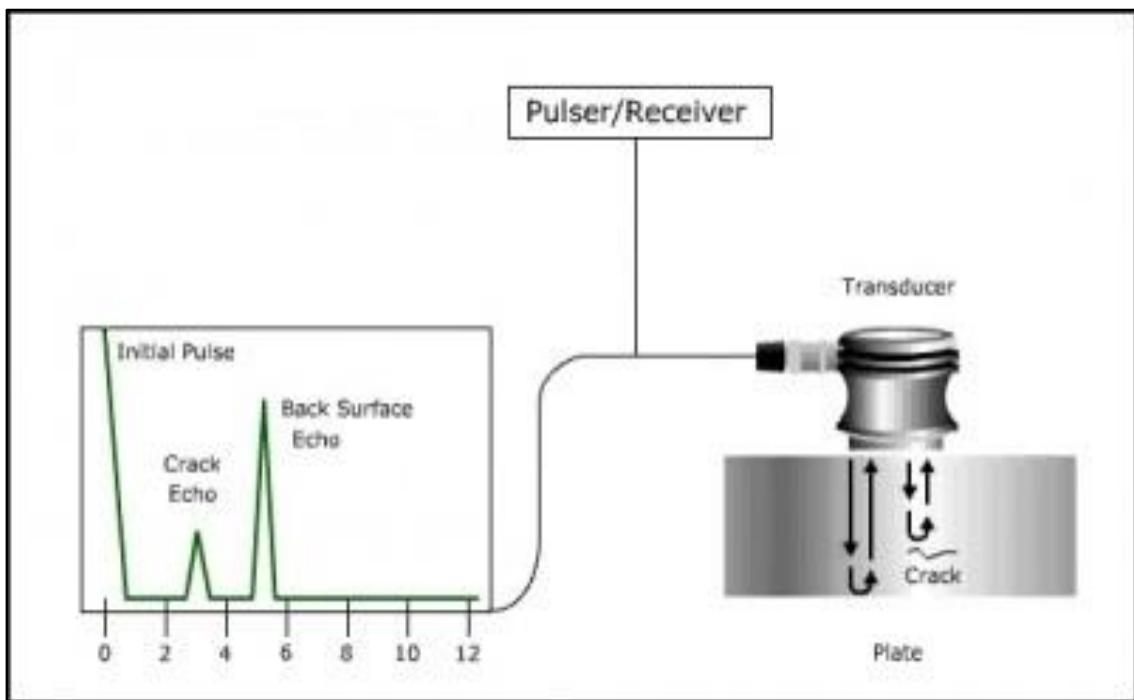


Figure I.5.a. Principe des Ultrasons [8]



Figure I.5.b. Matériel d'Ultrasons

I.2.6 Magnétoscopie

I.2.6.1 Principe

La magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructive pour la détection des défauts débouchant ou sous-jacents (de 1 à 2 mm de la surface) dans les matériaux ferromagnétiques. Elle consiste à créer un flux magnétique intense dans les structures entraînant, au droit des défauts, des flux de fuite (Figure I.6.). Ces flux sont mis en évidence par des révélateurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux ou, de façon plus marginale, par une mesure directe avec des capteurs. Il s'agit, dans la majorité des cas, d'une inspection visuelle réalisée par un opérateur. La sensibilité de détection est liée en partie à la granulométrie des poudres magnétiques utilisées, qui doivent être très homogènes. Le contrôle peut se faire de façon automatisée sur [6].

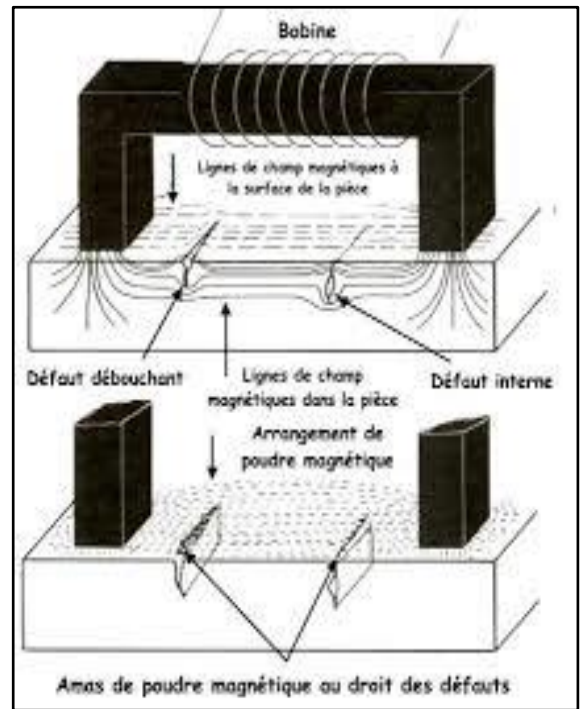
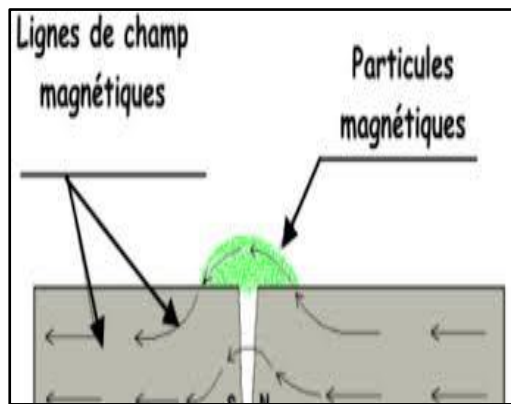


Figure I.6. Contrôle par magnétoscopie

I.2.7 Thermo- inductive

I.2.7.1 Principe

La thermographie inductive consiste à placer une pièce conductrice dans un champ magnétique généré par un inducteur alimenté par une source alternative. À l'intérieur de la pièce, l'inducteur crée des Courants de Foucault qui chauffent celle-ci. En conséquence, l'existence d'un défaut présente un obstacle à la propagation de la chaleur. La distribution de la température dans la pièce à contrôler est fonction de ses propriétés thermiques et de sa géométrie. L'acquisition des résultats s'obtient par l'utilisation d'une caméra infrarouge. Les résultats sont, ensuite, interprétés à partir des différences de température pour détecter et caractériser les défauts [7].

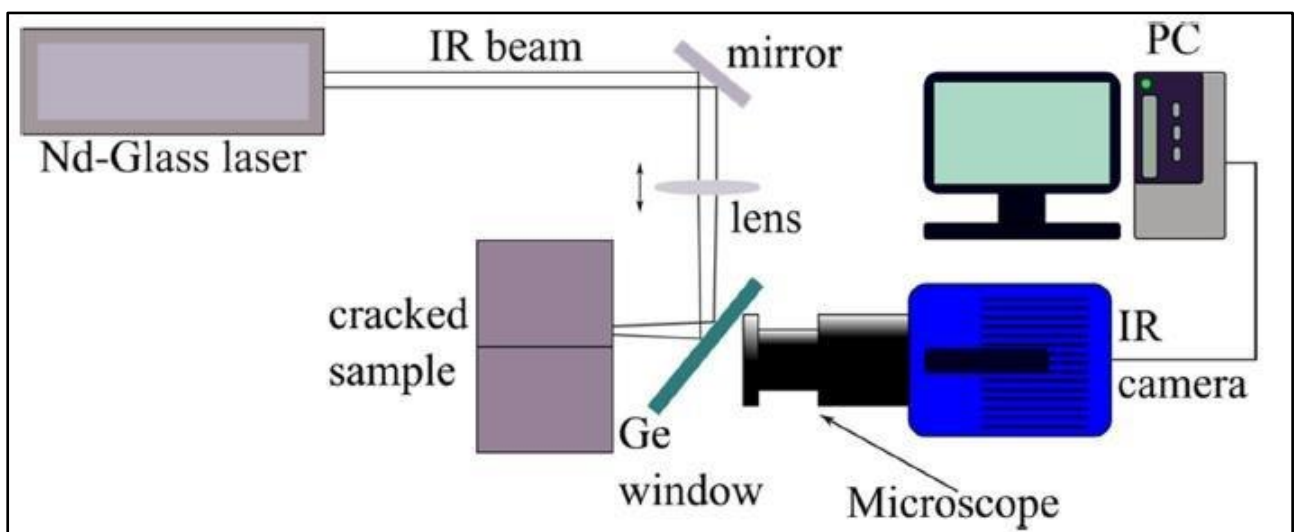


Figure I.7. Contrôle par Thermo-inductive [2]

I.2.8 Contrôle par laser

I.2.8.1 Principe

La méthode de contrôle par laser est parmi les méthodes optiques les plus répandues en contrôle non destructif. Comme elle est aussi sans contact, les objets irréguliers et les surfaces non planes peuvent être inspectés sans problèmes d'usure. Le mot laser est un acronyme pour amplification légère de la radiation de l'émission stimulée. Cette lumière est très intense, essentiellement monochromatique (longueur d'onde unique), plan polarisé (unidirectionnel) et très stable. Les méthodes de contrôle non destructif par laser sont populaires dans les industries aéronautiques et automobiles [18].

I.2.9 Contrôle par Courants de Foucault

I.2.9.1 Principe

Le contrôle par Courants de Foucault consiste à induire des courants électriques dans des matériaux conducteurs à l'aide d'un capteur. Ces courants induits circulent localement dans le matériau et leur distribution et répartition dépendent du champ électromagnétique d'excitation, de la géométrie, des caractéristiques de conductivité électrique et de la perméabilité magnétique de la pièce examinée.

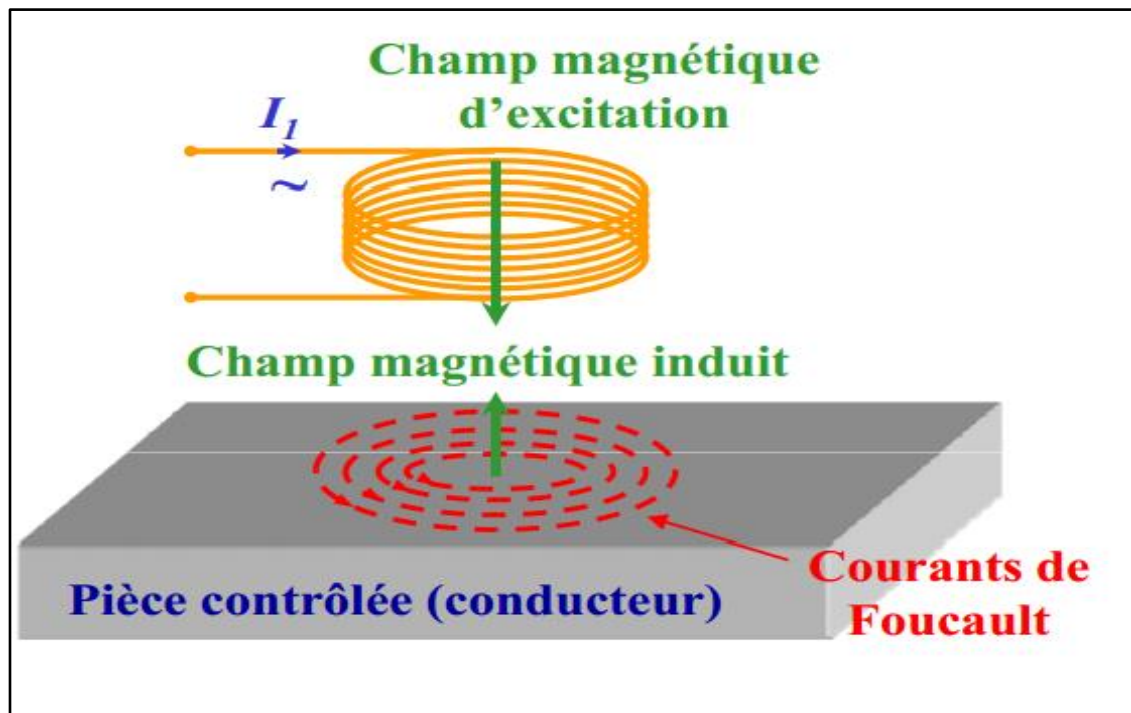


Figure I.8.Principe des Courants de Foucault

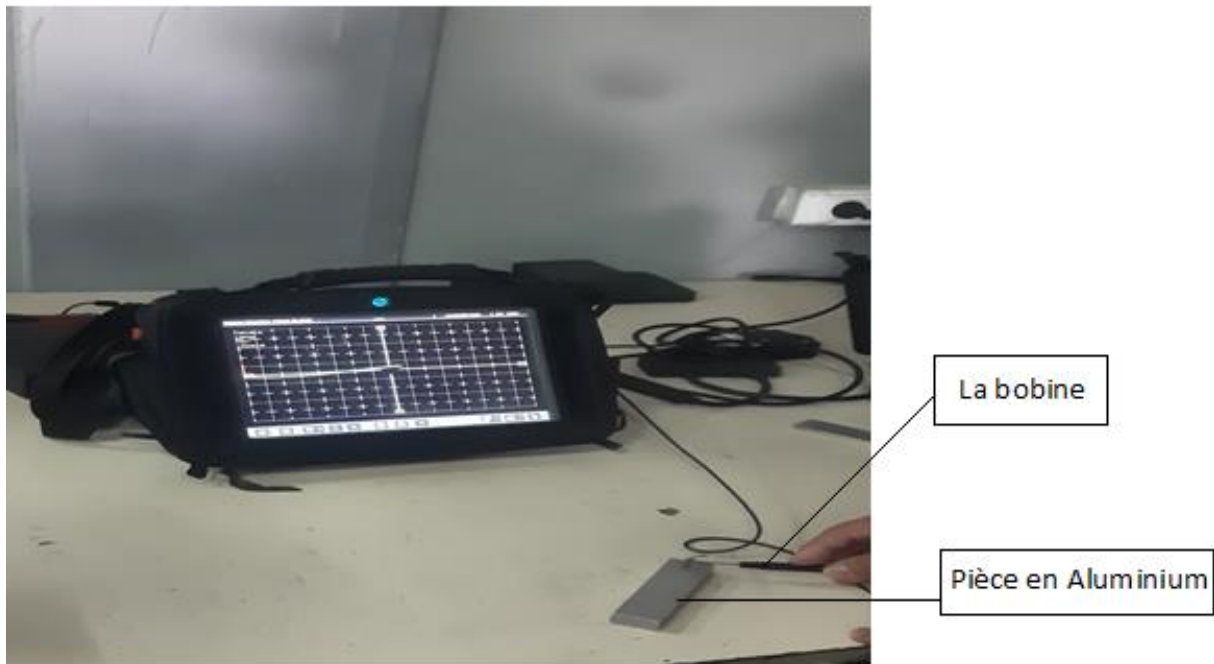


Figure I.8.b. Matériel des Courants de Foucault

Cette méthode est utilisée pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les Courants de Foucault ont une tendance de se rassembler principalement à la surface des matériaux conducteurs (effet de peau). Si on considère une configuration simple (pièce plane infinie) excitée par un dispositif d'excitation extérieur (bobine) de fréquence f , l'onde plane électromagnétique générée par ce dispositif se propage orthogonalement à la surface plane de la pièce et la densité de courant dans la pièce est révélée par la relation suivante [26] :

$$J(z) = J_s \exp(-z\sqrt{\pi f \sigma \mu}) = J_s \exp(-\frac{z}{\delta}) \quad (I.1)$$

Avec :

– z la profondeur considérée. – $J(z)$ la densité de courant en fonction de la profondeur z .

– J_s la densité de courant à la surface ($z = 0$). – δ épaisseur de peau.

La relation (I.1) montre que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur (plus z est grand, c'est à dire plus on pénètre en profondeur dans la cible, plus le module de la densité de courant est faible).

Cette méthode est très appréciée du fait des ses possibilités diverses offertes par la sensibilité de détection et l'automatisation aisée de la technique. Elle s'applique à tous les matériaux conducteurs de l'électricité pour la recherche de défauts débouchant ou situés à des profondeurs faibles (de zéro à

quelques mm), pour la mesure d'épaisseur des revêtements isolants ou de conductivité de différentes couches et également pour déceler les variations de composition d'un alliage. En effet, elle est de plus adaptée aux contrôles de structures cylindriques (barres, tubes) et aux contrôles de surface (tôle) [26].

Avantages et limites de la méthode des Courants de Foucault:

Comme pour toute technique de contrôle CND, la méthode des Courants de Foucault possède des avantages et des limitations. Au niveau des avantages, cette méthode peut détecter les défauts de surface et ceux près de la surface. La sonde d'essai n'a pas besoin d'entrer en contact direct avec la pièce testée. De plus, la méthode peut être utilisée pour plus d'applications que la seule détection de défauts et enfin une préparation minimale des pièces est nécessaire. Il existe cependant des limitations.

Tout d'abord, la méthode est restreinte aux matériaux conducteurs. De plus, l'inspection des matériaux ferromagnétiques peut être influencée par la perméabilité magnétique. Ensuite, la profondeur d'inspection (pénétration) est limitée. Les compétences et la formation requises sont plus importantes que pour les autres techniques de CND. Notons aussi que la finition et la rugosité de la surface peuvent interférer. Les Courants de Foucault sont applicables sur les défauts débouchant. Et enfin, des normes de références sont nécessaires pour la configuration [8].

I.3 Structures Aéronautiques

Le développement de la mécanique dans le domaine de l'aéronautique est assez récent (une cinquantaine d'années environ), encore plus en ce qui concerne les structures et les nouveaux matériaux utilisés dans plusieurs domaines industriels mécaniques en général et aéronautiques en particuliers. Les motivations à l'origine de ce développement viennent des soucis de concevoir le comportement de ces structures et ces matériaux dans leur état de déformation élastique, aéro élastique et leur limite élasto plastique afin de prévoir leur fissuration et leur destruction afin d'éviter leur ruine totale et optimiser leur durée de vie. Ce qui permettra de déterminer leur résistance et leur performance vis-à-vis de leur sécurité et leur coût d'exploitation [9].

I.3.1. classification structurale

La structure d'un avion est divisée en trois catégories très différentes.

I.3.1.1. Structure primaire

La structure primaire d'un avion est la structure « vitale », c'est à dire l'ossature sans laquelle l'avion ne peut pas voler. Les couples, longerons, lisses, nervures, supports moteurs, revêtements, ferrures, etc. font partie de la structure primaire [8].

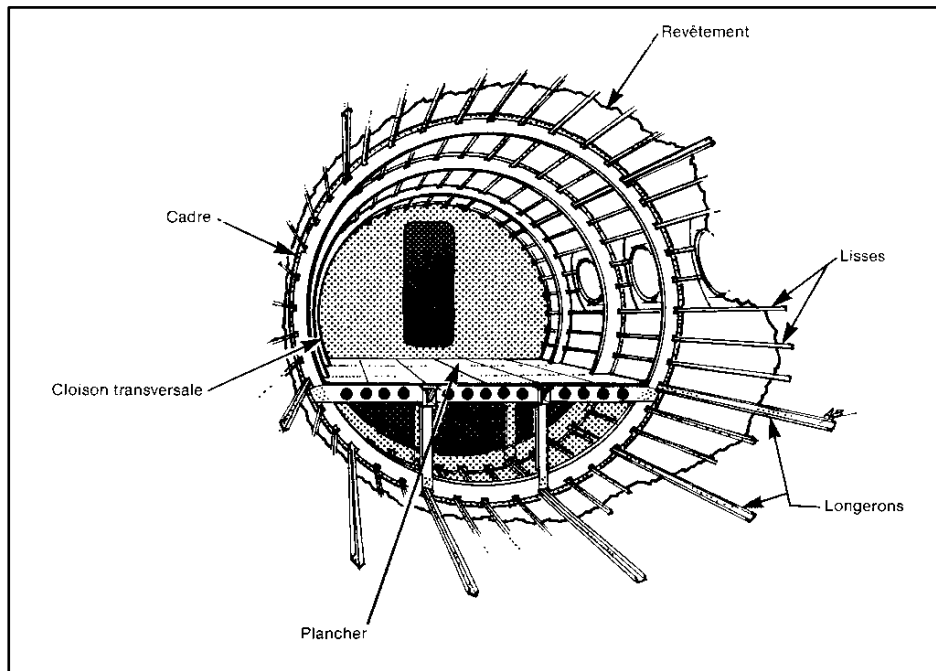


Figure I.9. différents dispositifs d'un fuselage [8]

I.3.1.2. Structure secondaire

La structure secondaire d'un aéronef est la structure nécessaire mais non indispensable au vol. C'est à dire les supports, aménagements et équipements qui si ils rompent durant le vol diminueront les performances de l'avion parfois de façon très importante mais dont la rupture ou l'absence n'empêcheront pas la fin du vol [8].

I.3.1.3. Structure tertiaire

La structure tertiaire est la structure « légère » souvent amovible, dont l'aménagement diffère en fonction de la compagnie aérienne. Les cloisons cabines par exemple font partie de la structure tertiaire si elles ne sont pas utilisées comme renfort de structure.

Attention, très souvent, il sera tentant de considérer des éléments comme étant de structure tertiaire, mais une cloison de séparation entre une cabine et une soute cargo, par exemple, assure l'étanchéité en cas d'utilisation d'extincteurs et fait donc partie de la structure secondaire [8].

I.3.2. Eléments structuraux

I.3.2.1. Fuselage

Le fuselage est monocoque sur les gros porteurs. Le fuselage monocoque est formé, comme son nom l'indique, d'une seule coquille. C'est le revêtement, appliqué sur une série de cadres servant à donner la forme, qui absorbe tous les efforts. De fait, c'est comme si on joignait des tôles bout à bout pour former un tube. Pour avoir une résistance et une rigidité suffisantes, il faut utiliser des tôles épaisses qui sont lourdes. On rencontre les fuselages monocoques sur de petits avions

seulement. Pour alléger cette structure, on se sert parfois de feuilles d'aluminium sandwich, qui sont utilisées abondamment dans d'autres sections des cellules [8].

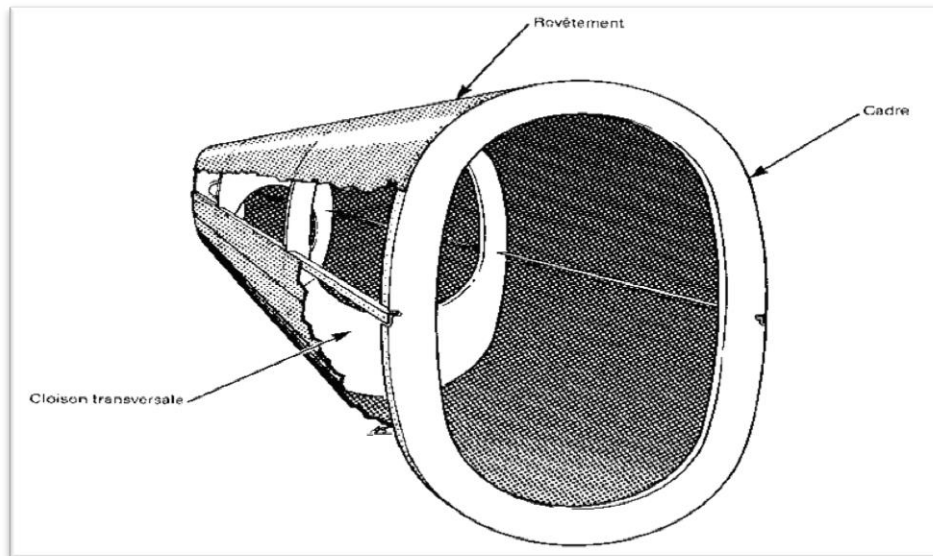


Figure I.10. Vie d'un fuselage d'avion [8]

I.3.2.2. ailes

La voilure (ou simplement l'aile) est la partie d'un avion assurant la transformation de la vitesse de l'avion en force de portance qui permet le vol. L'empennage la complète au point de vue de la stabilité.

Chaque demi-voilure est constituée d'un (ou de plusieurs) longerons attachés au fuselage au niveau de l'emplanture. Les nervures supportent les revêtements supérieur (extrados) et inférieur (intrados) et transmettent les charges aérodynamiques aux longerons. La voilure peut également être le support de différents systèmes de navigation comme les feux de position (aux extrémités), les phares d'atterrissage, ou de pilotage (détecteur de décrochage). Y sont également fixés d'autres dispositifs, par exemples de fines tiges parfois terminées par des brosses en fibres de carbone (déperditeur de potentiel) permettant d'éliminer la charge électrostatique formée par la friction de l'air[8].

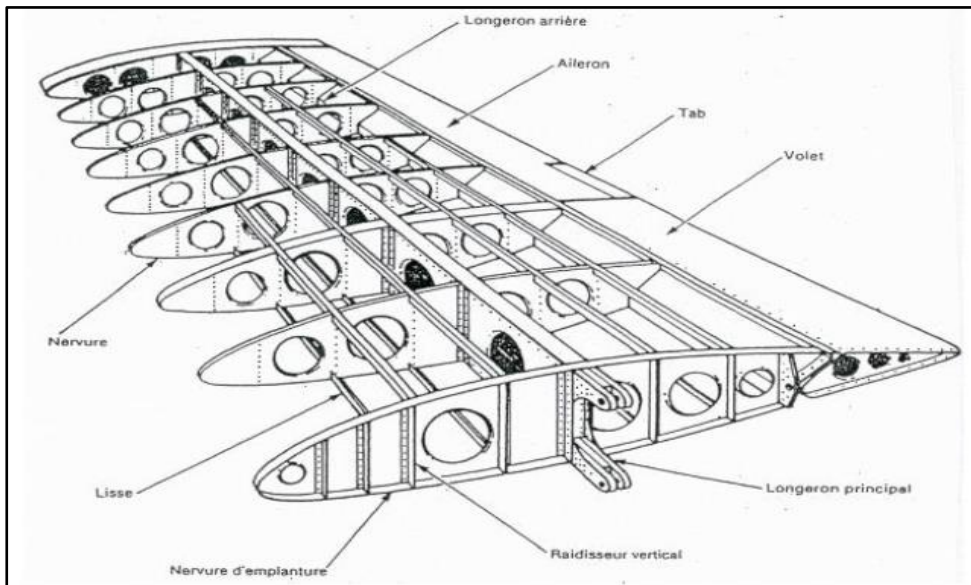


Figure I.11. vie d'une aile avion [8]

I.3.2.3. empennage

L'ensemble des surfaces disposées à l'arrière du fuselage s'appelle empennages. Ils permettent de stabiliser et de manœuvrer l'avion en tangage et en lacet.

Il existe les empennages horizontaux et verticaux : l'empennage horizontal assure la stabilité et la manœuvre de l'avion autour de l'axe de tangage, l'empennage vertical évite le dérapage et assure la stabilité et la manœuvre de l'avion en lacet.

Il existe différents types d'empennages : Classiques surélevés, type canard, bi-poutre, bi-dérive, tri-dérive et en Vé ou papillon.

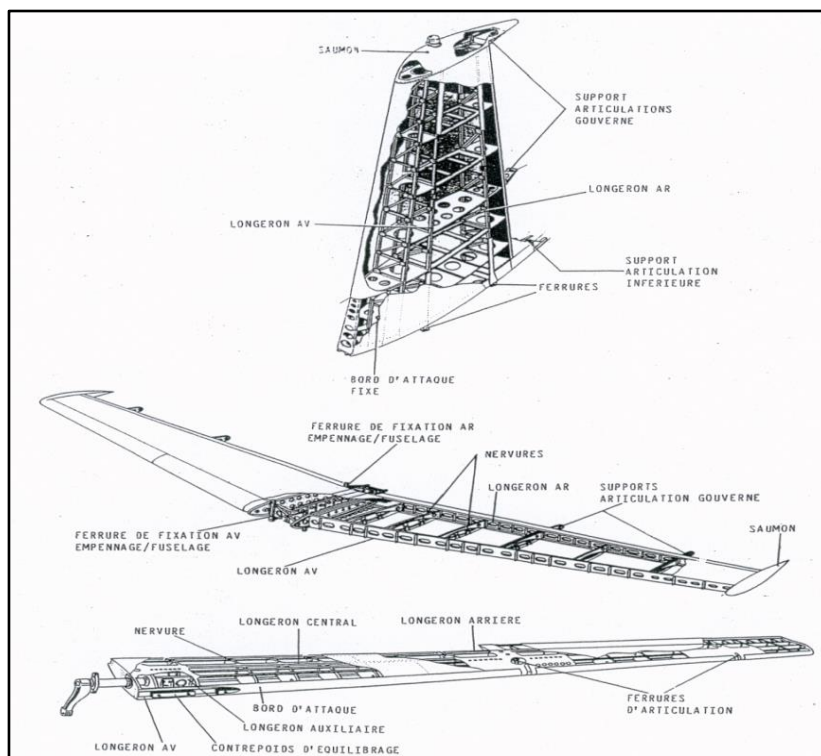


Figure I.12. Exemple d'empennage classique [8]

I.3.3. Différentes structures

les structures utilisés en aéronautique sont souvent constituées de systèmes discrètes complexes composées de sous-ensembles (moins complexes) assemblées en treillis, poutres, plaques ou coques de grandes dimensions et enveloppées par des matériaux légers en aluminium ou bien en différents matériaux composites (Figure I.16.) [9].

Dans le domaine de l'assemblage de ces différents matériaux, les composites à fibres de verre et d'aluminium à matrice polymère sont les plus rencontrés et dont deux familles sont en grande concurrence : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Les thermoplastiques ont une matrice dure à température ambiante, qui peut être ramollie plusieurs fois par chauffage. Tandis que les thermodurcissables sont polymérisés de façon irréversible [10]. Les enjeux associés à l'une ou l'autre famille sont à caractère :

- Technique : Les thermodurcissables sont irremplaçables sur les pièces structurales mais ne peuvent être assemblés que par collage alors que les thermoplastiques se prêtent au soudage.
- Economique : Les thermoplastiques sont plus rapides à mettre en œuvre et a priori suivant des procédés plus facilement automatisables.
- Et même écologiques : Les thermoplastiques sont potentiellement recyclables.

C'est en fonction de ces critères que le concepteur et le producteur ont à faire un choix. Par ailleurs, les procédés de fabrication sont justement au cœur des préoccupations des industriels qui ont à maîtriser la robustesse tout en augmentant les cadences de fabrication d'où la recherche d'automatisation. L'accroissement de l'utilisation de composites fait apparaître de nouveaux challenges aujourd'hui avec l'Écoconception : développement de résines « vertes », utilisation de fibres naturelles végétales (chanvre, lin ...), mise au point de procédés respectueux de l'environnement et recyclage des composites [11].

I.3.3.1. structures discrètes utilisées en aéronautique

Les structures discrètes ont une grande importance dans les domaines de l'application de la mécanique, l'aéronautique, l'aérospatiale et le génie civil. Les structures discrètes sont composées d'un assemblage de solides en éléments élastiquement déformables, lié à un bâti constituant le solide de référence, lui-même rapporté à un repère orthonormé $\{x \ y \ z\}$. Aussi leurs liaisons intérieures et extérieures sont supposées bilatérales et conservatives et possèdent une rigidité élastique linéaire ainsi que les forces extérieures constituant le chargement dérivent d'une énergie potentielle scalaire indépendant du temps [12].

I.3.3.2. structures continues utilisées en aéronautique

Les structures continues sont souvent les matériaux qui enveloppent les structures discrètes en aéronautique. Elles sont souvent constituées d'un assemblage de fibres de verre, de polymère, de carbone ou d'aluminium. Elles sont des structures habituellement composées de forme plaques, coques, triangles, tétraèdres, cubes, etc. L'élément conique ou bien sphérique raidie par des raidisseurs longitudinaux ou bien circonférentiels. Ce type d'assemblage permet la mise au point de structures plus stables à forts moments quadratiques. L'étude dynamique de telles structures nécessite la connaissance des théories de coques axisymétriques et de poutres. Afin de pouvoir étudier la structure globale, on peut s'attacher à étudier séparément les sous-structures simples qui sont d'une part les coques et d'autre part les poutres. Ces dernières vont constituer les raidisseurs, que ce soit dans le sens circonférentiel ou

le sens longitudinal. On aura alors à faire respectivement à des poutres circulaires ou des poutres droites. Les structures de coques minces avec raidisseurs sont très largement employées dans le domaine aéronautique afin de garantir la tenue mécanique notamment vis-à-vis du flambement. Ainsi, ces structures sont utilisées, tant au niveau du fuselage des avions que de celui des lanceurs. Dans le secteur spatial, les applications dans la conception des satellites sont fréquentes. Les structures coques peuvent constituer aussi bien le corps des satellites que les panneaux solaires ou les tuyères des moteurs (Figure I.13.) [9].

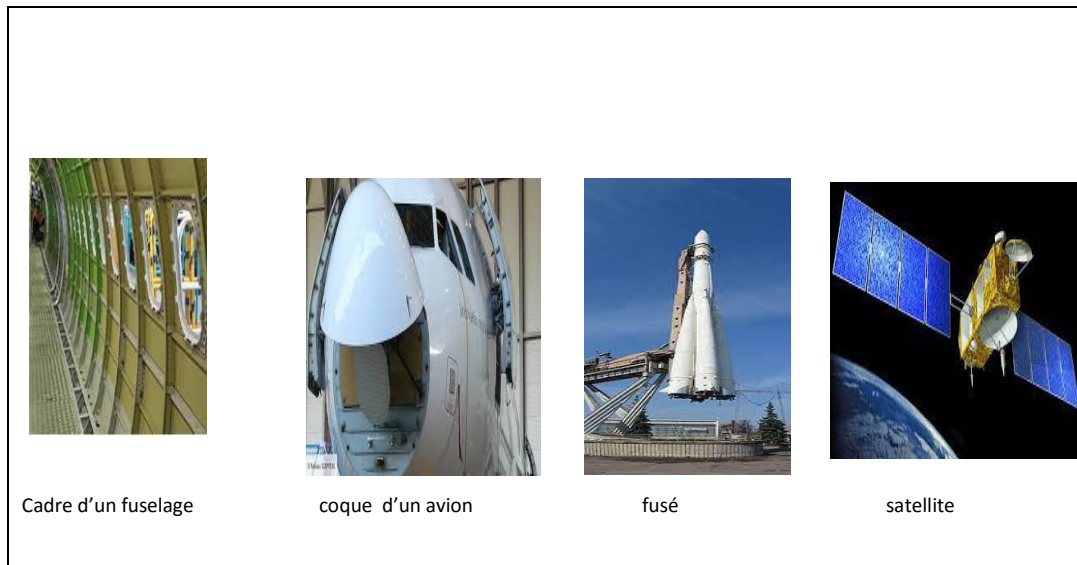


Figure I.13. Structures continues utilisées en aéronautiques

I.3.3.3. Structures métalliques

Lorsque l'on découvre un défaut isolé sur une structure, il est assez délicat d'en trouver l'origine, d'autant plus que certains facteurs physiques tels que l'humidité, la température ou les changements de pression atmosphérique, jouent un facteur de catalyseur.

Dans les faits, une structure aéronautique est conçue et calculée de sorte à pouvoir supporter plusieurs types de contraintes. Suivant la nature et la fonctionnalité de la pièce, cette dernière est amenée à supporter des contraintes de cisaillements, de torsions ou de compressions, voire les trois à la fois. La 'wing box' centrale par exemple, qui est une pièce critique de l'avion à la jonction entre les ailes et le fuselage, subit une multitude de contraintes que l'on peut visualiser sur les Figure I.14 et Figure 15 I.15 [16].

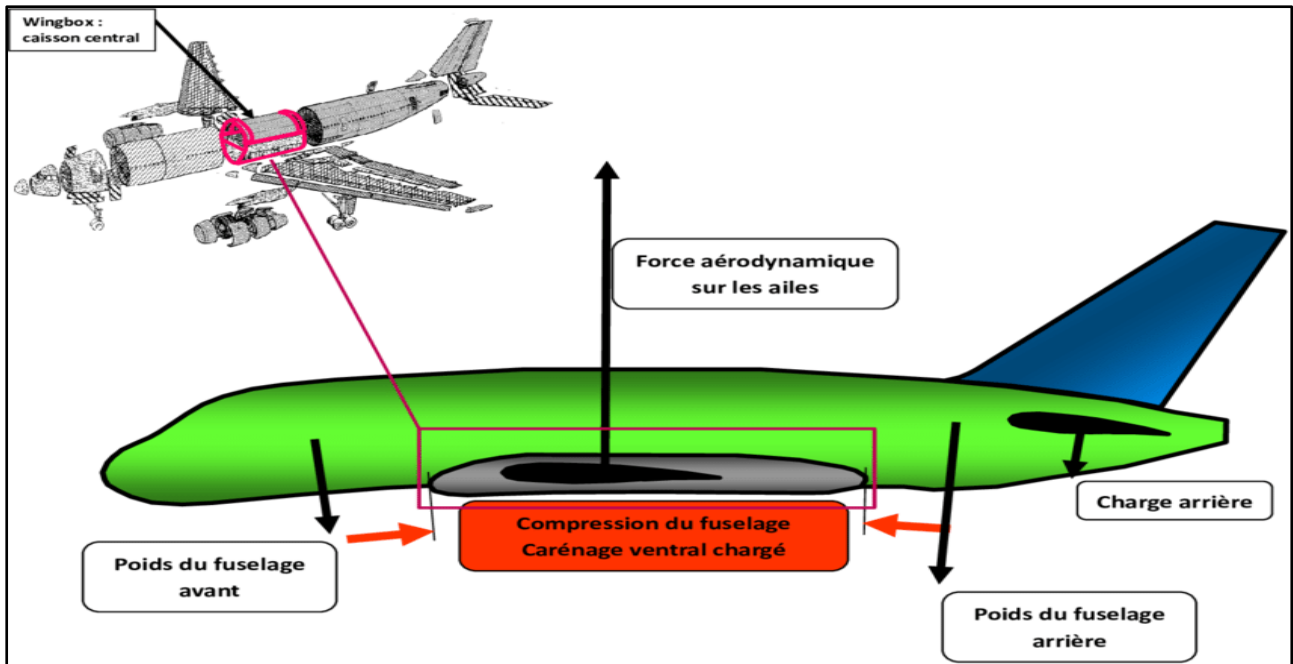


Figure I.14. Schéma d'analyse des contraintes que subit la 'centrale wing box' d'un avion (vue de profil) [29]

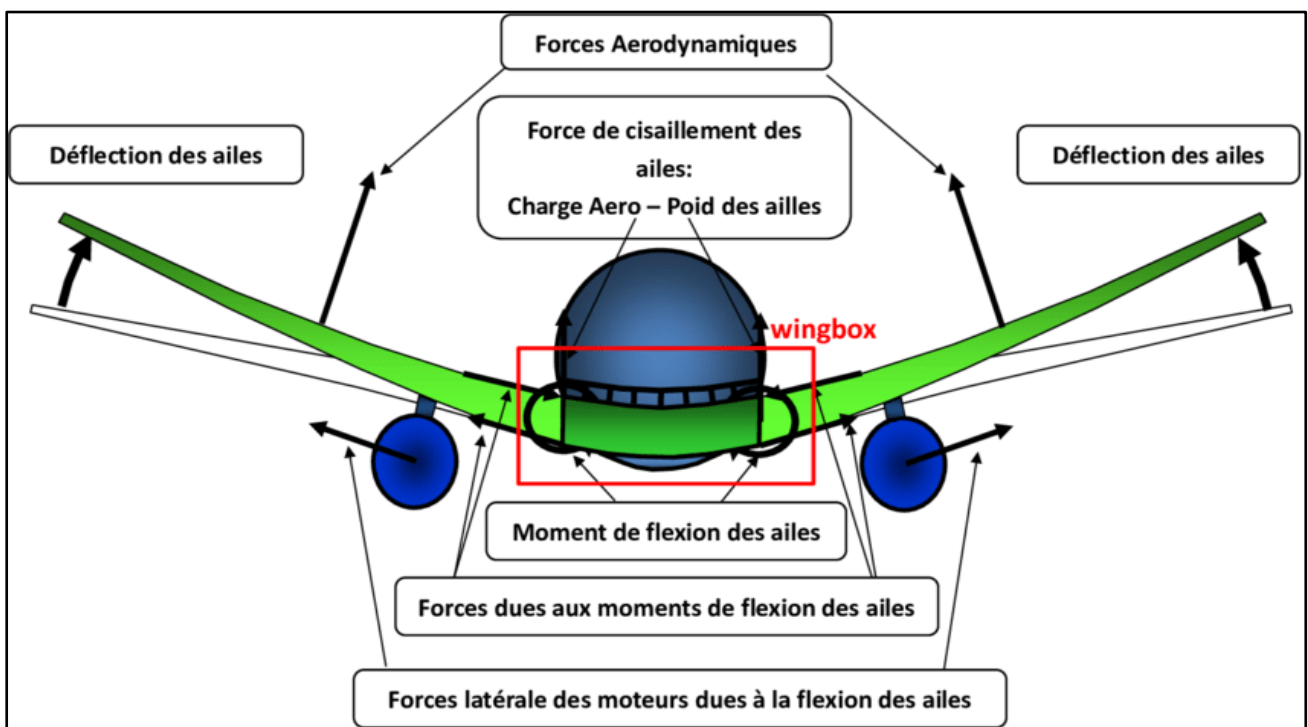


Figure I.15. Schéma d'analyse des contraintes subies par la 'centrale wing box' du même avion en vue de face

Cette zone de l'avion est clairement la plus exposée à la fatigue. Ainsi, malgré des inspections récurrentes, des défauts dus à ces cycles d'opérations apparaissent assez régulièrement comme en témoignent deux crashes survenus à un mois d'intervalle aux USA : celui du Lockheed C-130 du US Forest Service sur 17 juin 2002 et vol N7520C d'un P4Y-2 le 18 juillet 2002. L'enquête du NTSB a révélé l'existence de fissures de fatigue cachées dans le caisson central de voilure [16].

I.3.3.4. Structures Composites

Initialement en bois puis en alliage métallique, l'industrie de l'aéronautique s'est dirigée depuis une vingtaine d'années vers les matériaux composites en fibres de carbone ou de verre. Plus légers et plus résistants, ces matériaux de nouvelle génération devraient, à terme, faire baisser le poids total des avions et donc réduire leur consommation d'énergie.

Les structures composites utilisées en aéronautique sont répertoriées en Figure 16, et leur répartition dans une structure d'avion indiquée en Figure 17. Elles se divisent dans l'ensemble en deux catégories [16] :

Structures composites simples construites par simple empilement de fibres imprégnées de résine époxy ; on distingue :

- Les composites en fibres de carbone renforcés polymère (CFRP)
- Les composites en fibres de verre renforcés polymère (GFRP)
- Les composites en fibres de quartz renforcés polymère (QFRP)
- Les composites en fibres de verre renforcés aluminium (GLARE)

Structures composites sandwich construites par empilement d'un cœur autour d'une peau extérieure et intérieure. Dans leurs formes les plus communes, elles sont respectivement constituées d'un cœur en fibre de verre en forme de nid d'abeille avec deux peaux en composite CFRP [16].

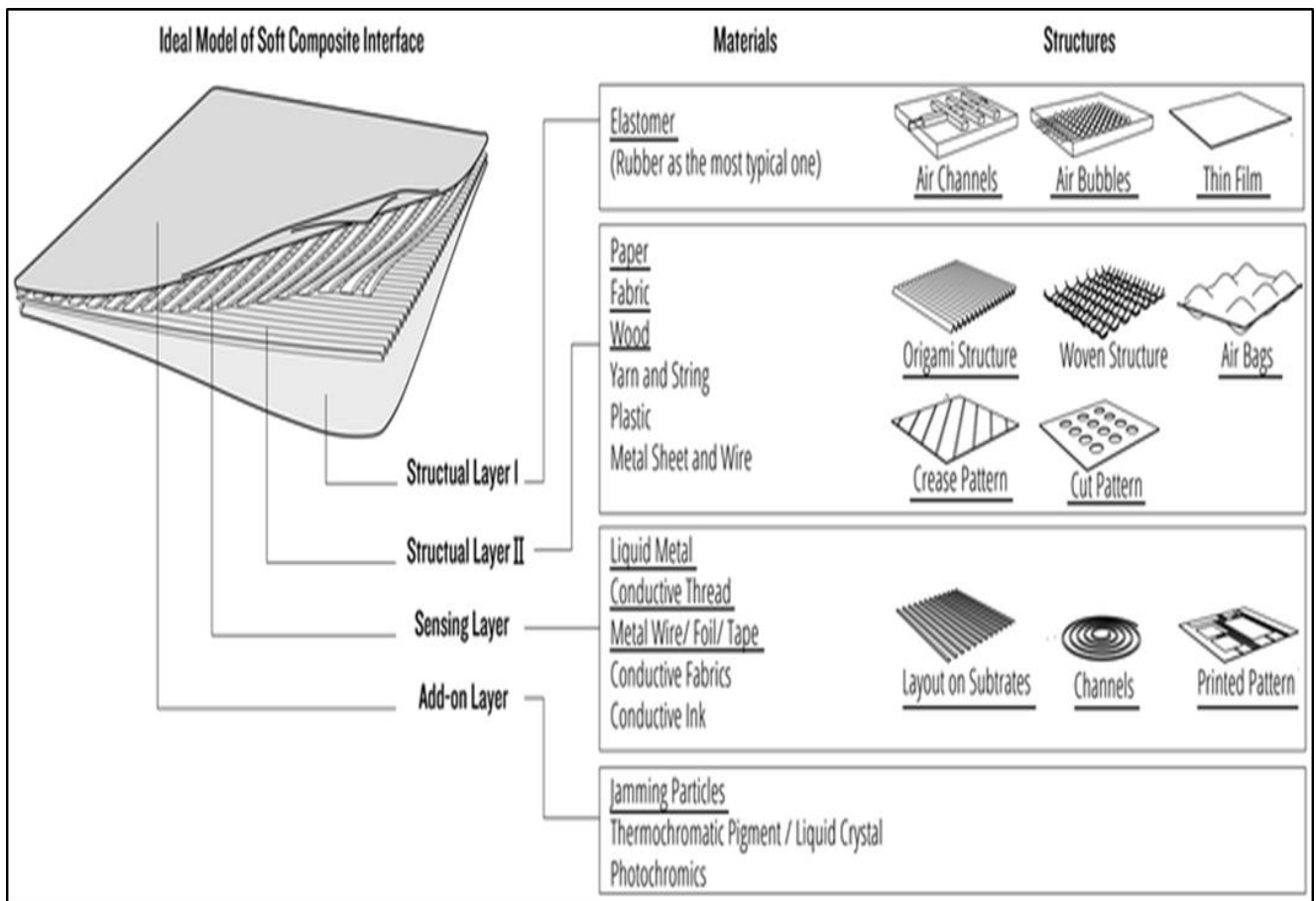
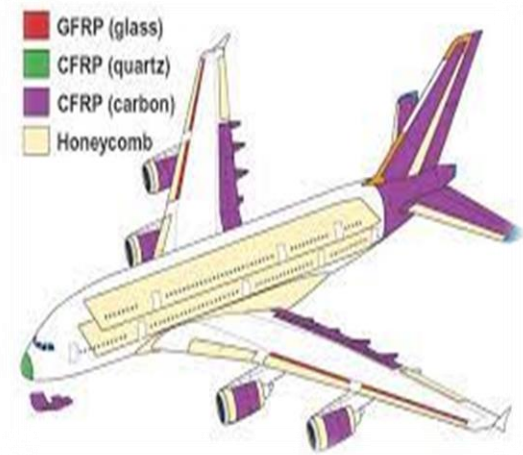


Figure I.16. Diagramme de structure composite



Structures Avions, les Tendances d'Evolution

Compétition : Métal / Composite

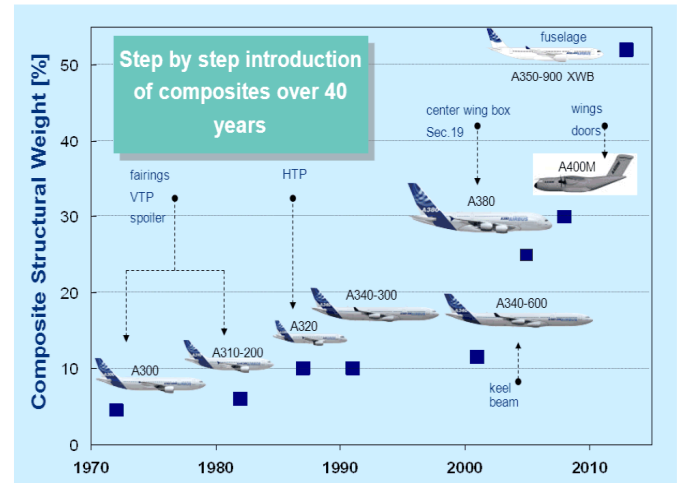


Figure I.17. Distribution des matériaux composites dans les avions civils

Avantages et inconvénients des structures composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté
- Grande résistance à la fatigue
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion
- Insensibilité aux produits chimiques
- Possibilité de prendre plusieurs formes (pièces complexes)
- Bonne tenue au feu (attention aux dégagements toxiques) Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion
- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication
- La sensibilité à la chaleur
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

Structure Monocouches

Le composé monocouche (couche ou couche primaire) correspond à l'unité épaisseur initiale, constituée d'une ou plusieurs couches identiques (tissé, UD, Tapis, ...) groupés sans aucune orientation. La couche est un produit semi-composite (Fibre + Matrice) présenté en format semi-bidimensionnel,

feuille mince ($\approx 0,125\text{mm}$). On distingue la couche UD (le renfort a une structure UD), et la couche tissée (Le renfort a une structure dirigée) et la couche mate (le renfort a une structure aléatoire).

Il formera une superposition monocouche dans un agencement de plan d'enroulement Stratification (Figure I.18.).

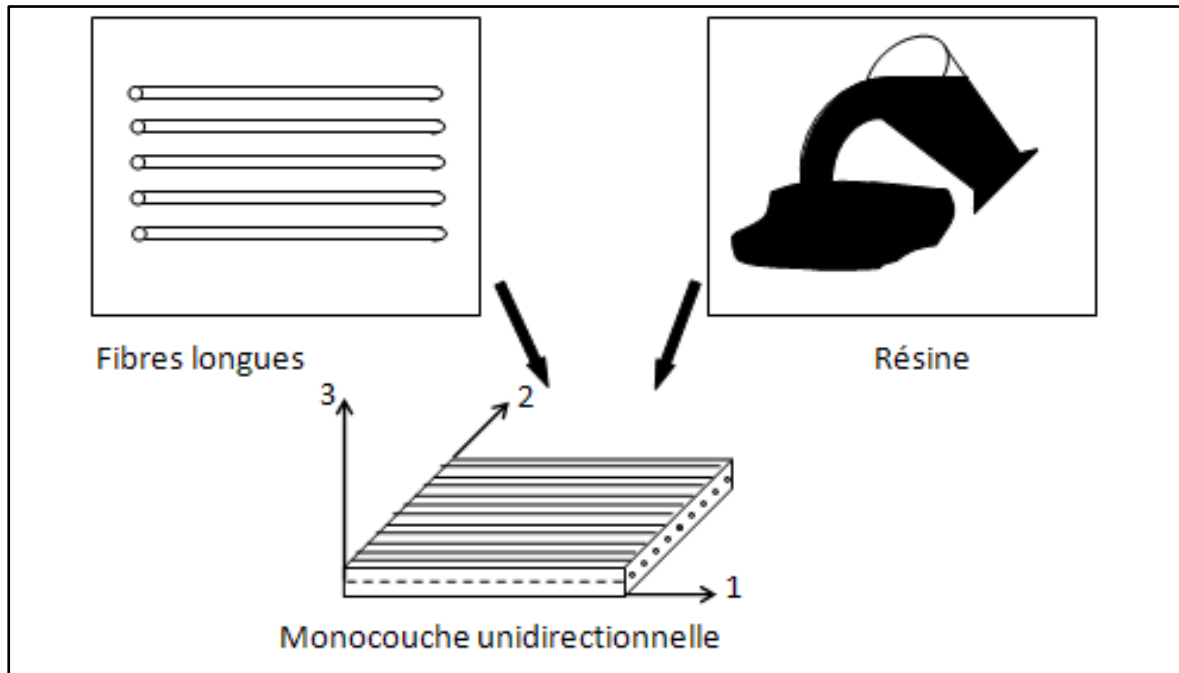


Figure I.18. Constitution d'une structure monocouche

Structures composites Multicouche (stratifié)

C'est un ensemble de couches empilées et orientées selon un drapage. Le drapage est défini comme l'orientation des couches selon un référentiel donné. Par exemple on peut avoir un drapage de 0° , 45° , 90° ; il peut être :

- équilibré : autant de plis orientés $+9$ que -9 ;
- symétrique par rapport au pli central;
- orthogonal une suite de plis 0° et 90° . Il est à noter que dans les matériaux d'ingénierie classiques, les propriétés mécaniques ne varient pas beaucoup avec la direction considérée. Tandis que les matériaux composites à renfort de fibres auront une résistance et une rigidité mécanique élevée le long de l'axe principal de l'armature par rapport autres directions; d'où l'intérêt du recours à l'empilement avec différentes orientations [17].



Figure I.19.a. Structure multicouche en aluminium (trappe de train de Boeing 737-800)

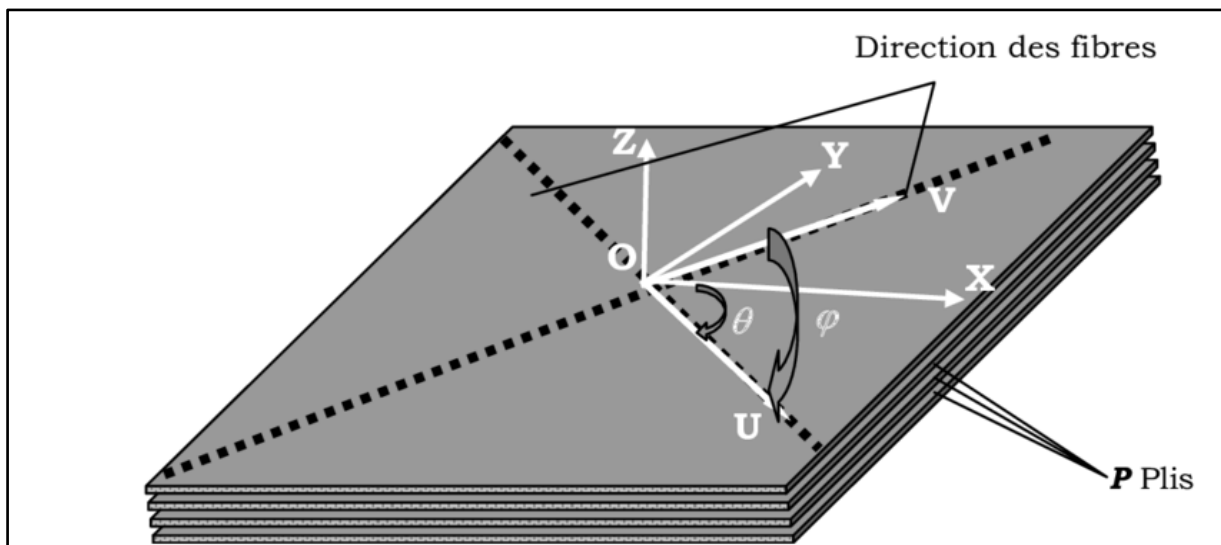


Figure I.19.B. Constitution d'une structure composite multicouche (stratifié) [32]

Caractéristiques des structures multicouches

Les structures multicouches se composent de plusieurs couches de matériaux empilées les unes sur les autres, offrant ainsi des propriétés spécifiques à la structure globale. Voici quelques caractéristiques importantes des structures multicouches à prendre en compte dans le contexte de la simulation de la procédure de CND-CF :

1-Épaisseur des couches : Les structures multicouches sont caractérisées par des couches de différentes épaisseurs. L'épaisseur des couches peut varier considérablement d'une application à l'autre, ce qui

influe sur la pénétration des Courants de Foucault et la sensibilité de la technique de CND-CF. Des couches minces peuvent permettre une meilleure détection des défauts proches de la surface, tandis que des couches épaisses peuvent réduire la sensibilité aux défauts plus profonds.

2-Conductivité des matériaux : Chaque couche d'une structure multicouche peut être composée d'un matériau avec une conductivité électrique différente. La conductivité des matériaux influence la répartition des Courants de Foucault à travers la structure et affecte la détection des défauts. Des différences de conductivité entre les couches peuvent créer des contrastes électromagnétiques qui facilitent la détection des anomalies.

3-Propriétés magnétiques : Certaines structures multicouches peuvent contenir des matériaux présentant des propriétés magnétiques différentes. Ces propriétés magnétiques peuvent influencer les interactions des Courants de Foucault avec la structure, modifiant ainsi les réponses électromagnétiques mesurées. La présence de matériaux magnétiques peut nécessiter l'utilisation de techniques de CND-CF spécifiques pour prendre en compte ces propriétés.

4-Interface entre les couches : Les interfaces entre les couches d'une structure multicouche peuvent influencer la propagation des Courants de Foucault et les réponses électromagnétiques mesurées. Les décollements, les interfaces non adhérentes ou les interfaces avec des variations locales de conductivité peuvent affecter la détection des défauts et nécessitent une attention particulière lors de la simulation et de l'interprétation des résultats de CND-CF.

5-Géométrie de la structure : La géométrie globale de la structure multicouche, y compris sa forme, sa taille et sa configuration, peut avoir un impact sur la distribution des Courants de Foucault et les réponses électromagnétiques. Des structures complexes ou présentant des contours irréguliers peuvent nécessiter des modèles de simulation plus avancés pour prendre en compte ces caractéristiques géométriques spécifiques.

Désignation des structures composites multicouche (stratifié)

Les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels sont constituées d'un grand nombre de couches ou plis. L'épaisseur d'une couche dépend de son grammage. L'épaisseur de chacune des couches est généralement très faible, de l'ordre de 0,125 mm pour un matériau carbone époxy de type Aéronautique et 0,3 mm pour ceux qui sont utilisés dans l'Industrie Nautique. Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale. La désignation des structures stratifiées est délicate car il faut préciser les axes de référence. Un stratifié est codifié de la façon suivante :

- chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x, les couches sont représentées décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut ;
- les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole « / » comme l'exemple de suivants : [-45/45/-45/-45/45/-45] ;
- en cas de stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il faut préciser par un indice la nature de la couche ;
- en cas de structures symétriques, la moitié est codifiée et le symbole s indique la symétrie : [-45/45/-45/-45/45/-45] devient [-45/45/-45]s et [0/45/45/90/-45/-45/0] devient [0/45/2/90/-45/2/0] [17].

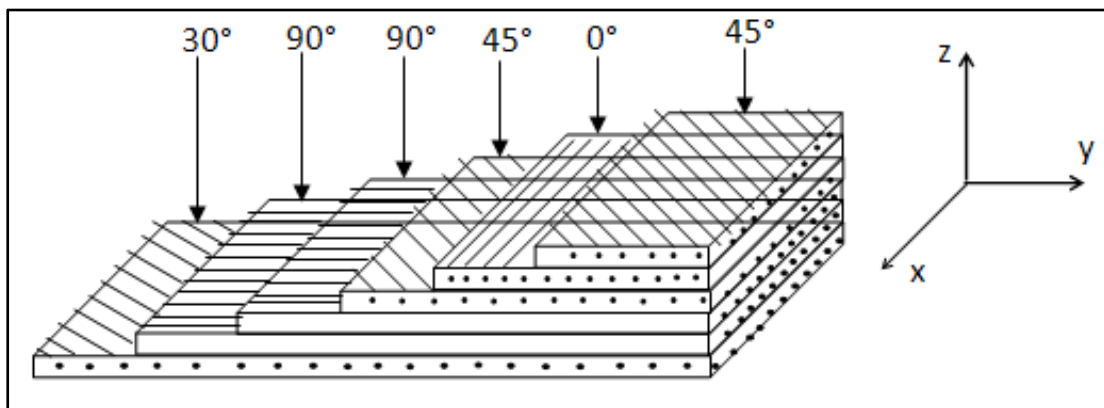


Figure I.20. Désignation d'une structure composite multicouche (stratifié) [17]

I.4. Conclusion

Dans un premier temps, nous avons exploré les bases du CND, en mettant en évidence les différentes techniques utilisées, telles que les Courants de Foucault, la radiographie, les ultrasons, etc. Chacune de ces techniques présentent des avantages et des limites spécifiques, et elles sont utilisées de manière complémentaire pour obtenir un examen complet de structures de vol.

Ensuite, nous nous sommes concentrés sur les structures de vol, qui ont des propriétés uniques en termes de matériaux, de géométrie et de contraintes. Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans l'industrie aérospatiale en raison de leur légèreté et de leur résistance. Cependant, leur examen nécessite des techniques CND spécifiques pour détecter les défauts tels que les fissures, les fissures, etc. De plus, les structures métalliques doivent également être contrôlées pour les défauts tels que la corrosion, les fissures de fatigue, etc.

CHAPITRE II : Analyse sur l'état de l'art de l'utilisation des Courants de Foucault

II.1.introduction

Des progrès significatifs ont été réalisés dans l'utilisation des Courants de Foucault pour détecter les défauts dans les nouveaux matériaux. Par exemple, des études ont exploré l'application des Courants de Foucault aux matériaux composites, aux alliages métalliques avancés et aux matériaux à haute température. Ces avancées étendent les capacités de détection par Courants de Foucault à des domaines et industries spécifiques, Les développements récents se sont également concentrés sur le développement de techniques avancées de détection par Courants de Foucault. Par exemple, l'utilisation de capteurs multiplexés ou de capteurs à balayage permet d'améliorer la vitesse de détection et la résolution spatiale. De plus, l'intégration des techniques d'imagerie et de l'intelligence artificielle dans l'analyse des signaux de Courants de Foucault ouvre de nouvelles possibilités pour la détection et la caractérisation des défauts.

Des progrès récents ont également démontré l'application des Courants de Foucault à des domaines spécifiques tels que la surveillance de l'usure et de la corrosion, la détection de microfissures dans les structures mécaniques et la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux. Ces applications spécifiques permettent d'exploiter les avantages des Courants de Foucault dans des contextes spécifiques et ouvrent de nouvelles voies de recherche une autre avancée récente est liée à la miniaturisation des systèmes CND-CF. Grâce à l'utilisation de capteurs embarqués et de technologies intégrées de traitement du signal, il devient possible d'intégrer des systèmes CND-CF dans des appareils portables ou de petites structures. Cette miniaturisation offre des possibilités de surveillance en temps réel et de détection précoce des erreurs, en particulier dans les environnements difficiles d'accès.

II.2.Techniques avancées de détection

Les avancements récents ont également porté sur le développement de techniques avancées de détection des Courants de Foucault. Par exemple, l'utilisation de capteurs à balayage ou de capteurs multiplexés permet d'améliorer la vitesse de détection et la résolution spatiale. Des algorithmes sophistiqués de traitement du signal ont été développés pour extraire des informations précises sur les défauts, tels que leur taille, leur forme et leur profondeur [28].

II.2.1. Capteurs multiplexés

Les capteurs multiplexés permettent de réaliser des mesures simultanées sur plusieurs canaux, ce qui accélère le processus de détection et réduit le temps d'inspection. Ces capteurs sont généralement utilisés pour examiner de grandes surfaces ou des structures complexes. Ils offrent une meilleure couverture de la zone inspectée et permettent d'obtenir des données plus complètes [28].



Figure II.1. Multiplexeur à relais 16- ou 32- voies [29]

II.2.2. Capteurs à balayage

Les capteurs à balayage sont utilisés pour cartographier une zone spécifique en déplaçant le capteur de manière contrôlée. Cette technique permet de détecter et de caractériser les défauts avec une résolution spatiale élevée. En balayant le capteur sur la surface, il est possible de reconstruire une image du défaut et d'analyser ses caractéristiques [24].



Figure II.2. Capteur à balayage linéaire H3662 Fife [2]

II.2.3. Techniques d'imagerie

L'intégration de techniques d'imagerie dans la détection des Courants de Foucault permet de visualiser les défauts de manière plus intuitive. L'imagerie par Courants de Foucault permet de représenter les défauts sous forme d'images ou de cartes de couleur, facilitant ainsi leur identification et leur caractérisation. Cette approche facilite également l'interprétation des données, en particulier pour les opérateurs moins expérimentés [24].

II.2.4. Intelligence artificielle et apprentissage automatique

L'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage automatique sont de plus en plus utilisés dans le domaine de la détection des Courants de Foucault. Ces techniques permettent d'analyser les signaux de manière automatique et de prendre des décisions basées sur des modèles préalablement entraînés. L'IA peut être utilisée pour détecter des défauts complexes, classifier les types de défauts et réduire les faux positifs [28].

II.2.5. Techniques de traitement du signal avancé

Les techniques de traitement du signal, telles que la transformée de Fourier, l'analyse en ondelettes et les méthodes de décomposition modale empirique, sont utilisées pour extraire des informations significatives des signaux de Courants de Foucault. Ces techniques permettent de révéler les caractéristiques spécifiques des défauts, telles que leur taille, leur profondeur et leur forme [28].

II.3. Types de capteurs CND

Les techniques de CND-CF nécessitent la mise en place de systèmes permettant l'émission et la réception d'un champ magnétique. Différentes techniques sont utilisées, et le capteur peut être élaboré par une ou de plusieurs bobines. Selon la technique émission-réception utilisée nous distinguons plusieurs types de capteurs [15].

II.3.1 Type de capteur suivant la structure

Nous pouvons distinguer deux familles de capteurs : les capteurs à air les capteurs avec noyaux en ferrites. Les premiers sont constitués de bobine sans noyaux Leur conception est relativement simple et peuvent être de taille réduite. L'un des objectifs de l'utilisation de capteur en pot de ferrite est d'intensifier le champ magnétique émis par la bobine et de le focaliser sur la pièce à contrôler. L'autre objectif est de protéger le capteur contre d'éventuelles sources magnétiques extérieures [25].

II.3.2.Type de capteur suivant la forme

On distingue trois types de capteurs suivant leur géométrie [17]: bobine encerclant, sonde et palpeur. Les capteurs axiaux encerclant ou bobines encerclant sont constitués d'enroulement de mesure

entourant la pièce à contrôler. Ils sont destinés au contrôle des produits longs (tubes, barres,...). Quant aux palpeurs ou bobines ponctuelles, ce sont de petits inducteurs placés sur ou à proximité de la surface de la pièce. Ce type de capteur permet une inspection locale d'une zone de la pièce et peut atteindre des régions d'accès difficile. Néanmoins, les produits creux sont examinés par des capteurs appelés sondes, pouvant se déplacer à l'intérieur des conduites ou des tubes creux [29].

II.3.3.Type de capteur selon sa fonction

C'est la même bobine qui assure le rôle d'excitation et de réception dans un capteur à double fonction. Dans ce type de capteur, l'élément de mesure est l'impédance aux bornes de l'enroulement. C'est la variation de la valeur de l'impédance qui nous renseigne sur l'état de santé de la pièce, comme on peut déduire ses caractéristiques physiques et géométriques.

Dans le cas du capteur à fonction séparée, il existe au moins deux enroulements. L'un est réservé à la création du champ magnétique d'excitation. La mesure de la tension est faite aux bornes d'une seconde bobine qui peut être de taille réduite. Cette tension est induite par le passage du champ magnétique à travers l'ensemble des spires. Le champ magnétisant est dû au courant de conduction de la source mais aussi au courant induit dans les matériaux avoisinants [29].

II.3.4.Type de capteur suivant le mode de contrôle

L'objectif du contrôle ainsi que l'environnement des mesures peuvent déterminer le mode de contrôle. Pour évaluer les caractéristiques physiques et dimensionnelles des structures conductrices, il est préférable d'utiliser la méthode absolue. La mesure se fait par comparaison du signal reçu à une référence artificielle électronique.

Afin d'éliminer les perturbations telles que la température, les chercheurs ont proposé une régulation compensée. Deux bobines sont utilisées, l'une est placée à proximité de la structure à contrôler, cependant l'autre est proche de la même structure mais saine. Une mesure comparative permet de ne retenir que les signaux valides.

Pour détecter de petites discontinuités lorsque la sonde se déplace sur un matériau, tout en évitant les variations lentes de conductivité ou de l'entrefer, des capteurs différentiels sont recommandés. Deux bobines montées tête-bêche se trouvent généralement dans le même boîtier de sonde. Dès qu'un changement de topologie (défaut) est rencontré par l'une des deux bobines, une variation d'impédance est détectée [29].

II.4. Modes d'excitation

Pour alimenter les capteurs CF, on distingue trois types de modes d'excitation: mono fréquentiel, multi-fréquentiel et pulsé.

-Le mode mono-fréquentiel

Le mode mono-fréquentiel consiste à exciter le capteur de courant de Foucault par un signal sinusoïdal d'une fréquence fixe. Afin d'éviter les résultats non précis, le choix de la fréquence est important et doit être adapté aux données de la pièce à inspecter et au type de défauts recherchés (taille, profondeur). Par exemple, une fréquence très basse n'est pas capable à donner des résultats bien précis à cause la faible amplitude des Courants de Foucault qui peuvent être noyés dans les bruits. De même qu'une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites [15].

-Le mode multi-fréquentiel

Cette stratégie basée sur l'utilisation de plusieurs fréquences d'excitation permet d'avoir un grand nombre d'informations d'une part et d'éliminer fortement l'effet des grandeurs perturbatrices, comme le lift off, d'autre part. L'alimentation du capteur peut être réalisée simultanément ou en séquence [15].

- Le mode pulsé

Ce mode a été appliqué la première fois dans les années 50 pour mesurer l'épaisseur des revêtements métalliques. Il constitue une alternance au mode multi-fréquentiel, et utilise un signal de large bande fréquentielle pour exciter la sonde avec des signaux impulsionnels contenant un spectre riche en fréquences. La forme du signal d'excitation utilisée peut être une forme rectangulaire, triangulaire ou semi-sinusoïdale. Cette dernière est l'un des cas les plus utilisés à cause sa simplicité de mise en œuvre. L'avantage principal de mode pulsé est de contrôler la pièce testée à différentes profondeurs de pénétration simultanément. Ce qui permet de fournir beaucoup d'informations sur la pièce testée dans un temps réduit [15].

II.5. Types et origines des défauts

II.5.1. Hétérogénéités et défauts

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa notion négative évoque bien le rôle que joue le CND dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement: les défauts de surface, les défauts internes [13].

II.5.2. Défauts de surface

Les défauts de surface, accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.



Figure II.3. Défauts de surface

II.5.2.1. Défauts ponctuels

Qui correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les Courants de Foucault ou les ultrasons [13].

II.5.2.2. Défauts d'aspect

Qui correspondent à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques [13].

II.5.3. Défauts internes

Ils sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé [14].

II.5.4. Origines des défauts

Les origines et les causes des défauts sont multiples. On peut citer sans être exhaustif les exemples suivants :

- Défauts de moulage,
- Défauts de soudage ou de brasage des pièces mécaniques,
- Détection de fissuration (interne ou débouchant),
- Endommagement (délaminage) de composites,
- Hétérogénéité dans les matériaux,
- Défauts de collage,
- Absence de colle,
- Défaut d'adhésion,
- Fissuration de colle,
- Défauts de fixation des composants électroniques,

II.6. défauts spécifiques de structures multicouches

Les structures multicouches sont souvent utilisées pour améliorer les performances de protection contre la corrosion des matériaux métalliques. Cependant, ces structures peuvent présenter certains défauts qui peuvent affecter leur efficacité.

II.6.1. Défaillance de l'adhérence entre les couches

La défaillance de l'adhérence entre les couches dans une structure multicouche peut être attribuée à plusieurs facteurs, tels que l'utilisation de matériaux incompatibles, des conditions de traitement inadéquates ou une préparation de surface insuffisante. Lorsque l'adhérence se détériore, cela crée une voie d'entrée pour l'eau et les ions corrosifs entre les couches, atteignant ainsi le substrat métallique sous-jacent. Cette infiltration peut entraîner des processus de corrosion qui compromettent l'intégrité structurelle [30].

$$F_t = \mu F_n \quad \text{loi de coulomb} \quad (\text{II.1})$$

Où F_t est la force de frottement, F_n est la force normale, et μ est le coefficient de frottement.

l'avancement de la fissure, vaut :

$$G_c = \left(\frac{12 F_c^2 a^2}{E b^2} \right) \quad (\text{II.2})$$

F_c étant la force critique permettant d'amorcer la propagation de la fissure de longueur a et E le module de Young du matériau (supposé identique pour les deux objets). Ce calcul est valable

uniquement dans le cas d'une fissure longue comparée à l'épaisseur des deux adhérents ($a \gg h$) (Darque-Ceretti et Felder (2003)).

l'expression du taux critique de restitution d'énergie est le suivant :

$$GC=FC/b \quad (II.3)$$

Cette expression est valable en l'absence de contraintes résiduelles dans la bande et en dissipation plastique confinée.

II.6.2.la corrosion

Les structures multicouches peuvent présenter certains défauts spécifiques, notamment en ce qui concerne la corrosion :

II.6.2.1 La corrosion galvanique

Est un processus de corrosion qui se produit lorsque deux métaux différents sont en contact électrique direct et sont exposés à un environnement corrosif. Dans une structure multicouche, où différentes couches métalliques sont superposées, la corrosion galvanique peut se produire lorsque ces couches entrent en contact les unes avec les autres, et basée sur une réaction électrochimique où un métal plus actif (anode) se corrompt rapidement, tandis qu'un métal moins actif (cathode) reste relativement préservé. Le métal de l'anode fournit des électrons qui sont transférés au métal de la cathode, conduisant à une accélération de la corrosion de l'anode [2].

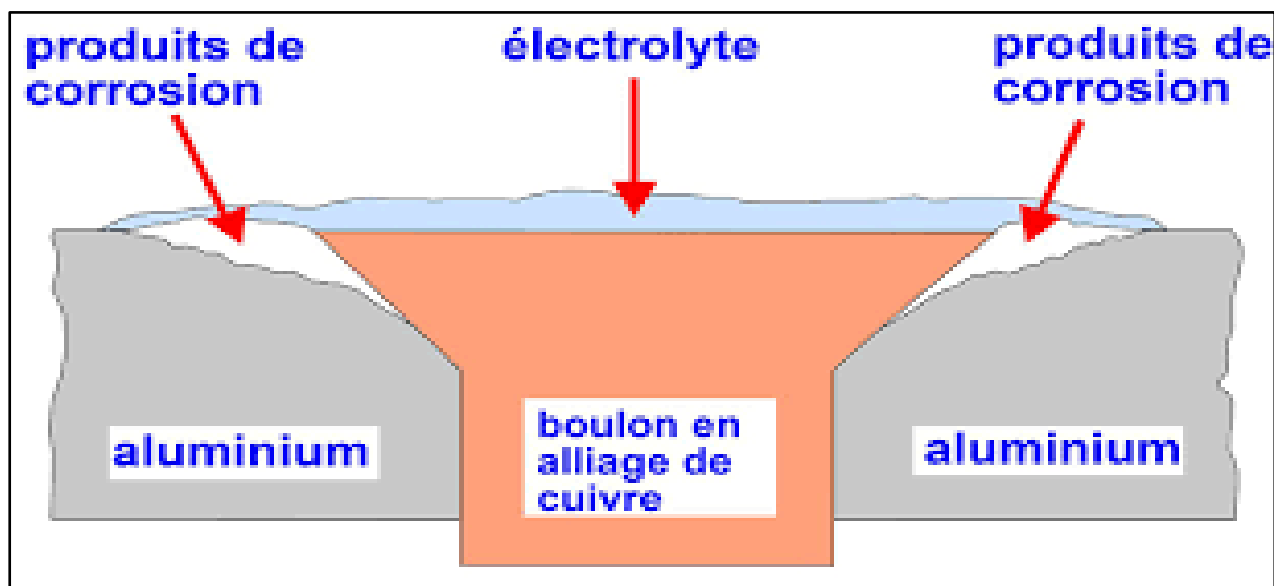


Figure II.4.Schéma de la corrosion galvanique survenue autour d'un boulon fait d'un alliage de cuivre posé sur une plaque en aluminium [31]

Les facteurs qui favorisent la corrosion galvanique dans les structures multicouches comprennent la présence d'électrolytes (par exemple, l'eau ou l'humidité) qui permettent la conductivité électrique

entre les différentes couches, ainsi que des différences de potentiel électrochimique entre les métaux constituant les couches [2].

II.6.2.2 La corrosion sous revêtement

La corrosion sous revêtement est un type de corrosion qui se produit lorsque des agents corrosifs pénètrent à travers un revêtement protecteur, entraînant la corrosion des substrats métalliques situés en dessous. Ce phénomène peut également se produire dans les structures multicouches où un revêtement est appliqué sur les différentes couches métalliques, et Les facteurs qui peuvent contribuer à la corrosion sous revêtement dans les structures multicouches comprennent les défauts ou les dommages dans le revêtement, tels que les fissures, les éraflures, les bulles ou les zones mal adhérentes. Lorsque ces imperfections sont présentes, les agents corrosifs, tels que l'humidité, les sels ou les gaz corrosifs, peuvent atteindre les substrats métalliques et provoquer la corrosion [2].



Figure II.5. La corrosion sous revêtement

La corrosion sous revêtement peut être difficile à détecter car les signes visibles de corrosion peuvent être masqués par le revêtement externe. Cependant, certains indicateurs peuvent inclure la formation de cloques ou de décollements du revêtement, des changements de couleur ou de texture de la surface, ou des zones de corrosion localisées visibles autour des défauts du revêtement.

II.6.2.3 L'effet de barrière

L'effet de barrière est un concept lié à la protection contre la corrosion dans les structures multicouches. Dans ce contexte, l'effet de barrière se réfère à la capacité d'une couche de revêtement

appliquée sur la surface d'une structure métallique pour agir comme une barrière physique entre le métal et l'environnement corrosif [26].

Lorsqu'une structure multicouche est revêtue, la couche de revêtement est conçue pour empêcher les agents corrosifs tels que l'humidité, les gaz corrosifs, les sels ou les produits chimiques d'entrer en contact direct avec le métal de base. La couche de revêtement doit être imperméable aux agents corrosifs et doit rester intacte pour maintenir l'effet de barrière, L'effet de barrière dépend de plusieurs facteurs, tels que l'épaisseur et la qualité du revêtement, l'adhérence entre le revêtement et le substrat métallique, ainsi que la résistance du revêtement aux produits chimiques et aux conditions environnementales spécifiques [26].

Si la couche de revêtement est trop mince ou si elle est endommagée, l'effet de barrière peut être compromis et l'environnement corrosif peut atteindre le métal de base, entraînant une corrosion. De plus, si le revêtement ne résiste pas aux produits chimiques ou aux conditions environnementales spécifiques, il peut se détériorer plus rapidement et perdre son effet protecteur.

II.7. Avantages du CND par Courants de Foucault

Le CND par CF est un contrôle simple à mettre en œuvre grâce à la miniaturisation et l'automatisation et la contrôlabilité du dispositif. Ce qui facilite la transportabilité et aussi le contrôle dans les endroits difficilement accessibles. Le niveau faible des puissances des signaux d'alimentation et celui mesuré, permet d'utiliser directement des composants électronique qui permettent la rapidité d'acquisition et de traitement. L'absence du couplant permet d'effectuer un contrôle sans contact. De plus, cette technique a une grande sensibilité à la détection des défauts même pour environnements hostiles et des températures élevées. En terme écologique, la technique de CF est une technique qui ne laisse aucune trace de pollution dans l'environnement [15].

II.8. Limites du CND par Courants de Foucault

Malgré tous les avantages de la méthode de CND-CF par rapport aux autres techniques, elle reste limitée par des inconvénients et des limitations :

- ne s'applique que pour contrôler les matériaux électriquement conducteurs ;
- n'a pas la capacité à détecter des défauts à profondeur important ;
- probabilité d'instabilité de lift off du capteur CF durant la procédure du scan qui peut conduire à des perturbations au niveau de la détection de la variation d'impédance ;
- analyse des signaux, habituellement complexe ;

II.9. Conclusion

Les résultats de la recherche ont montré l'efficacité de cette méthode pour détecter les défauts tels que les fissures, les fissures, les changements d'épaisseur, les impuretés et les zones de corrosion, Les progrès récents dans l'utilisation des Courants de Foucault se sont concentrés sur le développement de technologies de détection avancées, y compris l'utilisation de capteurs multiplexés, de capteurs à balayage optique, d'algorithmes de traitement de signal sophistiqués et de l'incorporation de « l'intelligence artificielle ». Ces progrès ont amélioré la vitesse de balayage, la résolution spatiale, la visualisation des défauts et la capacité de classification des défauts.

L'analyse moderne a également montré que les Courants de Foucault sont largement utilisés dans des domaines tels que l'aérospatiale, l'industrie pétrolière et gazière, l'automobile et la construction navale. Leur utilisation permet des inspections rapides, précises, économiques et non destructives, ce qui contribue à la sécurité et à la qualité des produits.

CHAPITRE III : Modélisation du CND-CF appliquée à une structure multicouche

III.1. Introduction

Le principe de fonctionnement du Contrôle Non Destructif par les Courants de Foucault est basé sur les phénomènes d'électromagnétisme. La compréhension de ces phénomènes est très importante pour la modélisation mathématique puis la simulation, pour faire des modifications pour la conception des capteurs efficaces et minimiser les problèmes rencontrés dans le contrôle. En premier lieu nous allons mettre l'équation qui régit notre système, [17] [9]. Dans notre travail ça sera l'équation du magnétodynamique en régime quasi-stationnaire pour une formulation en potentiel vecteur magnétique A , [17] [10]. En suite la résolution de cette équation (qui est une équation différentielle aux dérivées partielles) se fait à l'aide des méthodes numériques.

Dans le domaine CND par Courants de Foucault, la modélisation vise à décrire l'interaction entre la cible et le capteur. Il permet de résoudre deux problèmes :

- Le problème immédiat : est de mettre en œuvre un modèle mathématique permettant de prédire les signaux des capteurs en connaissant les paramètres cibles.
- Le problème inverse : il s'agit de restituer tout ou partie des propriétés de la cible à partir des résultats de mesure correspondant aux signaux issus du capteur. Dans ce cas, il n'y a généralement pas de relations mathématiques inverses explicites.

Il convient de noter que l'objectif principal du CND par CF est de résoudre le problème de réflexion des données par Courants de Foucault. La plupart des méthodes utilisent un modèle direct qui relie les grandeurs géométriques représentant l'erreur au changement d'impédance mesuré aux extrémités de la bobine. Le modèle direct est généralement basé sur la résolution des équations de Maxwell.

III.2. Plan d'impédance normalisée

L'inspection des matériaux consiste à mesurer les variations d'impédance de la bobine. En général, on utilise une méthode comparative, dont l'objet est de mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine en présence de la pièce à inspecter et l'impédance Z_0 de la bobine dans l'air. En absence du matériau à contrôler, l'impédance Z_0 du capteur est: [23], [24].

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (\text{III.1})$$

R_0 Et X_0 sont respectivement la résistance et la réactance à vide de la bobine du capteur. En présence du matériau à contrôler, le champ réactif provoque une modification de l'impédance du capteur. L'impédance complexe en charge \bar{Z} est :

$$\bar{Z} = R + jX \quad (\text{III.2})$$

R est la composante résistive qui englobe les pertes internes du bobinage d'excitation et les pertes par Courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans le matériau.

X est la composante inductive qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le capteur. [23].

Pour éliminer les composantes de l'impédance à vide (R_0 Et X_0) (pertes à vide l'inductance propre du capteur) et garder uniquement la géométrie du capteur, sa position relative au matériau (lift-off) et les caractéristiques géométriques et physiques du matériau, on procède à la normalisation de l'impédance complexe du capteur en présence du matériau. Cette normalisation est donnée par :

$$Z_n = (\bar{Z} + R_0) / X_0 = R_n + jX_n \quad (\text{III.3})$$

$$R_n = (R - R_0) / X_0 \quad (\text{III.4})$$

$$X_n = X / X_0 \quad (\text{III.5})$$

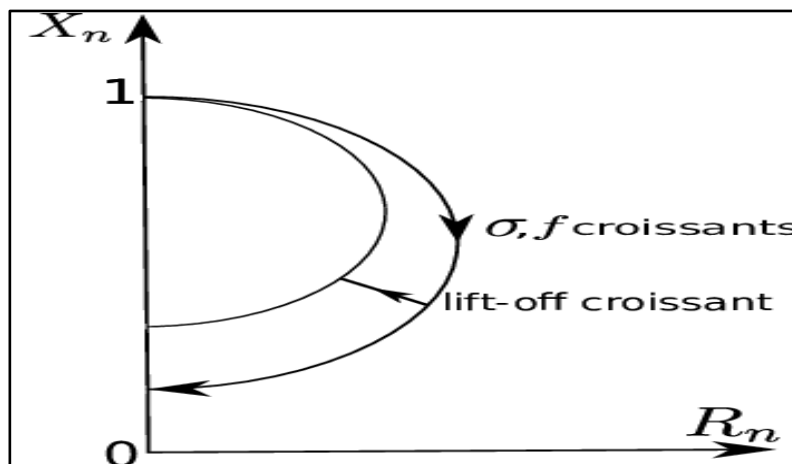


Figure III.1. Plan d'impédance normalisé

III.3. Intérêt de la modélisation

Le CND par Courants de Foucault est largement employé pour inspecter les matériaux électriquement conducteurs. Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier pièce et jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances [6].

La modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction sonde-pièce testée et de définir une structure de sonde adaptée à un problème donné. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix de matériaux,...) sans avoir à réaliser de prototypes multiples. Dans le domaine du CND par Courants de Foucault, la modélisation numérique

est ainsi devenue, grâce à la performance du matériel informatique, un acteur important dans la conception de sondes [3].

III.4. Modélisation électromagnétique d'un problème de CND-CF

Un modèle de CND-CF peut être représenté par un système qui se compose de plusieurs parties avec des propriétés physiques différentes. Ce système contient une source où nous imposons une densité de courant, une région conductrice qui représente la pièce contrôlée ou caractérisée, et une troisième région non conductrice qui représente l'air environnant.

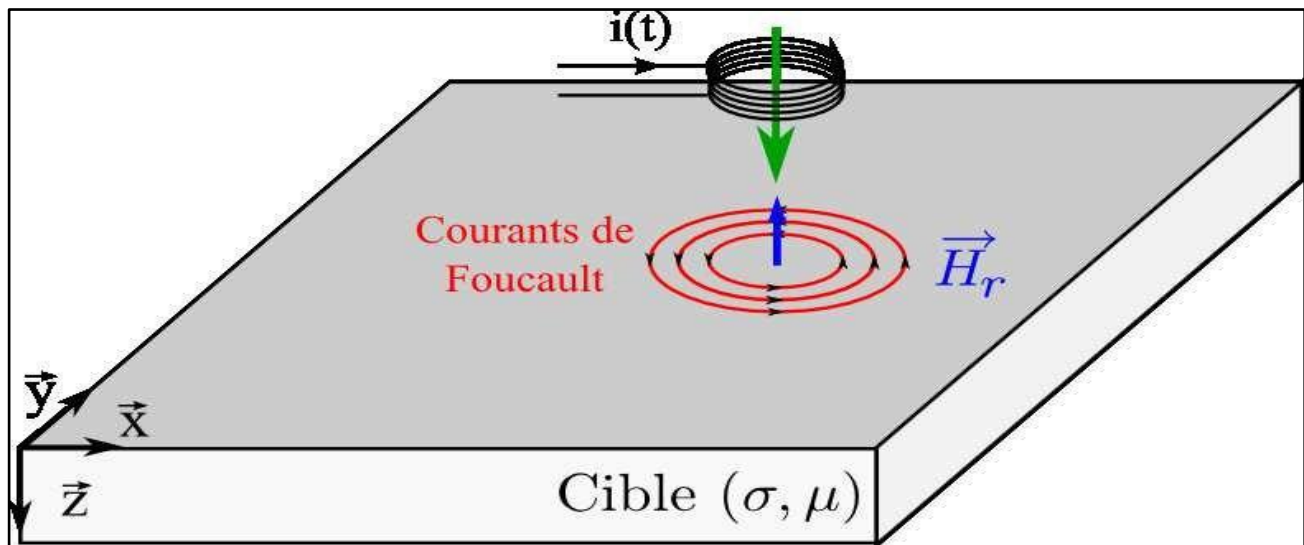


Figure III.2. Représentation de la génération de Courants de Foucault par une bobine inductrice- $i(t)$

Avec :

$i(t)$: est le courant d'excitation

H_r : est le champ d'excitation

H_i : le champ induit.

σ : Conductivité électrique.

μ : Perméabilité magnétique.

III.4.1. Équations de Maxwell

En électromagnétisme, les systèmes d'équations qui régissent les phénomènes électromagnétiques se développent à partir des équations de Maxwell. Les équations de Maxwell sont l'expression la plus générale des lois classiques de l'électromagnétisme. Ils constituent le modèle général de description du comportement et des interactions des champs électriques et magnétiques et de leurs sources : charges et densités de courant, et traduisent l'interdépendance de ces quatre grandeurs :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \overline{\vec{j}}_{\text{ind}} + \vec{j}_s \quad \text{Équation de Maxwell – Ampère} \quad (\text{III.6})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad \text{Équation de Maxwell-Faraday} \quad (\text{III.7})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de conservation du flux magnétique} \quad (\text{III.8})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad \text{Équation de Maxwell-Gauss} \quad (\text{III.9})$$

avec :

\vec{E} : Champ électrique [V/m]

\vec{H} : Champ magnétique [A/m]

\vec{B} : Induction magnétique [T]

\vec{D} : Induction électrique [C/m²]

\vec{j} : Densité de courant [A/m²]

ω : est la pulsation du signal d'excitation (rad/s).

Physiquement, la conductivité électrique, la perméabilité magnétique et la permittivité électrique sont des paramètres physiques qui relient les équations de Maxwell par des relations appelées « lois physiques du comportement ». Ces relations sont décrites comme suit [11]:

$$\overline{\vec{j}}_{\text{ind}} = \sigma \cdot E \quad (\text{III.10})$$

$$\vec{B} = \mu \cdot H \quad (\text{III.11})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot E \quad (\text{III.12})$$

Où :

ε : est la permittivité électrique en (F/m).

Les paramètres ε , μ et σ sont constants pour des matériaux linéaires et variables, en fonction de l'intensité des champs, pour des matériaux non linéaires. Ce sont des grandeurs scalaires pour les matériaux isotropes et tensorielles pour les matériaux anisotropes. Le système d'équations de Maxwell, qui fait intervenir dans notre cas plusieurs équations, de type EDP, non linéaires, tensorielles et couplées, est très difficile à résoudre. Pour y remédier, nous utiliserons des grandeurs intermédiaires pour simplifier le système et en faciliter la résolution. Plusieurs formulations sont décrites dans la littérature dans ce sens [11].

III.4.2. Formulations électromagnétiques

Selon les termes utilisés pour élaborer les systèmes électromagnétiques, nous distinguons plusieurs formulations. En effet, la formulation en termes du champ, du potentiel ou de la densité des courants.

Le choix d'une formulation liée à sa capacité à la résolution du problème posé en réduisant au maximum le nombre d'inconnues, ce qui va réduire le temps de calcul et l'espace mémoire utilisé.

Parmi les formulations les plus utilisées pour traiter les problèmes de CND-CF, nous citons

La formulation $\vec{A}v - \vec{A}$ [13] et la formulation $\vec{T} - \varphi$ [14].

Où :

\vec{A} : Potentiel vecteur magnétique en (Wb/m).

\vec{T} : Potentiel vecteur électrique en (A/m).

φ : Potentiel scalaire magnétique

La formulation $\vec{A}v - \vec{A}$ repose sur l'association du potentiel magnétique vecteur \vec{A} et le potentiel scalaire électrique V , pour la réécriture du système d'équations de Maxwell. D'après l'équation de conservation du flux magnétique (III.3), il existe un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{III.13})$$

Et d'après les relations (III.2) et (III.8), on déduit qu'il existe une grandeur électrique scalaire V telle que:

$$\vec{E} + j\omega\vec{A} = -\vec{\nabla} V \quad (\text{III.14})$$

Ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \vec{A} + (j\omega\vec{A} + \vec{\nabla} V) \right) &= \vec{J} \quad (\text{III.15}) \\ \vec{\nabla} \cdot (\sigma(j\omega\vec{A} + \vec{\nabla} V)) &= 0 \end{aligned}$$

Le système (III.10) synthétise le système de Maxwell en 02 équations couplant le potentiel magnétique vecteur A et le potentiel scalaire électrique V .

Afin d'assurer l'unicité de la solution du potentiel vecteur magnétique, il faut imposer une jauge [19].

Nous utiliserons, dans la suite, la jauge de Coulomb : $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$

Et nous ajouterons le terme de pénalité $-\vec{\nabla} \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \vec{A} \right)$ dans le système (III.10) qui devient :

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \vec{A} \right) - \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \vec{A} \right) + (j\omega\vec{A} + \vec{\nabla} V) &= \vec{J} \quad (\text{III.16}) \\ \vec{\nabla} \cdot (\sigma j\omega\vec{A} + \vec{\nabla} V) &= 0 \end{aligned}$$

On mentionne dans la littérature que les formulations exprimées en potentiel vecteur magnétique sont des formulations générales et robustes [16, 29]. D'autre part, cette formulation est très efficace pour

résoudre les problèmes à géométries complexes [26]. Pour ces avantages nous choisissons la formulation $\overline{\text{Av}} - \overline{\text{A}}$.

III.4.2.1. Formulation en champ magnétique

En combinant les relations suivant :

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \sigma\vec{E} \quad , \quad \vec{J} = \vec{J}_s + \sigma\vec{E} \quad (\text{III.17})$$

Nous obtenons l'équation à résoudre :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \text{rot}\vec{H} \right) + \frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.18})$$

Cette équation associée à des conditions aux limites adéquates admet une solution unique. Cependant il faut assurer la continuité de la composante normale de l'induction magnétique, soit en terme de \vec{H} :

$$(\mu_1 \vec{H} - \mu_2 \vec{H}) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III.19})$$

Cette relation implique la discontinuité de la composante normale de \vec{H} dans le cas de discontinuité de \vec{H} . Ceci rend la formulation beaucoup moins intéressante dans le cas des éléments finis nodaux. En revanche, elle est bien adaptée aux éléments d'arêtes puisque la continuité de la composante tangentielle de \vec{H} est vérifiée [21].

III.4.2.2. Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique

En éléments finis nodaux, cette formulation est la duale de la formulation $\vec{A} - V$. En effet, lorsqu'il n'y a pas d'accumulation de charge, l'équation de continuité s'écrit $\text{div}\vec{A} = 0$ et permet de définir le potentiel \vec{T} , tel que $\vec{J} = \text{rot}\vec{T}$. Comme pour la formulation $\vec{A} - V$, l'unicité de la solution nécessite l'introduction d'une jauge ce qui donne l'expression ci-dessous :

$$\left(\text{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \text{rot}\vec{T} \right) - \text{grad} \left(\frac{1}{\sigma} \text{div}\vec{T} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \mu (\vec{T} - \overline{\text{grad}} \varphi) \right) = \vec{0} \quad (\text{III.20})$$

$$\text{div}(\vec{T} - \overline{\text{grad}} \varphi) = 0 \quad (\text{III.21})$$

III.4.3. Lois constitutives

Les équations précédentes sont associées aux relations constitutives (lois de comportement) des matériaux.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{III.22})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{III.23})$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{III.24})$$

Où

B_r : Induction magnétique rémanente [T]

σ , μ et ε peuvent être soit des scalaires, modélisant le comportement de matériaux isotropes, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie.

III.4.4. Conditions aux limites

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

- Condition de Dirichlet homogène $u \cdot \vec{n} = 0$

- Condition de Neumann homogène $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$

III.4.5. Conditions de continuité

Lors du passage d'un milieu à un milieu, les grandeurs de champs subissent des discontinuités aux interfaces et, ne sont pas différentiables.

Les relations entre les grandeurs électromagnétiques à l'interface, dites relations de transmission, s'écrivent alors :

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_{sur} \quad (\text{III.25})$$

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III.26})$$

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \cdot \vec{n} = \vec{J}_{sur} \quad (\text{III.27})$$

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \cdot \vec{n} = \vec{0} \quad (\text{III.28})$$

Où :

ρ_{sur} est la densité surfacique de charge, \vec{J}_{sur} la densité surfacique de courant et \vec{n} le vecteur normal à la surface de séparation des deux milieux.

III.4.6. Conditions de Jauge

Dans les équations de Maxwell, les champs s'expriment soit à un gradient près (champ rotationnel), soit au rotationnel près (champ à divergence) ce qui justifie l'utilisation des jauges dans certaines formulations pour assurer l'unicité de la solution. Soient \vec{u} et \vec{w} deux champs de vecteurs, les conditions de jauge s'écrivent de façon générale par [16] :

$$\text{div} \vec{u} = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb} \quad (\text{III.29})$$

$$\text{div} \vec{u} + K \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz} \quad (\text{III.30})$$

$$\vec{u} \cdot \vec{w} = 0 \quad \text{Jauge adapté pour les éléments d'arête} \quad (\text{III.31})$$

III.4.7. Hypothèses simplificatrices

La plupart des travaux accomplis jusqu'à présent dans le domaine de calcul des champs et des Courants de Foucault pour les systèmes électromagnétiques, sont fondés sur les hypothèses suivantes :

. Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$ (Approximation des Régimes Quasi Stationnaires ARQS).

. Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité $\sigma \vec{E}$ peut être décomposée en une partie imposée \vec{J}_s (densité de courante source) et une partie due au champ électrique induit, pour laquelle on gardera la notation $\sigma \vec{E}$ qui exprimera uniquement la densité des Courants de Foucault [16] :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.32})$$

.La densité volumique de charge est considérée comme nulle.

.Généralement, le courant n'existe qu'en volume ($\overline{Jsur} = 0$), c'est-à-dire que la conductivité est finie et que la fréquence d'excitation n'excède pas quelques MHz (basses fréquences). Par conséquent, la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique aux interfaces où la perméabilité subit une discontinuité est assurée.

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \cdot \vec{n} = \vec{0} \quad (\text{III.33})$$

. L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ($\vec{B}_r = \vec{0}$) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanent. Avec ces hypothèses, les équations à résoudre sont :

$$div \vec{B} = \vec{0} \quad (\text{III.34})$$

$$rot \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial x} \quad (\text{III.35})$$

$$rot \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.36})$$

Avec les relations constitutives qui deviennent :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.37})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.38})$$

III.4.8. Champs et potentiels

Les champs de vecteurs $\vec{E}, \vec{B}, \vec{H}, \vec{J}$, peuvent eux-mêmes s'écrire en fonction de potentiels vecteurs ou scalaires :

$$\vec{H} = \vec{T} - \overrightarrow{grad} \varphi \quad (\text{III.39})$$

$$\vec{B} = rot \vec{A} \quad (\text{III.40})$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial x} - \overrightarrow{grad}V \quad (III.41)$$

$$\vec{j} = rot\vec{T} \quad (III.42)$$

Avec :

V : Potentiel scalaire électrique [V]

Ainsi, pour un problème donné, plusieurs combinaisons sont envisageables (il existe a priori un grand nombre de formulations possibles). De telles combinaisons aboutissent à des formulations électromagnétiques.

III.5. Principe des capteurs inductifs

Un capteur inductif est principalement constitué d'un circuit magnétique ouvert de grande perméabilité, sur lequel sont bobinés un ou plusieurs enroulements par un courant alternatif. L'approche d'une cible conductrice et / ou magnétique dans l'entrefer du circuit modifie la répartition des lignes de champ et se traduit par une variation de réluctance et de pertes électromagnétiques dues à la pénétration du champ à l'intérieur de la cible [22].

Lorsque la cible est purement conductrice, le champ incident induit des courants surfaciques dénommés Courants de Foucault, qui à leur tour génèrent un champ magnétique opposant au champ exciteur. On parle dans ce cas de "Capteurs à Courants de Foucault" ou "CCF" [3].

L'effet produit par l'approche d'une cible magnétique non conductrice se traduit par une modification des lignes de champ, qui se trouvent attirées par le matériau en regard le dispositif fonctionne alors en "Capteur Magnétique" ou "CM" [3].

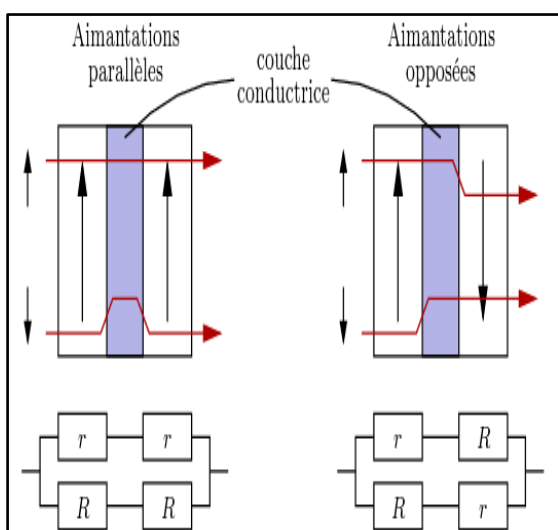


Figure III.3. Capteur à Courant de Foucault

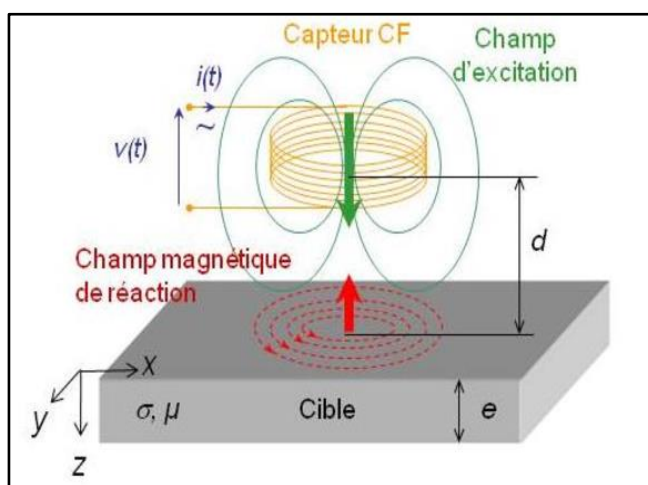


Figure III.4. Capteur Magnétique

III.6. Réponses d'un capteur par CF

Les réponses d'un capteur de CND-CF peuvent être un champ magnétique, une tension ou bien une variation d'impédance. Nous allons présenter quelques formules utilisées pour calculer ces réponses.

III.6.1. A partir l'énergie magnétique emmagasinée et des pertes Joule

Pour obtenir les réponses d'un capteur CF, on peut utiliser l'énergie magnétique emmagasinée dans tout le domaine d'étude et les pertes par effet Joule au niveau de la charge. Dans un modèle de CND-CF, l'échange de puissances entre l'inducteur alimenté par un courant d'une valeur efficace I et une charge en structure multicouche, s'exprime comme suit :

$$P_j + j\omega 2Wm = (+j\omega L)I^2 \quad (\text{III.43})$$

P_j est la puissance active dissipée dans la charge, elle s'exprime comme suit :

$$P_j = \int_{\Omega_c} \overline{\vec{J}^* \text{ind}} \overline{\vec{\rho}} \overline{\vec{J} \text{ind}} dv \quad (\text{III.44})$$

Dans un repère 3D (x, y, z), le tenseur de résistivité de la charge en structure multicouche est une matrice de (3x3) :

$$\overline{\vec{\rho}} = \frac{1}{\overline{\vec{\sigma}}} = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} & \rho_{xz} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} & \rho_{yz} \\ \rho_{zx} & \rho_{zy} & \rho_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{III.45})$$

Pour un matériau multicouche et dans un repère cartésien (x, y, z), la relation de P_j se développe comme suit :

$$P_j = \int_{\Omega_c} J_x^* (\rho_{xx} J_x + \rho_{xy} J_y + \rho_{xz} J_z) + J_y^* (\rho_{yx} J_x + \rho_{yy} J_y + \rho_{yz} J_z) + J_z^* (\rho_{zx} J_x + \rho_{zy} J_y + \rho_{zz} J_z) dv \quad (\text{III.46})$$

La matrice du tenseur de résistivité est égale à l'inverse de la matrice de conductivité. Par conséquence, les éléments de $\overline{\vec{\rho}}$ donnés par les relations suivantes :

$$\rho_{xx} = (\sigma_{yy}\sigma_{zz} - \sigma_{zy}\sigma_{yz}) / \delta, \quad \rho_{xz} = (\sigma_{xy}\sigma_{yz} - \sigma_{yy}\sigma_{xz}) / \delta \quad (\text{III.47})$$

$$\rho_{yx} = (\sigma_{zx}\sigma_{yz} - \sigma_{yx}\sigma_{zz}) / \delta, \quad \rho_{yz} = (\sigma_{yx}\sigma_{xz} - \sigma_{xx}\sigma_{yz}) / \delta \quad (\text{III.48})$$

$$\rho_{zx} = (\sigma_{yx}\sigma_{zy} - \sigma_{zx}\sigma_{yy}) / \delta, \quad \rho_{zz} = (\sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{yx}\sigma_{xy}) / \delta \quad (\text{III.49})$$

Le déterminant δ est calculé par la formule suivante :

$$\delta = \sigma_{xx} (\sigma_{yy}\sigma_{zz} - \sigma_{zy}\sigma_{yz}) + (\sigma_{xy}\sigma_{zx}\sigma_{yz} - \sigma_{yx}\sigma_{zz}) + \sigma_{xz} (\sigma_{yx}\sigma_{zy} - \sigma_{zx}\sigma_{yy}) \quad (\text{III.50})$$

Finalement, nous pouvons calculer la partie réelle et imaginaire de l'impédance, en présence du défaut, en utilisant la relation suivante :

$$R = \frac{1}{I^2} \int_{\Omega_c} \overline{\vec{J}^* \text{ind}} \overline{\vec{\rho}} \overline{\vec{J} \text{ind}} dv \quad (\text{III.51})$$

L'énergie magnétique Wm dans tout le domaine d'étude, elle s'exprime comme suit :

$$Wm = \frac{1}{2} \iiint_{\text{espace}} \frac{1}{\mu_0} \overline{\vec{B}} \overline{\vec{B}} dv \quad (\text{III.52})$$

Donc :

$$L = \frac{1}{I^2} \iiint_{\text{espace}} \frac{1}{\mu_0} \overrightarrow{B} \cdot \overrightarrow{B} dv \quad (\text{III.53})$$

Dans les équations (III.38) et (III.46) , $\overrightarrow{J^*ind}$ et \overrightarrow{B} désignent les conjugués des vecteurs \overrightarrow{Jind} et \overrightarrow{B} .

III.6.2. A partir l'énergie électromagnétique de la bobine

La réponse d'un capteur à Courants de Foucault peut également être déterminée par l'énergie électromagnétique stockée. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$I_s^2 \cdot \Delta Z = - \int_{\Omega_c} (\overrightarrow{E} - \overrightarrow{E0}) \cdot \overrightarrow{J_s} d\Omega_s \quad (\text{III.54})$$

Avec :

\overrightarrow{E} et $\overrightarrow{E0}$ Les champs électriques respectivement en présence et en absence de défaut pour une application CND, ou avec et sans charge dans le cas d'une application de caractérisation.

Le champ électrique dans la bobine est évalué par :

$$\overrightarrow{E} = - \overrightarrow{J} \omega \overrightarrow{A} \quad (\text{III.55})$$

Donc, l'expression de la variation d'impédance s'écrit :

$$\Delta Z = \frac{j\omega}{I_s^2} \int_{\Omega_c} (\overrightarrow{A^s} - \overrightarrow{A^s0}) \cdot \overrightarrow{J_s} d\Omega_c \quad (\text{III.56})$$

$\overrightarrow{A^s}$ et $\overrightarrow{A^s0}$: Les potentiels vecteurs magnétiques respectivement en présence et en absence de défaut pour une application CND, ou avec et sans charge dans le cas d'une application de caractérisation.

III.6.3. A partir la tension aux bornes du récepteur

Pour un capteur CF, selon la loi de Faraday, la force électromotrice ΔV de la bobine de détection liée au vecteur de la densité du flux magnétique $\overrightarrow{B_s}$ s'exprime par l'équation suivant :

$$\Delta V = - \int_s J \omega \overrightarrow{B_s} \cdot d\overrightarrow{s} \quad (\text{III.57})$$

La variation de l'impédance transmis au récepteur est calculée en divisant sa variation de la force électromotrice par le courant d'excitation I_s

$$\Delta Z = - \frac{j\omega}{I_s} \int_s \overrightarrow{B_s} \cdot d\overrightarrow{s} \quad (\text{III.58})$$

I_s : La densité de courant dans la bobine de réception

III.7.Méthodes numériques de résolution

Les formulations magnétodynamiques précédemment exposées sont des équations aux dérivées partielles sous forme continue. Elles peuvent être résolues par l'une des méthodes numériques suivantes:

La méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments de frontière (BEM), la méthode des intégrales de volume, la méthode des volumes finis (FVM) et la méthode des éléments finis (FEM).

III.7.1. La méthode des différences finies

Historiquement la première, elle consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mailles rectangulaires et à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs de différences entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Si cette méthode est simple à programmer, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes [27].

III.7.2. La méthode des éléments de frontières

Elle repose sur la méthode plus générale des équations intégrales. Les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations intégrales. Les fonctions de Green, noyaux de ces intégrales, représentent la réponse due à une source ponctuelle (réponse impulsionnelle) dans le contexte de la géométrie étudiée. La difficulté de leur détermination limite l'application de cette méthode à des géométries canoniques. Cette méthode ne peut s'appliquer 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..etc) [27].

III.7.3. La méthode des intégrales de volumes

Elle repose sur la résolution des équations intégrales précédemment citées. Une fois les fonctions de Green correspondant à la géométrie étudiée obtenues, les champs électrique et magnétique dus à l'interaction capteur-cible sont déterminés par convolutions 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 [27].

III.7.4. La méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis, appelée aussi méthode des volumes de contrôles, est une méthode de résidus pondérés où les fonctions de poids sont égales à l'unité dans des volumes finis données. Elle consiste à discrétiser les équations aux dérivées partielles par intégration sur des volumes finis entourant les nœuds du maillage plutôt qu'aux nœuds eux-mêmes. En effet, dans le cas de cette méthode, le domaine d'intégration est subdivisé en volumes de contrôle, chacun entoure un nœud de maillage. Lors de l'assemblage des équations discrétisées, la matrice du système global est

construite par arrête contrairement aux matrices globales issues d'une discrétisation par éléments finis, pour laquelle la construction se fait par élément [27].

III.7.5. La méthode des éléments finis

Elle est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Elle est bien utilisée lorsque l'excitation s'effectue à basse ou moyenne fréquence (la profondeur de pénétration standard n'est pas négligeable devant les autres dimensions). Nous ne nous intéressons qu'à la méthode des éléments finis malgré son coût en occupation mémoire et en temps d'exécution, cette méthode présente des avantages tels que la robustesse ou la précision [27].

III.7.5.1 Principe de la méthode variationnelle

La méthode variationnelle nécessite la connaissance à priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée par le principe de l'action Hamiltonienne qui stipule l'existence d'un fonctionnel type intégral défini par :

$$f(A) = \int_{\Omega} \Omega \, d\Omega \quad (\text{III.59})$$

L : est la fonction de la grange résultant de la coénergie du système de type cinétique et de son énergie potentiel.

Ω : est le domaine d'étude.

La résolution du problème variationnelle défini par la fonction d'énergie $F(A)$ revient à minimiser cette fonctionnelle [26].

La minimisation s'effectue en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\partial F \partial A_n = 0 \quad (\text{III.60})$$

n : Nombre de nœud dans le domaine d'étude.

A : Inconnue au nœud n du domaine.

III.7.5.2 Principe de Formulation résidus pondérés

Le principe de la méthode des résidus pondérés est de remplacer la solution exacte par une solution approchée ce va engendrer une erreur appelée résidus R .

$$R_i = L(A) - f \quad (\text{III.61})$$

R_i : est le résidu de l'approximation.

$L(A)$: opérateur différentiel.

f : fonction définie sur le domaine d'étude Ω

A : l'inconnue à chercher.

A l'aide de fonction de pondération bien choisie, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en N points du domaine Ω .

$$\int_{\Omega} \mathbf{R}_i \cdot \Phi_i \cdot \partial \Omega \quad (\text{III.62})$$

Φ_i : Fonction de pondération ou de projection. Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

Plusieurs méthodes peuvent être déduites de la formulation résidus pondérés, ces dernières sont essentiellement liées au choix des fonctions de pondérations, parmi elles on citera :

--La méthode de collocation par points, ou les fonctions de Dirac sont prises comme fonctions de pondérations ou on impose au résidu de s'annuler dans chaque pont ou on veut approcher la solution.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, après la modélisation mathématique des technologies ECND-CF et structures multicouche, nous validons notre approche computationnelle. La validation a été effectuée en comparant les résultats obtenus par COMSOL avec les résultats expérimentaux donnés dans un problème standard. Nous avons ensuite effectué des simulations de deux configurations de propriétés structures multicouche en utilisant deux types de capteurs de formes différentes et fonctionnant dans des modes différents.

En résumé, nous notons que les capteurs présentés nécessitent une rotation mécanique. Du point de vue des applications industrielles, ces capteurs ont une large gamme d'utilisations. Cependant, en raison de la réalisation de la rotation mécanique. Ce processus peut être manuel, et le processus de caractérisation peut prendre beaucoup de temps pour analyser la réponse du capteur pour plusieurs modes, et dans le cas d'une rotation électromécanique, même si le temps de balayage est réduit, ce système nécessite un dispositif mécanique rotatif supplémentaire. Dans le chapitre suivant nous ferons des propositions d'amélioration de ces dispositifs, notamment en supprimant l'obligation de faire pivoter les capteurs.

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction

La section "Résultats et discussions" vise à présenter en détail les résultats obtenus à partir des simulations de la procédure de Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (CND-CF) appliquée à des structures multicouches. Ces résultats sont analysés en profondeur pour évaluer la performance de la procédure et fournir des connaissances précieuses sur sa capacité à détecter, localiser et caractériser les défauts dans de telles structures. Dans cette introduction, nous présenterons brièvement le contexte de la recherche et les objectifs de cette partie de l'étude.

Les objectifs de cette partie de l'étude sont multiples. Tout d'abord, nous cherchons à présenter les résultats numériques des simulations CND-CF réalisées sur différents cas de structures multicouches. Ces résultats incluent des données telles que les courbes d'impédance, les profils de Courants de Foucault et les cartes de distribution de conductivité, qui fournissent des informations essentielles sur le comportement électromagnétique de la structure.

Ensuite, nous procéderons à une comparaison approfondie entre les résultats des simulations et les données expérimentales disponibles pour des structures multicouches similaires. Cette comparaison nous permettra d'évaluer la validité et la précision des simulations et d'identifier les éventuels écarts entre les deux. En comprenant ces différences, nous serons en mesure d'apprécier les avantages et les limites de la procédure de CND-CF dans le contexte des structures multicouches.

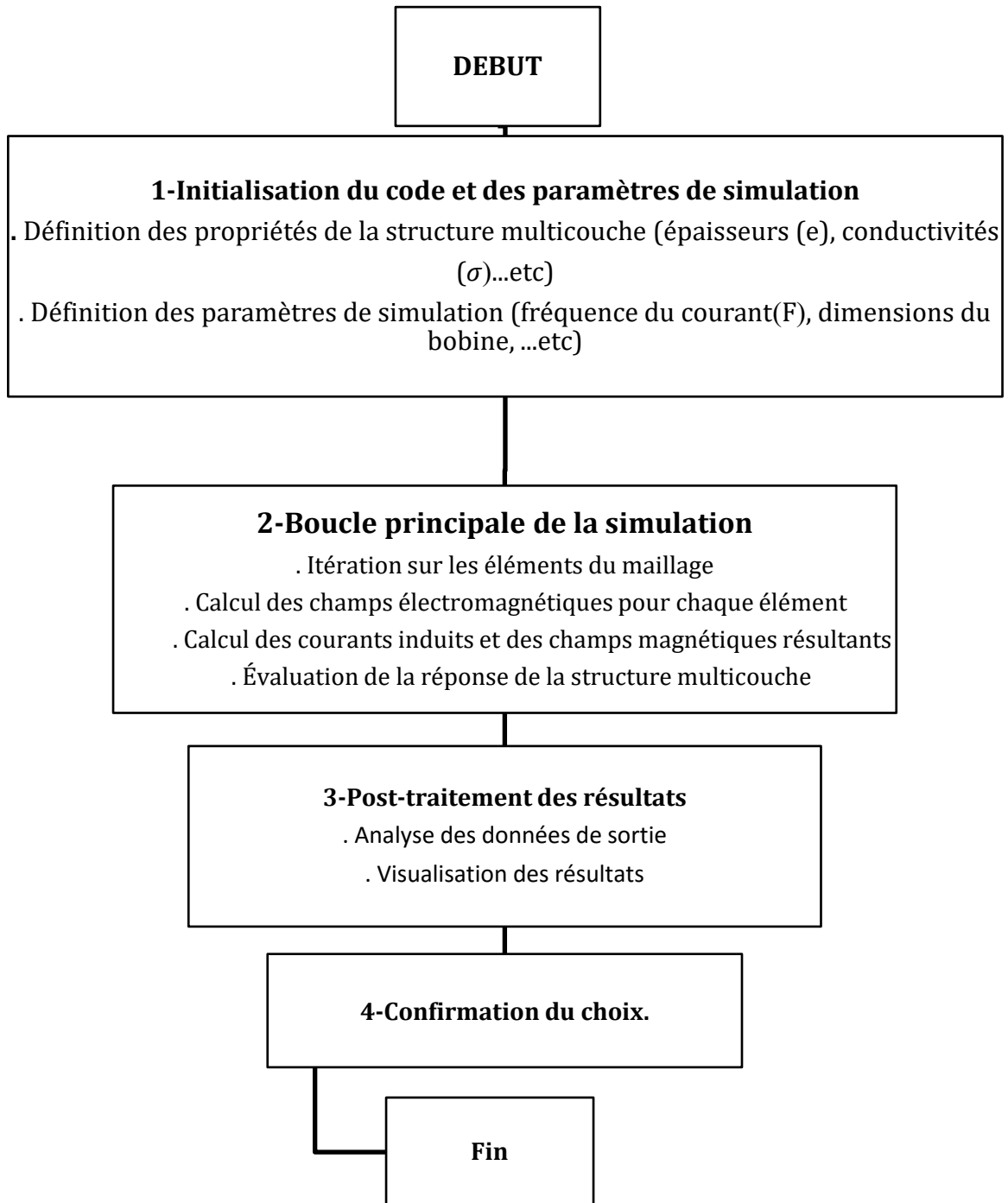
Enfin, nous analyserons les performances de la procédure de CND-CF à travers une évaluation détaillée des résultats des simulations. Nous chercherons à comprendre comment les paramètres de simulation, tels que l'épaisseur des couches, la conductivité des matériaux, etc., influencent les performances de la procédure. Cette analyse nous permettra d'identifier les facteurs clés qui contribuent à l'efficacité et à la sensibilité de la procédure dans la détection des défauts dans les structures multicouches.

IV.2. Organigramme de code interne utilisé

-Chargement des données d'entrée nécessaires à la simulation, telles que les propriétés de la structure multicouche (épaisseurs, conductivités, permittivités,...etc), les paramètres de simulation (fréquence du courant, dimensions du domaine,... etc).

-calcul des champs électromagnétiques dans la structure multicouche en fonction des équations fondamentales de l'électromagnétisme. Cela implique de résoudre les équations de Maxwell pour

obtenir les distributions de champs électriques et magnétiques à travers la structure.



Validation de code interne utilisé

Le code utilisé a été validé par des travaux antérieurs de monsieur Bennoud Salim, (Bennoud S, « Modélisation et simulation numérique des phénomènes électromagnétiques (Notions et applications) », Edition Universitaire Européenne, UE, ISBN :978-613-8-40026-4 (2018), [17], [26], [29])).

Note : toutes les références peuvent être consultées.

IV.3. Configuration de test

Le capteur utilisé

Dans nos simulations le capteur est posé sur la couche supérieure d'aluminium, Nous supposons que d'une mesure à l'autre il y a une variation de lift-off (décalage en hauteur entre capteur et cible) est de 0.25mm,

La taille de capteur utilisé a été déterminée par deux contraintes : d'une part, le nombre de spires suffisant pour générer un champ magnétique capable de pénétrer plusieurs millimètres de profondeur dans la structure testée, et d'autre part le diamètre pour éviter les effets de bord (associés par exemple à la possibilité de clous près de la zone d'inspection). Dans notre étude la bobine est conçue de Ns=150 spires et son profil extérieur est de Re=5 mm, l'intérieur est de Ri=3mm, sa hauteur supposée fixe h=8mm, et la fréquence utilisé est de F=5000hz, l'intensité du courant d'excitation sinusoïdal est fixée à I=50A, Ce capteur sera utilisé dans des structures multicouches constituées de deux plaques en aluminium de grande surface séparées par une fine couche d'air qui constitue le jeu entre les pièces. L'objectif est d'analyser les interactions physiques entre capteurs et structures.

Description des structures multicouche étudiée

Dans ce mémoire, nous considérons dans un premier temps une structure composée de deux couches d'aluminium de conductivité ($\sigma = 18\text{MS/m}$) et de perméabilités $\mu = 1$, séparées par une mince couche d'air et nous nous proposons d'étudier les caractéristiques de l'impédance normalisée d'un capteur CF utilisé pour l'inspecter.

Propriétés électromagnétiques du matériau constituant les couches

Aluminium : L'aluminium est un matériau conducteur largement utilisé dans diverses applications industrielles. Il présente une conductivité électrique élevée, généralement entre 15 et 35 millions de siemens par mètre (MS/m) à température ambiante. L'aluminium présente également une perméabilité magnétique proche de celle du vide, ce qui signifie qu'il n'a pas d'influence significative sur les propriétés magnétiques de la structure multicouches.

Épaisseurs des couches et L'écartement

Couche extérieure en aluminium : L'épaisseur de la couche extérieure et inférieure en aluminium est de $e_a = e_b = 2.2 \text{ mm}$ illustré (voir figure 1.6), cette épaisseur est choisie pour représenter une couche relativement mince, permettant une détection efficace des défauts près de la surface de la structure multicouches, L'écartement entre les deux couches est de $e=0.25\text{mm}$.

Tableau IV.1. Paramètres du cas étudié

La bobine	
La bobine	
Rayon intérieur (Re)	3mm
Rayon extérieur (Ri)	5mm
Longueur (h)	8mm
Nombre de tours (N)	150
La distance bobine-pièce(lift-of)	0.25mm

Les plaques

Plaque supérieur :

épaisseur (e_a)	2.2mm
Conductivité (σ)	18Ms/mm
Perméabilité (μ)	1

Plaque inférieure :

épaisseur (e_b)	2.2mm
Conductivité (σ)	18Ms/mm
Perméabilité (μ)	1

L'écartement (e) 0.25mm

**Fissure est dans la deuxième plaque
d'alimentation**

Longueur	12mm
Profondeur	0.5mm
Autres paramètres	
Fréquence	5000hz
Courant	50A

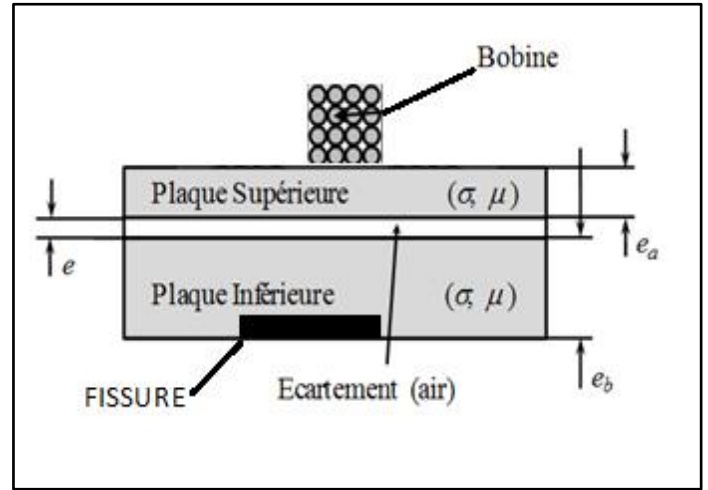


Figure IV.1. Dispositif expérimental

IV.4. Résultats et discussions

IV.4.1. Structure multicouche sans défaut

Dans ce cas de simulation, nous avons étudié une structure multicouche sans présence de défaut. L'objectif principal était d'analyser le comportement électromagnétique de la structure en l'absence de

tout défaut, afin d'établir une référence pour les cas ultérieurs avec des défauts, avec des couches distinctes composées de matériaux ayant des propriétés électromagnétiques connues. Les épaisseurs des couches ont été fixées conformément à une configuration réaliste.

Des simulations ont été effectuées en considérant trois épaisseurs de la couche inférieure ($e_b=1.3\text{mm}$, $e_b=1.8\text{mm}$, $e_b=2.5\text{mm}$), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau (IV.1).

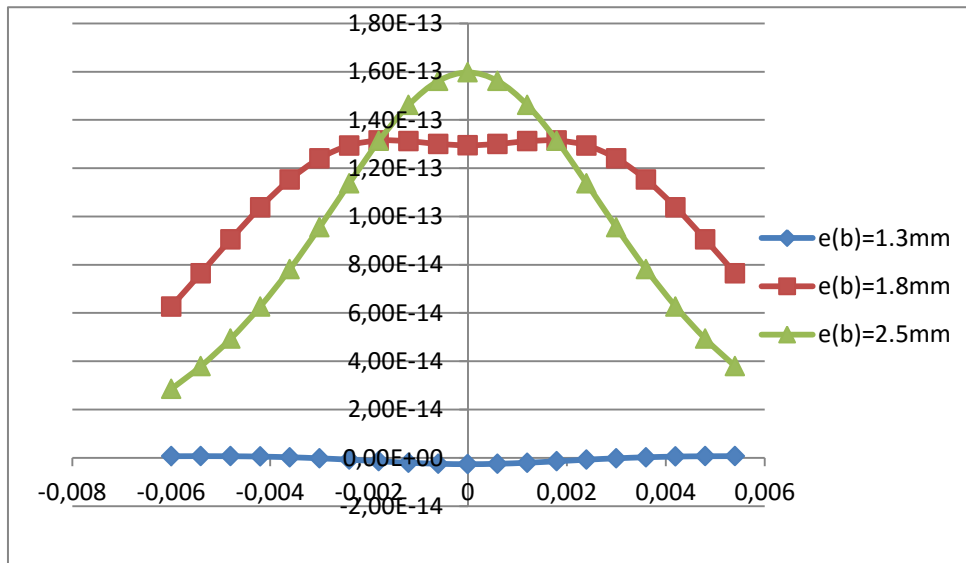


Figure IV.2. Variation de la partie réelle pour différentes épaisseurs de la couche inférieure avec l'absence de défaut

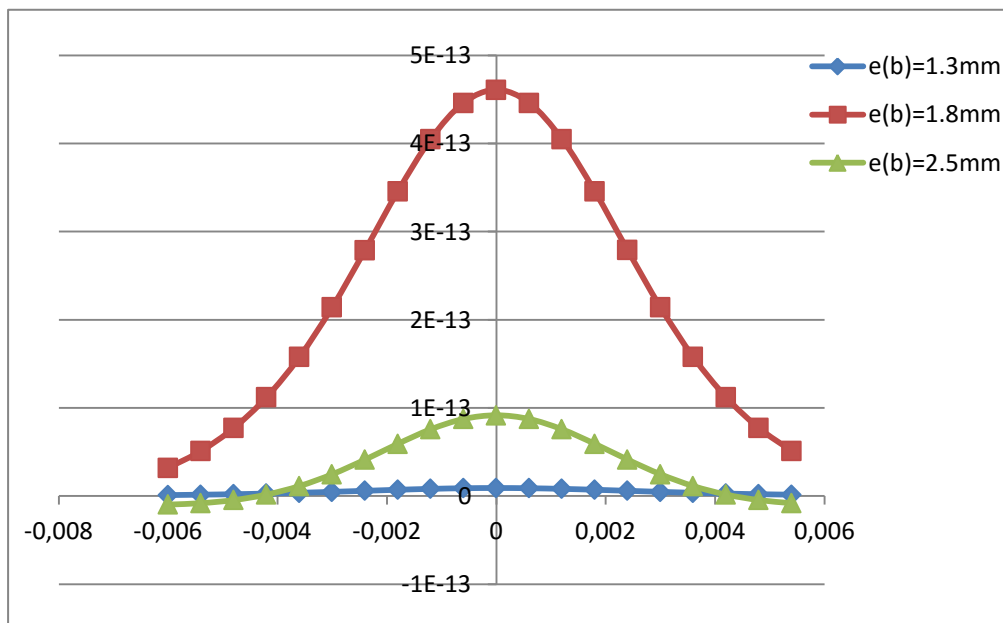


Figure IV.3. Variation de la partie imaginaire pour différentes épaisseurs de la couche inférieure avec l'absence de défaut

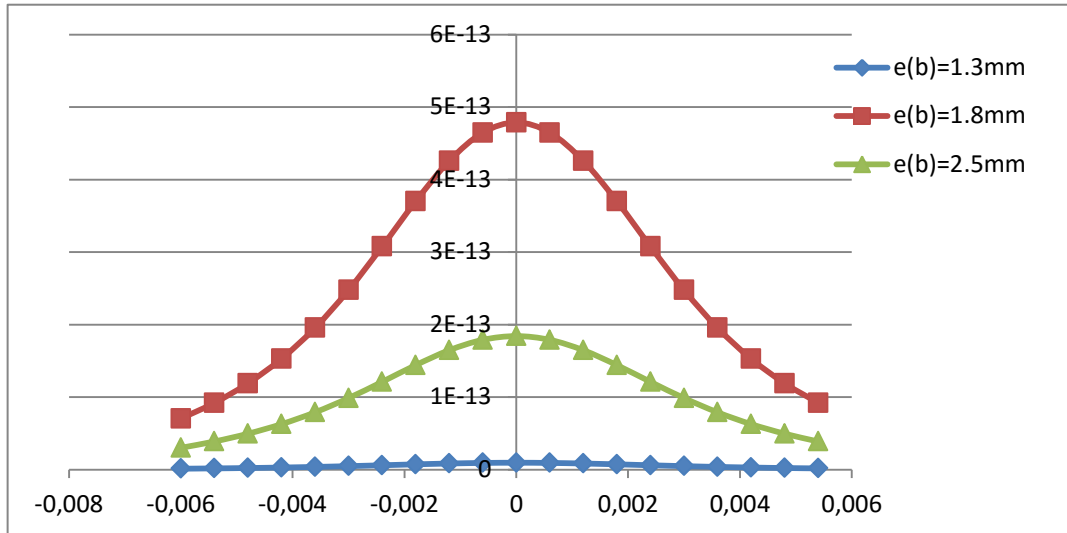


Figure IV.4. Variation de l'impédance normalisée pour différentes épaisseurs de la couche inférieure avec l'absence de défaut

En analysant les résultats présentés ci-dessus, on remarque que :

-Les figures (IV.2), (IV.3), (IV.4) respectivement, présentent l'évolution de la partie réelle, la partie imaginaire et la variation de l'impédance pour différentes épaisseurs de la couche inférieure avec l'absence de défaut, L'augmentation de la valeur de l'épaisseur est inversement proportionnelle avec ces variations.

IV.4.2. Structure multicouche avec défaut

Dans ce cas de simulation, nous avons étudié une structure multicouche similaire au cas précédent, mais avec l'introduction d'un défaut intentionnel dans la structure. L'objectif était d'évaluer la capacité de la procédure de CND-CF à détecter, localiser et caractériser ce défaut dans une configuration réaliste.

Le défaut considéré était une fissure située à la couche intérieure. Cette fissure avait des caractéristiques géométriques spécifiques, telles que sa longueur 12mm, sa profondeur 0.5mm.

Nous avons étudié l'influence des différents paramètres, telles que la fréquence, les épaisseurs, les conductivités, l'interaction entre les deux couche, La distance bobine-pièce (lift-off), l'influence de la longueur et profondeur de la fissure.

IV.4.3. Influence de la fréquence

La fréquence des Courants de Foucault utilisée dans la procédure peut avoir un impact significatif sur les performances de détection des défauts et sur la réponse électromagnétique.

Des simulations ont été effectuées en considérant trois fréquences (F1=600hz, F2=3000hz, F3=20000hz), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau (IV.1).

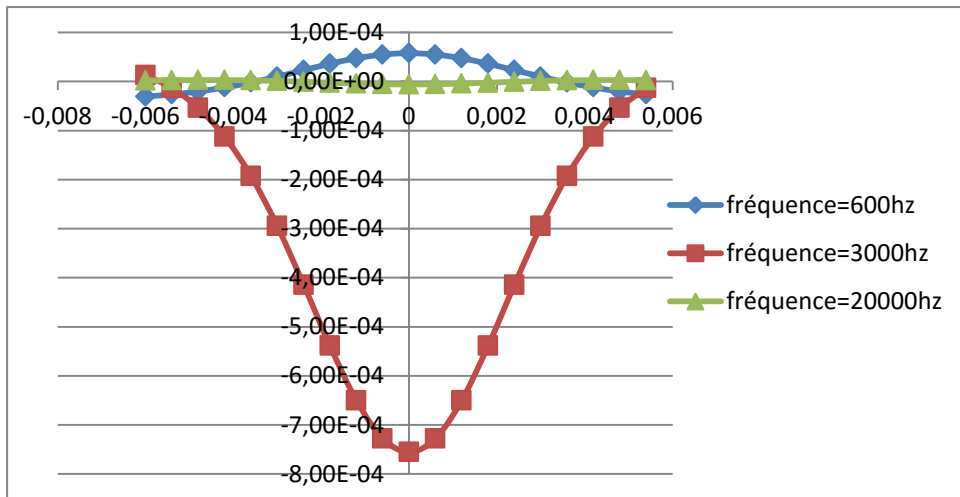


Figure IV.5. Variation de la partie réelle pour différentes fréquences

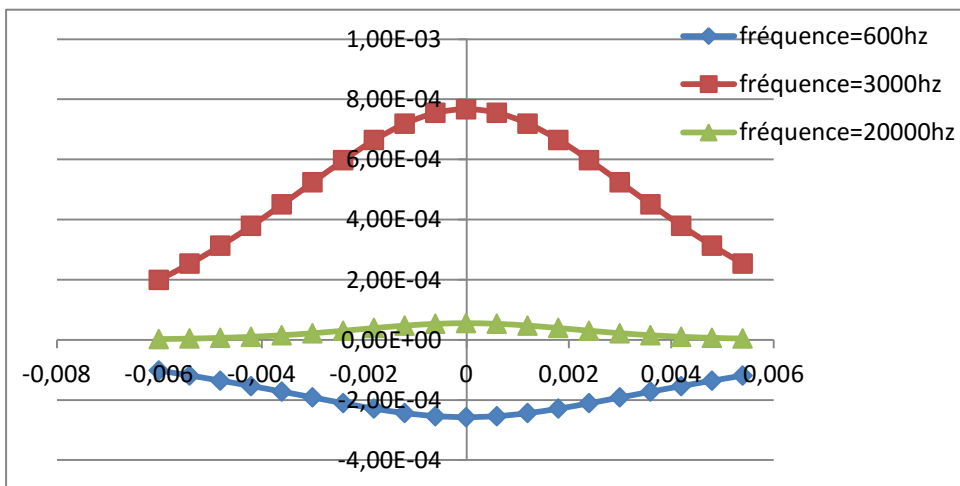


Figure IV.6. Variation de la partie imaginaire pour différentes fréquences

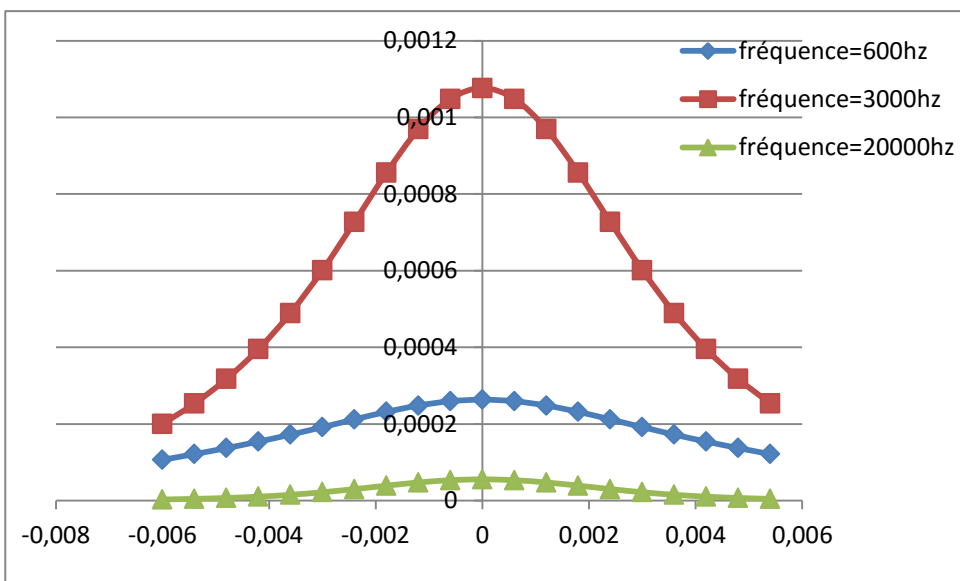


Figure IV.7. Variation de l'impédance normalisée pour différentes fréquences

En analysant les résultats présentés ci-dessus, on remarque que :

-Les figures (IV.5), (IV.6), (IV.7) respectivement, présentent l'évolution de la partie réelle, la partie imaginaire et la variation de l'impédance pour différentes fréquences, L'augmentation de la valeur de la fréquence est inversement proportionnelle avec les composantes de la résistance (partie réelle R_n) et les composantes imaginaires (partie réactive X_n), elle est aussi inversement proportionnelle avec les composantes de l'impédance normalisé.

D'autres simulations ont été effectuées en considérant quatre fréquences ($F_{1.1}=1500\text{Hz}$, $F_2=3000\text{Hz}$, $F_{3.1}=4500\text{Hz}$, $F_{4.1}=6000\text{Hz}$), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau (IV.1).

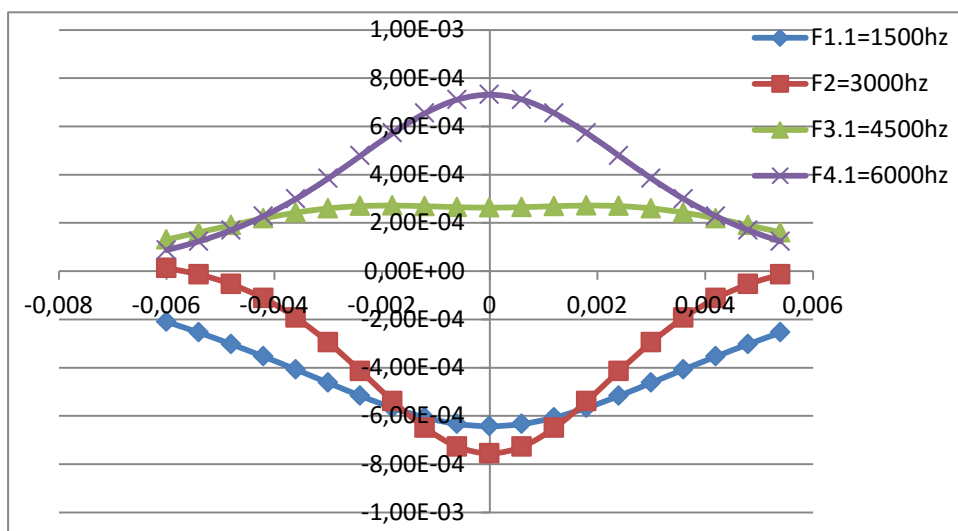


Figure IV.8.Variation de la partie réelle pour différentes fréquences

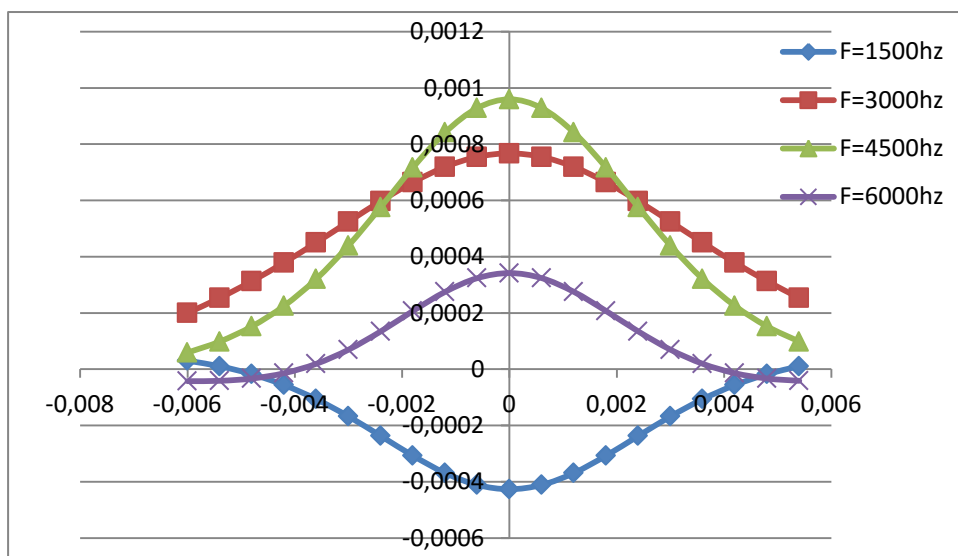


Figure IV.9.Variation de la partie imaginaire pour différentes fréquences

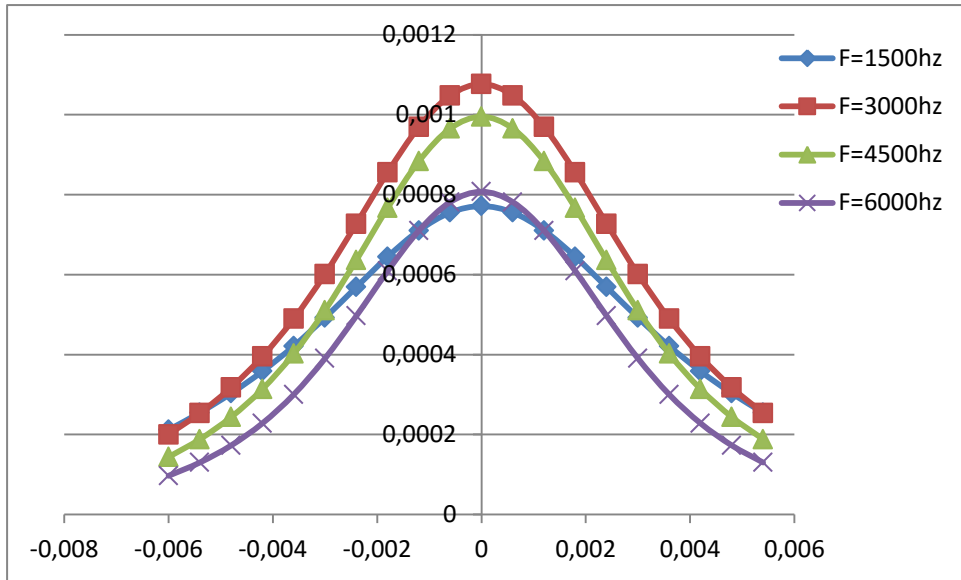


Figure IV.10. Variation de l'impédance normalisée pour différentes fréquences

En analysant les résultats présentés ci-dessus, on remarque que :

-Les figures (IV.8), (IV.9), (IV.10) respectivement présentent l'évolution de la partie réelle, la partie imaginaire et variation de l'impédance pour différentes fréquences, L'augmentation de la valeur de la fréquence est inversement proportionnelle avec les composantes de la résistance (partie réelle R_n) et les composantes imaginaires (partie réactive X_n), donc sont inversement proportionnelle avec les composantes de l'impédance normalisé.

IV.4.4. Influence de la conductivité Conductivité de la couche supérieure

Des simulations ont été effectuées en considérant trois conductivités de la couche extérieure ($\sigma_a=16\text{MS/m}$, $\sigma_a=16,7\text{MS/m}$, $\sigma_a=17,4\text{MS/m}$, $\sigma_a=18,5\text{MS/m}$), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau(IV.1).

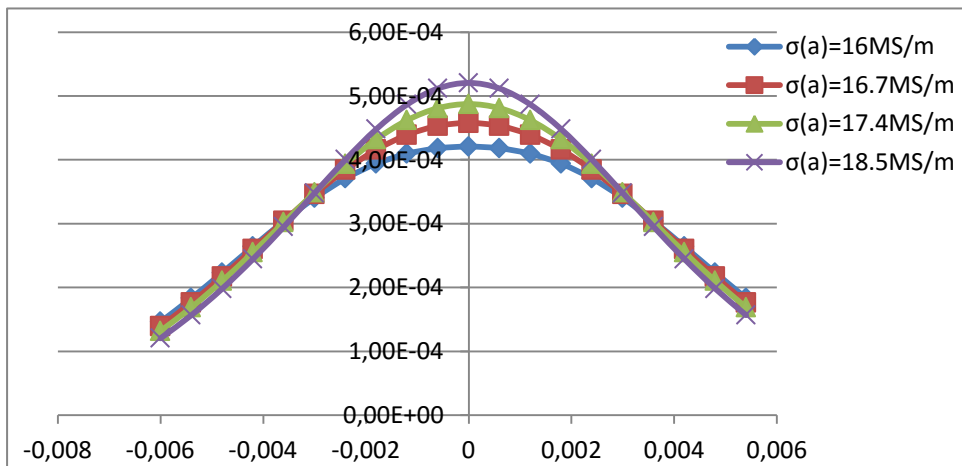


Figure IV.11. Variation de la partie réelle pour différentes conductivités de la couche extérieure

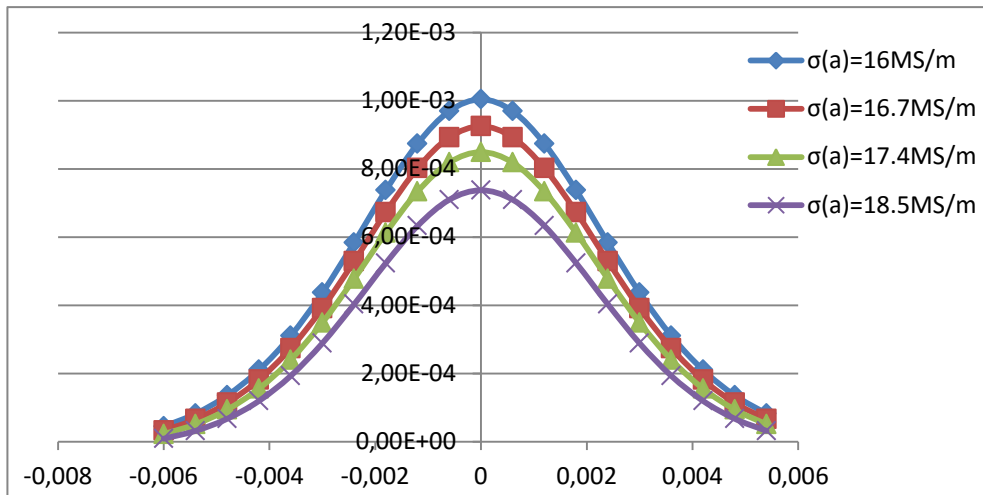


Figure IV.12. Variation de la partie imaginaire pour différentes conductivités de la couche extérieure

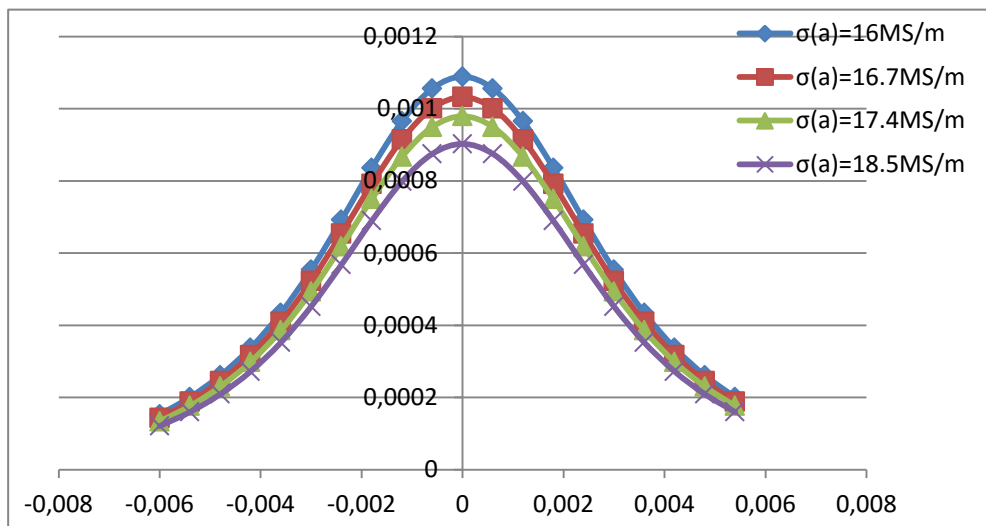


Figure IV.13. Variation de l'impédance normalisée pour différentes conductivités de la couche extérieure

En analysant les résultats obtenus, on remarque que :

-Les figures (IV.11), (IV.12), (IV.13) respectivement présentent l'évolution de la partie réelle, la partie imaginaire, et l'impédance normalisée en fonction de différentes conductivités de la couche extérieure, L'augmentation de la valeur de conductivité provoque une augmentation des composantes de la résistance (partie réelle R_n), ainsi qu'une diminution des composantes imaginaires (partie réactive X_n), et des composantes de l'impédance.

Conductivité de la couche inférieure

Des simulations ont été effectuées en considérant quatre conductivités de la couche inférieure ($\sigma_b=16\text{MS/m}$, $\sigma_b=16,7\text{MS/m}$, $\sigma_b=17,4\text{MS/m}$, $\sigma_b=18,5\text{MS/m}$), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau (IV.1).

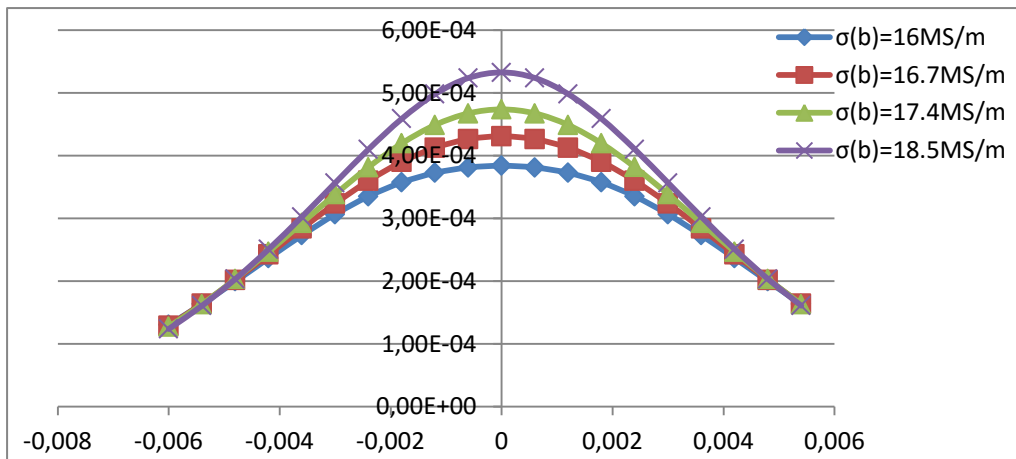


Figure IV.14. Variation de la partie réelle pour différentes conductivités de la couche inférieure

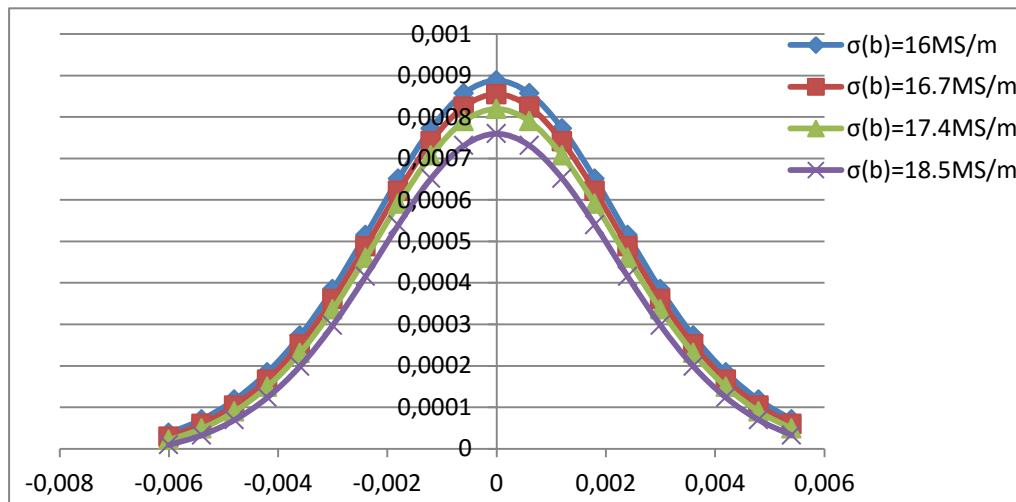


Figure IV.15. Variation de la partie imaginaire pour différentes conductivités de la couche inférieure

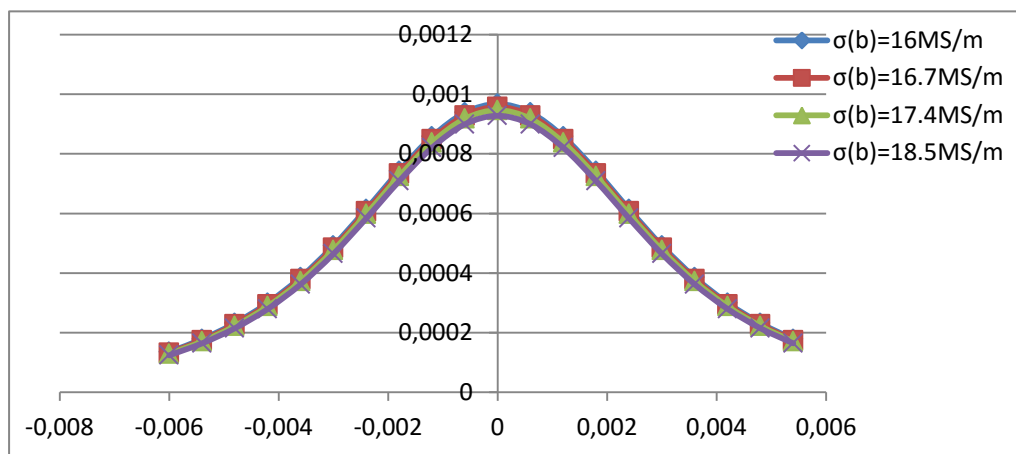


Figure IV.16. Variation de l'impédance normalisée pour différentes conductivités de la couche inférieure

En analysant les résultats présentés ci-dessus, on remarque que :

-Les figures (IV.14),(IV.15), (IV.16) respectivement présentent l'évolution de la partie réelle, la partie imaginaire, et l'impédance normalisée en fonction de différentes conductivités de la couche inférieure, L'augmentation de la valeur de conductivité provoque une augmentation des composantes de la résistance (partie réelle R_n),Ainsi qu'une diminution des composantes imaginaires (partie réactive X_n), Quant aux composants de l'impédance normalisée, ils sont adjacents d'une manière qui ne nous permet pas de voir les changements, mais à travers les données présentées dans le tableau (IV.2), nous pouvons voir une diminution par rapport à une augmentation de ces conductivités.

Tableau IV.2.Variation de l'impédance normalisée pour différentes conductivités de la couche intérieure

Conductivité de la couche inférieure	l'impédance normalisée
$\sigma_b=16\text{MS/m}$	0,000135674 0,000178348 0,000231913 0,000299765 0,000385716 0,000231913 0,000178348
$\sigma_b=16.7\text{MS/m}$	0,000132459 0,000174448 0,000227259 0,0002943 0,000379399 0,000227259 0,000174448
$\sigma_b=17.4\text{MS/m}$	0,000129238 0,000170511 0,000222526 0,000288692 0,000372846 0,000222526 0,000170511
$\sigma_b=18.5\text{MS/m}$	0,000124204 0,000164312 0,00021501 0,000279698 0,000362217 0,00021501 0,000164313

IV.4.5. Influence de l'épaisseur des plaques épaisseur de la couche supérieure

Des simulations ont été effectuées en considérant trois épaisseurs de la couche supérieure ($e_a=1.3\text{mm}$, $e_a=1.8\text{mm}$, $e_a=2.5\text{mm}$), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau(IV.1).

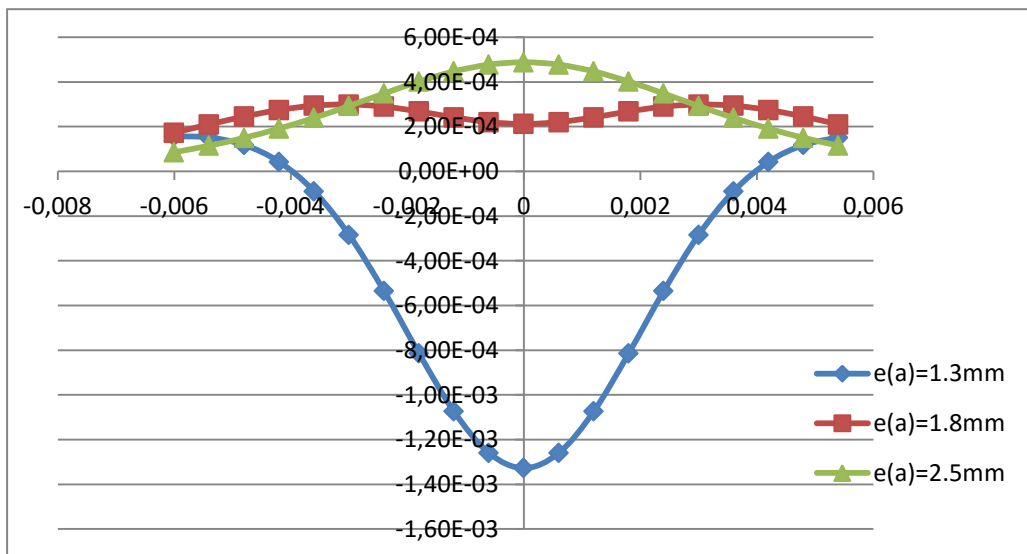


Figure IV.17. Variation de la partie réelle pour différentes épaisseurs de la couche extérieure

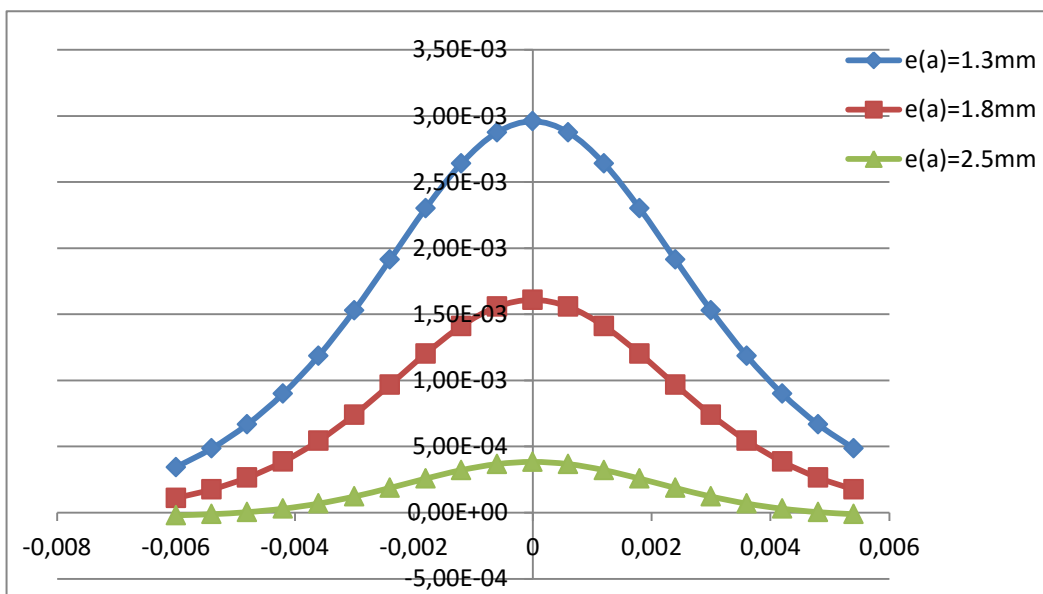


Figure IV.18. Variation de la partie imaginaire pour différentes épaisseurs de la couche extérieure

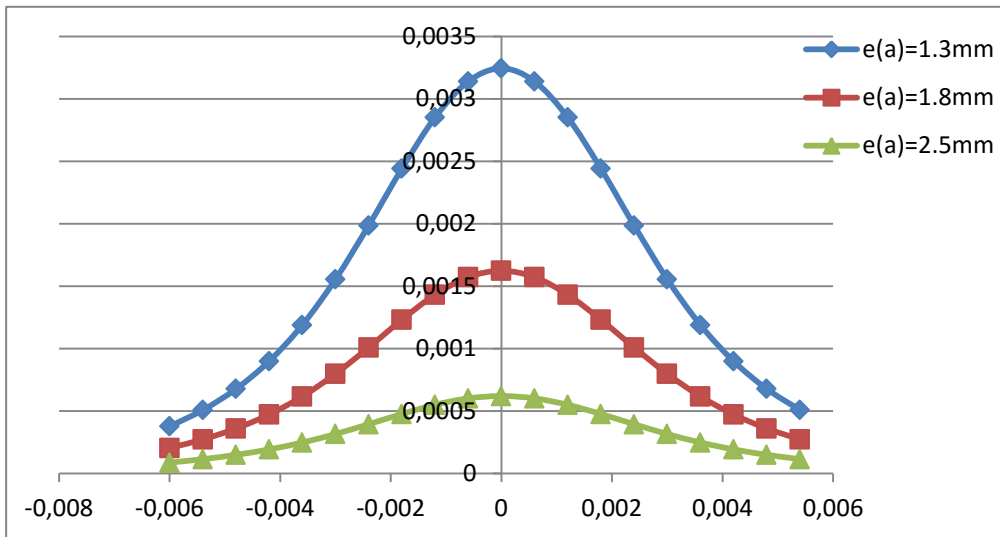


Figure IV.19. Variation de l'impédance normalisée pour différentes épaisseurs de la couche extérieure

En analysant les résultats présentés ci-dessus, on remarque que :

-Les figures (IV.17),(IV.18), (IV.19) respectivement présente l'évolution de la partie réelle, la partie imaginaire, et l'impédance normalisée en fonction de différentes épaisseur de la couche extérieur, L'augmentation de la valeur de l'épaisseur provoque une diminution des composantes imaginaires (partie réactive X_n),et des composantes de l'impédance, Ainsi que les composantes de la résistance (partie réelle R_n),ils sont inversement proportionnelles à ces épaisseurs.

épaisseur de la couche inférieure

Des simulations a été effectuées en considérant trois épaisseur de la couche inférieure ($e_b=1.3\text{mm}$, $e_b=1.8\text{mm}$, $e_b=2.5\text{mm}$), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau (IV.1).

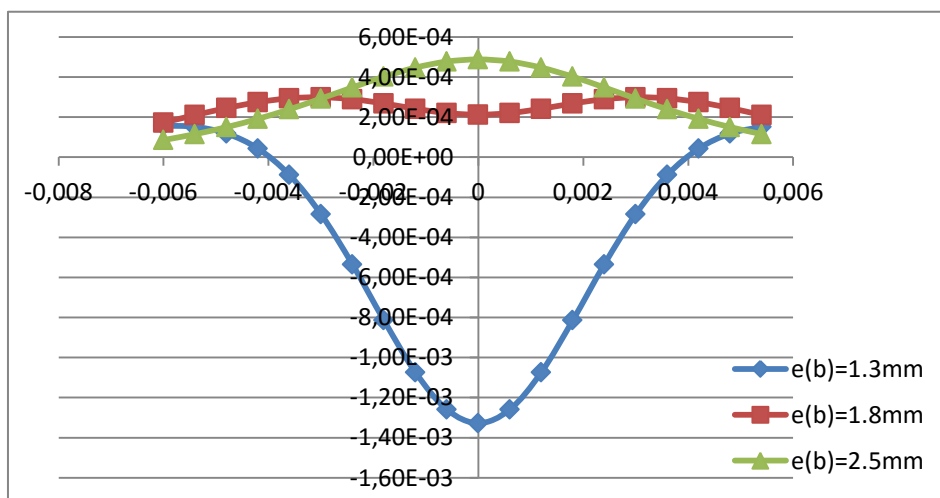


Figure IV.20. Variation de la partie réelle pour différentes épaisseurs de la couche inférieure

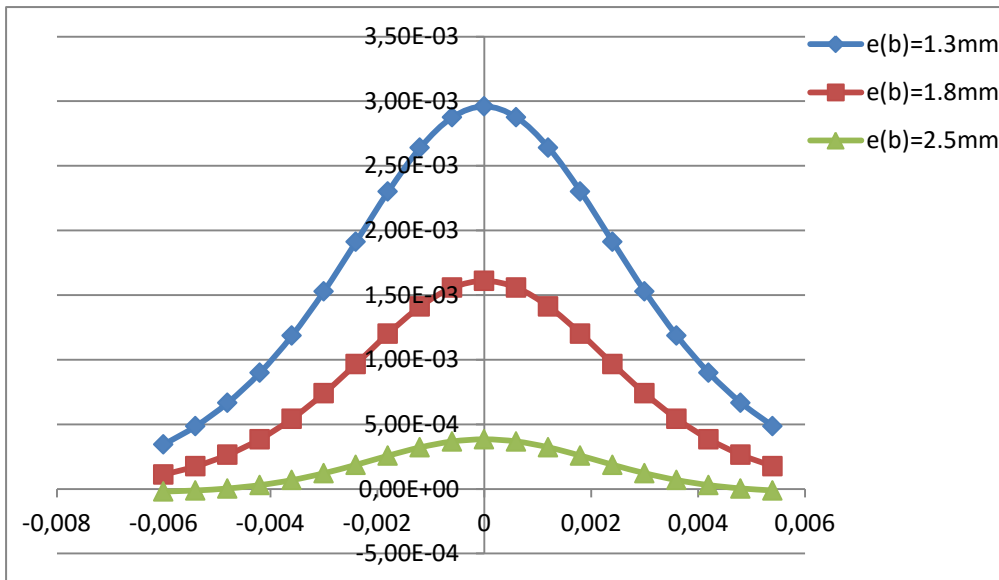


Figure IV.21. Variation de la partie imaginaire pour différentes épaisseurs de la couche inférieure

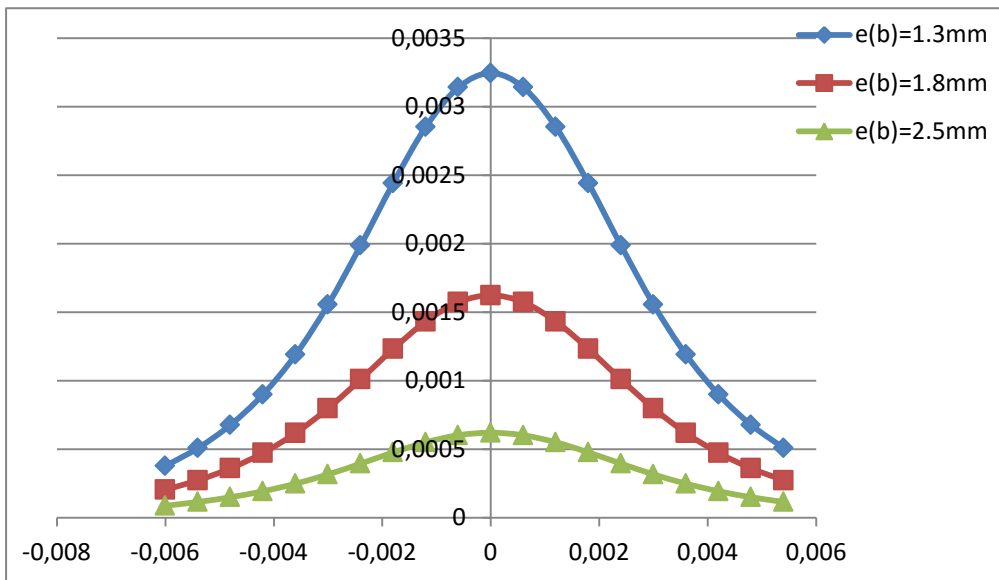


Figure IV.22. Variation de l'impédance normalisée pour différentes épaisseurs de la couche inférieure

En analysant les résultats présentés ci-dessus, on remarque que :

-La figure (IV.20),(IV.21), (IV.22) respectivement présente l'évolution de la partie réelle, la partie imaginaire, et l'impédance normalisée en fonction de différentes épaisseur de la couche inférieure, L'augmentation de la valeur de l'épaisseur provoque une diminution des composantes imaginaires (partie réactive X_n), et des composantes de l'impédance, Ainsi que les composantes de la résistance (partie réelle R_n), ils sont inversement proportionnelle à ces épaisseur.

IV.4.6. Influence de l'écartement (GAP) des plaques

Des simulations ont été effectuées en considérant quatre écartement ($e=0\text{mm}$, $e=0.1\text{mm}$, $e=0.2\text{mm}$, $e=0.3\text{mm}$), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau (IV.1).

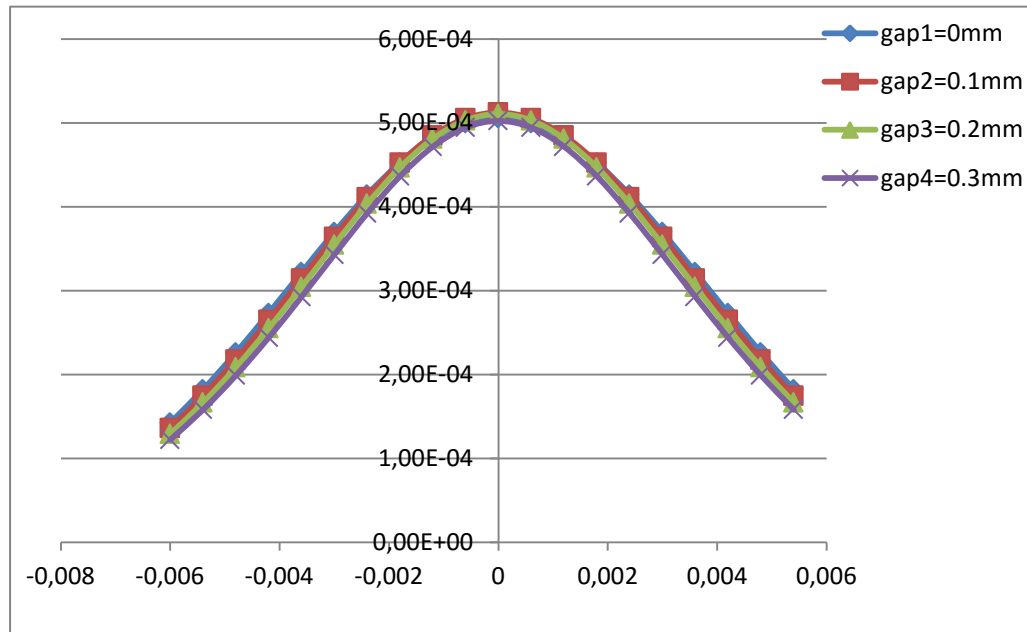


Figure IV.23. Variation de la partie réelle pour différents écartement (GAP)

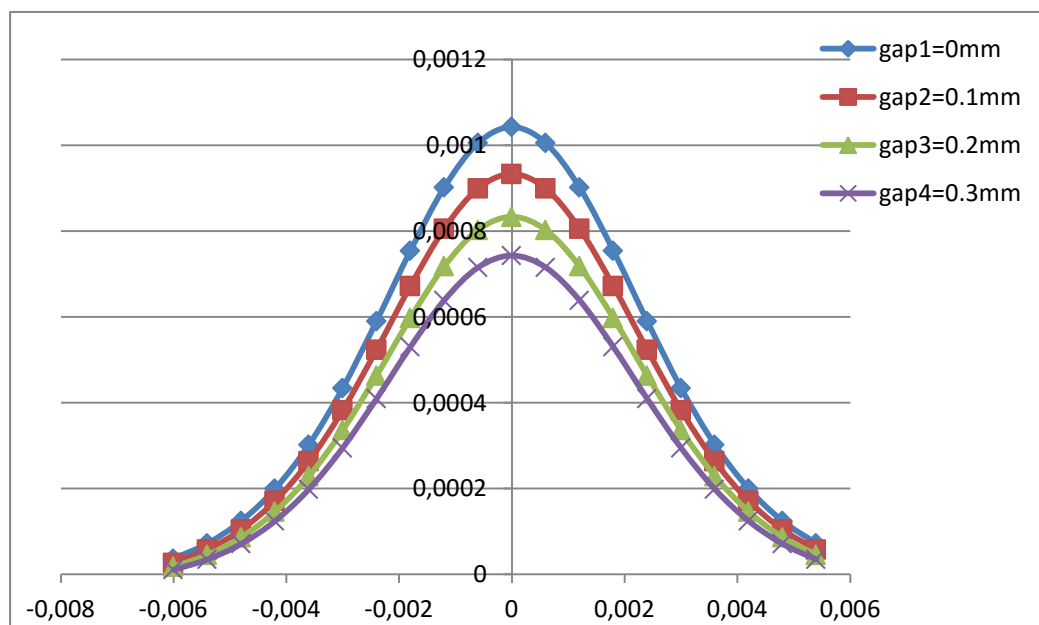


Figure IV.24. Variation de la partie imaginaire pour différents écartement (GAP)

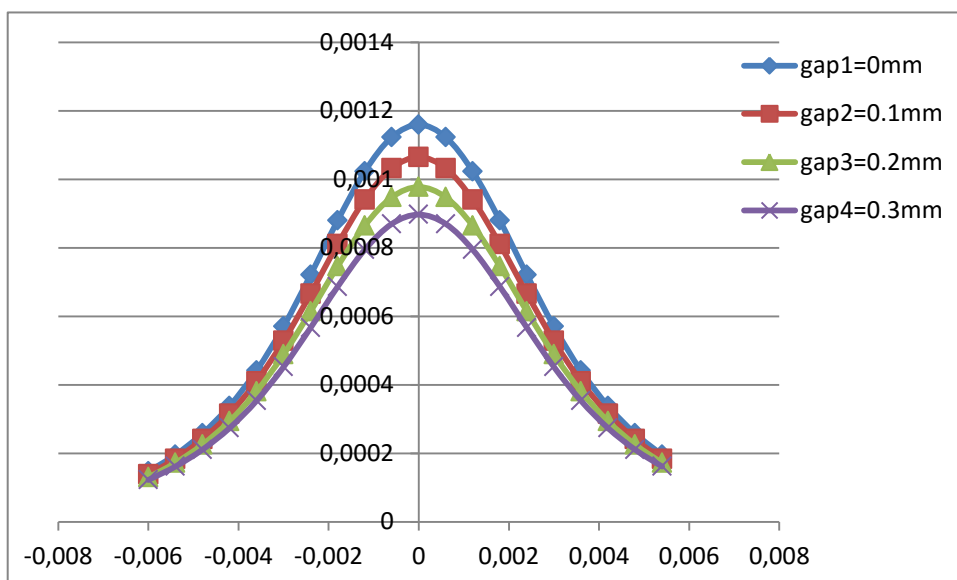


Figure IV.25. Variation de l'impédance normalisée pour différents écartement (GAP)

En analysant les résultats présentés ci-dessus, on remarque que :

-Les figures (IV.23),(IV.24), (IV.25) respectivement présentent l'évolution de la partie réelle, la partie imaginaire, et l'impédance normalisée en fonction de différents écartement(GAP) , L'augmentation de la valeur de l'écartement provoque une diminution des composantes imaginaires (partie réactive X_n),et des composantes de l'impédance normalisée, Quant aux composants de résistance (la partie réelle, R_n), ils sont adjacents d'une manière qui ne nous permet pas de voir les changements, mais à travers les données présentées dans le tableau (IV.3), nous pouvons voir une diminution par rapport à une augmentation de ces écartement.

Tableau IV.3. Variation des parties réelles pour différents écartement(GAP)

Ecartement(GAP)	Partie réelle
e=0mm	1,42E-04
	1,82E-04
	2,26E-04
	2,73E-04
	3,22E-04
	2,26E-04
	1,82E-04
e=0.1mm	1,36E-04
	1,75E-04
	2,18E-04
	2,65E-04
	3,14E-04
	2,18E-04
	1,75E-04
e=0.2mm	1,29E-04
	1,66E-04

	2,09E-04 2,55E-04 3,04E-04 2,09E-04 1,66E-04
e=0.2mm	1,22E-04 1,58E-04 7,11E-05 1,24E-04 1,99E-04 1,99E-04 1,58E-04

IV.4.7. Influence de la distance bobine-pièce (LIFT-OF)

Des simulations ont été effectuées en considérant quatre distances bobine-pièce (LIFT-OF) (0 mm, 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau (IV.1).

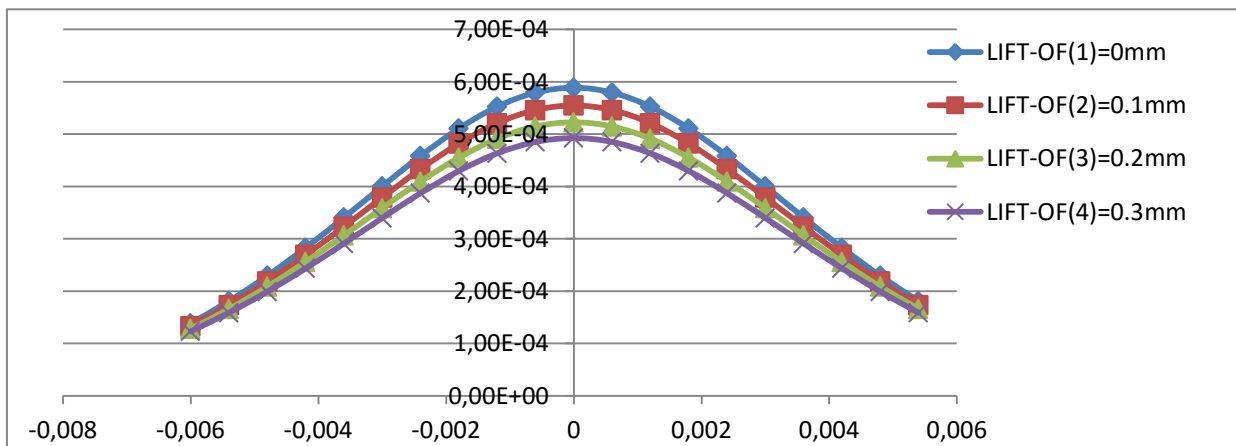


Figure IV.26.Variation de la partie réelle pour différentes distances bobine-pièce (LIFT-OF)

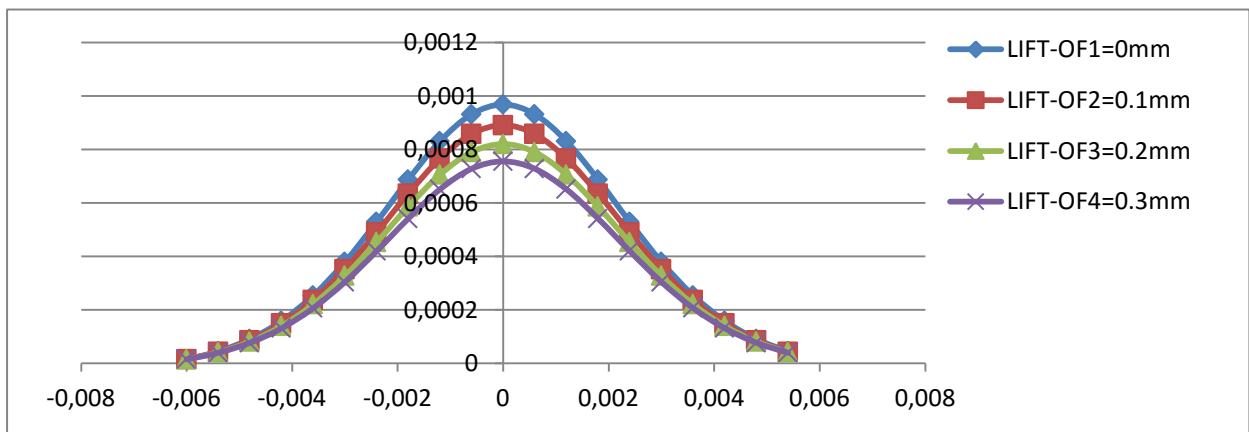


Figure IV.27.Variation de la partie imaginaire pour différentes distances bobine-pièce (LIFT-OF)

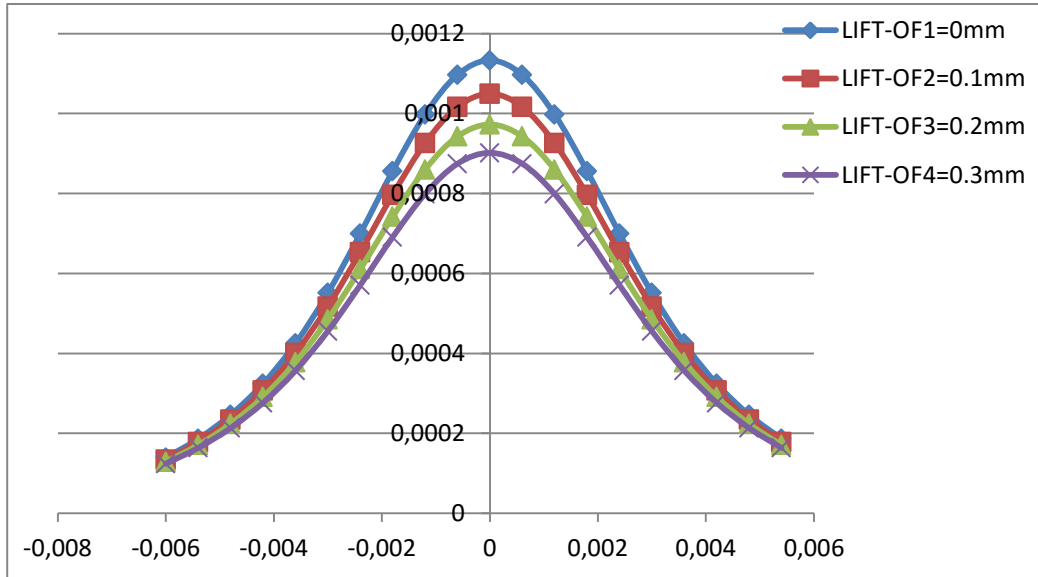


Figure IV.28. Variation de l'impédance normalisée pour différentes distance bobine-pièce (LIFT-OF)

En analysant les résultats présentés ci-dessus, on remarque que :

-Les figures (IV.26), (IV.27), (IV.28) respectivement présentent l'évolution de la partie réelle, la partie imaginaire, et l'impédance normalisée en fonction de différentes distance bobine-pièce (LIFT-OF), L'augmentation de la valeur du distance bobine-pièce (LIFT-OF) provoque une diminution des composantes de la résistance (partie réelle R_n), des composantes imaginaires (partie réactive X_n), donc une diminution des composantes de l'impédance normalisée.

IV.4.8. Influence des propriétés de la fissure

IV.4.8.1. Influence de la longueur de la fissure

Des simulations ont été effectuées en considérant quatre longueurs de fissure (0.4mm, 0.8mm, 1.1mm, 1.4mm), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau (IV.1).

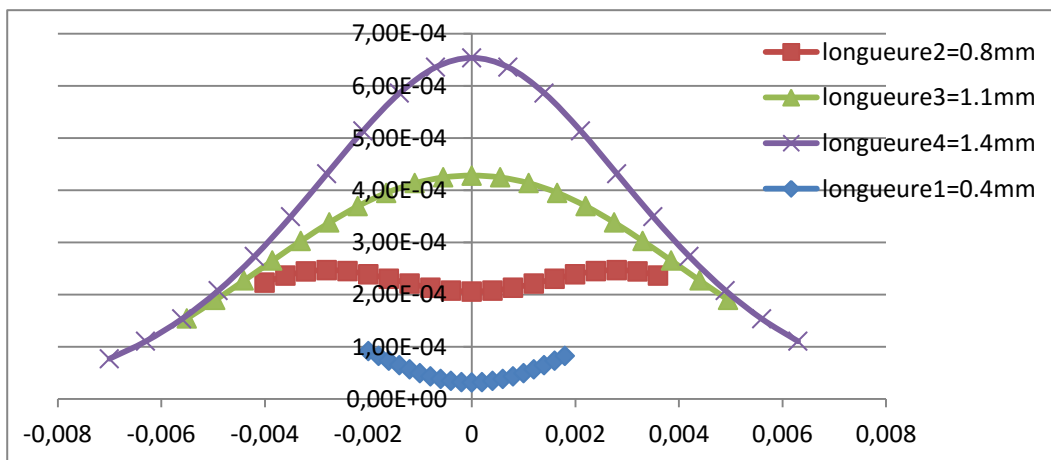


Figure IV.29. Variation de la partie réelle pour différentes longueur de la fissure

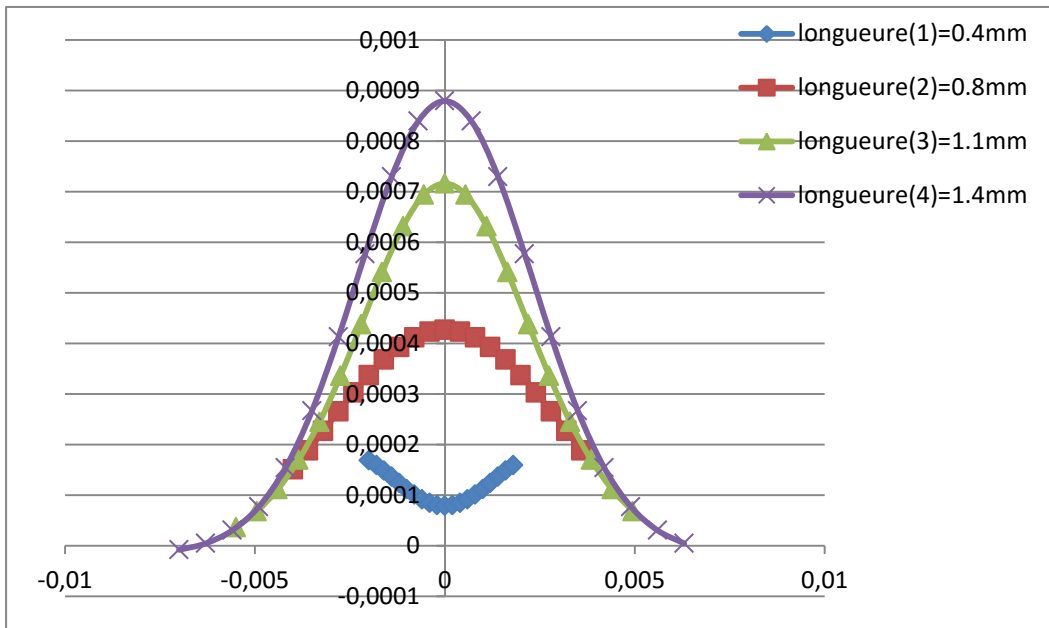


Figure IV.30. Variation de la partie imaginaire pour différentes longueur de la fissure

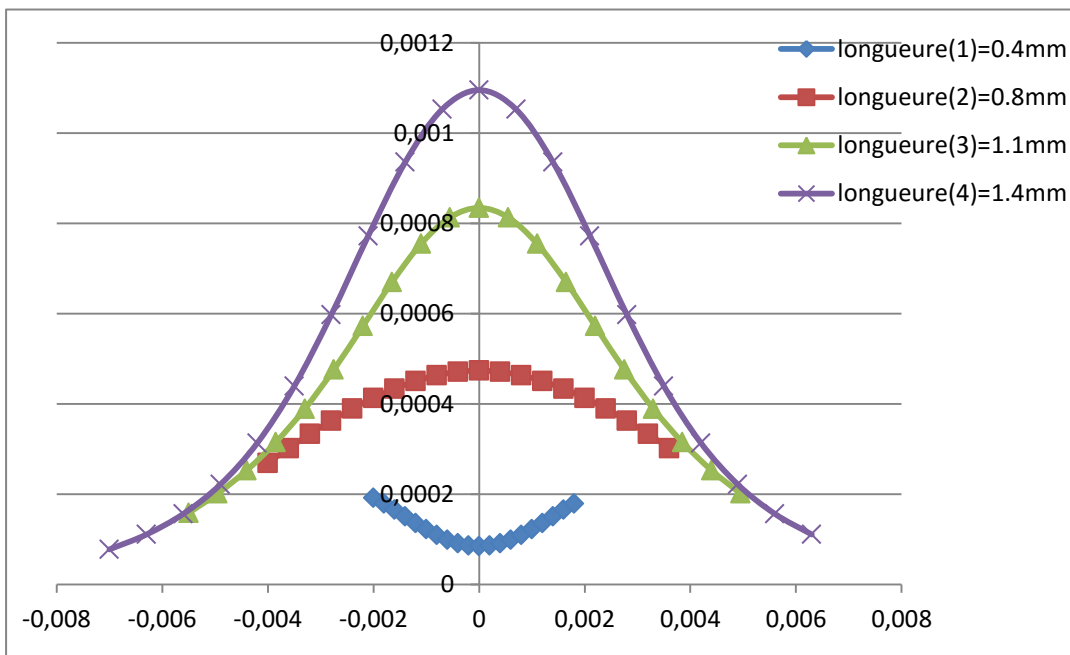


Figure IV.31. Variation de l'impédance normalisée pour différentes longueur de la fissure

IV.4.8.2. Influence de la profondeur de la fissure

Des simulations ont été effectuées en considérant trois profondeurs de fissure (0.3mm, 0.6mm, 0.9mm), les autres paramètres sont fixés étant ceux de la configuration présentée en tableau (IV.1).

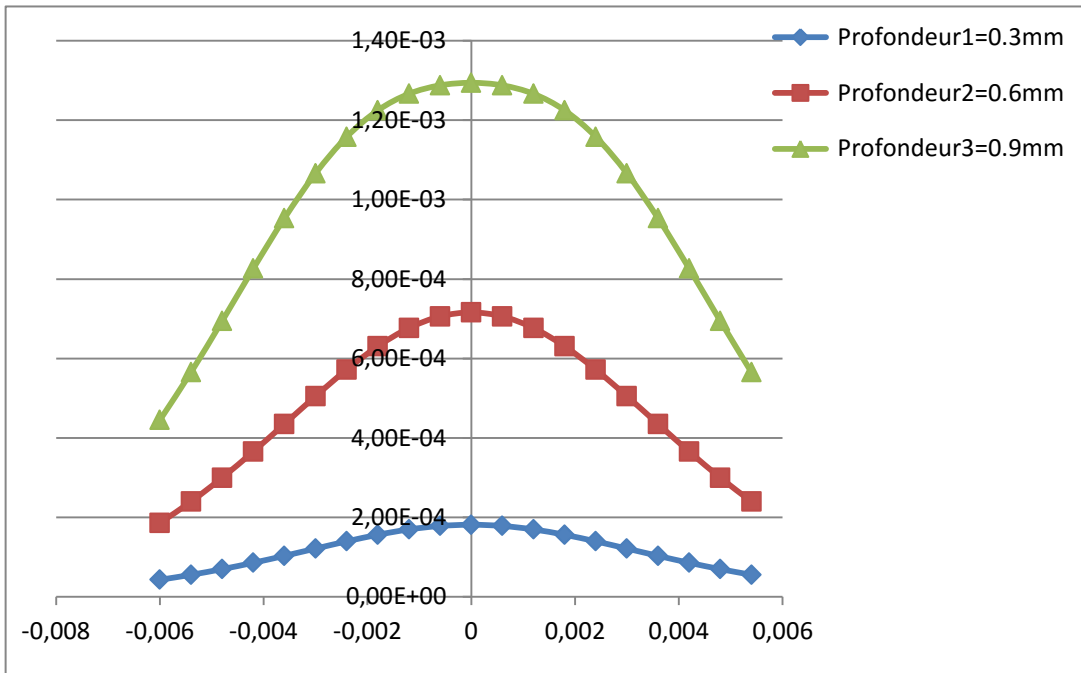


Figure IV.32. Variation de la partie réelle pour différentes profondeurs de la fissure

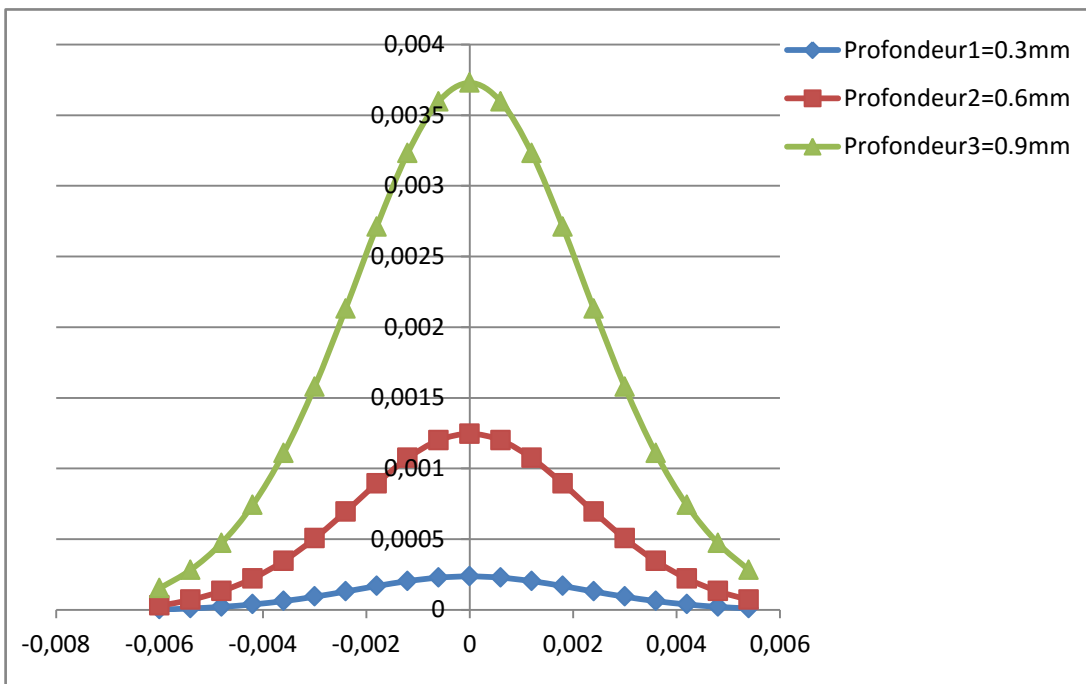


Figure IV.33. Variation de la partie imaginaire pour différentes profondeurs de la fissure

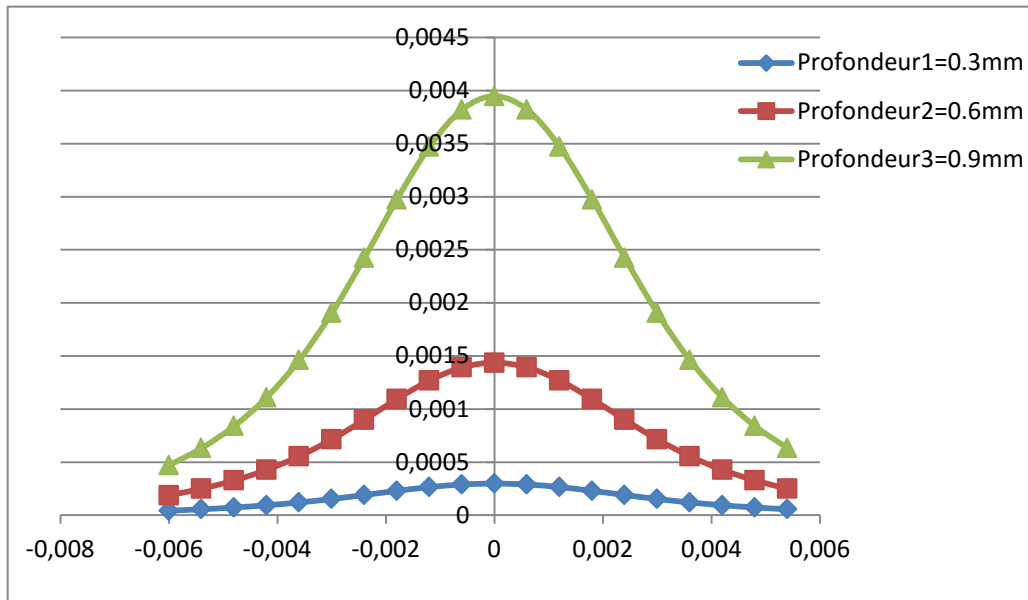


Figure IV.34. Variation de l'impédance normalisée pour différentes profondeurs de la fissure

En analysant les résultats présentés ci-dessus, on remarque que :

-Les figures (IV.32), (IV.33), (IV.34) respectivement présentent l'évolution de la partie réelle, la partie imaginaire, et l'impédance normalisée en fonction de différentes profondeurs de la fissure, L'augmentation de la valeur de profondeur du fissure provoque une augmentation des composantes de la résistance (partie réelle R_n), des composantes imaginaires (partie réactive X_n), donc une augmentation des composantes de l'impédance normalisée.

IV.5. Conclusion

Les simulations ont montré l'efficacité de la procédure CND-CF dans la détection des défauts et la caractérisation d'une structure multicouche étudiée. Les Courants de Foucault générés lors de l'excitation sinusoïdale ont révélé des différences significatives dans la présence de défauts, permettant de les distinguer des régions saines de la structure

Pour l'influence de la fréquence d'excitation sur les performances de la procédure de CND-CF, les simulations ont révélé que certaines fréquences sont plus sensibles à la détection des défauts que d'autres. La sélection de la fréquence d'excitation appropriée est essentielle pour optimiser la sensibilité et la résolution de la détection. Des fréquences plus élevées offrent une meilleure résolution pour les défauts proches de la surface, tandis que des fréquences plus basses permettent une meilleure pénétration dans la structure pour détecter les défauts plus profonds.

L'analyse des résultats a également permis de caractériser les défauts pouvant être détectés. Des simulations ont montré que la longueur, et la profondeur du défaut affectent la réponse des Courants de Foucault.

En conclusion, les résultats obtenus dans cette partie ont démontré que la simulation de la procédure

de CND-CF est une méthode efficace pour la détection des défauts dans les structures multicouches. Les Courants de Foucault générés et les caractéristiques des défauts détectables ont été étudiés en détail, offrant des informations précieuses pour la compréhension du comportement électromagnétique de la structure et l'optimisation des paramètres de détection. Ces résultats ouvrent la voie à des applications pratiques de la procédure de CND-CF dans divers domaines industriels, contribuant ainsi à l'amélioration de la sécurité et de la fiabilité des structures.

CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, nous avons abordé les fondements théoriques du CND-CF, en mettant l'accent sur le principe de fonctionnement des Courants de Foucault et leur interaction avec les structures multicouches. Nous avons également passé en revue l'état de l'art de l'utilisation des Courants de Foucault, mettant en évidence les avancements récents et les techniques avancées de détection.

La méthodologie de simulation basée sur la méthode des éléments finis (MEF) a été choisie pour modéliser la procédure de CND-CF appliquée à la structure multicouche étudiée. Nous avons développé un modèle de simulation en prenant en compte les propriétés électromagnétiques des matériaux constituant les couches, les épaisseurs des couches et les interfaces.

Les résultats de simulation ont été analysés en détail, en mettant en évidence la détection et la caractérisation des défauts simulés.

L'influence de la fréquence d'excitation a été étudiée, révélant que la sélection de la fréquence appropriée est cruciale pour optimiser les performances de la procédure de CND-CF. Nous avons analysé les tendances observées dans le graphe d'influence de la fréquence, en mettant en évidence les fréquences les plus sensibles à la détection des défauts.

En conclusion, ce mémoire a démontré l'efficacité de la simulation de la procédure de CND-CF dans la détection des défauts dans les structures multicouches. Les Courants de Foucault générés ont révélé des variations significatives en présence de défauts, permettant leur détection ainsi que leur caractérisation précise par la suite. L'influence de la fréquence d'excitation a été identifiée comme un paramètre clé, nécessitant une sélection judicieuse pour optimiser les performances de détection.

Cette étude a contribué à l'avancement des connaissances dans le domaine du CND-CF appliqué aux structures multicouches. Les résultats obtenus offrent des perspectives prometteuses pour l'application pratique de cette procédure dans divers secteurs industriels, notamment l'aéronautique.

Cependant, il convient de noter que cette étude présente quelques limites. Les résultats de simulation sont basés sur des hypothèses et des modèles simplifiés, ce qui peut affecter leur exactitude. Des travaux futurs pourraient consister à affiner les modèles de simulation et à les confronter à davantage de données expérimentales pour une validation plus approfondie.

En somme, ce mémoire a apporté des contributions significatives à la compréhension et à l'application de la procédure de CND-CF dans le contexte des structures multicouches. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des futures recherches et à des applications pratiques pour améliorer la détection des défauts et renforcer la sécurité des structures.

REFERENCES

- [1] Yohan Le Diraison, « Imagerie à courants de Foucault pour l'évaluation non-destructive de structures rivetées aéronautiques », Thèse de doctorat, école normale supérieure de cachan, 2008.
- [2] Bennoud S, « Modélisation et simulation numérique des phénomènes électromagnétiques (Notions et applications) », Edition Universitaire Européenne, UE, ISBN :978-613-8-40026-4 (2018).
- [3] AMRIOU Nabil ; HANNA Brahim " Contrôle Non Destructif pour une Structure Multicouches utilisée en aéronautique par système Multi-Capteurs à Courants de Foucault", Mémoire de Master, Spécialité Électromécanique, Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
- [4] Adib, Safer Omar, « Etude Et Modélisation De Capteur A Courants De Foucault Pour Le Contrôle Non Destructif (CND) », Mémoire master en génie électrique Université de M'sila , 2014.
- [5] A. Abdou, «Contrôle non Destructif (CND) :Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif à Courant de Foucault,», Thèse de doctorat, Université de Batna 2 , Batna, 2018.
- [6] Yahya, Choua, «Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault», Thèse de doctorat, Orsay, Université Paris Sud - Paris XI, Français.2009.
- [7] H. K. BUI, "Contribution à la modélisation multiphysique des matériaux composites stratifiés, Application au CND thermo-inductif ", Thèse de Doctorat. Université de Nantes 2014.
- [8] Bennoud S, Zergoug M, Evaluation and quantification of electromagnetic field distribution for different configurations of aeronautical materials, Review of Industrial Engineering Letters (RIEL) Vol. 3(2), 29-37, 2016.
- [9]HADJEZ Faysal, "Structures et Matériaux utilisés en Aéronautique : État de l'Art et Analyse de leur Déformation sous l'effet des Sollicitations Extérieures",Thèse de doctorat,Spécialité : Génie Mécanique, Option : Aéronautique,l'Université Frères Mentouri-Constantine 1,2018
- [10] C. Lederman, P. Ermanni, R. Kelm, Dynamic CAD objects for structural optimization in preliminary aircraft design, Aerospace Science and Technology, Vol. 10, No. 7, pp. 601- 610, 2006
- [11] S. Hakim, S. Aljibori, Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process, European Journal of Scientific Research, Vol.33 No.1 (2009), pp.57-69.
- [12] M. D. Ardema, M. C. Chambers, A. P. Patron, A. S. Hahn, H. Miura, M. D. Moore, Analytical Fuselage and Wing Weight Estimation of Transport Aircraft, NASA Technical Memorandum 110392, May 1996.
- [13] Gaouir Chemseddine ,Rezkoune Rassim,"Modèles neuronaux pour le CND à flux de fuite magnétique,Mémoire de Master, Département d'Electrotechnique, Option : Electrotechnique Industrielle, Université Mohammed SeddikBenyahia Jijel.
- [14] Rabhi Mouldi : cours, contrôle non destructif CND, 2017, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Gafsa.

- [15] BOULOUDENINE Abderraouf, "Étude de dispositifs de CND-CF (Contrôle non destructif par Courants de Foucault) appliqués à la caractérisation de matériaux composites à fibres de carbone, Thèse de doctorat, Spécialité : Électrotechnique, Option : ELECTROTECHNIQUE, Université des Frères Mentouri de Constantine.
- [16] Hamza boukabache, "étude et développement d'un nœud piézoélectrique intégré dans un microsystème reconfigurable" Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Toulouse
- [17] S. Bennoud et M. Zergoug, "Modélisation et simulation du dépistage des défauts dans les pièces conductrices multicouches par la technique des courants de Foucault", Journal of Physics : Conference Series, J.Phys : Conf. Secret. V574 : 012095, 2015.
- [18] Khebbab, Mohamed, «Étude et Modélisation de Capteur à Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) », Mémoire de Magistère en Électrotechnique, Université de Constantine , 2007
- [19] O. BIRO AND K. PREIS, "On the Use of the Magnetic Vector Potential in the Finite Element Analysis of Three-Dimensional Eddy Currents", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL 25. NO 4. JULY 1984, 3145-3159.
- [20] F. Bouillault, Z. Ren, and A. Razek, "Calculation of 3D eddy current problems by an hybrid (T-phi) method", IEEE Trans. Magn., vol. 26, no. 2, pp. 478–481, Mar. 1990.
- [21] Yahya CHOUA, Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, 2009.
- [22] A. Benhalima Et A. Saoudi, «Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques),» Mémoire de master, Université de M'sila, 2018.
- [23] H. Meziane, «Étude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive,» Mémoire de master Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2018.
- [24] Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala, Bachir .Abdelhadi, Amor. Guettafi, Azzedine Benoudjit. «Real-Time Eddy Current Measurement of Aeronautical Construction Material Coating Thickness». Instrumentation Measure Métrologie , Vol 18, No 5, pp:451457. (2019).
- [25] V. Doirat, "Contribution à la modélisation de système de contrôles non destructif par courant de Foucault. Application à la caractérisation physique et dimensionnelle de matériaux de l'aéronautique" ,Thèse de Doctorat de l'université de Nantes, Octobre 2007.
- [26] Salim BENNOUD, THESE DE DOCTORAT "ETUDE ET SIMULATION DE CONTROLE DES PIECES EN AERONAUTIQUE PAR LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES" UNIVERSITE BLIDA-1-, Institut d'Aéronautique et des études spatiales, Blida, 2017
- [27] Bachir HELIFA, "**CONTRIBUTION** A LA SIMULATION DU CND PAR COURANTS DE FOUCAULT EN VUE DE LA CARACTERISATION DES FISSURES DEBOUCHANTES", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes
- [28] A. Smith, N. Johnson et C. ; Anderson, « Progrès récents dans l'application du test par courants de Foucault », Journal of Non destructive Testing, vol. 45, non. 3, p. 123-136, 2021

- [29] S. Bennoud et M Zergoug, Modélisation et développement de simulations d'essais par courants de Foucault pour les pièces de plaques, Advanced Science Letters, Adv. Les sciences. Litt, V15, 22-24, 2012.
- [30] B.Maouche "Elaboration de modèles couplés basés sur la méthode des moments pour la modélisation de structures électromagnétiques- application à l'étude du contrôle non destructif par induction" Thèse de Doctorat université de Sétif, 2007.
- [31] Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 129916-0024
- [32] Samir BENSALD, «CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION ET A LA MODELISATION ELECTROMAGNETIQUE ET THERMIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES ANISOTROPES », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes
- [33] Mohammed Debbache, « la réalisation d'une pale éolienne en matériaux composites », Mémoire de Magister institut national des sciences appliquées de Toulouse,2011.

