

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

LA 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 Etudes Spatiales

Département Construction Aéronautique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Aéronautique

Option : Propulsion et Structure

THÈME

Simulation d'un procédé du contrôle non destructif pour
l'inspection d'une fissuration due à la fatigue sur un matériau
aéronautique.

Proposé et dirigé par:

Dr. BENNOUD Salim

Réalisé par:

Mlle. OULD AISSA Meriem,

Mlle. BEJERA Lamia Feriel ;

Soutenue devant le jure compositeur de :

Dr. BOUKERT Billel

MCB

Président

Dr. GHERROUS Mustapha

MCB

Examineur

Promo : 2022 / 2023



Dédicace

Je dédie ce travail :

*A mes chers parents, en qui je respire dans cette vie. A mon âme et mon cœur dans la vie. A celle qui a passé sa vie pour mon bonheur. A celle qui a essuyé mes larmes et a été un baume pour mes blessures. A celle dont les prières étaient secrètement pour mon succès, ma bien-aimée et la lumière de mon chemin, ma chère mère **BOUABDELLAH Karima**. Que Dieu vous protège et vous accorde une vie au-delà de votre âge, je vous souhaite une bonne santé et bien-être.*

*A celui qui m'a soutenu dans la vie, à celui dont la présence prévaut, à celui qui m'a appris le sens de la force et de la lutte, à celui dont je porte le nom avec fierté, mon cher père **Ahmed**, que Dieu vous protège de tout mal.*

*À ceux qui m'ont fourni un amour, une gentillesse et une tendresse sans bornes, mes chers grand-père **Mohamed** et grand-mère **Rosa**, je prie Dieu de vous accorder longue vie, santé et bien-être.*

*À ceux avec qui j'ai grandi et sur qui j'ai compté, à ceux avec qui je connaissais le sens de la vie, mes sœurs querelleuses **Hadjer** et **Faiza**.*

A toute ma famille et mes amis, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, je dédie cet humble travail.

OULD AISSA Meriem

Dédicace :

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quel que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessés de me conseiller, de m'encourager et de me soutenir tous au long mes études et qui n'a épargné aucuns efforts pour me rendre heureux : mon adorables mère **ABDELLI Fatna**.*

*A mon très cher Père **Laredj** Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que J'ai toujours pour toi.*

*A vous mes frères **Zohir** et **Iyad** et ma sœur **Houaria** ceux qui m'ont soutenus et me soutiennent encore. Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Mes anges gardiens et mes fidèles compagnons dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse. Du fond du cœur Merci, et que Dieu vous protège.*

*A tous les membres de ma famille, petits et grands ; particulièrement « **Amina, Nada , Malak et Mohammed** »*

BEJERA Lamia Ferial

Remerciements

Je remercie Dieu, mon Seigneur, qui nous a donnés la force et la patience d'achever ce travail et d'atteindre ce succès, qui a beaucoup d'épreuves et d'embûches derrière lui. Nous le remercions pour la situation dans laquelle nous sommes arrivés aujourd'hui. Les cinq années que nous avons passées n'ont pas été faciles du tout, mais elles sont passées avec des hauts et des bas.

*Nos remerciements vont aussi se présenter à notre encadreur **Dr. BENNOUD Salim** qui n'a jamais cessé de nous conseiller, orienter et nous encourager. Merci pour sa disponibilité et sa coopération remarquable.*

*Je tiens nous tenons à exprimer mes nos vifs remerciements à **Mr. HALIMI Rafik**, pour ses conseils concernant les orientations de notre mémoire et pour faire facilité les choses au niveau de centre de recherche et technologie industriel (CRTI) ainsi que **Mr BECHEROU Nacer** et toutes l'équipes de centre , nous remercions aussi tous les membres de l'équipes d'Air Algérie particulièrement **Mr. Drissi** et **Mr.Lhadi** au niveau d'atelier NDT.*

Nous remercions vont également à tous les enseignants d'Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales qui ont contribué à notre formation et qui n'ont pas manqué de nous prodiguer leur aide pendant nos années d'études ainsi à toutes l'équipe administrative.

Nos reconnaissances vont également aux membres de jury qui ont accepté d'examiner notre travail et de faire partie de jury.

Finalement nos remerciements vont être exprimés à tous les amis et les collègues qui nous ont encouragés et nous ont remonté le moral pour terminer ce travail de la meilleure façon.

SOMMAIRE :

DEDICACE	II
REMERCIEMENTS	IV
SOMMAIRE	V
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES SYMBOLES	XV
ABSTRAIT	XVII
INTRODUCTION GENERALE:	1
CHAPITRE1 : GENERALITE SUR LE CND	5
1 Introduction :.....	5
2 Le contrôle non destructif :	6
3 Utilisation de CND :.....	6
4 Classification des défauts :.....	6
4.1 Défauts de surface :	6
4.1.1 Défauts ponctuels :.....	7
4.1.2 Défauts d’aspect :.....	7
4.2 Défauts internes :.....	7
5 Le champ d’application de CND:.....	7
5.1 Le contrôle en cours de fabrication:	7
5.2 Contrôle de réception :	8
5.3 Le contrôle en service:.....	8
6 Différentes techniques de Contrôle non destructif :.....	8
6.1 Examen Visuel :.....	8
6.1.1 Conditions de réalisation du contrôle visuel :.....	9
6.1.2 Matériels de contrôle visuel :.....	9
Lampe stylo :.....	9
6.1.3 Avantage :	10
6.1.4 Inconvénients :	10

Sommaire

6.2 Ressuage :	11
6.2.1 Principe de Ressuage :	11
6.2.2 Domaine d'application :	13
6.2.3 Avantage :	13
6.2.4 Inconvénients :	13
6.3 Magnétoscopie :	13
6.3.1 Principe :	14
6.3.2 Domaine d'application :	15
6.3.3 Avantage :	15
6.3.4 Inconvénients :	15
6.4 Ultrasons :	15
6.4.1 Principe :	16
6.4.2 Domaine d'application :	17
6.4.3 Avantage :	17
6.4.4 Inconvénients :	17
6.5 Radiographie :	17
6.5.1 Principe :	18
6.5.2 Domaine d'application :	18
6.5.3 Avantages :	19
6.5.4 Inconvénients :	19
6.6 Courants de Foucault :	19
6.6.1 Principe :	19
6.6.2 Objectif du contrôle par CF:	20
6.6.3 Domaine d'application :	21
6.6.4 Avantage :	22
6.6.5 Inconvénients :	22
7 Classification des capteurs:	22

Sommaire

7.1 Selon la position :	23
7.1.1 Sonde internes :.....	23
7.1.2 Sonde encerclante :	24
7.1.3 Sonde ponctuelle :.....	25
7.1.4 Sonde plate :.....	25
7.2 Selon la fonction :.....	26
7.2.1 Sonde à double fonction :	26
7.2.2 Sonde à fonctions séparées :	27
7.3 Selon le mode :	28
7.3.1 Mode absolu :.....	28
7.3.2 Mode différentiel :	28
7.3.3 Mode de contrôle compensé :	29
8 Différents modes d'excitation :	30
8.1 Excitation mono fréquence :.....	30
8.2 Excitation multifréquence :	31
8.3 Excitation pulsée :	31
9 Principaux paramètres influents le contrôle :.....	31
9.1 Paramètres liés au matériau à testé :.....	31
9.2 Paramètres électriques :.....	32
9.3 Paramètres liés au montage :	32
10 Effet de peau :	32
11 Conclusion :.....	35
CHAPITRE 2: AUBE DE COMPRESSEUR	37
1 Introduction :	37
2 Principe de fonctionnement d'un turboréacteur :.....	37
3 Généralités sur les compresseurs :	38
3.1 Compresseur axial :	39
3.2 Fonctionnement d'un compresseur axial:	39
3.3 Compresseur centrifuge:.....	40

Sommaire

3.4 Fonctionnement d'un compresseur centrifuge :	41
4 Les aubes :	41
5 Géométrie d'une aube de compresseur :	42
6 Les principales contraintes et sollicitation subie par l'aube :	43
6.1 Fatigue :	43
6.1.1 Définition d'un phénomène de fatigue:	43
6.1.2 Courbe de Wöhler :	44
6.1.3 Phase de propagation d'une fissure en fatigue :	45
6.1.4 Modes de rupture :	46
6.1.5 Principaux paramètres influents sur le comportement en fatigue :	48
6.1.5.1 Facteurs métallurgiques :	48
6.1.5.2 Facteurs géométriques :	48
6.1.5.3 Facteurs de surfaces :	48
6.1.5.4 Facteur de l'environnement :	49
6.2 Fluage :	49
6.2.1 Modèle descriptif du fluage :	49
6.2.2 Courbe de fluage :	49
6.3 Érosion :	50
6.3.1 Erosion dans un moteur d'avion :	51
6.4 Corrosion :	52
7 Conclusion :	52
CHAPITRE 3: MODELISATION MATHÉMATIQUE	54
1 Introduction :	54
2 Description du problème:	54
3 Intérêt de la modélisation :	55
4 Équations de Maxwell :	55
4.1 Conditions aux limites :	57
4.2 Conditions de continuité :	57
4.3 Conditions de Jauge :	59

Sommaire

5 Hypothèses simplificatrices :	59
6 Formulations magnétodynamiques :	60
6.1 Formulations basées sur le champ électrique E :	60
6.2 Formulation en H :	61
6.3 Formulation $\mathbf{A} - \mathbf{V}$:	61
7 Détermination de la réponse de la bobine :	62
7.1 Calcul de l'énergie magnétique et des pertes de Joule :	63
7.2 Calcul direct :	63
8 Méthodes de résolution des EDP :	65
8.1 Méthodes analytiques :	65
8.2 Méthodes semi-analytiques :	65
8.3 Méthodes numériques :	65
8.3.1 La méthode des intégrales de volumes (MIV) :	Erreur ! Signet non défini.
8.3.2 Méthode des intégrales de surface (MIS) :	Erreur ! Signet non défini.
8.3.3 Méthode des intégrales de frontières (MIF) :	Erreur ! Signet non défini.
8.3.4 Méthode des différences finies (MDF) :	Erreur ! Signet non défini.
8.3.5 Méthode des volumes finis (MVF) :	Erreur ! Signet non défini.
8.3.6 Méthode des éléments finis (MEF) :	68
8.3.6.1 la méthode variationnelle :	68
8.3.6.2 Formulation résidus pondérés :	69
9 Conclusion :	70
CHAPITRE 4: APPLICATION ET SIMULATION :	72
1 Introduction :	72
2 Description du modèle :	72
3 Propriétés et caractéristique :	73
4 Applications :	74
4.1 Contrôle Non Destructifs (CND) :	74
4.1.1 Inspection sur table :	74
4.1.2 Contrôle par Ressuage :	74

Sommaire

4.1.3 Contrôle par CF :	77
4.1.3.1 Conception de la sonde :	78
4.1.3.2 Procédure utilisé:	80
4.1.3.3 Description de l'appareil de mesure :	80
4.1.3.4 Test de pièce saine :	80
4.2 Simulations :	83
4.2.1 Validation :	83
4.2.2 Organigramme de calcul :	84
4.2.3 Etude d'une configuration sans défauts :	85
4.2.3.1 Influence de l'épaisseur du substrat :	85
4.2.3.2 Influence de fréquence :	87
4.2.3.3 Influence de gap :	89
4.2.4 Etude d'une configuration avec défaut :	90
4.2.4.1 Influence de fréquence :	91
4.2.4.2 Influence de l'épaisseur de défaut :	92
4.2.4.3 Influence de la position de défaut:	94
5 Conclusion :	96
CONCLUSION GENERALE :	98
PERSPECTIVES:	99
REFERENCES :	101

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU (4.1) : LES CARACTERISTIQUES ELECTROMAGNETIQUES DE LA PIECE ETUDIEE.	73
TABLEAU (4.2) : EPAISSEUR DE POSITIONS TESTEES.	81

LISTE DES FIGURES

FIGURE (1.1) : LES MATERIELS DE CONTROLE VISUEL.	9
FIGURE (1.2) : ENDOSCOPE.....	10
FIGURE (1.3) : LA PROCEDURE DE CONTROLE PAR RESSUAGE.	12
FIGURE (1.4) : PRINCIPE DU CND PAR MAGNETOSCOPIE. [4].....	14
FIGURE (1.5) : PRINCIPE DE LA METHODE DES ULTRASONS. [3].....	16
FIGURE (1.6) : PRINCIPE DU CND PAR RADIOGRAPHIE.....	18
FIGURE (1.7) : PRINCIPE DU CND PAR COURANT DE FOUCAULT. [1]	20
FIGURE (1.8) : OBJECTIF DU CND PAR CF.	21
FIGURE (1.9) : CLASSIFICATION DES CAPTEURS A COURANT DE FOUCAULT.....	23
FIGURE (1.10) : SONDE INTERNE. [12].....	24
FIGURE (1.11) : SONDE EN CERCLANT. [12].....	24
FIGURE (1.12) : SONDE PONCTUELLE. [12]	25
FIGURE (1.13) : SONDE PLATE. [12].....	26
FIGURE (1.14) : SONDE A DOUBLE FONCTION. [15].....	27
FIGURE (1.15) : SONDE A FONCTION SEPARÉE. [15].....	27
FIGURE (1.16) : SONDE ABSOLU. [3].....	28
FIGURE (1.17) : SONDE EN MODE DIFFERENTIEL. [2]	29
FIGURE (1.18) : SONDE ABSOLUE EN MODE COMPENSE. [2]	29
FIGURE (1.19) : LES DIFFERENTS MODES D'EXCITATION.	30
FIGURE (1.20) : REPARTITION DES COURANTS DE FOUCAULT DANS UNE PIECE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR Z.....	33
FIGURE (1.21) : ÉVOLUTION DE L'ÉPAISSEUR DE PEAU EN FONCTION DE LA FREQUENCE POUR CERTAINS MATERIAUX. [13].....	34
FIGURE (2.1) : TURBOREACTEUR CF6-80C2.	38
FIGURE (2.2) : COMPRESSEUR AXIALE. [23] [24].....	39
FIGURE (2.3) : COMPRESSEUR RADIAL (CENTRIFUGE). [25].....	40
FIGURE (2.4) : LES COMPOSANTES D'UN COMPRESSEUR CENTRIFUGE. [22]	41
FIGURE (2.5) : LES AUBES DE COMPRESSEUR.....	42
FIGURE (2.6) : GEOMETRIE D'UNE AUBE.	43

Liste des Figures

FIGURE (2.7) : REPRESENTE L'AMPLITUDE DE CONTRAINTE EN FONCTION LE NOMBRE DE CYCLE A RUPTURE.[28]	44
FIGURE (2.8) : ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE DANS UN COMPRESSEUR.....	46
FIGURE (2.9) : REPRESENTE LE MODE I D'OUVERTURE.	46
FIGURE (2.10) : REPRESENTE LE MODE II LE GLISSEMENT DANS UN PLAN.	47
FIGURE (2.11) : REPRESENTE LE MODE III LE GLISSEMENT ANTI PLAN.	47
FIGURE (2.12) : COURBE DE FLUAGE TYPIQUE PRESENTANT LES TROIS STADES DU FLUAGE. [30]	50
FIGURE (2.13) : DES DOMMAGES SUR LE BORD D'UN ACIER INOXYDABLE (AM355) PREMIER BLISK ETAGE DU COMPRESSEUR DUE A L'EROSION DE PARTICULES SOLIDES. [36]	51
FIGURE (3.1) : MODELE D'AUBES DE COMPRESSEUR, GEOMETRIE DU PROBLEME (1.A), DETAILS DU MODELE (1.B).	55
FIGURE (3.2) : SURFACE Σ SEPARANT DEUX MILIEUX Ω_1 ET Ω_2	58
FIGURE (3.3) : LES ETAPES DE LA MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS.	70
FIGURE(4.1) : AUBE DE DEUXIEME ETAGE DE COMPRESSEUR.	73
FIGURE(4.2) : IMMERSION DES AUBES DANS UN PENETRANT FLUORESCENT.	75
FIGURE(4.3) : RINÇAGE DE L'EXCES DE PENETRANT RC77.	75
FIGURE (4.4) : IMMERSION DES AUBES DANS L'EMULSIFIANT ER83C.	76
FIGURE (4.5) : RINÇAGE DE L'EXCES DE L'EMULSIFIANT ER83C.	76
FIGURE (4.6) : SECHAGE DANS UN FOUR.....	76
FIGURE (4.7) : APPLICATION DE REVELATEUR.....	77
FIGURE (4.8) : INSPECTION SOUS LUMIERE UV.....	77
FIGURE (4.9) : MATERIELS UTILISES A LA CONCEPTION DE SONDE.	78
FIGURE (4.10) : LES ETAPES DE FABRICATION DE SONDE.....	79
FIGURE (4.11) : L'APPAREIL HPAGILENT LCR METRE.	80
FIGURE (4.12) : LES DIFFERENTES POSITIONS A CONTROLE.	81
FIGURE (4.13) : APPLICATION DE CF SUR L'AUBE.	81
FIGURE (4.14) : DIAGRAMME D'IMPEDANCE POUR DEFERENTS EPAISSEURS.	82
FIGURE (4.15) : CONFIGURATION BOBINE-PIECE AVEC DEFAUT.....	85
FIGURE (4.16) : VARIATION DE L'IMPEDANCE POUR DIFFERENTS D'EPAISSEUR DE SUBSTRAT..	86
FIGURE (4.17) : LA GAMME DE FREQUENCE INFERIEUR A 50KHZ.	86
FIGURE(4.18) : L'EVOLUTION D'IMPEDANCE EN POSITION « 0 » POUR	87

Liste des Figures

FIGURE (4.19) : VARIATION DE L'IMPEDANCE POUR DIFFERENTES FREQUENCES D'EXCITATION.	88
FIGURE (4.20) : L'EVOLUTION D'IMPEDANCE EN POSITION « 0 » POUR DIFFERENTES FREQUENCES.	88
FIGURE (4.21) : L'EVOLUTION DE L'IMPEDANCE POUR DEFERENTS VALEURS DE GAP.....	89
FIGURE (4.22) : L'EVOLUTION D'IMPEDANCE EN POSITION « 0 » POUR DIFFERENTES VALEURS DE GAP.	90
FIGURE (4.23) : CONFIGURATION BOBINE-PIECE AVEC DEFAULT.....	91
FIGURE (4.24) : VARIATION D'IMPEDANCE POUR DEFERENTS FREQUENCES EN PRESENCE DE DEFAULT.	92
FIGURE (4.25) : L'EVOLUTION D'IMPEDANCE POUR DEFERENTS EPAISSEUR DE DEFAULT.....	93
FIGURE (4.26) : LA VARIATION D'IMPEDANCE AVEC UN DEFAULT LOCALISE SUR LE SUBSTRAT.	94
FIGURE (4.27) : LA VARIATION D'IMPEDANCE AVEC UN DEFAULT LOCALISE SUR LE REVETEMENT.	95

LISTE DES SYMBOLES

\vec{A}	Potentiel Vecteur magnétique.
A	L'inconnue du problème.
\vec{B}	Induction magnétique.
C	Vitesse de la lumière.
\vec{D}	Induction électrique.
\vec{E}	Champ électrique.
f_v	Fonction définie sur le domaine d'étude Ω .
\vec{H}	Champ magnétique.
\vec{J}	Densité de courant.
J	Courant de conduction.
\vec{J}_s	Densité surfacique de courant.
L	L'inductance de la bobine.
L_p	Opérateur différentiel.
l	Fonction de Lagrange.
n	Nombre de nœud dans le domaine d'étude.
\vec{n}	Vecteur unitaire.
P_j	Pertes de Joule.
R	Résistance de la bobine.
r	Rayon de la bobine.
s	Conductivité électrique.
t	Temps.
V	Tension instantanée.
$W :$	Energie magnétique moyenne.
w_c	Energie de type cinétique.
w_p	Energie de type potentielle.
X	Réactance de la bobine.
Z	Impédance Z .
$z:$	Profondeur considérée à l'intérieur de la pièce.
Γ	Frontière du milieu.
ζ	Résidu de l'approximation.
δ	Profondeur de pénétration conventionnelle.
ϵ	Permittivité électrique.
ϵ_0	Permittivité de vide.
ϵ_r	Permittivité relative du milieu considéré.
μ	Perméabilité magnétique.
μ_0	Perméabilité magnétique du vide.
μ_r	Perméabilité relative du milieu considère.
ρ	Conductivité électrique.
$\vec{\rho}_s$	Densité surfacique de charge.
ϕ_i	Fonction de pondération ou de projection.
ω	Fréquence angulaire du courant d'excitation.

Liste des Symboles

Ω	Domaine d'étude.
σ	Conductivité électrique.
Σ	Interface.

ABSTRAIT

The design of tomorrow's aeronautical and space structures must meet ever-increasing operational safety requirements and take into account the growing complexity of working environments. The main concern of aircraft manufacturers is the reliability of the aircraft.

Fatigue and corrosion are the two main causes of aircraft failures in service. Several non-Destructive Testing methods are usually applied to inspect aircraft components when they are in operation service. These methods are Ultrasonic, Eddy Current, Liquid Penetrant, Magnetic Radiation.

The main objective of the work is to determine an NDT-CF problem for a thin multilayer structure (compressor blade) with different material properties. The analysis of the study is carried out by experimental processes and simulations.

The results obtained make it possible to determine the effect of different parameters in order to optimise and characterise the elements of the configuration such as the probe and the defects.

RESUME :

La conception de structures aéronautiques et spatiales de demain doit répondre à des exigences de sûreté de fonctionnement de plus en plus grandes, prendre en compte la complexité croissante des environnements d'utilisation. La préoccupation majeure des constructeurs aéronautiques est la fiabilité des appareils.

La fatigue et la corrosion sont les deux principales causes des défaillances d'avions en service. Plusieurs méthodes de Contrôle Non Destructives sont habituellement appliquées pour inspecter les composantes d'avions lorsqu'elles sont en opération. Ces méthodes sont l'Ultrason, les Courants de Foucault, le Liquide Pénétrant, le Rayonnement et la Magnétoscopie.

L'objectif principal du travail est de déterminer un problème CND-CF pour une structure Multicouche de faible épaisseur (aube d'un compresseur) avec différentes propriétés des matériaux. L'analyse de l'étude est effectuée par des processus expérimentaux et des simulations. Les résultats obtenus permettent de déterminer l'effet de différents paramètres afin d'optimiser et de caractériser les éléments de la configuration tels que la sonde et les défauts.

ملخص

يجب أن يلبي تصميم هياكل الطيران والفضاء في المستقبل متطلبات السلامة التشغيلية المتزايدة باستمرار وأن يأخذ في الاعتبار التعقيد المتزايد لبيئات الاستخدام. مصدر القلق الرئيسي لمصنعي الطائرات هو موثوقية اجزاء و عناصر الطائرة.

الإرهاق والتآكل هما السببان الرئيسيان لتعطل الطائرات في الخدمة. عادة ما يتم تطبيق العديد من طرق الاختبار غير المدمرة لفحص مكونات الطائرات عندما تكون قيد التشغيل. هذه الطرق هي الموجات فوق الصوتية ، تيار فووكو، اختراق السائل ، التدفق المغناطيسي.

الهدف الرئيسي من العمل هو تحديد مشكلة الاختبار غير المدمر- تيار فووكو هيكل متعدد الطبقات من السماكة الصغيرة (شفرة الضاغط) مع خصائص مختلفة من المواد يتم إجراء تحليل الدراسة عن طريق العمليات التجريبية وعمليات المحاكاة
تسمح النتائج التي تم الحصول عليها بتحديد تأثير المعلمات المختلفة من أجل تحسين وتوصيف عناصر التكوين مثل المسبار والعيوب

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE:

Les turbomachines sont des appareils qui ont un rôle essentiel dans les domaines industriels. Ce sont des machines tournantes qui impliquent l'utilisation d'un fluide pour générer de l'énergie, dans plusieurs applications.

Les compresseurs constituent une gamme importante des turbomachines. Ils sont des dispositifs qui convertissent l'énergie mécanique fournie par la machine motrice en énergie de pression (donc, ils ont pour rôle principale d'augmenter la pression).

Les compresseurs sont soumis à des conditions de fonctionnement très sévères. Les aubes des compresseurs des turboréacteurs sont des pièces exposées, en plus de l'environnement agressif, à des sollicitations par différents chargements tels que : (température élevée, pression importante, vitesse de rotation élevée, vibrations) .Ces chargements génèrent des contraintes thermomécaniques, répétées et élevées et conduisent à la rupture de l'aube. de plus, ils sont également soumis au processus d'érosion qui est un phénomène surfacique associé à un enlèvement de matière provoqué par des impacts répétés de particules solides sur le matériau.

Les aubes de compresseur doivent avoir des caractéristiques leur permettant de combiner une résistance élevée au fluage et à la fatigue, ainsi qu'une bonne résistance aux effets d'un environnement oxydant et corrosif.

Le Contrôle Non Destructif (CND), qui vise à contrôler sans endommager les pièces concernées, est une étape importante dans la maintenance et le contrôle des équipements et des installations industriels afin d'éviter les dommages pouvant survenir après une panne.

Les méthodes de Contrôle Non Destructif permettent d'évaluer les grandeurs caractéristiques des pièces (épaisseur, conductivité...), de détecter la présence de défauts et de les caractériser. Parmi les méthodes les plus largement utilisées sont : les Tests de Pénétration, la Radiographie, les Ultrasons, les Tests de Particules Magnétiques et les Courants de Foucault. Le choix de la méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à examiner, la nature des informations requises (défaut débouchant ou enfoui, etc.) et conditions d'exécution, etc.

La méthode de contrôle par Courants de Foucault est largement utilisée pour la détection de défauts en surface ou à faible profondeur dans des matériaux conducteurs comme l'Aluminium, l'Acier inoxydable, le Cuivre, le Titane, le Nickel

La méthode de contrôle d'un Courant de Foucault consiste à créer des courants induits à travers un champ magnétique alternatif et variable dans le temps dans des matériaux électriquement conducteurs. Ces courants induits sont les Courants de Foucault, circulent localement dans le matériau et ont une distribution dépend du champ magnétique d'excitation et de la géométrie, de conductivité électrique et de la perméabilité magnétique de la pièce à contrôlée.

La résolution des problèmes de CND par CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement et doit faire appel à des méthodes numériques. Parmi ces méthodes, la méthode des éléments finis (MEF) qui permet de prendre en compte des géométries complexes de sondes et de pièces, est l'une des plus utilisée. Elle s'est

Introduction Générale

imposée comme un outil efficace pour résoudre numériquement les problèmes électromagnétiques,

L'objectif principal de cette étude est de cerner les différentes contraintes et sollicitations influent sur les aubes de compresseur qui produisent des endommagements impactant le fonctionnement de moteur et d'étudier les techniques de CND qui permettent de les détecter et les évaluer. Parmi les différentes méthodes de (CND) nous sommes intéressés par le contrôle de CND par les Courants de Foucault (CF) qui est plus utilisable dans le domaine aéronautique. On fait une étude numérique pour l'optimisation et la conception des sondes convenables à différents géométries et types des matériaux est aussi focalisée dans ce travail en se basant des simulations et des résultats expérimentaux effectuées sur une aube d'un compresseur.

Cette étude est menée en quatre chapitres organisés comme suite:

Le premier chapitre : présent des généralités sur les différentes techniques de Contrôle Non Destructif (CND), et les divers types de défauts puis on détaille dans la méthode de contrôle par Courant de Foucault.

Le deuxième chapitre : traite et présente les compresseurs et les différentes contraintes et sollicitations appliquées aux aubes des compresseurs axiaux.

Le troisième chapitre : est destiné à la modélisation mathématique du phénomène électromagnétique à partir des équations de Maxwell ainsi que les principales méthodes de résolution de systèmes des équations aux dérivées partielles et les méthodes de calculs d'impédance.

Le quatrième chapitre : est réservé à la mise en place des simulations et des procédures expérimentales entamées.

Ce contenu est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LE CND

1 Introduction :

Le Contrôle Non Destructif (CND) regroupe un ensemble des techniques d'évaluation qui permettent de contrôler et caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader.

L'histoire du CND commence à la fin du XIX siècle, avec la physique moderne, mais c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie. Vers les années 1960-1970, le développement des centrales nucléaires et de l'aéronautique a engendré une forte accélération du progrès du CND. [1]

Le CND intervient en laboratoires, en ateliers, sur chantiers et sur sites de production, en phase de conception, de fabrication et de surveillance de l'installation.

CND a pour objectif de contrôler l'état des pièces industrielles et de vérifier le fonctionnement correct des parties critiques d'un système sans en altérer les propriétés physiques, soit au cours de la production, soit au cours d'utilisation, soit dans la phase de maintenance. [2]. Les CND peuvent également être effectués pour mesurer d'autres caractéristiques de la pièce, telles que la taille, les dimensions, la configuration ou la structure, y compris la dureté, la taille des grains, etc.

En effet, détecter un défaut sur une pièce revient à mettre physiquement en évidence l'hétérogénéité d'un matériau, qui est une variation locale de propriétés physiques ou chimiques. Donc les défauts ont été classés en deux catégories liées à leur localisation : les défauts de surface, et les défauts internes.

Les principales techniques du CND sont le ressuage, la magnétoscopie, les ultrasons, la radiographie, et les courants de Foucault. le choix d'une entre elle peut être conditionnée par un certain nombre de paramètres dont les principaux sont:

- La nature du matériau a contrôlé (propriétés physique).
- L'information recherchée (détection, mesure, dimensionnement du défaut, ...).
- L'environnement du contrôle (nature des perturbations externes,...).
- Le type de contrôle a effectué (pièce mobile, possibilité de contact ou non,...).[1]

Chapitre 1 : Généralité sur le CND

2 Le contrôle non destructif :

Le contrôle non destructif (CND) consiste à évaluer l'état d'un système, d'une structure ou d'un matériau sans l'endommager en vue d'établir un diagnostic.

Les tests de contrôle non-destructif (CND) permettent, par difficulté croissante, de détecter, localiser, identifier et dimensionner les défauts en surface ou à l'intérieur des assemblages sans en modifier les propriétés d'usage.

3 Utilisation de CND :

- ✓ L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs).
- ✓ L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs).
- ✓ L'industrie navale (contrôle des coques).
- ✓ L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, pièces moteurs, trains d'atterrissage,... etc.).
- ✓ L'aérospatiale et l'armée.
- ✓ L'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.). [3]

4 Classification des défauts :

Les défauts, pouvant intervenir dans les pièces, sont répertoriés par des normes officielles, ils sont divisés en deux grandes catégories : les défauts de surface et les défauts internes.

4.1 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.

4.1.1 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 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, les ultrasons.

4.1.2 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.

4.2 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. [4]

5 Le champ d'application de CND:[5]

5.1 Le contrôle en cours de fabrication:

Le contrôle en cours de fabrication procède de la philosophie de l'instrumentation industrielle en tant qu'outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant alors un appareillage installé à demeure en ligne de fabrication présentant une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et une bonne fiabilité. Les défauts recherchés sont ici généralement bien identifiés, le fonctionnement est automatique aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux.

5.2 Contrôle de réception :

Le contrôle de réception d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison procède d'une philosophie de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant. Si l'aspect coût et productivité peut avoir encore une certaine importance à ce stade de contrôle, c'est surtout l'aspect procédure de la démarche qui devient primordial, qu'il s'agisse du choix du procédé, du choix des paramètres de réglage, de l'étalonnage, de la présentation et de l'archivage des résultats obtenus. À ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi souvent d'en définir la nature et les dimensions.

5.3 Le contrôle en service:

Le contrôle en service s'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement. On en attend une très grande fiabilité car les risques de non-détection d'un défaut ont graves. Pour ce type de contrôle, il convient de pouvoir estimer le mieux possible la nature et les dimensions des défauts pour pouvoir en apprécier la nocivité; il faut disposer aussi d'une grande reproductibilité de l'examen non destructif, de façon à pouvoir suivre l'évolution du dommage au cours du temps.

6 Différentes techniques de Contrôle non destructif :

La diversité des pièces à inspecter, de leurs géométries, de leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de technique existe et chacune présente certains avantages et inconvénients.

Parmi les techniques de contrôle non-destructif existant, nous proposons d'étudier, les techniques de Ressuage, Examen Visual, Ressuage, la Magnétoscopie, la Radiographie, l'Ultrason et les Courants de Foucault. [2]

6.1 Examen Visuel :

L'Examen Visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructif et qui donne un aperçu de l'état extérieur d'une pièce.

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 rédhibitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, ...etc. Toutefois l'examen

Chapitre1 : Généralité sur le CND

purement visuel présente des limitations de différentes natures que nous allons examiner et qui justifient l'écllosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique. [3]

6.1.1 Conditions de réalisation du contrôle visuel :

Le contrôle visuel et dimensionnel doit être réalisé sous une luminosité de 350 lux minimum (recommandé : 500 lux sur la surface de la pièce). L'œil de l'observateur doit être placé à une distance inférieure à 500 mm de la surface à examiner sous un angle supérieur à 30°. L'acuité visuelle du personnel de contrôle doit être vérifiée tous les ans (visite médicale). [6]

6.1.2 Matériels de contrôle visuel :

Lampe stylo :

La lampe stylo permet d'éclairer l'intérieur des tubes et d'assurer la vision du cordon de Pénétration. [6]

Miroir d'inspection :

Le miroir d'inspection est l'outil indispensable du contrôleur et du soudeur de tuyauterie. Il permet de contrôler visuellement les intérieurs de tubes de $\varnothing > 25$ mm. [6]

Loupe éclairante :

La loupe éclairante permet de grossir les détails et de distinguer des défauts de surface très fins sur les cordons de soudure comme des piqûres ou des fissures. [6]



a) Loupe éclairante.

b) Miroir d'inspection.

c) Lampe stylo.

Figure (1.1) : Les matériels de contrôle Visuel.

Endoscope :

Est un appareil conçu pour pouvoir observer les surfaces non directement accessibles à l'œil telles que les parois d'un tube ou d'une cavité, d'un alésage ou d'un Trou borgne.

L'endoscope se présente sous forme d'un tube ou d'un flexible comportant à une extrémité, une optique de prise de vues et souvent d'éclairage et, à l'autre extrémité, un oculaire d'observation ; les appareillages utilisés en contrôle non destructif ont un diamètre de l'ordre du centimètre et une longueur souvent inférieure au mètre.

[1] [4]



Figure (1.2) : Endoscope.

6.1.3 Avantage :

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

6.1.4 Inconvénients :

- Pas de dimensionnement des défauts.
- La surface doit être propre.
- Résolution et sensibilité limitées.
- Complémentaire à une autre technique.

6.2 Ressuage :

C'est une méthode de Contrôle Non Destructif qui permet de détecter des défauts débouchant en surface de pièce pour des matériaux non absorbants (alliages métalliques, matières plastiques, caoutchouc moulés, verres, certaines céramiques...).

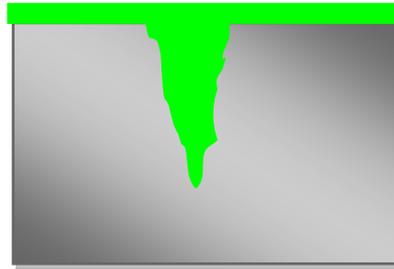
Le Ressuage est une extension de l'inspection visuelle qui peut s'appliquer sur tout matériau à l'exception de certaines fontes qui présentent une surface poreuse.

C'est un terme qui désigne la sortie d'un fluide (liquide ou gazeux) d'une discontinuité dans laquelle ce fluide s'était précédemment accumulé au cours d'une opération d'imprégnation. [4]

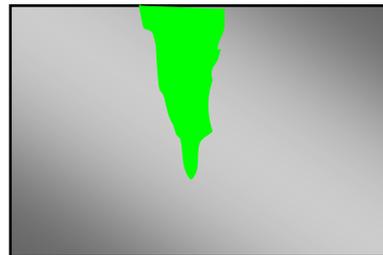
6.2.1 Principe de Ressuage :

Le contrôle par Ressuage comporte trois étapes. La phase initiale consiste à nettoyer la surface de la pièce et d'appliquer un liquide pénétrant, soit par immersion, soit par pulvérisation. La durée d'application est variable selon le type de pénétrant, mais se situe en général entre 15 et 30 minutes. Le choix du liquide dépend essentiellement de la rugosité de la surface à contrôler. Le pénétrant peut être un produit coloré (faible sensibilité), un produit pré-émulsionné (sensibilité moyenne) ou un produit fluorescent (sensibilité élevée). Le pénétrant appliqué s'infiltré dans les petits interstices débouchant en surface, un certain temps est nécessaire pour laisser « poser » le pénétrant. La deuxième étape consiste à rincer la surface de la pièce pour enlever l'excès de pénétrant. Cette opération est délicate parce qu'un rinçage excessif ou insuffisant permet de fausser le résultat final. Dans la troisième étape on applique un révélateur, liquide ou sous forme de poudre, sur la surface rincée, puis séchée. Le liquide (pénétrant) qui s'est introduit dans les fissures « ressort » à la surface dans le révélateur et s'élargit au niveau du défaut. Il devient nettement visible par un éclairage approprié qui dépend du pénétrant utilisé. La méthode ne donne aucune indication sur le volume et donc de l'importance des défauts. [3]

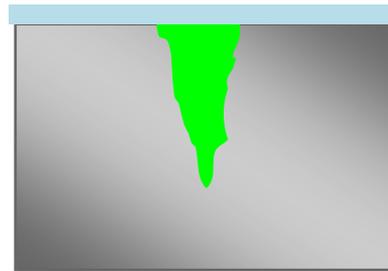
a) Application et pénétration du Liquide du Pénétrant sur la surface à contrôler.



b) Nettoyage de l'excès de Pénétrant



c) Application de révélateur



d) Le révélateur extrait le Pénétrant retenu
Par les fissures

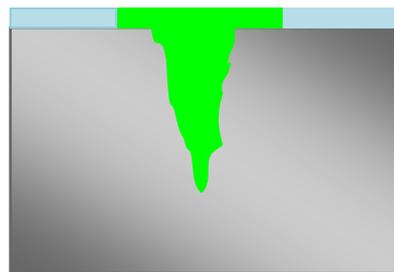


Figure (1. 3) : La procédure de contrôle par Ressuage.

6.2.2 Domaine d'application :

Le domaine d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement avec le pénétrant. [7]

On peut ainsi localiser les défauts de : moulage, de fatigue, d'usinage, de traitement thermique et de soudage. Le Ressuage donne des résultats intéressants avec des métaux tel que l'Aluminium, le Magnésium, le Cuivre, le Titane, l'Acier inoxydable et la plupart des alliages non métalliques comme les Céramiques, les plastiques, le caoutchouc moulé.[4]

6.2.3 Avantage :

- Procédé de contrôle économique et relativement rapide.
- Procédé insensible à l'orientation des défauts par rapport à la surface.
- Utilisable sur des matériaux amagnétiques à l'inverse de la magnétoscopie.
- Facilité de mise en œuvre et relativement sensible aux fissures débouchant.

6.2.4 Inconvénients :

- Nécessite un décapage et un dégraissage soigné avant l'inspection.
- Limite de l'application sur les matériaux non poreux.
- Impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.
- Produit inflammable, volatils, nocifs

6.3 Magnétoscopie :

La Magnétoscopie est une technique de CND qui permet de détecter les défauts de surface (défauts débouchant) ainsi que ceux proche de la surface (défauts sous-jacents) dans les matériaux ferromagnétiques (les Aciers ordinaires, le Fer, le Nickel, le Cobalt...)[2] Ils ne permettent pas de déterminer avec précision l'importance dimensionnelle du défaut, mais d'en définir la position et souvent la nature. [4]

6.3.1 Principe :

Le principe consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique d'une intensité suffisante de manière à travailler dans une zone située au-dessus de la valeur maximale de la perméabilité magnétique du matériau.

Le champ magnétique nécessaire à la visualisation des criques est produit dans la pièce contrôlée soit par aimantation directe par passage d'un champ magnétique longitudinal où la pièce est mise dans le champ au contact de pièces polaires, soit par aimantation indirecte (passage de courant) produisant un champ magnétique dans lequel se trouve placée la pièce.

Lorsqu'un défaut se situe dans la pièce, il crée un champ de fuite très intense du fait de la saturation du matériau.

Il est possible de visualiser le champ magnétique en pulvérisant sur la pièce un liquide à faible viscosité contenant en suspension des particules magnétiques suffisamment fines ($< 30\mu$). Ces particules sont attirées au-dessus du défaut, de manière à s'opposer à la résistance magnétique de l'air par formation d'un (pont magnétique). Ces accumulations de poudre sont détectables à l'œil.

Les défauts ne sont détectables que s'ils se trouvent placés perpendiculairement aux lignes de champs, d'où la nécessité de pratiquer au moins deux directions d'aimantation, si possible perpendiculaires. Le liquide révélateur contient des particules d'oxyde de fer noir (5 à 10 g/l de pétrole). Il existe des particules colorées aidant à la lecture du défaut par rapport à la teinte des pièces. On utilise également des produits fluorescents avec inspection en lumière ultraviolette. [4]

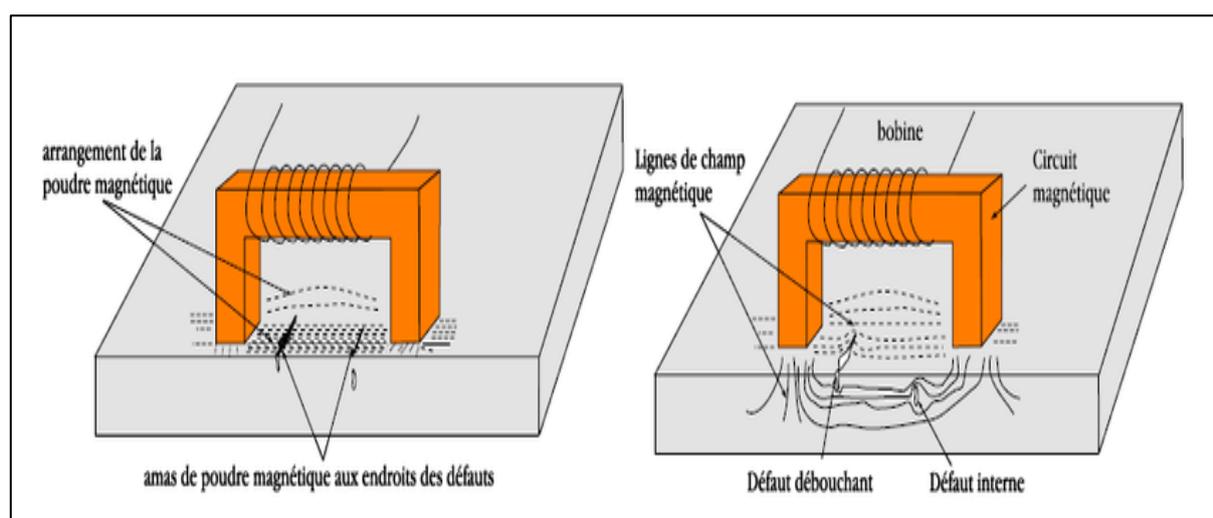


Figure (1.4) Principe du CND par Magnétoscopie. [4]

6.3.2 Domaine d'application :

Elle ne s'applique qu'aux matériaux et alliages ferromagnétiques (Fer, Acier, Fonte, ...).

La magnétoscopie est utilisée pour le contrôle :

- ❖ Des pièces moulées : criques situés entre le raccordement, réseaux de fissures superficielles.
- ❖ Des pièces forgées : criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement.
- ❖ Les fissures de fatigue peuvent si les conditions sont favorables être détectées.
- ❖ Les fissures de corrosion sous tension sont généralement bien décelées ainsi que les fissures d'origine thermique des soudures. [7]

6.3.3 Avantage :

- Localisation des défauts de surface ou légèrement sous-jacents et appréciation de leur longueur.
- La méthode est relativement simple de mise en œuvre.

6.3.4 Inconvénients :

- Utilisables que sur les matériaux ferromagnétiques.
- Problèmes liés à l'hygiène et la sécurité (Utilisation de Lumière Ultraviolette, produits chimiques).
- La sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction.

6.4 Ultrasons :

Le contrôle par Ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. [7]

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16 Hz à 16 KHz). Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde. [4]

6.4.1 Principe :

Le CND par Ultrasons est largement utilisé pour la détection des défauts dissimulés ou pour mesurer l'épaisseur d'une pièce.

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

Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour faire un aller-retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut.

Cette méthode nécessite d'effectuer un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts.

D'un point de vue pratique, on utilise un écran d'oscilloscope. Les échos sont représentés par des pics sur l'écran. [3][7] [8]

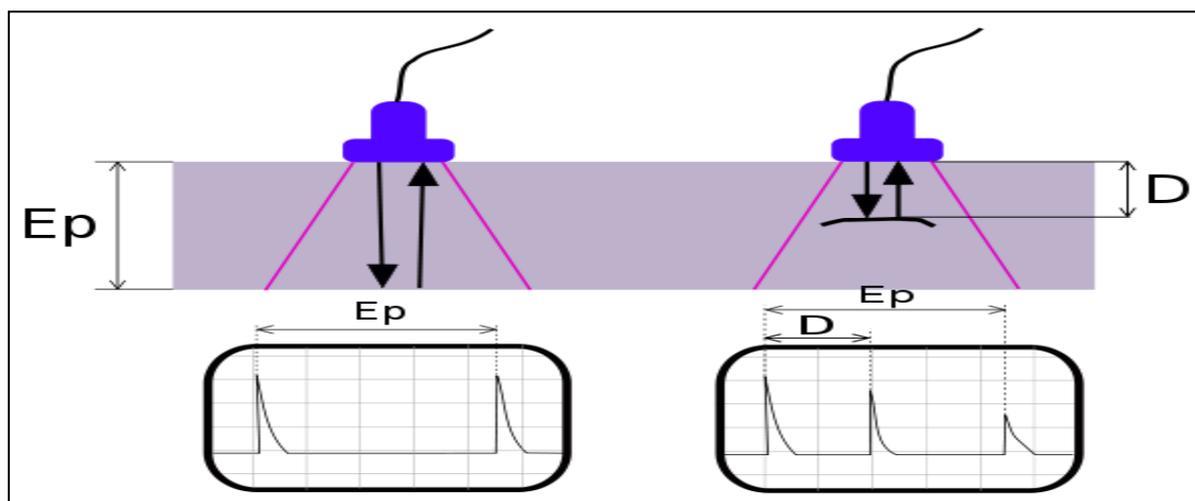


Figure (1.5) : Principe de la méthode des Ultrasons. [3]

6.4.2 Domaine d'application :

L'application du contrôle Ultrasonore concerne principalement, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques. Ce champ s'élargit de plus en plus au contrôle des matériaux et assemblages non métalliques, céramiques, polymères, matériaux composites, cela s'effectue lentement, eu égard aux difficultés pratiques rencontrées et dues à la nature même de ces produits à structure peu homogène et anisotrope.

Les Ultrasons sont très employées pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans L'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les profondeurs de traitements thermo-chimiques superficiels sur les aciers,...etc. [9]

6.4.3 Avantage :

- Haute sensibilité de détection des défauts.
- Détection, localisation et dimensionnement des défauts.
- Contrôle sur métaux, plastiques, matériaux divers.
- Absence totale d'inconvénients liés à l'hygiène.

6.4.4 Inconvénients :

- Le produit de couplage est nécessaire pour le bon fonctionnement de l'opération.
- L'opérateur doit suivre une formation pour interpréter l'affichage de manière précise.
- Le matériel doit être étalonné de façon régulière pour chaque épaisseur et chaque type de matériau.
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.

6.5 Radiographie :

La Radiographie est une méthode de contrôle non destructif qui permet d'obtenir une image de la densité de matière d'un objet traversé par un rayonnement électromagnétique X ou gamma. L'image est acquise généralement à l'aide d'un film sensible.

6.5.1 Principe :

La technique consiste à placer la pièce à contrôler entre la source de rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde et un film sensible. Le rayonnement se propageant dans la pièce à contrôler est plus ou moins absorbé en fonction de la densité de matière qu'il rencontre. Le rayonnement résiduel qui a réussi à traverser la matière vient irradier le film qui, une fois développé, peut être interprété pour mettre en évidence certains défauts de compacité de la pièce.

La mise en œuvre dépend de nombreux facteurs (qualité du film, activité de la source radioactive, la nature et épaisseur du matériau radiographié) et nécessite des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement.

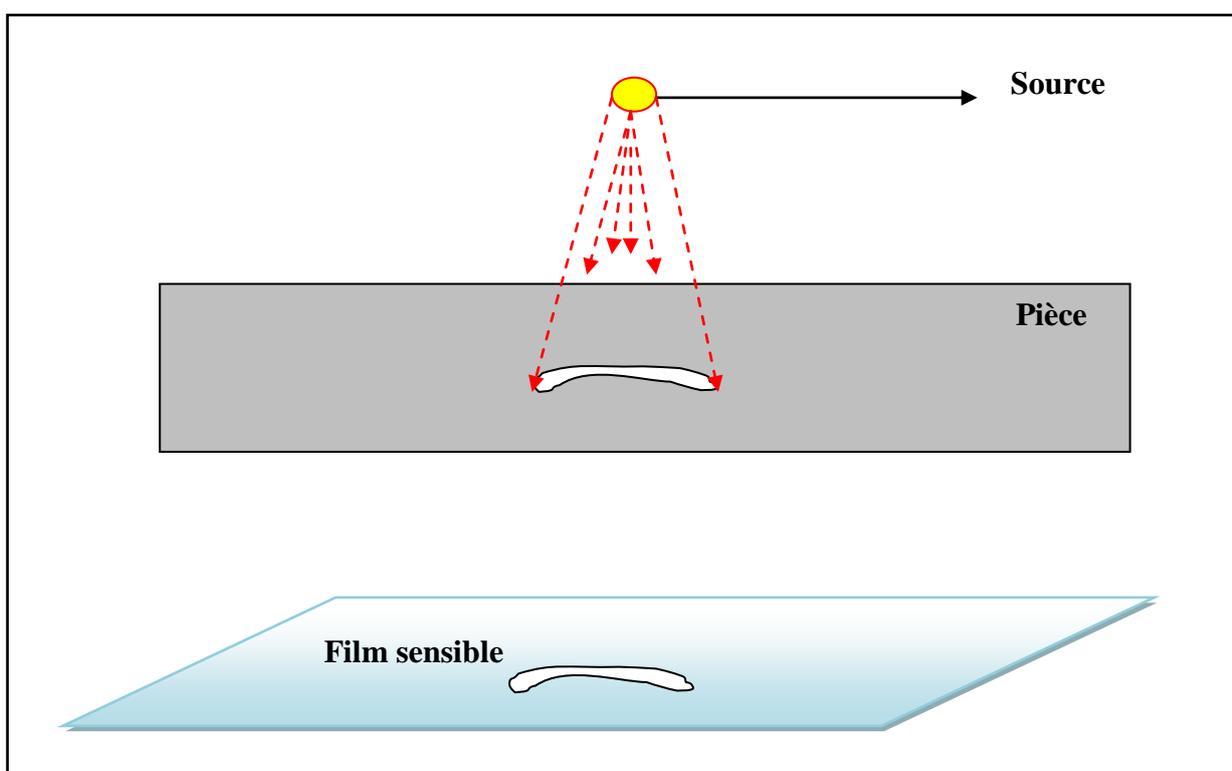


Figure (1.6) : Principe du CND par Radiographie.

6.5.2 Domaine d'application :

Le champ d'application de la Radiographie industrielle est très vaste ; c'est en effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à

Chapitre1 : Généralité sur le CND

l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui des contrôles de maintenance.

La quasi-totalité des matériaux peut être examinée en Radiographie et les épaisseurs contrôlées peuvent être importantes. [2]

La Radiographie est utilisée pour inspecter les soudures ainsi que pour rechercher les défauts de fonderie, les fissures et le manque de pénétration pour vérifier l'intégrité des structures composites.

6.5.3 Avantages :

- Traçabilité et archivage des résultats par l'intermédiaire d'un film.
- Contrôle des objets de forme compliquée.
- Elle est applicable à tous les types de matériaux (aluminium, acier, alliages cuivreux, titane, composites,..).

6.5.4 Inconvénients :

- Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurités pour l'opérateur et l'environnement.
- Les opérateurs doivent être très expérimentés.
- Sensibilité de détection liée à l'orientation du défaut par rapport au rayonnement ionisant.

6.6 Courants de Foucault :

Le contrôle par Courants de Foucault est l'une des méthodes électromagnétiques de CND. Cette méthode n'est applicable qu'aux pièces électriquement conductrices et est bien adaptée aux pièces cylindriques (barres, tubes, etc.).

6.6.1 Principe :

Le contrôle par Courants de Foucault. Lorsque l'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent à l'intérieur du matériau en circuit

Chapitre 1 : Généralité sur le CND

fermé. Une bobine parcourue par un courant alternatif, génère des courants induits qui créent eux-mêmes un flux magnétique. Ce flux magnétique, en s'opposant au flux générateur, modifie l'impédance de la bobine. La présence d'un défaut perturbe la circulation et la répartition des Courants de Foucault. La variation de l'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation est utilisée pour détecter des défauts superficiels. En général, On utilise une méthode comparative qui consiste à mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine sur la pièce à étudier et l'impédance Z_0 d'une pièce de référence ne comportant pas de défaut.

Cette procédure a donc recours à un étalonnage préalable. C'est ainsi que les Courants de Foucault sont couramment utilisés pour la recherche de fissures de fatigue au cours de la maintenance en aéronautique des trous à l'emplacement des rivets. [10]

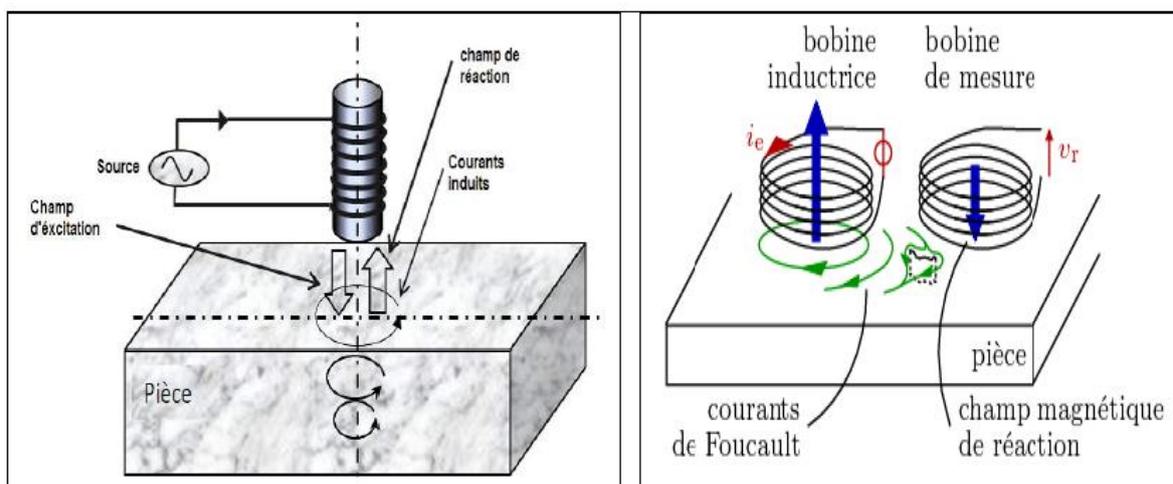


Figure (1.7) : Principe du CND par Courant de Foucault. [1]

6.6.2 Objectif du contrôle par CF:

La technique du contrôle par CF est utilisée pour accomplir plusieurs tâches. Du fait que l'impédance du système sonde/pièce est fonction des différentes caractéristiques électromagnétiques et géométriques et de l'état de santé de la pièce. [5]

La figure illustre les différents objectifs visés par le CND-CF.

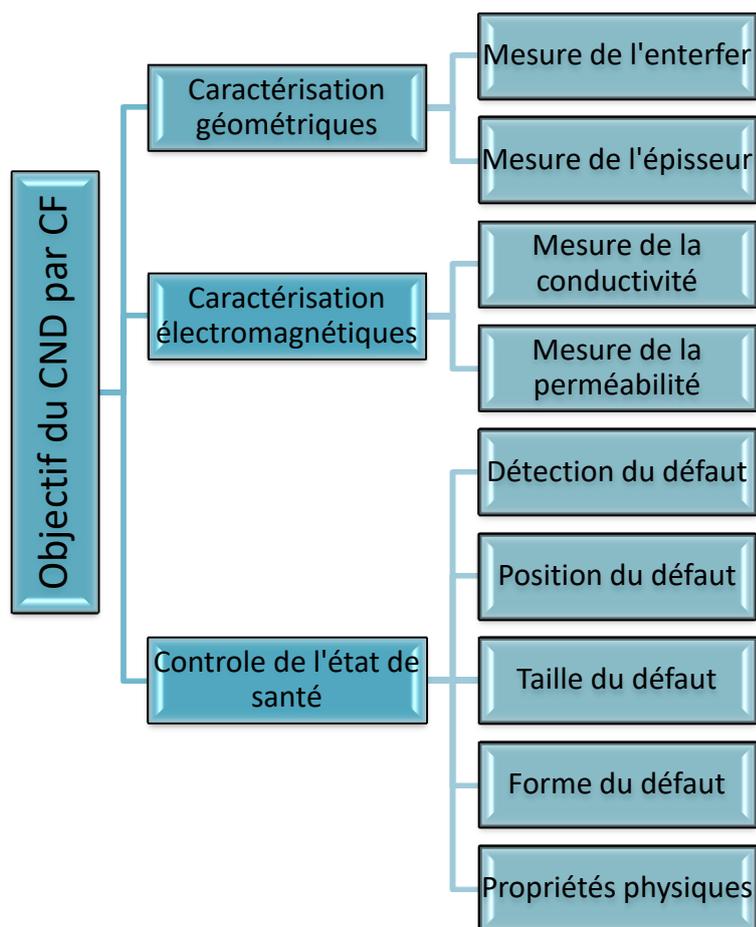


Figure (1.8) : Objectif du CND par CF.

6.6.3 Domaine d'application :

Les techniques de contrôle utilisant les Courants de Foucault sont utilisés pour effectuer les opérations suivantes:

- ❖ Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'Aluminium comme par exemple la surchauffe de composants aéronautiques.
- ❖ Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau.
- ❖ Mesure d'épaisseur de revêtements (conducteurs non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur...).
- ❖ Recherche de défauts sur produits en sortie de fabrication (tubes, rails, barres...).

- ❖ Suivi d'installations et de matériels en service.
- ❖ Mesure d'épaisseur dans les matériaux amagnétique. [9]

6.6.4 Avantage :

- Pas des conditions de sécurité ni pour l'opérateur ni pour l'environnement.
- mise en œuvre simple et peu couteux.
- grande sensibilité de détection des défauts (dimensionnelles, structurales...).
- évaluer le dimensionnement et la profondeur d'un défaut.
- enregistrement de résultats (suivi dans le temps).

6.6.5 Inconvénients :

- Effet de bords des pièces produisant des signaux parasites.
- La complexité de l'interprétation des signaux.
- Les défauts à forte profondeur ne sont pas détectables.
- Méthode limitée aux contrôles de matériaux conducteurs.

7 Classification des capteurs:

De nombreux critères sont pris en compte lors de la classification des capteurs. La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle. La figure (1.9) représente les trois critères.

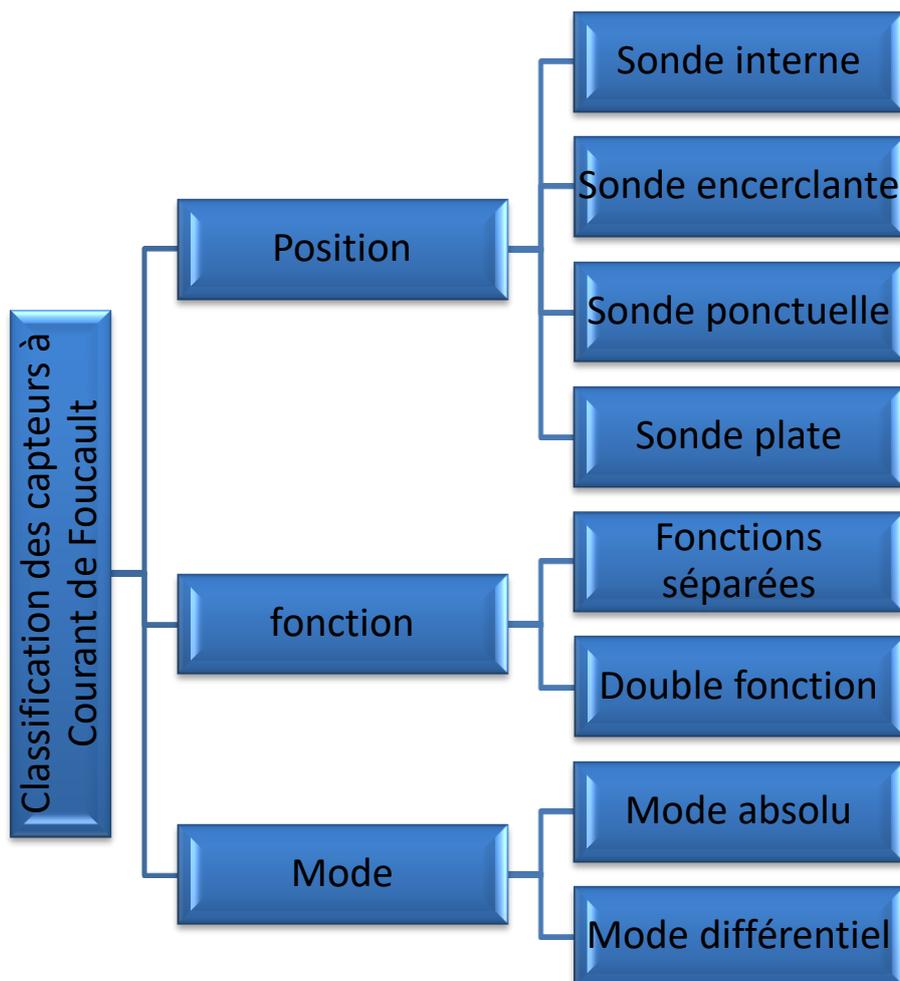


Figure (1.9) : Classification des capteurs à Courant de Foucault.

7.1 Selon la position :

Selon la forme géométrique, on distingue quatre principales configurations :

7.1.1 Sonde internes :

Pour le contrôle des tubes par l'intérieur, pour lesquels les bobines sont aussi moulées côte à côte de façon concentrique à l'axe du produit, ce type de capteur est principalement utilisé pour le contrôle des multiples tubes de petit diamètre qui constituent les échangeurs thermiques ou les générateurs de vapeur dans l'industrie nucléaire. [16]

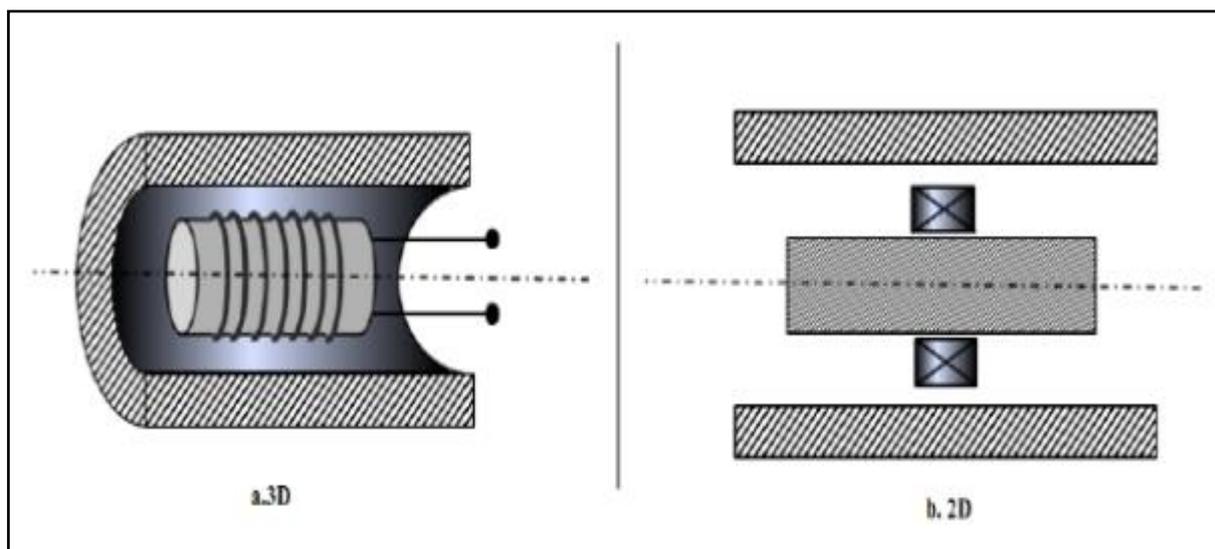


Figure (1.10) : Sonde interne. [12]

7.1.2 Sonde encerclante :

C'est une sonde dont la bobine entoure la pièce à contrôler. Il est utilisé pour inspecter par l'extérieur des objets de faibles sections tels que les tubes et les barres. [13]

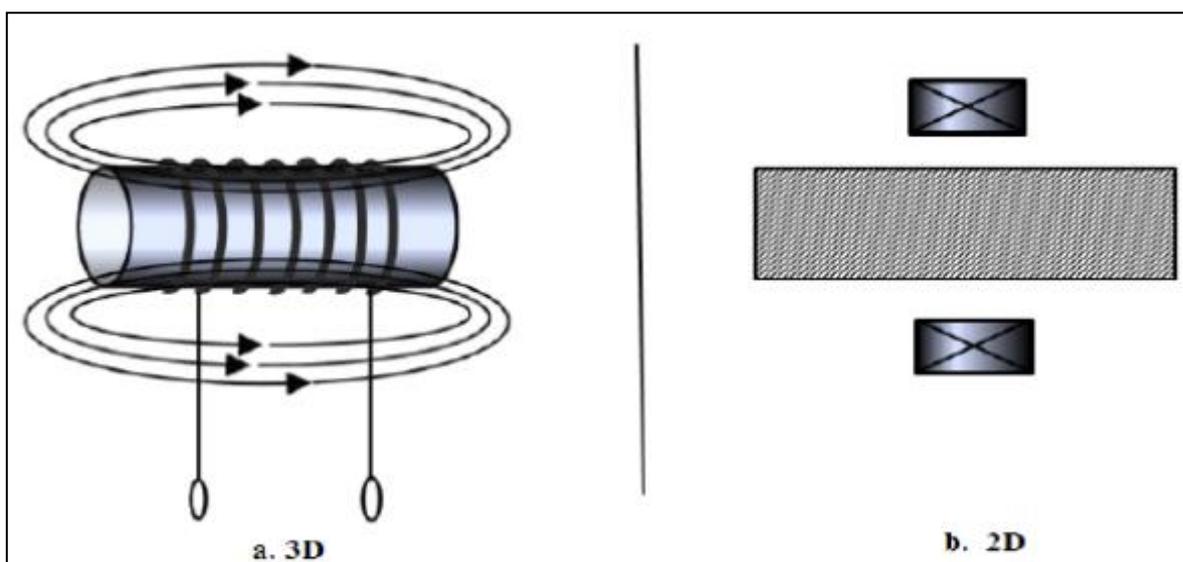


Figure (1.11) : Sonde encerclant. [12]

7.1.3 Sonde ponctuelle :

Ses enroulements forment une petite bobine qui peut être placée sur, ou près, de la surface de la pièce. Il est destiné au contrôle local d'un produit à partir de la surface, sur laquelle il peut se déplacer avec deux degrés de liberté, elle peut atteindre des régions d'accès réputées difficiles. Dans le cas de l'examen d'une surface importante, il nécessite un balayage méthodique de la pièce. [2]

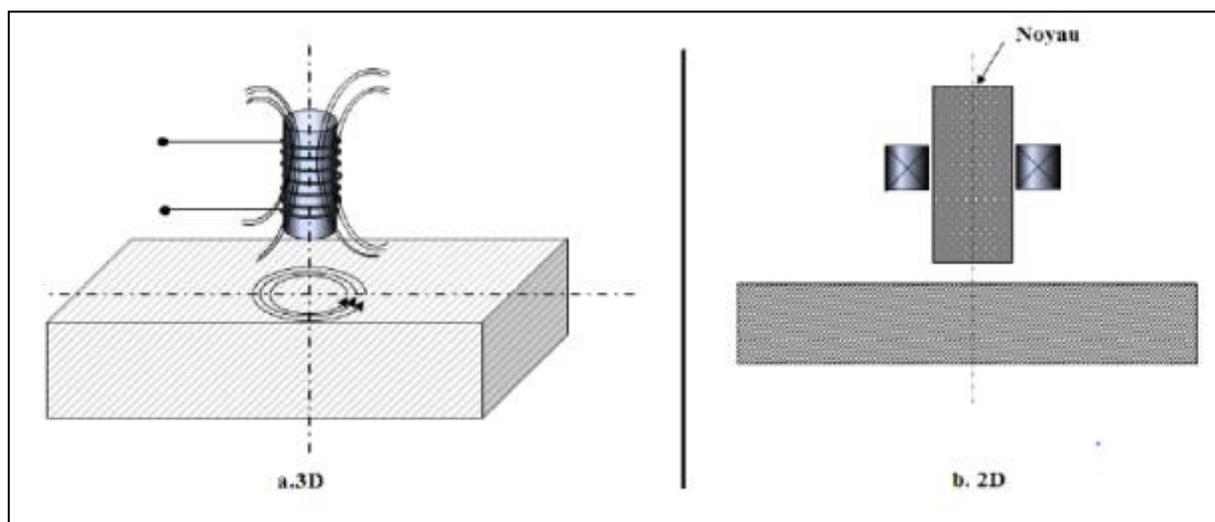


Figure (1.12) : Sonde ponctuelle. [12]

7.1.4 Sonde plate :

De la même manière que la sonde ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large. [14]

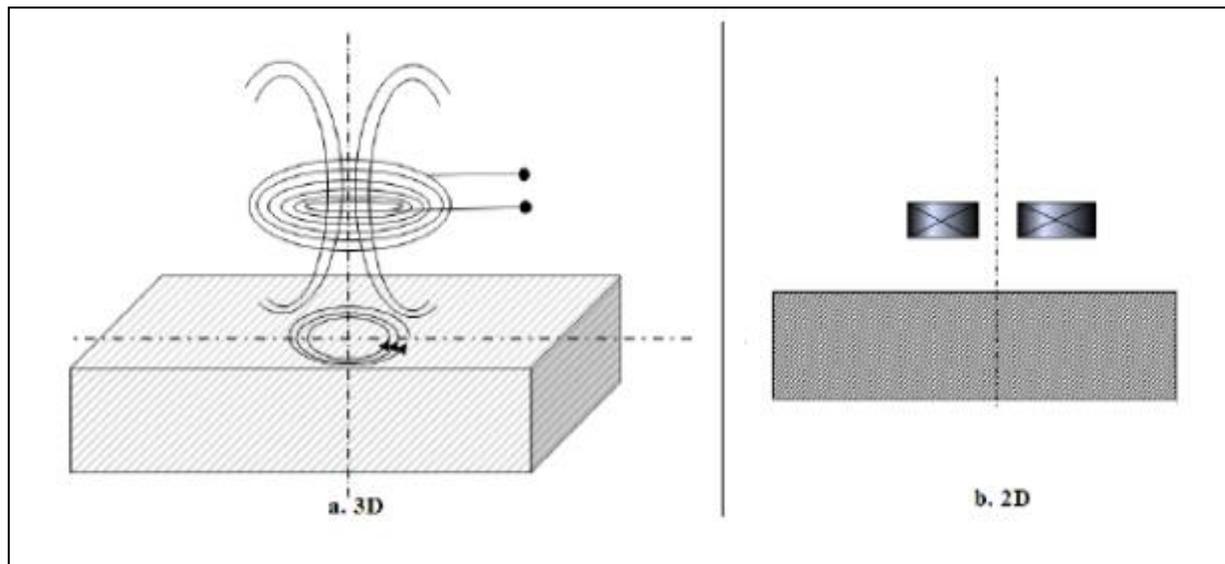


Figure (1.13) : Sonde plate. [12]

7.2 Selon la fonction :

7.2.1 Sonde à double fonction :

Ce capteur assure les deux fonctions d'excitation et de réception.

L'extraction de l'information se fait (en mode harmonique) par la mesure de l'impédance équivalente ou de la variation de l'impédance.

Les capteurs de ce type favorisent la détection de grandeurs à évolution lente comme l'épaisseur de revêtement et de conductivité. [12] [14]

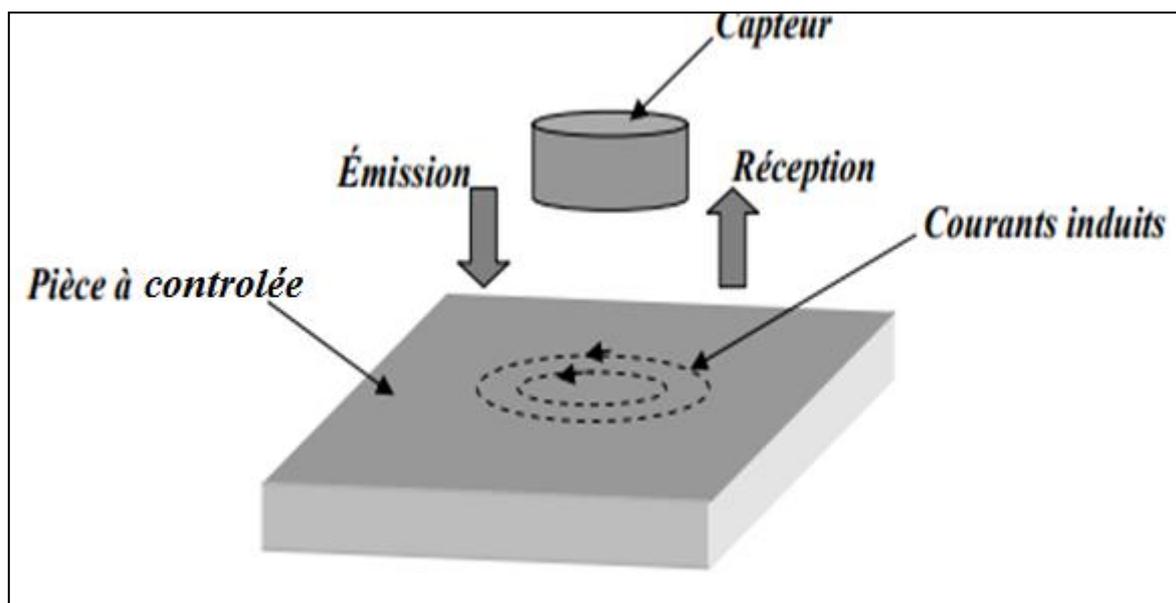


Figure (1.14) : Sonde à double fonction. [15]

7.2.2 Sonde à fonctions séparées :

Dans ce cas, la sonde contient au moins deux éléments, une bobine pour l'émission d'un champ alternatif et une autre bobine ou un capteur de champ magnétique pour la réception de la réponse de la pièce examinée. [8]

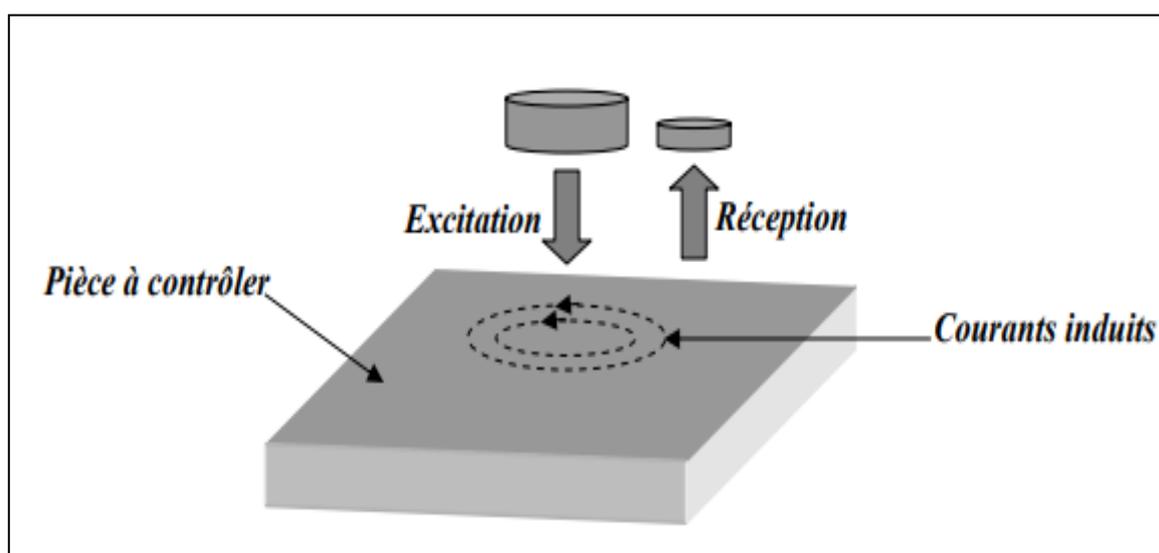


Figure (1.15) : Sonde à fonction séparée. [15]

7.3 Selon le mode :

7.3.1 Mode absolu :

Pour ce mode on utilise une sonde à double fonction, il est constitué d'une seule bobine émettrice- réceptrice qui crée le flux alternatif grâce au courant qui la parcourt et subit des variations d'impédance que l'on peut détecter en mesurant très finement sa signal de sortie, l'exploitation se fait, en régime sinusoïdal, par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine dans son environnement.

Un capteur absolu est destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit à examiner par rapport à une référence fixe. Le signal récupéré par la bobine est très faible en comparaison au signal émis. C'est pourquoi on utilise, en contrôle par courants de Foucault, une mesure comparative. Ce mode de mesure permet d'accéder simultanément aux grandeurs utiles et perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau à tester). [2][16]

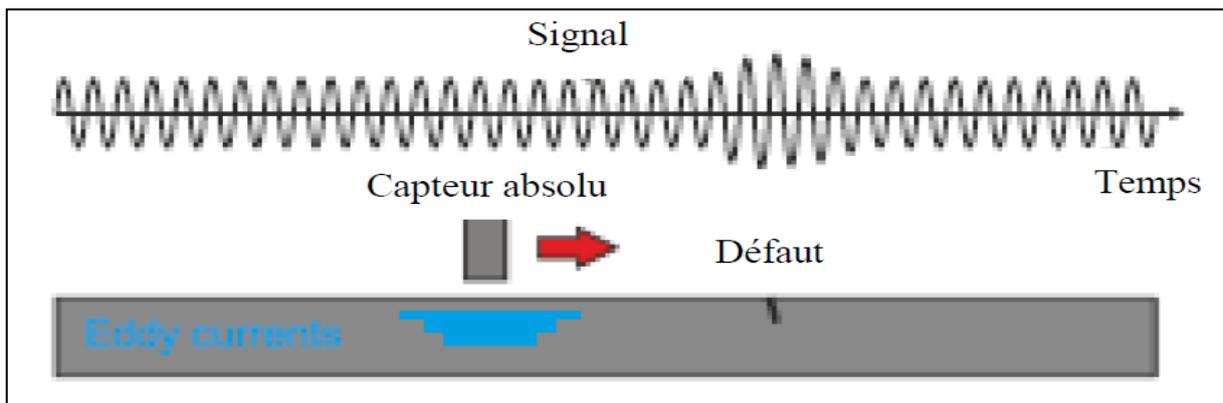


Figure (1.16) : Sonde absolu. [3]

7.3.2 Mode différentiel :

Pour ce mode, le capteur est constitué minimum de deux capteurs absolus bien liés entre eux, parcourus par le même courant dont les flux sont opposés, la mesure se fait par la comparaison de deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins, et la réponse est sensible juste aux variations de l'impédance au niveau de la pièce à contrôler, car l'impédance des deux capteurs est la même... Dans le cas d'une pièce saine, l'impédance du capteur différentiel est nulle et en présence d'un défaut elle se modifie. [12]

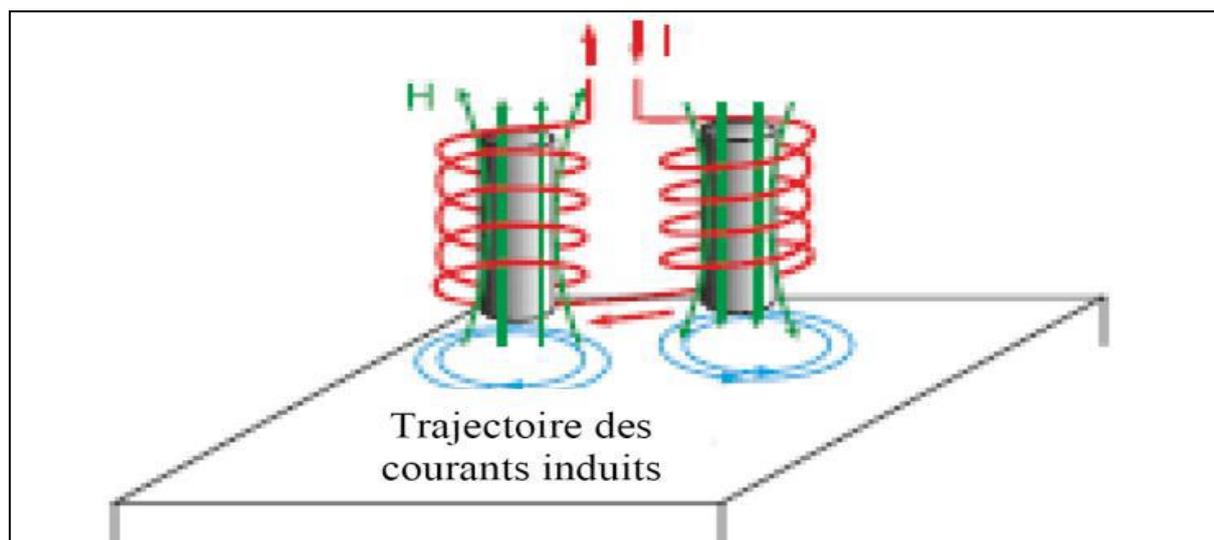


Figure (1.17) : Sonde en mode différentiel. [2]

7.3.3 Mode de contrôle compensé :

Dans ce mode de contrôle on utilise deux bobines :

L'une est positionnée à proximité d'une surface d'une pièce à contrôler et l'autre à proximité d'une autre surface saine du même matériau, comme le montre la figure (1.18). La première capte les grandeurs utiles et perturbatrices alors que l'autre ne capte que les signaux perturbateurs. Une mesure comparative permet d'extraire seulement les signaux utiles. [17]

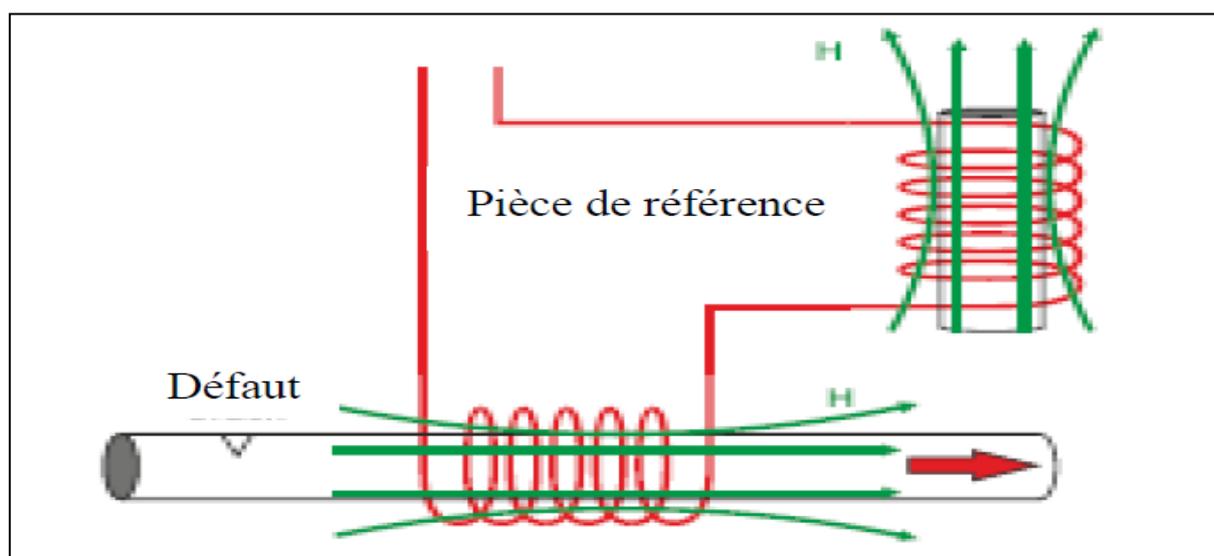


Figure (1.18) : Sonde absolue en mode compensé. [2]

8 Différents modes d'excitation : [9]

Quel que soit le type de sonde utilisé pour inspecter la santé d'une pièce, il existe pratiquement trois différents modes d'excitation qui sont résumés comme suit :

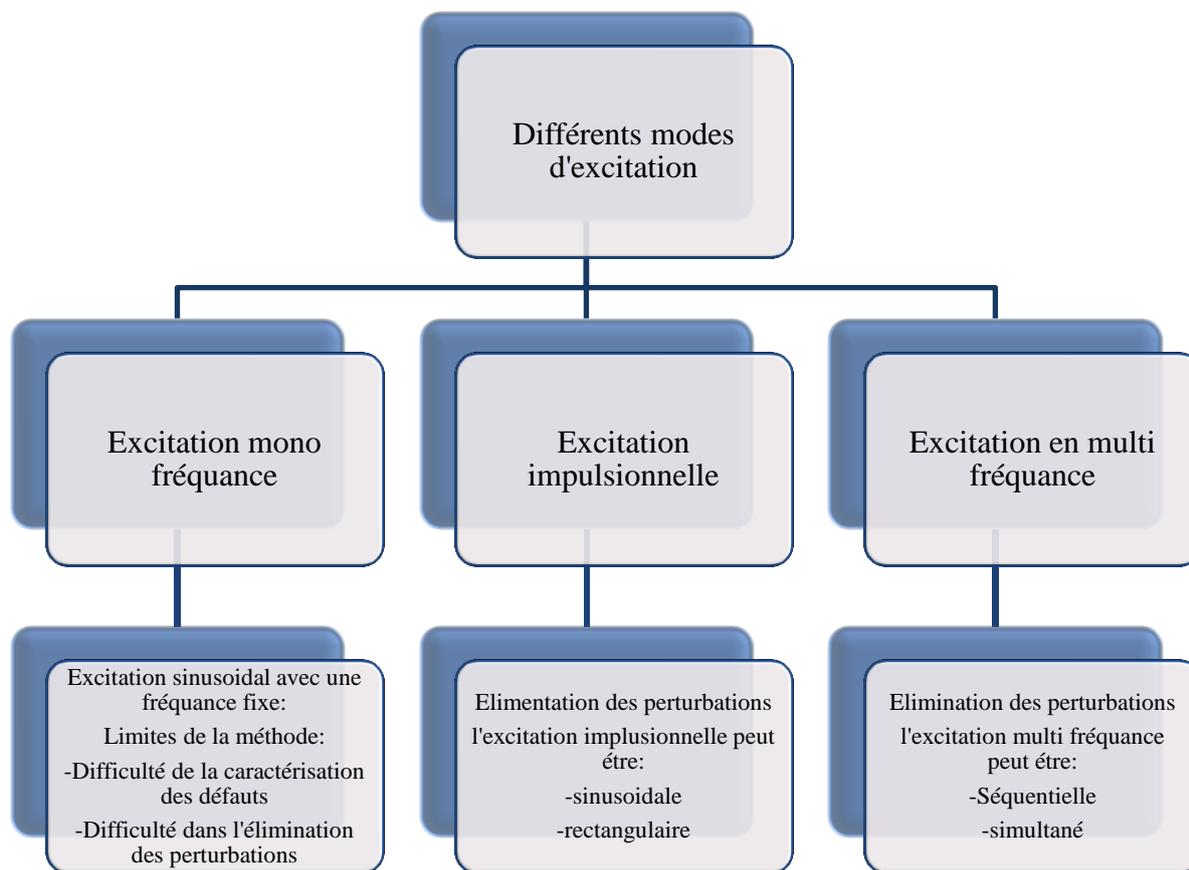


Figure (1.19) : Les différents modes d'excitation.

8.1 Excitation mono fréquence :

Le courant de Foucault est obtenu par une excitation sinusoïdale de fréquence fixe qui peut être fournie par un générateur ayant une ou quelques fréquences fixes commutables. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés. La fréquence intervient sur la profondeur de pénétration et sur la séparation en phase des réponses de divers défauts. Pour une fréquence très basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits. Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés par les capacités inter spires de la sonde. Il n'y a cependant pas de critères simples et uniques du choix de la fréquence.

Chapitre1 : Généralité sur le CND

Nous pouvons donc dire que ce mode d'excitation est limité en utilisation car il ne délivre pas une caractérisation fine des contrôles et n'élimine pas l'influence de l'ensemble des paramètres perturbateurs. [18]

8.2 Excitation multifréquence :

Cette méthode est la plus utilisée dans le domaine de CND à Courant de Foucault, Il faut faire des mesures à plusieurs fréquences d'excitation pour avoir beaucoup d'information. Cette technique de mesure peut être réalisée en fréquences séquentielles ou en fréquences simultanées. La première excite le capteur par mono fréquence successive, c'est une technique qui met un temps d'exécution et d'acquisition de données important. La deuxième consiste à injecter au capteur simultanément plusieurs signaux de fréquences différentes. [13]

8.3 Excitation pulsée :

Elle consiste à émettre un champ magnétique à large bande de fréquence. Le courant d'excitation n'est pas une onde sinusoïdale mais variable dans le temps. C'est une excitation impulsionnelle de formes rectangulaires, triangulaires ou autres. Toutefois, on préfère utiliser une forme semi sinusoïdale en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

Cette méthode représente donc une alternative à l'excitation multi fréquence. On utilise l'évolution temporelle des signaux pour extraire des informations. Une telle technique est plus riche en informations qu'en mono fréquence ou en multi fréquences.

Cette technique a été utilisée pour évaluer l'épaisseur de revêtements et les dépôts sur les pièces métalliques, pour la détection des défauts profonds. [17]

9 Principaux paramètres influents le contrôle :

9.1 Paramètres liés au matériau a testé :

Outre ceux liés à sa forme géométrique (diamètre), ce sont sa conductivité électrique « s » et sa perméabilité magnétique « m » dont il importera de prendre en compte le niveau de stabilité le long de la pièce ou d'une pièce à l'autre, toute variation locale entraînant un déplacement du point de fonctionnement moyen de la sonde [4]. Les variations de ces paramètres ont des causes très diverses comme la présence des contraintes résiduelles importantes dues à la fabrication. [13]

9.2 Paramètres électriques :

C'est essentiellement la fréquence d'excitation de la bobine, paramètre dont on est maître et qui sera choisi en fonction des considérations précédentes, à savoir l'obtention d'un effet de peau adéquat eu égard en particulier à la profondeur des défauts.

L'intensité de magnétisation alternative, liée à l'intensité électrique envoyée dans la bobine, n'est pas un facteur déterminant du contrôle dans la mesure où elle est choisie suffisamment faible pour éviter une saturation magnétique qui introduirait des non-linéarités rendant inextricable l'exploitation des signaux, et suffisamment forte pour que le rapport signal sur bruit soit convenable au niveau des amplifications et autres traitements électroniques. [4]

9.3 Paramètres liés au montage :

Qui gouvernent le couplage entre la bobine et le matériau: il s'agit soit du coefficient de Couplage pour les bobines encerclantes, rapport entre la section de la barre et celle de la bobine, soit du lift-off, terme désignant universellement la distance entre une sonde plate et la surface de la pièce.

Les variations du lift-off provoquent des fluctuations de l'impédance qui peuvent prendre une amplitude telle qu'elles masqueront les indications caractéristiques du défaut. [9][13]

10 Effet de peau :

L'intensité des courants de Foucault dans un matériau conducteur électrique caractérisée par une conductivité électrique σ (en Sm^{-1}) et une perméabilité magnétique μ (en Hm^{-1}), diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle δ (en m), souvent nommée épaisseur de peau.

En pratique, on peut détecter des anomalies jusqu'à une profondeur de quelques δ . L'épaisseur de peau est définie :

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

Cette profondeur est fonction de la fréquence. Plus la fréquence est importante, plus la densité de CF induits dans la cible est importante et limitée à la surface. Il en résulte que la profondeur à laquelle un capteur CF permet d'inspecter une cible est dépendante de la fréquence d'excitation.

Chapitre 1 : Généralité sur le CND

Si on considère une pièce plane d'épaisseur infinie, excitée par un courant extérieur de fréquence f parallèle au plan, 63% des courants circulent dans l'épaisseur de peau. Le module de la densité de courant dans la pièce est donné par la relation :

$$J_z = J_s e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (1.2)$$

Avec :

δ : l'épaisseur de peau [m].

f : la fréquence du courant [Hz].

μ : la perméabilité [H/m].

σ : la conductivité électrique [S/m].

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

J_s : le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z=0$) [A/m²].

J_z : le module de la densité de courant à la profondeur z .

Cette relation montre que l'évolution du module et de la phase de la densité de courants induits sont fonction de la profondeur z et de la fréquence d'excitation f . Donc, 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. [5][17]

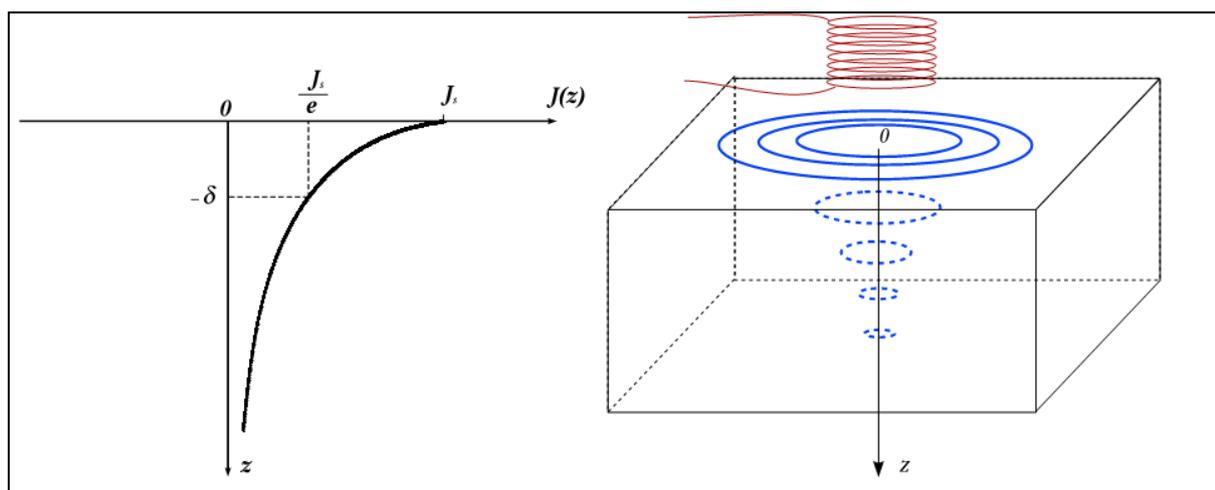


Figure (1.20) : Répartition des Courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur z .

L'affaiblissement très rapide du champ électromagnétique dans des matériaux Conducteurs explique pourquoi le contrôle par Courant de Foucauld convient à la caractérisation des pièces minces et la détection des défauts situé près de la surface de la pièce. Ceci explique que les fréquences utilisées sont variables en fonction des applications. [5]

La figure (1.21) montre l'évolution de la profondeur de peau en fonction de la fréquence pour certains matériaux. On remarque qu'aux basses fréquences l'épaisseur de peau est plus élevée, et dans le cas ferromagnétique (le Nickel et le Fer), elle est beaucoup plus faible que dans les cas non ferromagnétiques à cause des valeurs élevées de μ .

On peut donc conclure que pour pouvoir détecter des défauts enfouis dans un matériau ferromagnétique, les fréquences à utiliser doivent être de l'ordre de quelques centaines de Hz.[13]

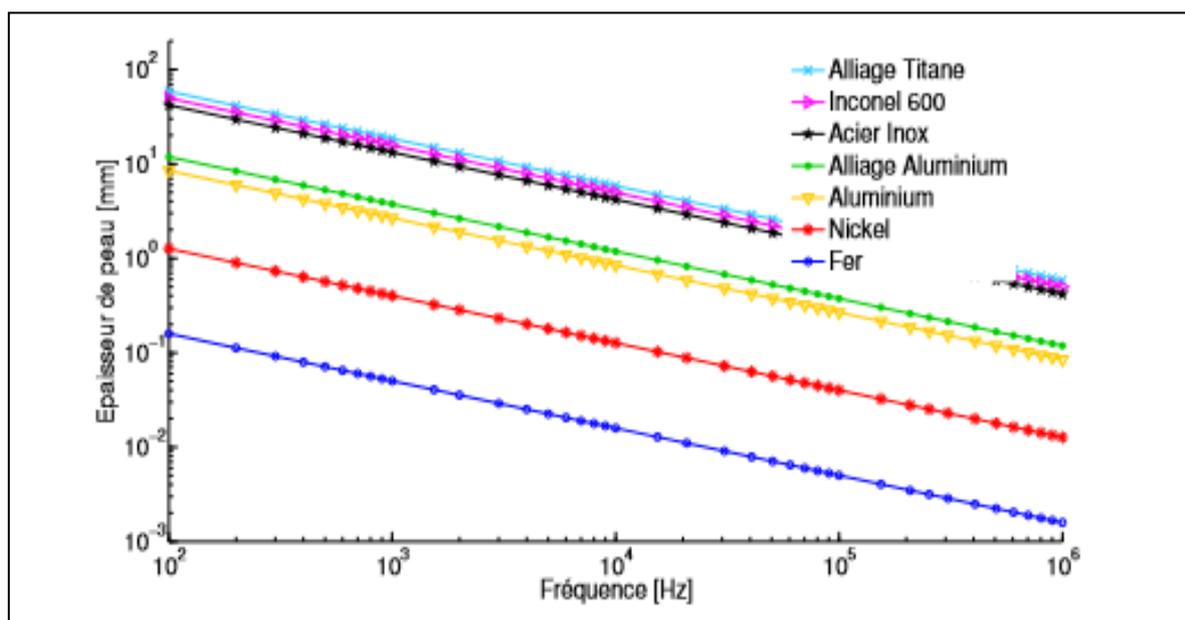


Figure (1.21) : Évolution de l'épaisseur de peau en fonction de la fréquence pour certains matériaux. [13]

11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons essayé de donner des généralités sur le CND. Tout d'abord, nous avons commencé par la présentation des différents types de défauts détectés en CND, Ensuite nous avons décrit les principes, les avantages , les inconvénients et les domaines d'applications des différentes techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel a savoir : l'examen Visuel, le Ressuage, Ultrason, la Radiographie, la Magnétoscopie, et les Courants de Foucault . Dans notre étude nous avons intéressé par cette dernière on a expliqué son objectif, les différents sondes utilisés en pratique et les modes d'excitation.

Il n'existe pas une technique meilleure que toutes les autres et valable pour tous les matériaux et tous les défauts. Chaque technique dispose de ses propres points forts qui la rendent parfois évidente pour effectuer un contrôle non destructif. C'est au contrôleur de décider de quelle technique il a besoin et de sa mise en œuvre.

CHAPITRE 2

CAPITRE 2: AUBE DE COMPRESSEUR

1 Introduction :

Le mot « turbomachine » est généralement utilisé pour les machines tournantes qui transforment l'énergie d'un fluide. Un premier classement des turbomachines est fait selon la nature du fluide utilisé. Il y a deux groupes : les machines à fluides incompressibles telles que les pompes, ventilateurs et les machines à fluides compressibles, dont les compresseurs. Un deuxième type de classement est fait à partir de la nature de l'écoulement au sein de cette turbomachine. Notre étude concerne le compresseur qui est une machine destinée pour la compression des fluides compressible comme l'air La conception des compresseurs ca diffère d'un compresseur à un autre selon l'appareil ou il fonctionne. [21].

Le compresseur comporte plusieurs étages d'aubes fixes et rotatives, chaque étage augmentant progressivement la pression d'air avant de se mélanger au carburant et de s'enflammer dans la chambre de combustion. Les aubes doivent fonctionner à des vitesses de rotation élevées et à des températures élevées, elles doivent donc résister à l'oxydation, à l'usure et à la corrosion et offrir une longue durée de vie.

Divers facteurs affectent la durée de vie des ailettes du compresseur en fonction de leur conception et des conditions de fonctionnement, à savoir :

- ❖ Environnement de fonctionnement (température, pression, humidité, particules solides).
- ❖ Contraintes mécaniques (la force centrifuge, les vibrations).
- ❖ Contraintes thermiques (dues aux gradients de température).

2 Principe de fonctionnement d'un turboréacteur :

Moteurs à réaction sont basée sur le principe de la réaction découvert par Héron d'Alexandrie au premier siècle, et formulé par Newton au XVII siècle: « pour chaque action il y a une réaction d'égale intensité, mais dirigée dans la direction opposée ».

Dans un turboréacteur, un compresseur, constitué de plusieurs roues munies d'ailettes (aubes) à leur périphérie, élève la pression et la température de l'air. Celui-ci passe ensuite dans une chambre de combustion alimentée en carburant (kérosène). Les gaz brûlés rencontrent les aubes d'une turbine sur lesquelles ils perdent une partie de leur énergie, celle-ci étant utilisée pour entraîner le compresseur, puis se détendent dans une tuyère. La poussée qui en résulte est égale au produit de la masse d'air traversant le turboréacteur par l'accroissement de vitesse obtenu entre l'entrée et la sortie.



Figure (2.1) : Turboréacteur CF6-80C2.

3 Généralités sur les compresseurs :

Les compresseurs sont des composants importants des moteurs à réaction car leurs performances ont des influences directes sur le fonctionnement global du moteur (rendement, consommation de carburant, ...).

Le rôle des compresseurs est d'aspirer l'air provenant de la soufflante, et de le comprimer pour l'amener dans la chambre de combustion dans les meilleures conditions possibles de pressions et de températures. En effet, plus l'air est comprimé, plus le nombre de chocs entre les molécules d'air s'accroît, et donc plus la température augmente. [22]

Ils existent deux types de compresseur dans les moteurs d'avions, les compresseurs centrifuges et les compresseurs axiaux, et ils se composent généralement de plusieurs étages. Un étage comporte des aubes rotatives (rotor ou impulseur) à grande vitesse pour augmenter la vitesse absolue du fluide et des aubes fixes (stator ou diffuseur) qui transforment cette énergie cinétique en énergie de pression.

3.1 Compresseur axial :

Le compresseur axial est un compresseur dont le flux d'air suit l'axe de rotation. Le compresseur axial génère un flux continu d'air comprimé et fournit un rendement élevé pour une masse volumique donnée et une section donnée du compresseur. Il est nécessaire d'avoir plusieurs étages d'aubages pour obtenir des pressions élevées et des taux de compression équivalent a ceux d'un compresseur centrifuge [21]. Ces compresseurs sont très coûteux à l'achat. Il y a un gros travail d'usinage pour les ailettes, l'axe doit-être parfaitement aligné et solide pour assurer la compression à des hautes vitesses de rotation (de 5000 à 12 000 tour/min). [23]

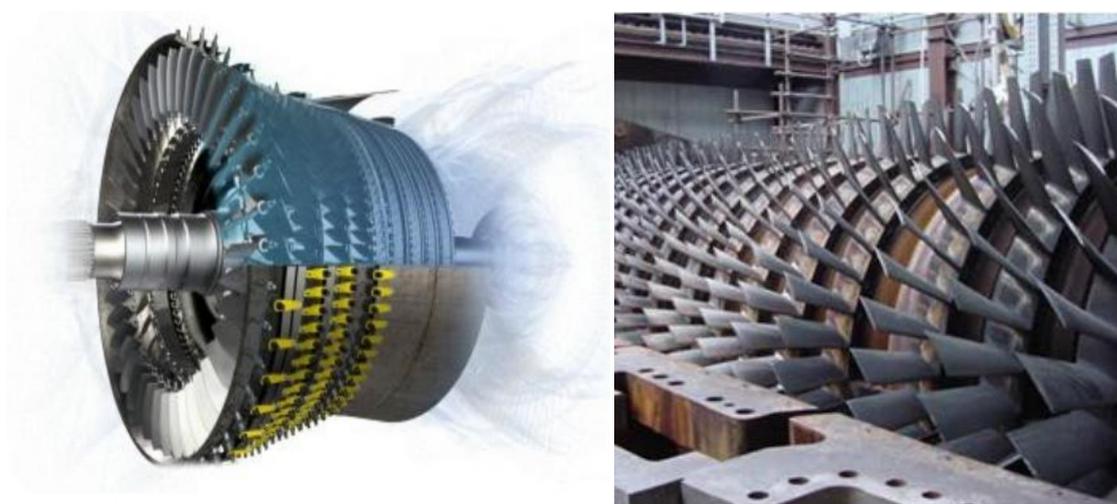


Figure (2.2) : Compresseur axiale. [23] [24]

3.2 Fonctionnement d'un compresseur axial:

Le compresseur axial fonctionne en débit continu, il convertit l'énergie mécanique en énergie de pression .Ce transfert se fait par le déplacement du fluide d'un étage à l'autre, chaque étage contenant une crémaillère d'aubes qui dirigent le fluide avec une vitesse de rotation et une augmentation de pression. Un compresseur axial est consisté par des séries d'un certain nombre des étages axiales. Chacune comporte un aubage mobile et un aubage fixe. L'aubage mobile (rotor) est constitué d'un disque circulaire sur lequel sont fixées des aubes (ailettes), Il tourne devant l'aubage fixe. [23]

Chapitre 2 : Aube de Compresseur

Théoriquement le fonctionnement se fait en deux étapes :

En premier lieux, le rotor fournit de l'énergie cinétique à l'air ; le stator transforme cette énergie cinétique en énergie de pression.

En fait, ces deux fonctions ne sont pas aussi nettement différenciées en pratique, car le rotor fournit de l'énergie cinétique à l'air et commence à transformer cette énergie cinétique en énergie de pression, ce phénomène est continué par le stator dont il transforme l'énergie de pression et l'énergie cinétique restante à la sortie du rotor en énergie de pression. [25]

3.3 Compresseur centrifuge:

Le compresseur centrifuge est un compresseur dans lequel le parcours de l'air dans la roue mobile est dirigé du centre vers la périphérie, pendant ce trajet l'air acquit une légère surpression et une grande vitesse de sortie qui se transforme ensuite une pression dans le diffuseur. Mais l'augmentation totale de pression est toujours assez faible car la vitesse circonférentielle de la roue est limitée par la fatigue du métal qui la constitue, donc pour obtenir des pressions élevées exigées, il est nécessaire de disposer plusieurs roues en série qui constituent les étages du compresseur. [26]

Le compresseur centrifuge utilisé lorsque la puissance utile du turbomoteur est suffisamment faible, a un taux de compression élevé (jusqu'à 4 au maximum). Mais, son inconvénient est l'importance des pertes lorsque le débit d'aspiration d'air est faible. [25]



Figure (2.3) : Compresseur radial (centrifuge). [25]

3.4 Fonctionnement d'un compresseur centrifuge :

L'air arrive par la partie centrale du rotor .sous l'effet de la vitesse de rouet, il est accéléré vers la périphérie, d'où gain d'énergie cinétique de l'air .en regardant le schéma du rotor, nous voyons que la section de passage entre aubes rotor sont divergentes et nous aurons donc un début de transformation d'énergie cinétique en énergie de pression. En suit, les filets d'air pénètrent dans les passages divergents du stator et achèvent leur transformation d'énergie cinétique en énergie de pression.

On peut dire que d'une façon assez générale, la moitié de l'énergie de pression est gagnée dans le rotor. [38]

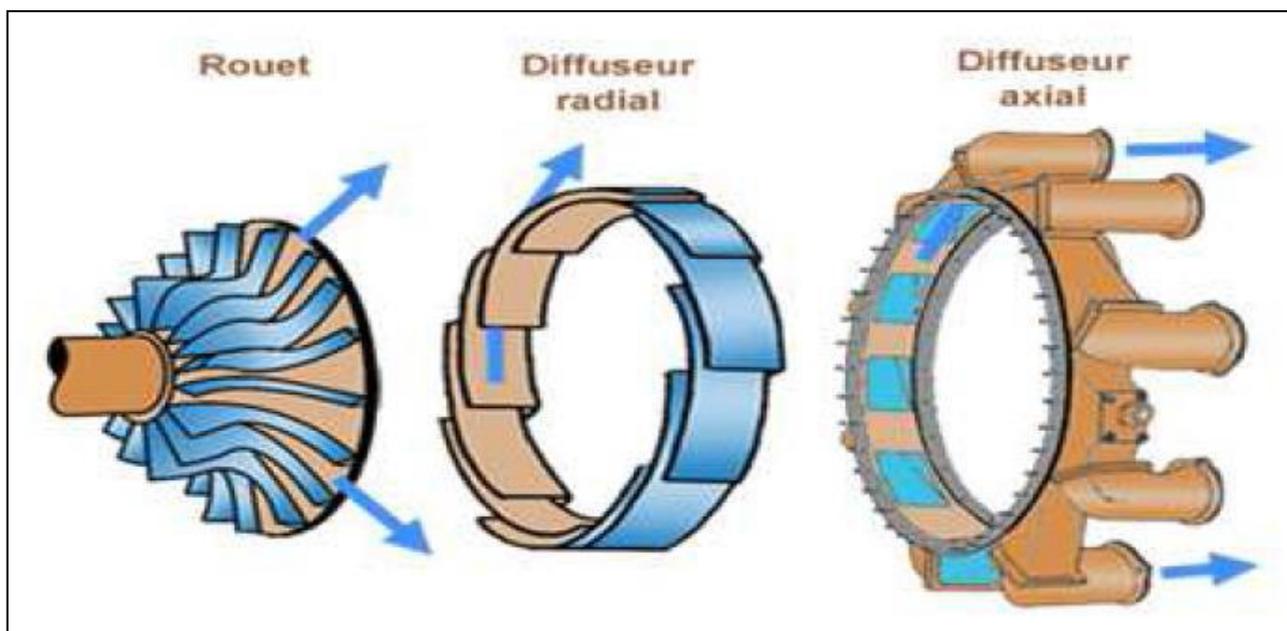


Figure (2.4) : Les composants d'un compresseur centrifuge. [22]

4 Les aubes :

Les aubes de turbine et de compresseur sont des composants essentiels dans les zones froides et chaudes d'un turboréacteur et ont un impact critique sur la génération de la poussée de l'avion.

Les aubes de réacteur utilisées dans l'industrie aéronautique et spatiale sont composées le plus souvent de matériaux difficiles à usiner et présentent des tolérances très faibles qu'il convient de respecter impérativement pour assurer un flux d'air parfait et une résistance extrême à l'usure. Elles sont exposées à des températures pouvant aller jusqu'à 1 000 °C. La surface doit par conséquent, elle aussi, présenter la meilleure qualité possible et être parfaitement adaptée aux conditions régnant dans le réacteur.[11]



Figure (2.5) : Les aubes de compresseur.

5 Géométrie d'une aube de compresseur :

Les aubes de compresseur sont généralement assez minces et sont fabriquées à partir d'alliages métalliques légers tels que l'aluminium et le titane.

Les aubes comportent une section aérodynamique comme une aile, L'aube présente un bord d'attaque et un bord de fuite, une surface intrados et une surface extrados s'étendant du bord d'attaque au bord de fuite, une enveloppe externe formant la surface intrados et la surface extrados et délimitant la cavité.

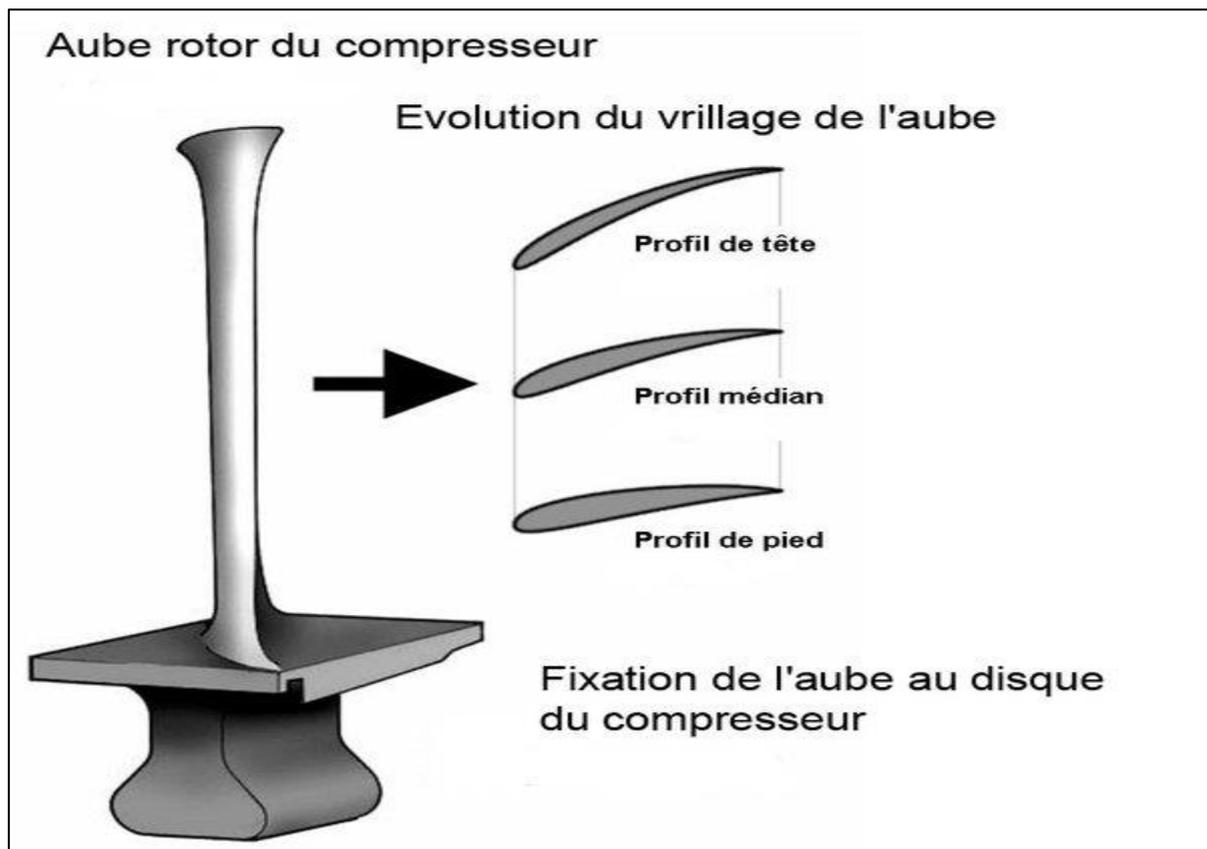


Figure (2.6) : Géométrie d'une aube.

6 Les principales contraintes et sollicitation subie par l'aube :

Les conditions de vol et l'utilisation des turboréacteurs impliquent des changements rapides et multiples de régime moteur. Sous l'action de l'effet centrifuge, l'aube est soumise à des sollicitations variables, avec des phases de fatigue et de fluage à chaque changement de régime moteur. En plus de l'effet centrifuge, l'aube est soumise à un très fort gradient de température. Les contraintes thermomécaniques qui en résultent et l'environnement de fonctionnement agressif des aubes contribuent à la détérioration des matériaux composants.

6.1 Fatigue :

6.1.1 Définition d'un phénomène de fatigue:

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés du matériau suite à l'application de cycles d'efforts, dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces.

Chapitre 2 : Aube de Compresseur

Ou fatigue des matériaux : détérioration progressive des matériaux sans déformation apparente, aboutissant à une rupture. La fatigue d'un matériau résulte de l'application répétée de contraintes. La rupture par fatigue apparaît de façon soudaine et imprévisible, contrairement à l'usure, à la déformation ou à la corrosion, qu'il est possible de détecter bien avant la rupture. L'étude de la fatigue des matériaux est particulièrement importante ; elle permet de déterminer la résistance mécanique d'éléments de machines et de structures soumises à des contraintes périodiques ou à des vibrations. [27]

6.1.2 Courbe de Wöhler :

Courbe de Wöhler (Courbe « S.N » dans les pays anglo-saxon (Sterss–Number of cycles)) : la courbe représente la variation d'une des contraintes dynamiques en fonction du nombre de cycles à rupture (reporté sur échelle logarithmique).

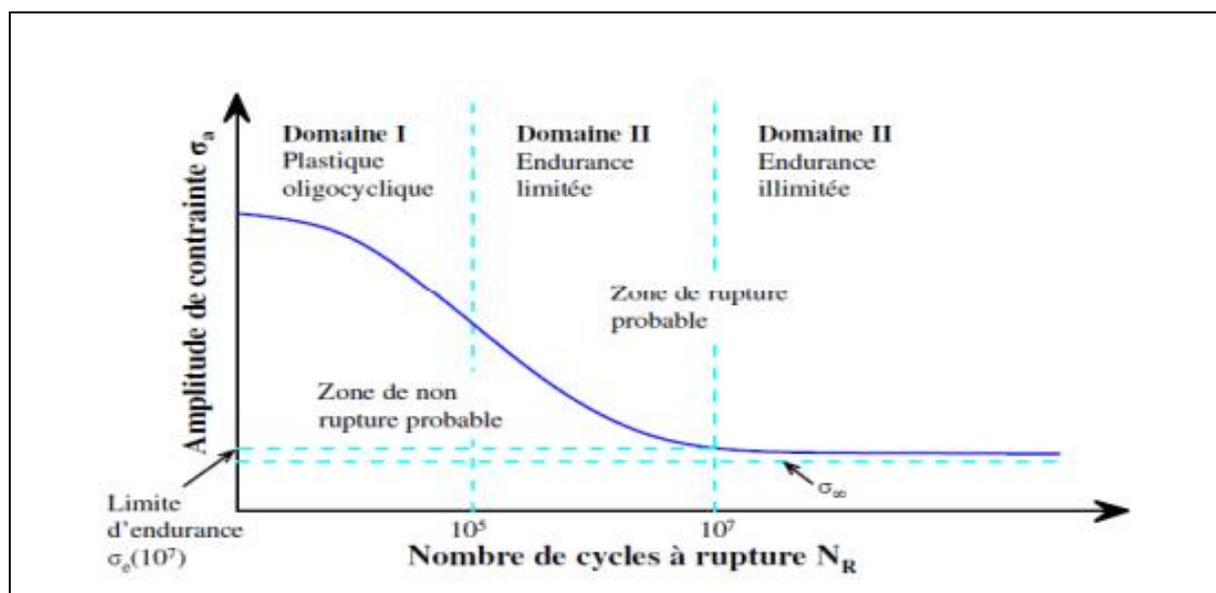


Figure (2.7) : Représente l'amplitude de contrainte en fonction le nombre de cycle à rupture.[28]

Domaine I : Zone de fatigue plastique oligocyclique, qui correspond aux contraintes les plus élevées, supérieures à la limite d'élasticité σ_e du matériau. La rupture survient après un très petit nombre de cycles variant généralement de $\frac{1}{4}$ de cycle à environ 10^4 à 10^5 cycles.

Dans cette zone, on observe très rapidement une déformation plastique importante suivie d'une rupture de l'éprouvette. [29]

Chapitre 2 : Aube de Compresseur

Domaine II : zone d'endurance limitée. Dans ce domaine, on applique une contrainte inférieure à la limite d'élasticité. La rupture est atteinte pour un nombre limité de cycles, qui augmente quand la contrainte diminue. L'ordre de grandeur de la durée de vie dans ce cadre varie typiquement de 10^5 à 10^7 cycles. [30]

Domaine III : zone d'endurance illimitée. Il s'agit du domaine des faibles contraintes jusqu'à une contrainte seuil appelée limite d'endurance en dessous de laquelle la durée de vie est théoriquement illimitée. [30]

6.1.3 Phase de propagation d'une fissure en fatigue :

Amorçage :

L'amorçage des fissures de fatigue résulte d'une concentration locale de contraintes en surface. Les origines de cette concentration peuvent être multiples. On peut citer entre autres l'état de surface initial de la pièce (rugosité, défauts d'usinage...) qui joue un rôle prépondérant lors de l'amorçage des fissures, les hétérogénéités métallurgiques du matériau (inclusions ...), des dégâts engendrés par l'environnement (piqûres...). [37]

Propagation :

Sous l'effet du changement cyclique du chargement la fissure initiée commence à prendre des dimensions importantes menant finalement à la ruine. A ce stade la fissure qui a grandi résultait de la propagation des microfissures causées par le défaut initié dans la première étape, c'est elle qui deviendra la fissure de la fatigue. [31]

Rupture :

Zone de rupture finale, plus tourmentée, se produit lorsque la pièce ne plus supporter les contraintes appliquées.



Figure (2.8) : Endommagement par fatigue dans un compresseur.

6.1.4 Modes de rupture : [39]

Mode 1 (mode d'ouverture) :

Les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement l'une à l'autre.

Rupture fragile donc rupture dangereuse. Ce mode est le plus dangereux, il fait propager les fissures pour les efforts les plus faibles.

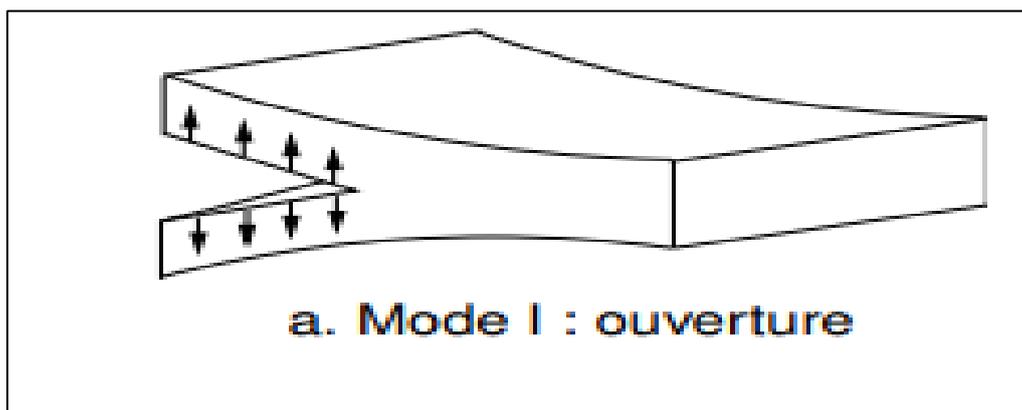


Figure (2.9) : Représente le mode 1 d'ouverture.

Mode II (glissement plan) :

Les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de la fissure.

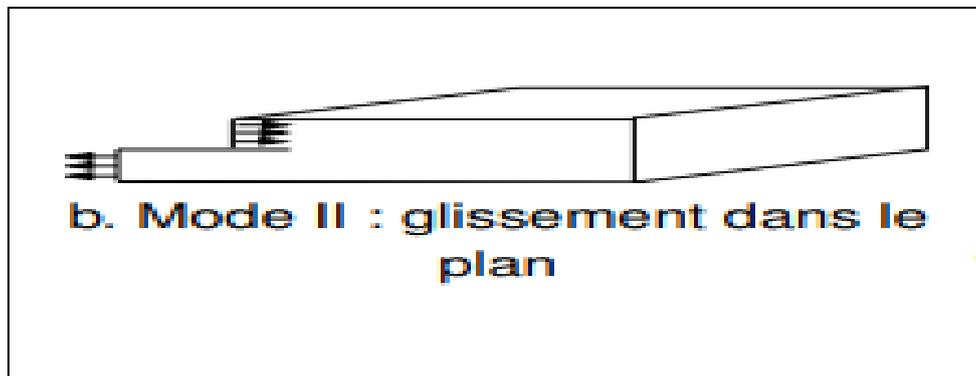


Figure (2.10) : Représente le mode II le glissement dans un plan.

Mode III (Glissement anti plan) :

Les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de fissure.

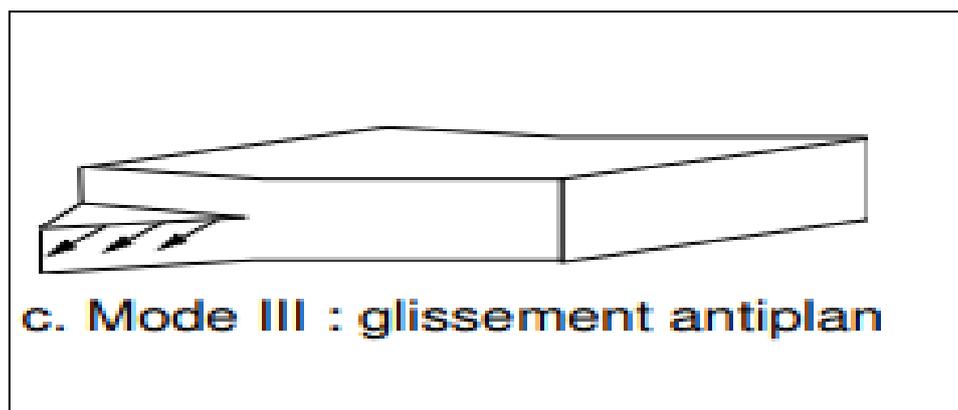


Figure (2.11) : Représente le mode III le glissement anti plan.

6.1.5 Principaux paramètres influents sur le comportement en fatigue :

Les principaux facteurs affectant la résistance à la fatigue des matériaux sont très nombreux (température, traitement thermique, contraintes résiduelles, l'humidité, l'état de surface ...), ce qui en fait un phénomène complexe à étudier.

6.1.5.1 Facteurs métallurgiques :

La réalisation d'une pièce passe toujours par des opérations mécaniques et thermiques, qui agissent sur l'état métallurgique du matériau utilisé donc sur ses caractéristiques mécaniques d'utilisation. On peut ranger dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal qui constitue la pièce (composition chimique et structure métallographique à son élaboration et à sa mise en forme (inclusion, défauts, fibrage), ainsi qu'aux traitements [28]

6.1.5.2 Facteurs géométriques :

L'influence de ces facteurs intervient par la dimension des pièces (effet d'échelle) et surtout par leurs formes (effet d'entaille et coefficient de concentration des contraintes). [27]

6.1.5.3 Facteurs de surfaces :

Les fissures de fatigue prennent le plus souvent naissance dans les couches superficielles. Il convient donc, pour améliorer l'endurance des pièces, de relever dans la mesure du possible celle des couches superficielles, on peut y arriver en jouant soit sur la nature du métal, soit sur la résistance des couches superficielles par des traitements de durcissement. [27]

- **Traitement thermique**

La résistance à fatigue diminue ou augmente selon que le traitement thermique provoque un adoucissement ou un durcissement du matériau. De plus, le traitement thermique peut modifier la taille des grains.

6.1.5.4 Facteur de l'environnement :

- **Influence de la température :**

La température, exerçant un effet direct sur la résistance, influe sur le comportement d'une pièce soumise à la fatigue. La limite d'élasticité et la résistance à la traction diminuant lorsque la température s'élève, il en sera de même de la limite d'endurance qui leur est proportionnelle [27]

- **Influence de corrosion :**

On entend généralement par effet de l'environnement l'action du milieu corrosif sur le matériau : air sec ou humide, oxygène, vapeur d'eau, hydrogène... Cet effet se manifeste à la fois sur les durées de vie, sur les vitesses de propagation des fissures. La fatigue-corrosion est un phénomène d'endommagement qui résulte de l'action combinée d'un milieu agressif et d'une charge cyclique. [29]

6.2 Fluage :

6.2.1 Modèle descriptif du fluage :

La déformation induite d'un matériau pendant le maintien constant de la contrainte à une température constante est appelée le fluage. Cette déformation est de nature viscoplastique et dépendante du temps de maintien. En effet, le fluage est possible à toutes les températures au-dessus du zéro absolu, et une faible variation de celle-ci peut entraîner des variations importantes de la vitesse de déformation. [33]

Pour les alliages métalliques, le fluage n'intervient de façon importante qu'à des températures relativement élevées. À haute température, un matériau se déforme plastiquement sous l'application d'une contrainte constante, même si elle est inférieure à la limite d'élasticité. [34]

6.2.2 Courbe de fluage :

La figure 1 représente la courbe de fluage donnant la contrainte ε en fonction du temps t . L'essai de fluage est généralement réalisé sous une contrainte inférieure à la limite élastique macroscopique du matériau.

La courbe de fluage permet de distinguer trois stades de fluage avant la rupture.

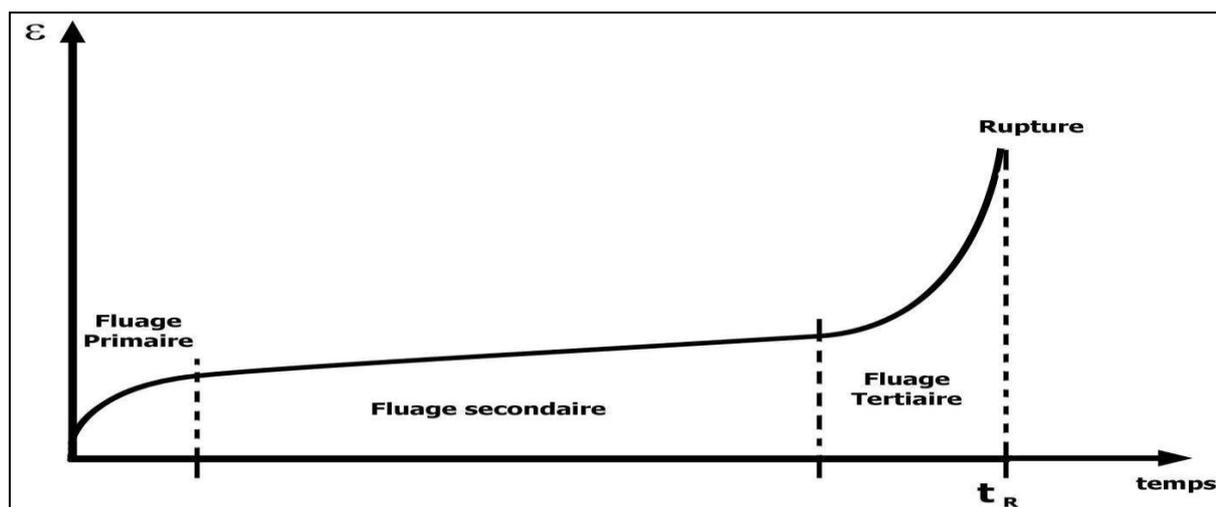


Figure (2.12) : Courbe de fluage typique présentant les trois stades du fluage. [30]

Fluage primaire : ou transitoire, pendant lequel la vitesse de fluage (ou vitesse de déformation) est importante puis diminue avec le temps, ce qui correspond à une augmentation de la résistance du matériau.

Fluage secondaire : ou fluage stationnaire (en fait « en régime stationnaire »). Il se caractérise par une vitesse de déformation constante. Cette vitesse de déformation est appelée vitesse de déformation minimale et correspond au paramètre de dimensionnement le plus important que l'on puisse tirer de la courbe de fluage. [34]

Fluage tertiaire : où la vitesse de déformation augmente jusqu'à rupture de l'éprouvette. La densité et la mobilité des dislocations augmentent. En parallèle, des phénomènes de cavitation interne et d'endommagement en surface vont mener à la création de fissures. Ces dernières vont diminuer la surface portante de l'éprouvette entraînant la rupture par augmentation de la contrainte macroscopique. [35]

6.3 Érosion :

Le phénomène d'érosion ou usure érosive est une perte progressive de matière du matériau. Elle est due à des interactions mécaniques entre la surface du matériau et des particules (liquides ou solides). . La perte de matière se fait par plusieurs mécanismes d'impact (fatigue, fracture, abrasion..) qui dépendent de plusieurs critères :

Chapitre 2 : Aube de Compresseur

- La nature du substrat : Ductile, fragile
- La vitesse d'impact
- L'angle d'impact
- Le type de particule : Matière (eau, sable, glace), Taille, Forme (rond, anguleux...)

Les effets de l'érosion des aubes sur les moteurs d'avions sont importants : plus il y a d'érosion, plus le moteur perd de la puissance et plus il consomme de carburant. L'érosion est particulièrement visible sur leurs bords d'attaque, cela réduit leur aérodynamisme et diminuant leur durée de vie.



Figure (2.13) : Des dommages sur le bord d'un acier inoxydable (AM355) premier blisk étage du compresseur due à l'érosion de particules solides. [36]

6.3.1 Erosion dans un moteur d'avion :

L'érosion est un problème irréversible. Les dommages dus à l'érosion peuvent se produire sur différents composants du moteur et prendre de différentes formes. Les effets typiques sont :

L'aggravation de l'aubage : (changements de profil, augmentation de la rugosité,) et donc également du comportement de fonctionnement du compresseur. Cette érosion génère des augmentations de température qui par voie de conséquence élève la température au niveau des aubages de la turbine de détente.

Surchauffe dans la chambre de combustion : Elle est due à des dommages d'érosion du système d'injection en particulier causés par des résidus résultant de températures de carburant trop élevées..

Oxydation des aubes de turbine et des aubes de stator :

Résultant des dommages d'érosion d'un revêtement protecteur. [24]

6.4 Corrosion :

La majorité des problèmes de corrosion des compresseurs axiaux industriels sont en général des problèmes de corrosion aqueuse liés à la formation d'acides agressifs.

Les étages d'entrée du compresseur sont les plus sensibles aux attaques corrosives pendant le fonctionnement normal du compresseur. En raison de la présence d'eau liquide dans les premiers étages du compresseur. La présence d'eau liquide est due aux fortes aspirations de l'air d'entrée causées par les taux de compressions élevés dans les premiers étages du compresseur.

La compression accrue ramène l'eau liquide à l'état gazeux dans les derniers étages. Ces derniers étant les plus chauds et les plus secs, le potentiel de corrosion est considérablement réduit malgré la présence des mêmes composés corrosifs que dans les premiers étages du compresseur.

Un certain nombre de mesures préventives doivent être prises en considération lors de la conception, de la construction et du fonctionnement du compresseur pour éviter les dommages dus à la corrosion. Parmi ces mesures on cite:

- La sélection judicieuse des matériaux.
- Les traitements mécaniques et thermiques des matériaux utilisés.
- L'utilisation de revêtements résistants à la corrosion.
- L'élimination des composés corrosifs à l'intérieur du compresseur. [24]

7 Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons essayé de donner des généralités sur le turboréacteur et les turbocompresseurs. Tout d'abord, nous avons commencé par la présentation des différents types de compresseurs et leur principes de fonctionnement ensuite nous avons parlé sur les aubes d'un compresseur axiale, y compris de leur géométrie et les principales contraintes qui influent sur la durée de vie des aubes, à cause de leur environnement de fonctionnement tel que la température élevée, le milieu corrosif et les différentes contraintes mécaniques dues aux forces centrifuges et aux vibrations causées par le mouvement de rotation des aubes qui conduisent au fil du temps à la fatigue et le fluage de matériau.

CHAPITRE 3

CHAPITRE 3: MODELISATION MATHÉMATIQUE

1 Introduction :

Dans le domaine du CND par CF la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu permet d'élaborer un modèle mathématique qui pourra prédire la réponse de la sonde en fonction des paramètres de la cible, qui doivent être connus. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell.[17] Selon la configuration à simuler, cette résolution peut être analytique ou numérique. Le développement technologique et les systèmes Électromagnétiques qui deviennent complexes, font qu'une solution analytique est souvent insuffisante ou impossible à obtenir. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques permettant d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées, comprenant des géométries quelconques de pièces, de défauts et de capteurs, et qui consistent en une discrétisation des équations aux dérivées partielles. [12]

2 Description du problème:

Les caractéristiques géométriques du problème correspondent à une configuration classique de CND par courants de Foucault. Une sonde est placée à proximité de l'échantillon cible (partie à contrôler) qui est constitué d'un substrat de faible conductivité sur lequel est déposée une fine couche de matériau conducteur (figure 1.a).Le contrôle des caractéristiques physiques du dépôt est réalisé en mesurant les variations d'impédance.

L'aube de compresseur est considérée comme une double couche isotrope, linéaire, homogène, demi-espace amagnétique et conducteur. Il est protégé de l'oxydation et de la corrosion à haute température par des revêtements métalliques.[19]

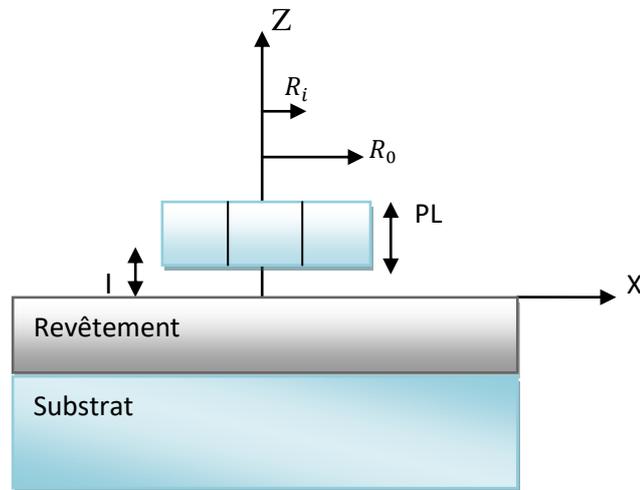


Figure (3.1) : Modèle d'aubes de compresseur, géométrie du problème.

3 Intérêt de la modélisation :

La modélisation consiste à créer une représentation mathématique d'un problème réel avec certaines hypothèses. Cette représentation permet de prédire le comportement des systèmes étudiés.

Dans le contexte du CND par CF, les outils de modélisation permettent la conception des capteurs et la prédiction de leur comportement sans réalisation effective. Ces outils ont des conséquences sur le développement d'outils de production, en permettant de réduire le coût de la phase expérimentale. La modélisation comporte deux étapes : la première est d'étudier et d'analyser problème et la deuxième est la mise en œuvre d'une solution au problème. La première étape aboutit en CND par CF à des équations aux dérivées partielles (EDP) basées sur les lois de l'électromagnétisme. [8]

4 Équations de Maxwell :

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les quatre équations de Maxwell et les lois de comportement des milieux. Les équations de Maxwell spécifient que toute variation spatiale ou temporelle d'un champ électromagnétique en un point de l'espace entraîne, ou est due à, l'existence d'un autre champ au même point. Ces équations sont donc locales et sont valables dans l'espace et dans le temps. Pour calculer du champ

Chapitre 3 : Modélisation Mathématique

électromagnétique qui règne dans un système matériel, on utilise les quatre équations fondamentales aux dérivées partielles de MAXWELL qui s'écrivent sous leurs formes la plus générale comme suit : [14]

$$\text{Rot}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell Ampère.} \quad (3.1)$$

$$\text{rot}(\vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell Faraday.} \quad (3.2)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad \text{Loi de Maxwell Gauss.} \quad (3.3)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de conservation de masse.} \quad (3.4)$$

Tel que :

\vec{E} : Champ électrique [V/m].

\vec{H} : Champ magnétique [A/m].

\vec{D} : Induction électrique [C/m²].

\vec{B} : Induction magnétique [T].

\vec{J} : Densité de courant [A/m²].

ρ : Densité volumique des charges électriques [C/m³].

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

Dans un milieu isotrope, homogène et linéaire, deux relations constitutives doivent être ajoutées:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} . \quad (3.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} . \quad (3.6)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} . \quad (3.7)$$

Où \mathbf{J} représente le courant de conduction résultant du champ électrique \mathbf{E} , μ , ε et σ représentent respectivement la perméabilité magnétique (H. m⁻¹), la permittivité électrique (F. m⁻¹) et la conductivité électrique (S. m⁻¹).

Tels que :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (3.8)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r . \quad (3.8)$$

Chapitre 3 : Modélisation Mathématique

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ est la perméabilité magnétique du vide.

μ_r : est la perméabilité relative du milieu considéré.

$\epsilon_0 = 8.8510^{-12}$ est la permittivité de vide.

ϵ_r : est la permittivité relative du milieu considéré.

$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$ Permittivité électrique du vide.

$C = 3.10^8 m/s$: Vitesse de la lumière.

Où, μ et σ peuvent être soit des scalaires, modélisant le comportement de matériaux isotrope, soit des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie. [2]

La relation entre l'induction magnétique \vec{B} et le champ magnétique \vec{H} peut être non linéaire.

Pour assurer l'unicité de la solution du système d'équations (3.1) et (3.7), il est nécessaire d'ajouter trois types de conditions: les conditions aux limites, les conditions de continuité ainsi que les jauges.

4.1 Conditions aux limites :

La résolution du système composé des équations de Maxwell et des lois de comportement admet une infinité de solutions, pour assurer l'unicité de la solution, des conditions aux limites du domaine sont imposées. [12]

Pour un domaine Ω de frontière Γ , avec \vec{n} un vecteur unitaire normal pour une variable u , il y a deux conditions:

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

4.2 Conditions de continuité :

Lors du passage d'un milieu à un autre, les champs électromagnétiques subissent des discontinuités aux interfaces et, ne sont pas différentiables. Cependant, il est possible de définir des conditions de passage des champs entre deux milieux [17]. Considérons deux milieux Ω_1 et Ω_2 séparées par une interface Σ , et ayant des

Chapitre 3 : Modélisation Mathématique

propriétés physiques différentes, Les conditions traduisant la continuité des champs à l'interface Σ sont définies par les relations suivantes :

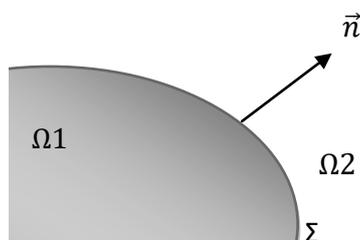


Figure (3.2) : Surface Σ séparant deux milieux Ω_1 et Ω_2 .

La discontinuité de la composante tangentielle de H.

$$\vec{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{J}_s \quad (3.10)$$

La continuité de la composante tangentielle de E.

$$\vec{n} \times (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0. \quad (3.11)$$

La continuité de la composante normale de B.

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0. \quad (3.12)$$

La discontinuité de la composante normale de D.

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \vec{\rho}_s \quad (3.13)$$

Où :

$\vec{\rho}_s$: La densité surfacique de charge.

\vec{J}_s : La densité surfacique de courant.

\vec{n} : La normale à l'interface Σ séparant les deux milieux Ω_1 et Ω_2 .

4.3 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. [2] Soient \vec{U} et \vec{W} deux champs de vecteurs, les conditions de jauge s'écrivent sous la forme suivante :

$$\operatorname{div} \vec{U} = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb.}$$

$$\operatorname{div} \vec{U} + K \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz.}$$

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \quad \text{Jauge adapté pour les éléments d'arêtes.}$$

La jauge de Coulomb est utilisée dans le cadre des régimes stationnaires, alors que la jauge de Lorentz est bien adaptée au problème de la propagation du champ électromagnétique. [32]

5 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 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$.
- 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 courant source) et une partie due au champ électrique induit, pour laquelle on gardera la notion de $\sigma \vec{E}$ qui exprime uniquement la densité des courants de Foucault. [20]
- La densité surfacique de courant entre les deux milieux est nulle ($\vec{J}_S = 0$)
- La densité volumique de charge est considérée nulle ($\rho_s = 0$).

Chapitre 3 : Modélisation Mathématique

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

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} \quad (3.14)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (3.15)$$

$$\text{div}\vec{D} = 0 \quad (3.16)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (3.17)$$

Avec les relations constitutives suivantes:

$$\vec{J} = \vec{J}_S + \sigma\vec{E} \quad (3.18)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (3.19)$$

L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ($\vec{B}_r=0$) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanent ou de matériau ferromagnétique.[20]

6 Formulations magnétodynamiques :

Une association des relations constitutives, les relations de passage, les conditions aux limites et les conditions de jauge sont à la base de formulation qui permet la mise en œuvre d'une solution outil éléments finis 3D. il faut donc, avoir une formulation aux dérivées partielles qui régit notre système.. En générale il est plus fréquent, dans les travaux CND-CF, d'avoir recours à l'utilisation au champ électrique et magnétique en fonction de potentiels. Car la solution converge mieux que si les inconnues étaient les champs (E, H). [20]

Deux familles de formulations peuvent être mises en évidence.

- Formulations basées sur le champ électrique ($\mathbf{E}, \mathbf{A-V}$), formulation en potentiel vecteur magnétique A .
- Formulation basées sur le champ magnétique ($\mathbf{H-}\Phi, \mathbf{T-}\Omega$) n, comprend des formulations en H ou la formulation en J .

6.1 Formulations basées sur le champ électrique E :

La formulation en champ électrique s'obtient en faisant la dérivée de l'équation Maxwell-Ampère (3.1) par rapport au temps, tout en supposant que la perméabilité est invariante par rapport au temps (cas des matériaux linéaires), la formulation s'écrit :

$$\operatorname{rot}\left[\frac{1}{\mu} (\operatorname{rot}\vec{E})\right] + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0} \quad (3.20)$$

6.2 Formulation en H :

La combinaison des équations (3.14) et (3.18) conduit directement à l'équation à résoudre:

$$\operatorname{rot}\left[\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\vec{H})\right] + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \vec{0} \quad (3.21)$$

Aucune condition de jauge n'est nécessaire pour assurer l'unicité de champ magnétique lorsque les conditions aux limites sont adéquates.

6.3 Formulation $\vec{A} - V$:

En reprenant l'équation (3.4), on peut montrer que l'induction magnétique \vec{B} peut être considérée comme le rotationnel d'un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que : [17]

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \quad (3.22)$$

De même en remplaçant (3.22) dans (3.2) on obtient :

$$\operatorname{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{0} \quad (3.23)$$

A partir de la relation précédente, nous pouvons définir un potentiel scalaire électrique V donné par la relation :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\operatorname{grad} V \quad \vec{E} = -\operatorname{grad} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (3.24)$$

La combinaison des équations (3.24) et (3.5) nous donne :

$$\vec{J} = \sigma \left(\operatorname{grad} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (3.25)$$

L'équation magnétodynamique en termes de potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire électrique s'écrit :

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} \right) + \sigma \left(\operatorname{grad} V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_s \quad (3.26)$$

Chapitre 3 : Modélisation Mathématique

En utilisant cette la relation :

$$\text{rot}(\text{rot } A) = -\text{div}(\text{grad } A) + \text{grad}(\text{div } A) \quad (3.27)$$

L'équation (3. 26) devient :

$$-\text{div}(\text{grad } A) + \text{grad}(\text{div } A) + \sigma(\text{grad}\vec{V} + \frac{\partial\vec{A}}{\partial t}) = \vec{J}_s \quad (3.28)$$

pour assurer L'unicité du potentiel On utilise la condition de **Juge de Coulomb** ($\text{div } A=0$), et la relation ($\text{grad } V = 0$) (il n'ya aucun gradient d'un potentiel scalaire dans l'équation (3.28) s'il n'y a aucune charge statique initiale dans le milieu).

L'équation (3.28) est écrite comme :

$$-\text{div}(\text{grad } A) + \mu\sigma\frac{\partial}{\partial t}(A) = \mu J \text{ ou } \nabla^2 A = \mu\sigma\frac{\partial}{\partial t}(A) - \mu J \quad (3.29)$$

Compte-tenu de la complexité des calculs dans le cas 3D, le problème de courant de Foucault peut être décrit mathématiquement par l'équation suivante en termes de potentiel vecteur magnétique :

$$\nabla^2 A + K^2 A = -Mj \quad (3.30)$$

Avec $K^2 = -\omega \mu (j\sigma + \omega\epsilon)$, ω est la fréquence angulaire du courant d'excitation.

7 Détermination de la réponse de la bobine :

L'objectif principal de la modélisation CND par CF est d'identifier une réponse bobine. (Sachant que les matériaux étudiés sont supposés linéaires et isotropes).

La bobine est caractérisée par deux grandeurs : la composante résistive R (partie réel) qui collecte les pertes causées par les courants de Foucault dus à la pénétration du champ dans La pièce à contrôler et la perte interne de la bobine d'excitation et du composant X (pièce Imaginaire) qui représente l'interaction de la bobine d'excitation, qui est liée typologiquement Les lignes de champ magnétique émises par la bobine.

En considérant une bobine parcourue par un courant I sinusoïdal, de pulsation ω son impédance Z peut être déterminée par plusieurs expressions ont été formulées et développées dans le domaine de contrôle non destructif par courants de Foucault. Parmi elles citons:

7.1 Calcul de l'énergie magnétique et des pertes de Joule :

L'impédance Z peut être déterminée en calculant l'énergie magnétique moyenne (W) emmagasinée dans tout l'espace et des pertes de **Joule** (P_j) dans les milieux conducteurs définies par les relations suivantes :

$$P_j = I^2 \text{Re}(Z) \quad (3.31)$$

$$W = I^2 \frac{\text{Im}(z)}{2\omega} \quad (3.32)$$

$$Z = \text{Re}(Z) + j \text{Im}(Z) \quad (3.33)$$

$$Z = (1/I^2) (P_j + j 2 W \omega) \quad (3.34)$$

$$Z = R + j \omega L \quad (3.35)$$

La résistance de la bobine est donnée par: $R = P_j / I^2$

L'inductance de la bobine est calculée par: $L = 2 W / I^2$

La réactance de la bobine est donnée par : $X = L \omega$.

$$Z = R + j X \quad (3.36)$$

7.2 Calcul direct :

L'impédance d'une seule spire de bobine (sonde) de rayon r transportant un courant alternatif I_s est donnée par:

$$Z = V / I \quad (3.37)$$

La tension instantanée V , sur les bornes de la bobine exprimée en termes de l'intensité de champ électrique E , s'écrit :

$$V = \int_C E \partial l \quad (3.38)$$

Chapitre 3 : Modélisation Mathématique

En remplaçant le terme $\frac{\partial}{\partial t}$ de l'équation (3.24), par $j\omega$ en régime harmonique, et la tension induite est indépendante du potentiel scalaire ($\text{grad } V = 0$), donc l'équation (3.38) devient :

$$V = j\omega \int_C A \partial l \quad (3.39)$$

L'équation (3.37) devient :

$$Z = \frac{j\omega}{I} \int_C A \partial l \quad (3.40)$$

Pour une bobine d'une seule spire de rayon r , Nous avons :

$$Z = j \frac{2 \pi r A \omega}{I} \quad (3.41)$$

L'impédance de la bobine est calculée de façon approximative en utilisant la méthode des éléments finis, en considérant que les dimensions des éléments sont petites et que le potentiel vecteur magnétique de toutes les spires de l'élément (i) peut être approximé par la valeur centrale A_c , et similaire les rayons de toutes les spires de l'élément (i), peuvent être approchés par la valeur centrale r_c .

$$Z = j \frac{2 \pi r_c A_c \omega}{I} \quad (3.42)$$

Les courants de Foucault sont obtenus par un courant I donné. Le contrôle s'effectue par la mesure d'impédance de la bobine. Pour l'exploitation on introduit traditionnellement la notion d'impédance normalisée.

Cette impédance normalisée Z_n se déduit de l'impédance de la bobine Z à l'aide de l'expression [32] :

$$Z_0 = R_0 + j X_0 \quad (3.43)$$

Z_0 : L'impédance à vide de la bobine (impédance sans cible).

À la présence de la cible (pièce testée), l'impédance devient:

$$Z = R_n + j X_n \quad (3.44)$$

$$R_n = \text{Re}(Z) = \frac{(R - R_0)}{X_0} = \frac{R - R_0}{L_0 \omega} \quad (3.45)$$

$$X_n = \text{Im}(Z) = \frac{X}{X_0} = \frac{L\omega}{L_0\omega} \quad (3.46)$$

Avec :

R_n : la résistance normalisée.

X_n : la réactance normalisée.

8 Méthodes de résolution des EDP :

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles. Nous citons les méthodes analytiques, semi-analytiques et les méthodes numériques.

8.1 Méthodes analytiques :

La solution analytique dépend du calcul direct d'une solution exacte des équations différences. Les premiers travaux s'appuyaient sur les méthodes de résolution analytiques des équations issues des modèles unidimensionnelles. Mais cette méthode devient impraticable si l'on étudier de problèmes présentant des formes complexes (bidimensionnels...), d'où la naissance des méthodes numériques.

8.2 Méthodes semi-analytiques :

Ce sont des méthodes mixtes, qui sont une combinaison de méthodes analytiques couplées à des méthodes numériques. Ces méthodes ne sont appliquées que pour résoudre certains types de problèmes. Cette approche nous permet d'obtenir des expressions analytiques faciles à résoudre et de réduire le temps de simulation tout en ayant des résultats assez proches de la réalité. [2], [12]

8.3 Méthodes numériques :

Dans la plupart des cas, lorsque la résolution des équation de Maxwell est difficile ou impossible, des méthodes numériques doivent être utilisées.

Ces derniers permettent d'obtenir une solution proche de la solution exacte du problème étudié. , l'utilisation des méthodes numériques dans l'étude des configurations sonde-pièce les plus variées se généralise de plus en plus, elles sont d'autant plus utilisées que la configuration à traiter est complexe (géométrie, hétérogénéité, non linéarité).

Chapitre 3 : Modélisation Mathématique

Les principales méthodes numériques de résolutions des équations aux dérivées partielles sont: la méthode des intégrales de frontières, la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis, la méthode des intégrales de volumes et la méthode des éléments finis. Nous devons cependant signaler que ces méthodes exigent des temps de calcul relativement longs et des espaces mémoire importants, donc des outils informatiques développés. [3] [12]

8.3.1 La méthode des intégrales de volumes (MIV) :

La méthode des intégrales de volumes repose sur la résolution des équations intégrales. Une fois les fonctions de Green correspondant à la géométrie étudiée obtenues, les champs électrique ou 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. [2]

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. [12]

8.3.2 Méthode des intégrales de surface (MIS) :

Avec cette méthode, le défaut est supposé de conductivité nulle avec une très petite ouverture. Il est pris en compte comme une surface empêchant le courant de passer.

Cette méthode se révèle bien adaptée pour ce type de problème. Cependant, à cause de la définition des dyades de Green, elle reste limitée du point de vue des configurations traitables avec cette méthode. [8]

8.3.3 Méthode des intégrales de frontières (MIF) :

Cette méthode consiste à exprimer les intégrales volumiques (utilisées avec la méthode intégrales de volume) en intégrales aux frontières surfaciques entre chaque sous domaines homogènes. En effet, En régime linéaire et pour une pièce isotrope homogène par morceaux, le champ électromagnétique peut être exprimé en fonction des densités de courants électrique et magnétique sur ces surfaces. Cette méthode utilise des dyades de Green qui sont indépendantes de la géométrie. Elle permet donc de traiter des géométries compliquées par rapport à celle basée sur les intégrales de volume. Cette approche peut être intéressante pour certaines configurations mais est

Chapitre 3 : Modélisation Mathématique

restreinte à l'étude des milieux simples. Par ailleurs elle entraîne la résolution d'un système linéaire plein dont l'assemblage est complexe (évaluation d'intégrales faiblement singulières).

L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de prendre en considération la saturation, la nécessité d'un espace mémoire et d'un temps de calcul importants, car les matrices issues de cette méthode sont de rang élevé.

La méthode des intégrales de frontières est utilisée généralement en magnétostatique ou bien elle est couplée avec la méthode des éléments finis pour calculer des champs électromagnétiques dans les milieux linéaires et non conducteurs. [8], [9]

8.3.4 Méthode des différences finies (MDF) :

C'est une méthode numérique simple à mettre en œuvre, est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles,[8]Elle consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mailles rectangulaires. La méthode est basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par un opérateur aux 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. [2]

8.3.5 Méthode des volumes finis (MVF) :

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation utilisée en particulier en mécanique des fluides. Elle a connu aussi un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie : transfert thermique, électromagnétisme ...etc. Ultérieurement, elle a été utilisée pour résoudre les équations elliptiques et paraboliques. La méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude Ω en volumes élémentaires (tétraèdres, hexaèdres, prismes...etc.) de telle manière que chaque volume entoure un nœud. Dans cette méthode les inconnues sont les valeurs moyennes de la solution sur chaque cellule de contrôle. La méthode consiste à projeter et résoudre le problème sur chaque cellule. Méthode des volumes finis permet de traiter des géométries complexes, ce qui constitue un avantage par rapport à la méthode des différences finis. [8] [2] [12].

8.3.6 : La méthode des éléments finis (MEF) :

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions.

Elle consiste à discrétiser tout le domaine d'étude en des éléments finis (tétraèdres, prismes....) et à utiliser une approximation simple de l'inconnue recherchée pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques (système matriciel). Cependant elle ne s'applique pas directement aux équations aux dérivées partielles mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre. Les méthodes couramment utilisées pour obtenir la formulation intégrale sont la mise sous forme variationnelle et la méthode des résidus pondérés.

Cette méthode est très couramment employée lors de l'étude des systèmes électromagnétiques complexes. Elle permet d'obtenir des résultats de calcul avec une bonne précision et d'étudier de façon précise la répartition interne du flux magnétique. [8] [3]

8.3.6.1 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: [12] [2]

$$F(A) = \int_{\Omega} l d\Omega \quad (3.47)$$

$$L(A) = (w_c - w_p) \quad (3.48)$$

Avec :

Ω : Domaine d'étude.

L : la fonction de Lagrange.

w_c : Energie de type cinétique.

w_p : Energie de type potentielle.

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

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

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_n} = 0 \quad (3.49)$$

Ou :

- n : nombre de nœud dans le domaine d'étude.
- A : inconnue au nœud n du domaine.

8.3.6.2 Formulation résidus pondérés:

La méthode des résidus pondérés présente un intérêt particulier par rapport la formulation variationnelle car elle ne nécessite pas la connaissance au préalable de la fonctionnelle de l'énergie. Son principe consiste à chercher la solution approchée du problème partant directement des EDP, ce qui va engendrer une erreur appelée résidus ζ : [2][12]

$$\zeta = L_p (A) - f_v \quad (3.50)$$

ζ : représente le résidu de l'approximation.

L_p : Opérateur différentiel.

f_v : Fonction définie sur le domaine d'étude Ω .

A: L'inconnue du problème.

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

$$\int_{\Omega} R_i \phi_i \cdot \partial \Omega \quad (3.51)$$

ϕ_i : Fonction de pondération ou de projection.

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

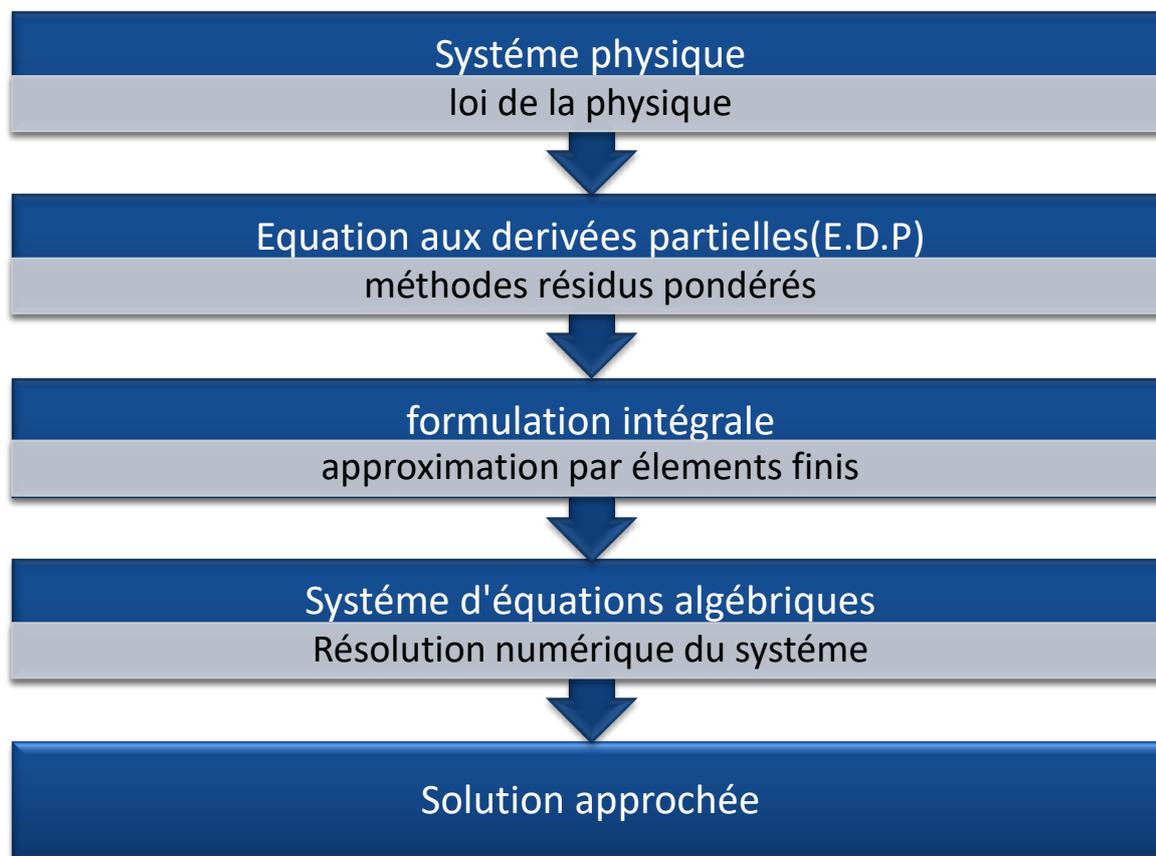


Figure (3.3) : Les étapes de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis.

9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons explorés concepts de base de l'électromagnétisme et les équations de Maxwell, ainsi que leurs formulations en champ électromagnétique, Ensuite nous avons présentées des expressions de calcul d'impédance qui ont été formulées et développées dans le domaine du contrôle non destructif par courants de Foucault. Enfin nous avons citées les différentes méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles.

CHAPITRE 4

CHAPITRE4: APPLICATION ET SIMULATION

1 Introduction :

Le CND par CF est une technique de contrôle électromagnétique des matériaux conducteurs. Il est largement utilisé dans l'industrie aéronautique pour inspecter des pièces métalliques, détecter les fissures, la corrosion et d'autres discontinuités pendant la fabrication, ainsi que pendant le service.

La simulation consiste à reproduire le fonctionnement d'un système par le moyen de calcul numérique. Les outils de simulation permettent la conception des éléments (pièces, capteurs,..) et la prédiction de leur comportement sans réalisation effective afin de concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix de matériaux, etc.) tout en limitant le nombre de prototypes à réaliser. [32]

Dans ce chapitre nous avons présenté deux parties : une partie expérimentale traite diverses procédures de contrôle non destructif (ressuage et CF) pour contrôler l'aube de compresseur et l'autre partie contient des simulations qui sont exécutées par le code développé par Mr BENNOUD Salim pour étudier l'influence de variation des paramètres sur la réponse des sondes.

2 Description du modèle :

Dans cette étude, nous nous intéressons aux ailettes du moteur équipées un avion d'Air Algérie, qui sont les ailettes du compresseur BP du réacteur CF6-80C2.

Nous avons étudié la structure à double couche d'une aube de compresseur, la couche inférieure représente le substrat de la pièce et la supérieure est une couche de protection (revêtement) contre le milieu de fonctionnement, la figure (3.1) montre la structure étudiée.



Figure(4.1) : Aube de deuxième étage de compresseur.

3 Propriétés et caractéristique :

Le tableau ci-dessous résume les différentes propriétés de la structure de l'aube :

Tableau (4. 1) : Les caractéristiques électromagnétiques de la pièce étudiée.

	Matériau	Conductivité électrique σ (s/m)	Perméabilité magnétique relative μ
Revêtement	CuNiIn	2.4396×10^6	1
Substrat	Titan Ti-6Al-4V	5.82×10^5	1

4 Applications :

4.1 Contrôle Non Destructifs (CND) :

Pour rechercher des défauts, il existe plusieurs méthodes, chacune présente des avantages, des inconvénients et un domaine d'application que nous avons vu précédemment dans le premier chapitre.

Le planning des activités et la réalisation de l'étude s'effectuent au niveau d'atelier NDT de la base de maintenance Air Algérie et des laboratoires partenaires (Centre de recherche et des technologies industrielles – Chraga).

Au court de ce travail, nous avons utilisées trois approches expérimentales pour contrôler notre pièce. Il s'agit de l'examen visuel, le ressuage et le contrôle par CF.

4.1.1 Inspection sur table :

L'inspection visuelle permet une interprétation subjective des observations.

Cette inspection consiste à examiner visuellement la pièce à l'aide d'une loupe sous une Lumière Blanche.

Cette inspection ne révèle aucune anomalie.

4.1.2 Contrôle par Ressuage :

Cette technique est principalement utilisée pour contrôler les aubes. Il permet la détection des fissures de fatigue thermique et de corrosion sur les pièces.

Les étapes :

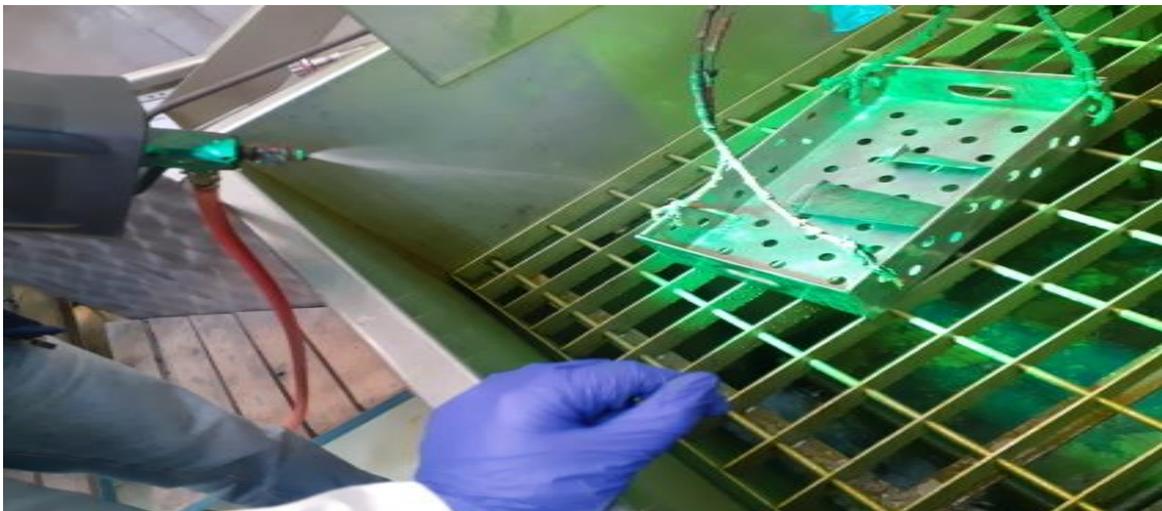
- Application de pénétrant fluorescent **RC77** sur les aubes par immersion dans une température ambiante (pièce et pénétrant) entre 10° et 52° pour une durée de 15 min d'immersion suivie de 15 min d'égouttage.
- Elimination de l'excès de pénétrant par rinçage avec un pistolet à eau ($P_{eau} \leq 2 \text{ bar}, 10^\circ \geq T_{eau} \leq 38^\circ$) sous lumière **UV** pour une durée la plus courte possible.
- Application de l'émulsifiant **ER83C** pour une durée inférieure à 2 min.
- Rinçage des pièces sous une lumière **UV** sans dépasser 3 min.
- Séchage dans un four à air pulsée.

Chapitre 4 : Application et Simulation

- Application de révélateur à poudre **D90G** pour une durée minimale de 10 min avec vérification que la surface des pièces est recouverte de révélateur.
- Inspection des pièces sous une lumière **UV**.



Figure(4.2) : Immersion des aubes dans un pénétrant fluorescent.



Figure(4.3) : Rinçage de l'excès de pénétrant RC77.

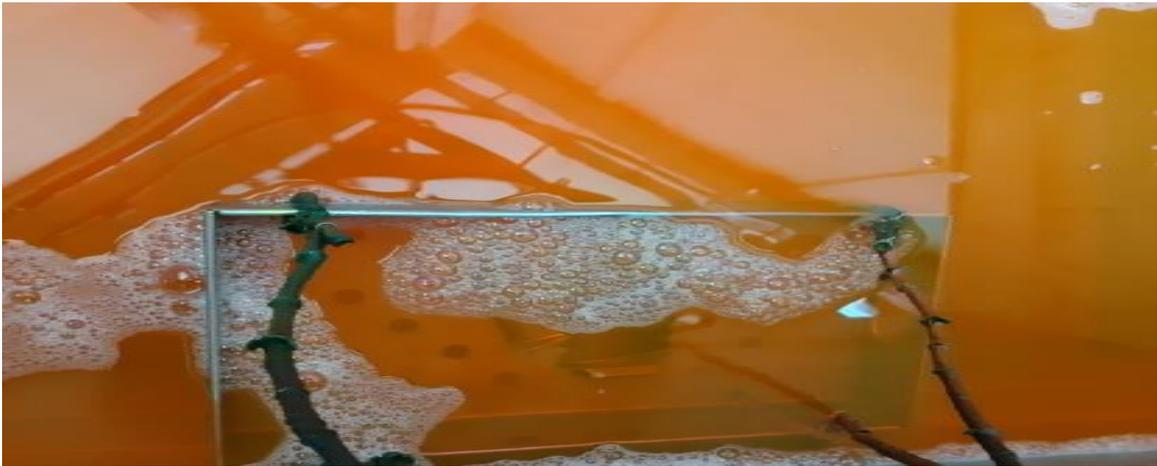


Figure (4.4) : Immersion des aubes dans l'émulsifiant ER83C.

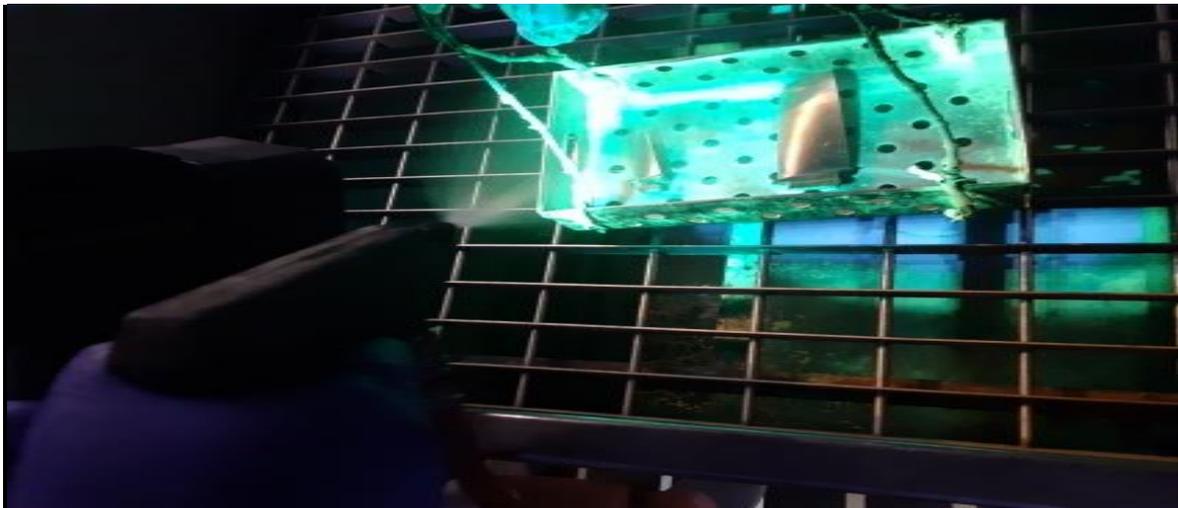


Figure (4.5) : Rinçage de l'excès de l'émulsifiant ER83C.



Figure (4.6) : Séchage dans un four.



Figure (4.7) : Application de révélateur.

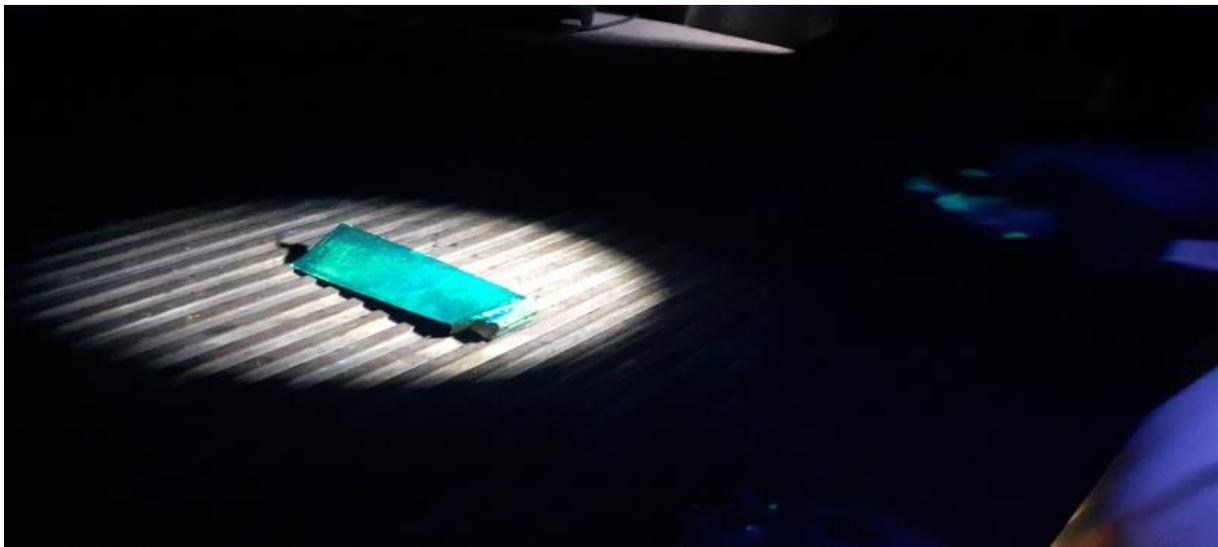


Figure (4.8) : Inspection sous lumière UV.

NB : Selon l'inspection visuelle et de pénétration par ressuage, il n'y a aucun changement dans la structure de surface, et donc l'absence totale des traces d'érosion et de corrosion.

4.1.3 Contrôle par CF :

La complexité des applications des CF sur certaines géométries nécessite des capteurs adéquats. C'est pourquoi les ingénieurs contribuent à la conception de nouveaux modèles de capteurs tels que les capteurs multiéléments.

4.1.3.1 Conception de la sonde :

Pour la conception de notre sonde nous avons utilisé :

- Une ferrite de diamètre 5mm et une hauteur de 20mm.
- Un fil de cuivre de diamètre 0.02 mm.
- Un câble électrique.
- Appareil de soudage.

Nous avons réalisées une sonde absolue de 200 spires.

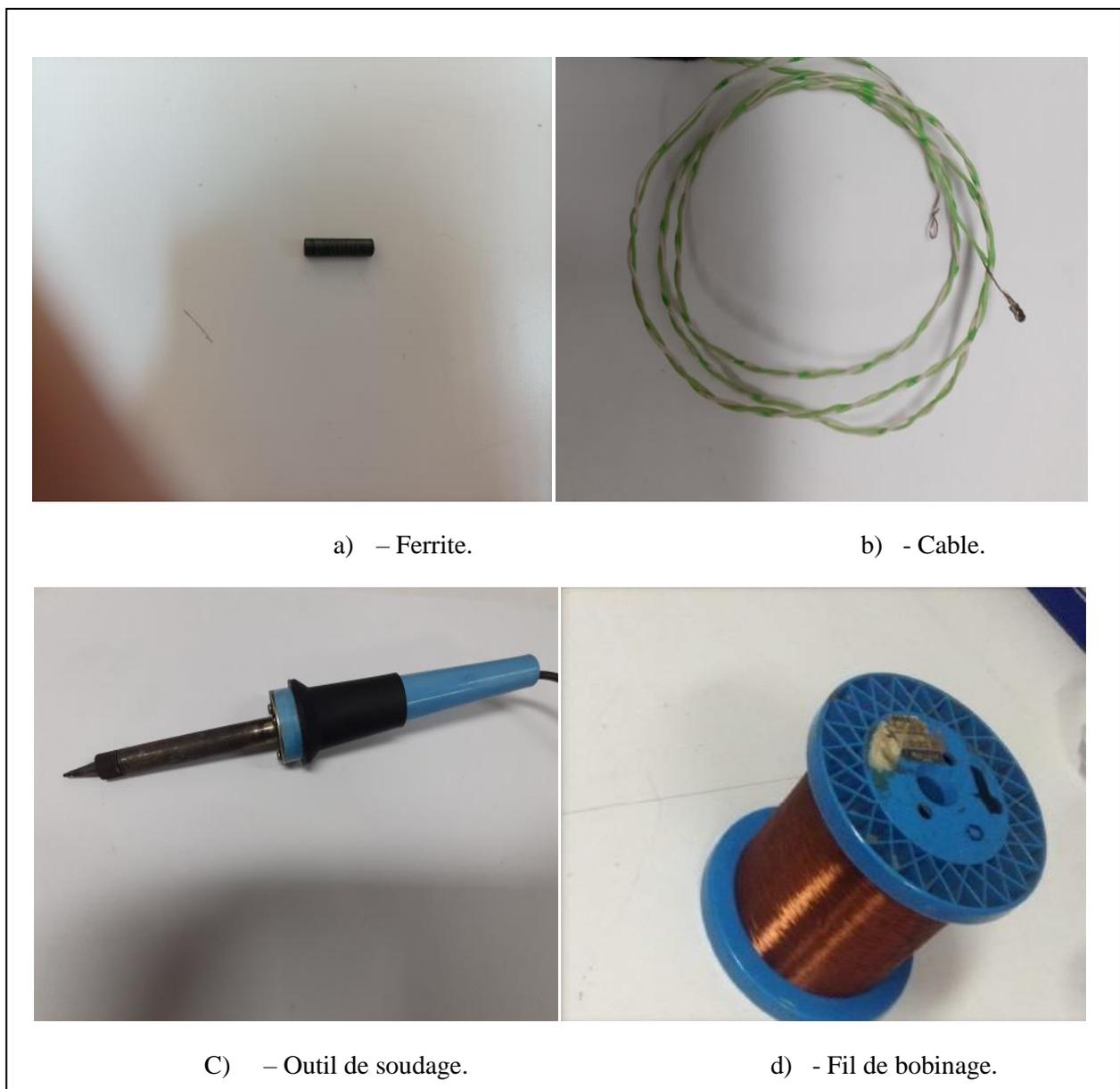


Figure (4.9) : Matériels utilisés à la conception de sonde.

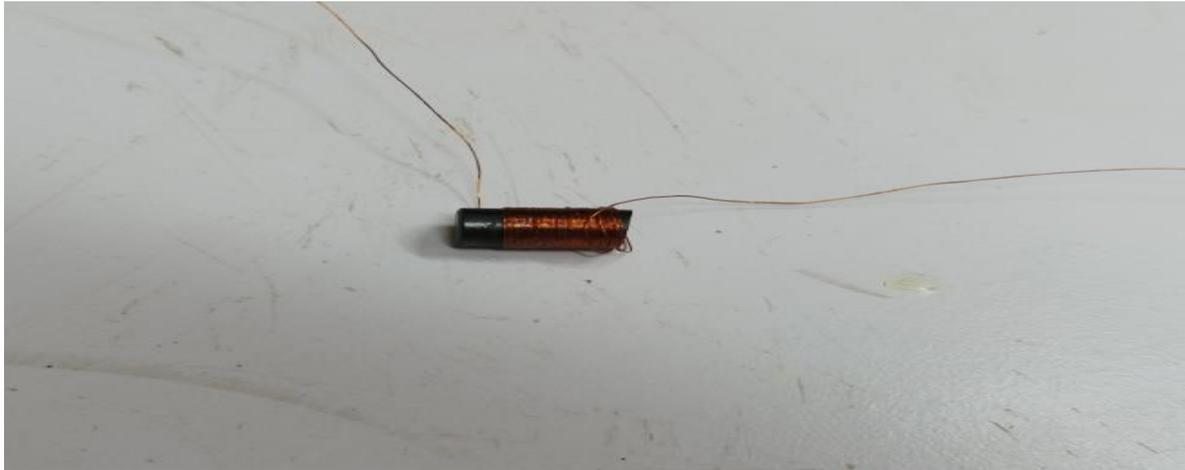


Figure (4.10) : Les étapes de fabrication de sonde.

4.1.3.2 Procédure utilisé:

On Connecte les bornes du sonde avec l'appareil de mesure par le Hpagilent LCR mètre. On mesure les valeurs de la résistance et l'inductance à vide de la sonde puis on les mesures à la surface de l'échantillon, les résultats sont enregistrés sous ordinateur par le programme Hp4284A.EXE.

4.1.3.3 Description de l'appareil de mesure :

Hpagilent LCR mètre:

Le 4284A LCR mètre est un appareil utilisé pour caractériser et mesurer les paramètres. La large plage de fréquences de test comprise entre 20Hz et 1MHz et les performances du super signal de test 4284A permettent de tester les composants correspondant aux normes de test les plus couramment utilisées. [5]



Figure (4.11) : L'appareil hpagilent LCR mètre.

4.1.3.4 Test de pièce saine :

Nous avons fait la mesure d'impédance pour quatre points d'épaisseurs différentes et un intervalle de fréquences de 100hz -325khz, on obtient les résultats suivantes.

Chapitre 4 : Application et Simulation

Tableau (4.2) : Epaisseur de positions testées.

Point	A1	A2	A3	A4
Epaisseur (mm)	6.47	4.24	1.33	6.24

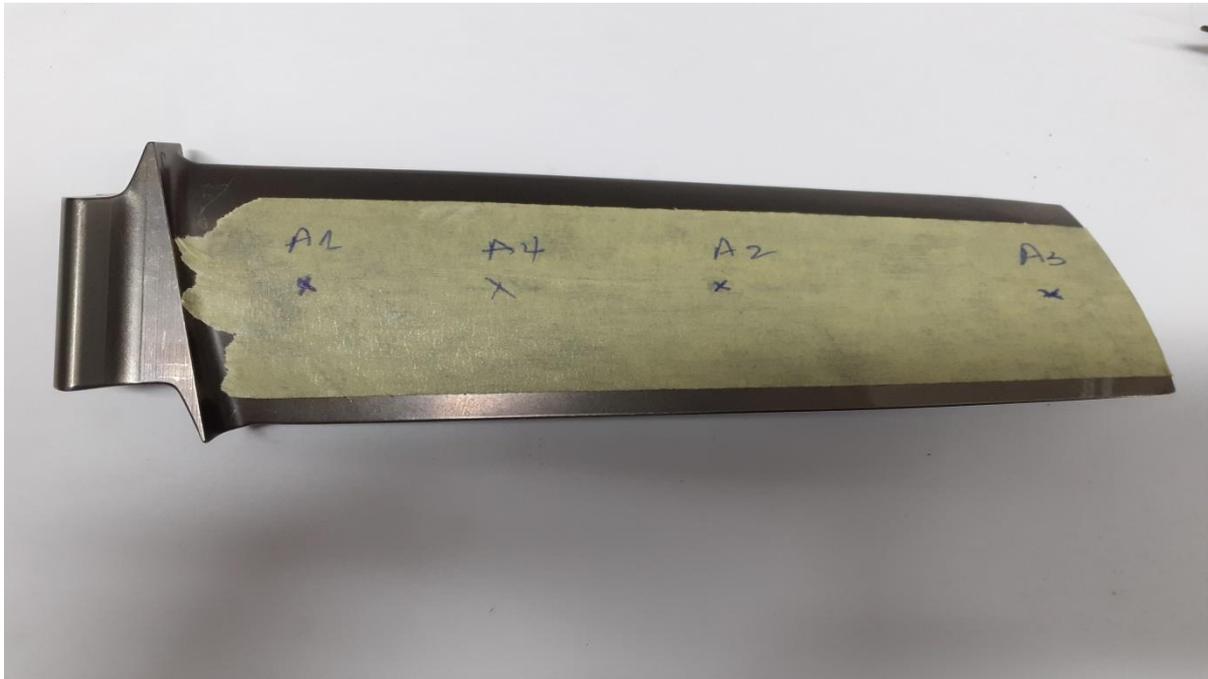


Figure (4.12) : Les différentes positions à contrôler.

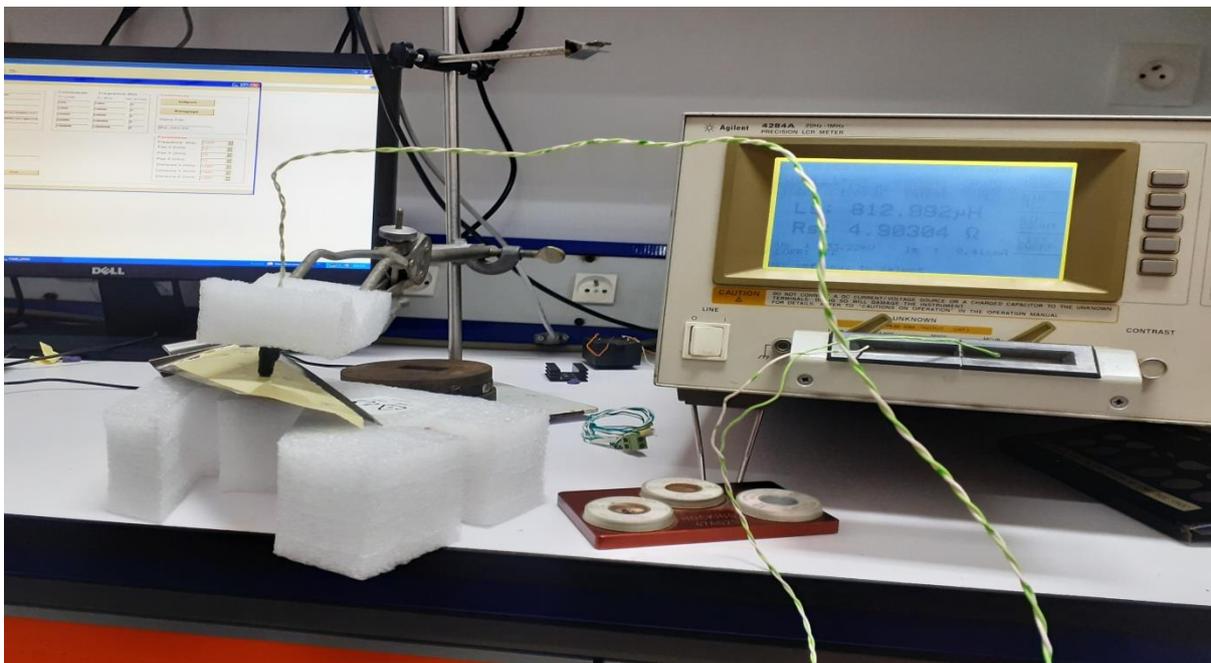


Figure (4.13) : Application de CF sur l'aube.

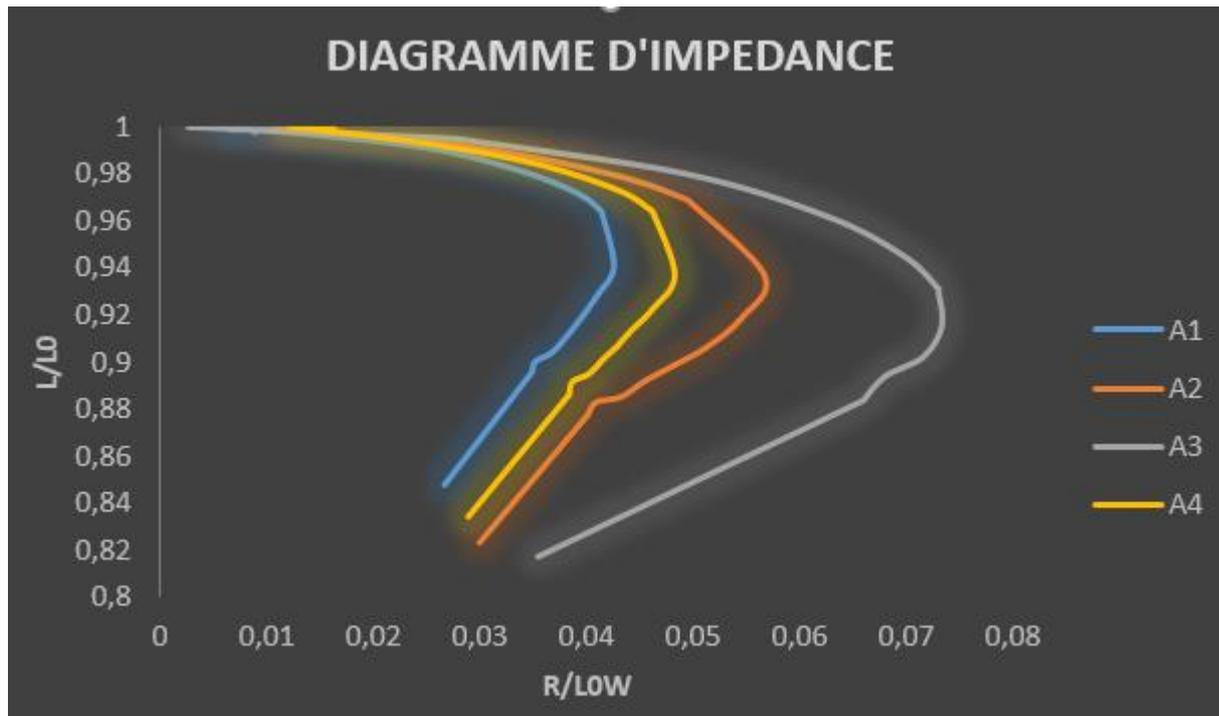


Figure (4.14) : Diagramme d'impédance pour différents épaisseurs.

Une pièce saine a été testée sur une marge de fréquence (100Hz – 300kHz) pour déterminer l'allure de la courbe d'impédance et ces variations pour différentes positions afin de déterminer l'effet de l'épaisseur de substrat.

L'analyse des diagrammes d'impédance montre qu'une augmentation d'épaisseur entraîne une diminution d'impédance.

Nous constatons pour les basses fréquences la partie imaginaire (L/L_0) est quasiment constante alors qu'aux hautes fréquences nous remarquons une augmentation de partie imaginaire (réactance L/L_0) ainsi que la partie réel (résistance $R-R_0/L_0\omega$) et donc une augmentation de l'impédance.

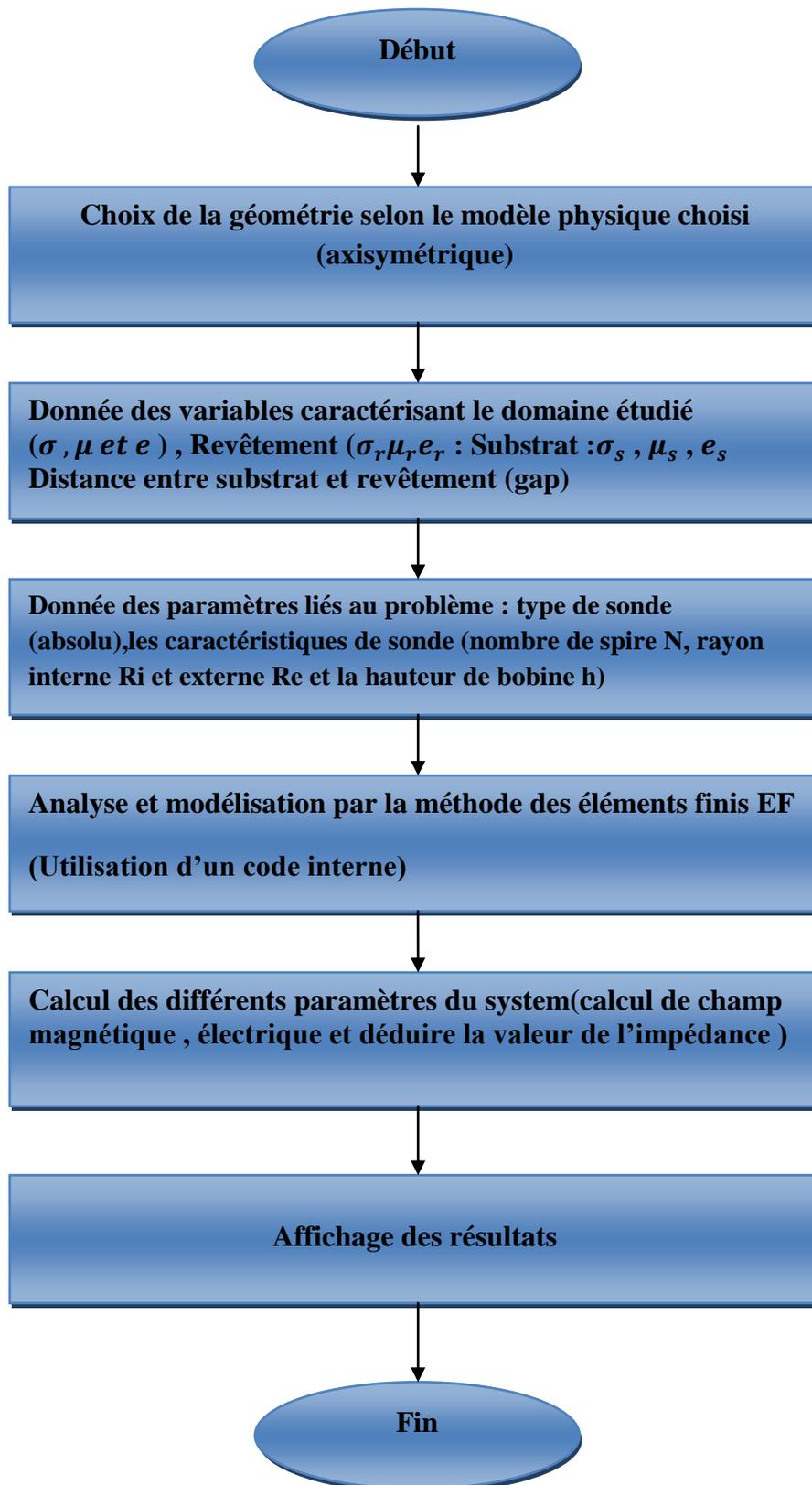
4.2 Simulations :

La simulation numérique, après la validation semble être un outil adéquat pour la conception et l'optimisation des bobines. Une étude donnant la variation de l'impédance normalisée de la bobine en fonction de ses principaux paramètres peut être effectuée. Les résultats obtenus permettent la caractérisation de la bobine étudiée. Le principe est basé sur l'observation des variations d'impédance. Cette impédance est fonction des facteurs suivants : la conductivité électrique, la perméabilité magnétique du matériau, la géométrie de la pièce, la distribution des courants induits (courants de Foucault) dans la pièce. [30]

4.2.1 Validation :

Dans cette étude, un code interne pour résoudre les problèmes électromagnétiques en employant la méthode des éléments finis (le code a été développé et validé par les travaux de Mr. BENNOUD Salim [30]). Le code de calcul est basé sur la discrétisation des équations de Maxwell en mode harmonique par la méthode des éléments finis basée sur les formulations en potentielles combinées.

4.2.2 Organigramme de calcul :



4.2.3 Etude d'une configuration sans défauts :

La configuration étudiée « sonde-pièce » est constituée d'une bobine absolue à vide (sans noyau avec un nombre de spires $N = 200$, de rayon externe $Re = 2.4 \text{ mm}$ et interne $Ri = 2 \text{ mm}$, et de hauteur $h = 17 \text{ mm}$. La distance bobine-pièce (lift-off) est de 0.2 mm . Cette sonde est placée au-dessus d'une aube conductrice de deux couches (revêtement + substrat), la conductivité électrique de revêtement $\sigma = 2.4396 \text{ MS/m}$ et d'épaisseur $e = 0.3 \text{ mm}$, la conductivité électrique de substrat $\sigma = 5.82 \text{ MS/m}$ et d'épaisseur $e = 1.2 \text{ mm}$. La perméabilité relative de deux couches $\mu = 1$. La fréquence d'excitation est de $10 - 300 \text{ KHz}$ et un courant de 10 mA .

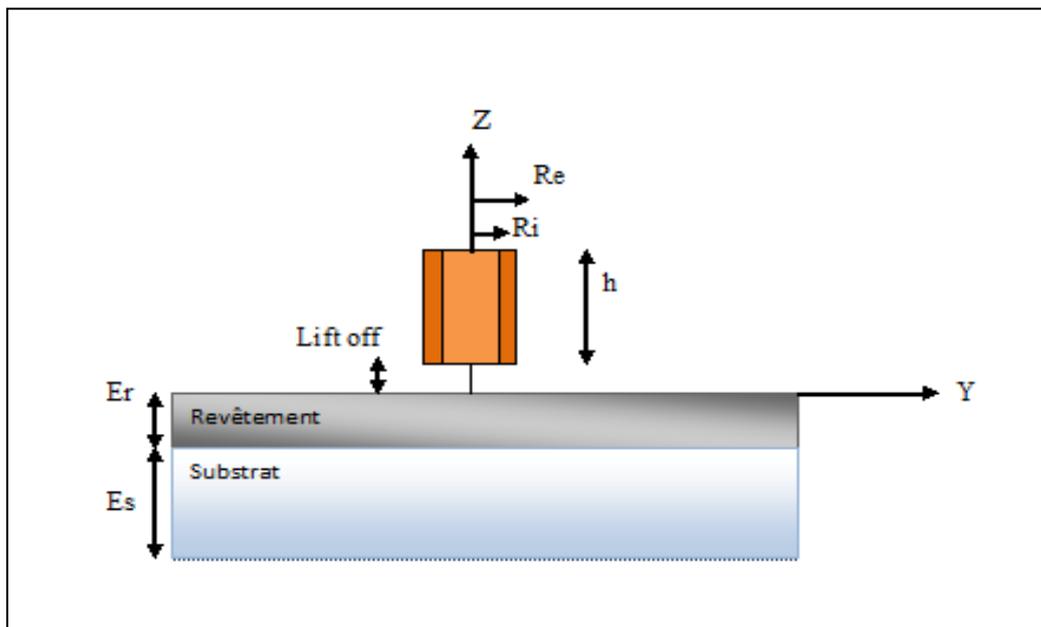


Figure (4.15) : Configuration bobine-pièce avec défaut.

4.2.3.1 Influence de l'épaisseur du substrat :

La figure (4.16) donne l'évolution d'impédance du capteur en fonction de la position pour une épaisseur de substrat variant de 0.8 à 1.2 mm [$E1=0.8$, $E2= 1$, $E3=1.2$], les autres paramètres étant constants avec une fréquence d'excitation de 10 kHz .

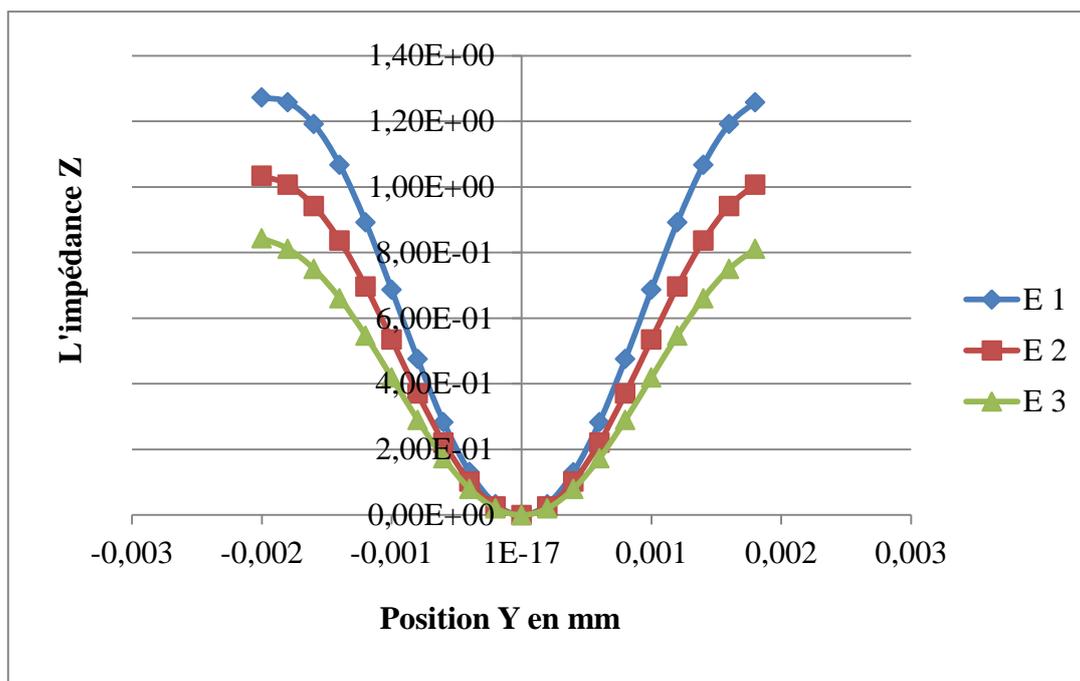


Figure (4.16) : Variation de l'impédance pour différents d'épaisseur de substrat.

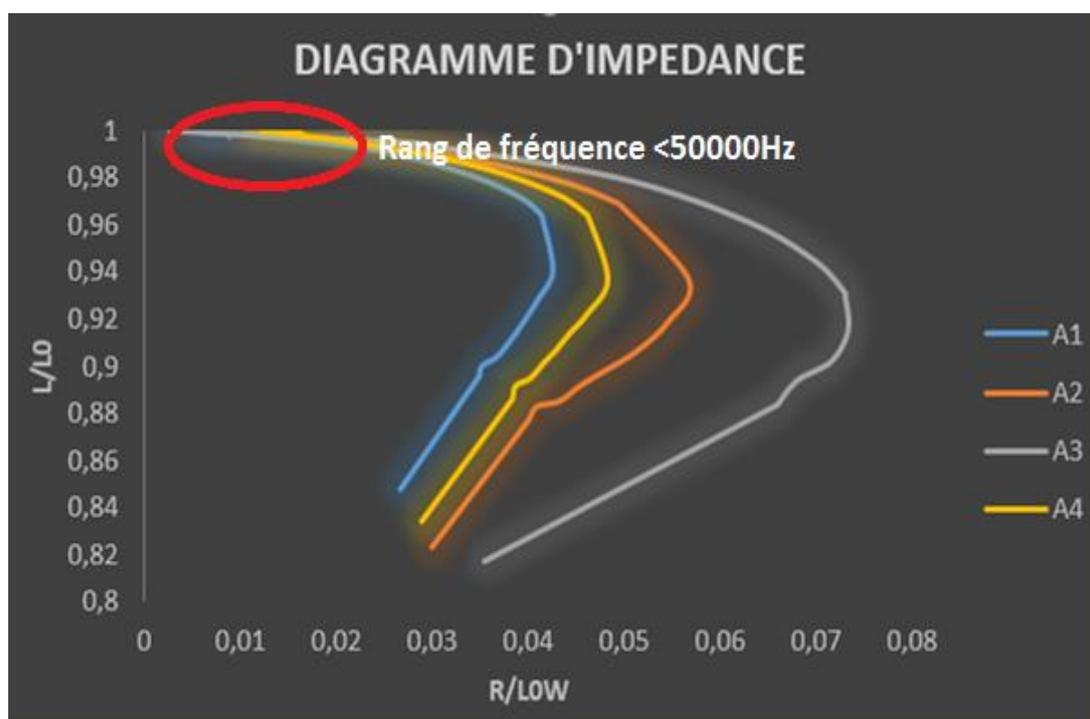


Figure (4.17) : La gamme de fréquence inferieur à 50kHz.

Chapitre 4 : Application et Simulation

Une augmentation d'épaisseur entraîne une diminution d'impédance, certaines zones ne nous donnent pas des informations suffisantes sur l'évolution de l'impédance due à la fréquence choisie ce qui est montrée expérimentalement dans la gamme de fréquence inférieure à 50kHz. Pour cela nous avons fixé l'évolution d'impédance sur la position « 0 » pour les trois valeurs d'épaisseurs, la figure (4.18) présente les résultats obtenus.

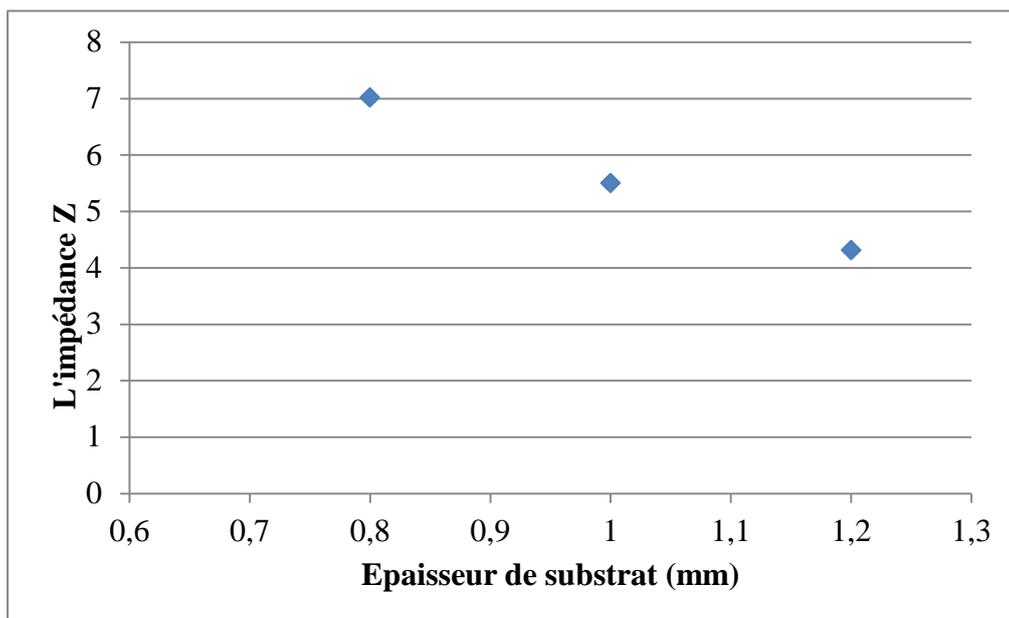


Figure (4. 18) : L'évolution d'impédance en position « 0 » pour différents épaisseurs.

4.2.3.2 Influence de fréquence :

La figure (4.19) représente la variation de l'impédance en fonction de la position pour différentes valeurs de la fréquence d'excitation (50khz, 125khz, 200 et 300 kHz).

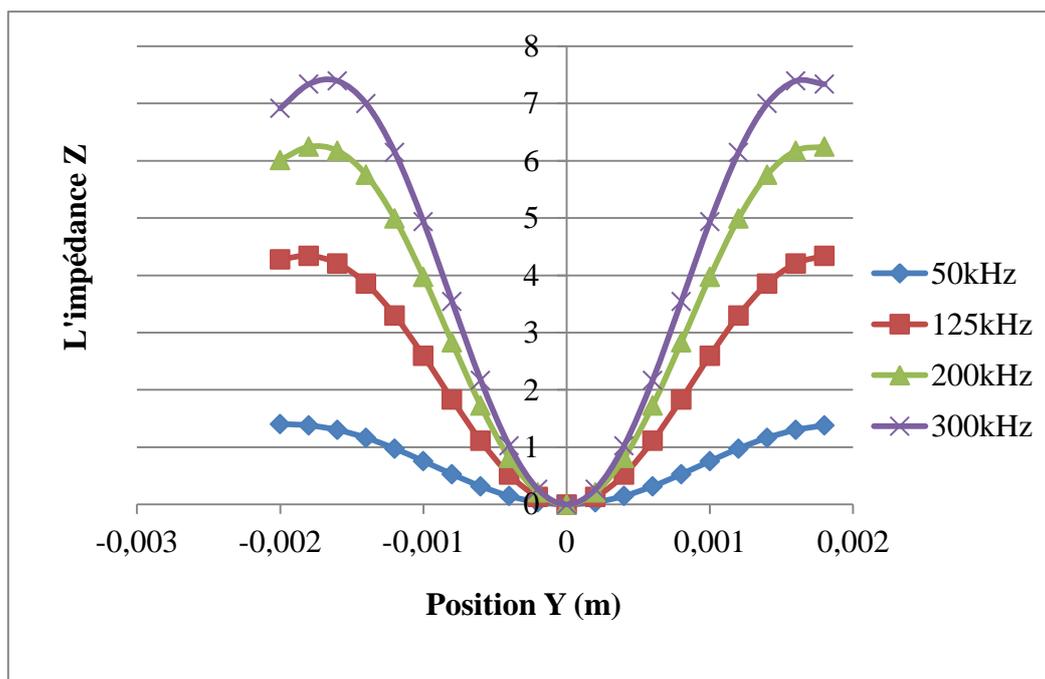


Figure (4.19) : Variation de l'impédance pour différentes fréquences d'excitation.

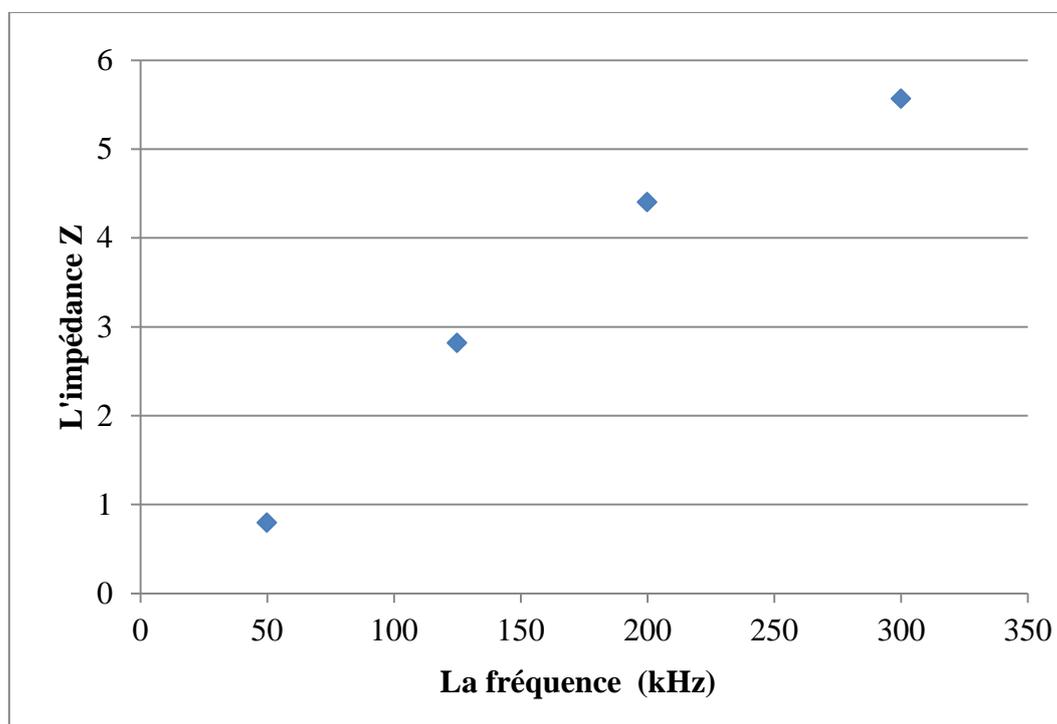


Figure (4.20) : L'évolution d'impédance en position « 0 » pour différentes fréquences.

Analysant les graphes précédents, nous constatons que l'impédance augmente avec l'augmentation de la fréquence.

4.2.3.3 Influence de gap :

Les figures (4.21) et (4.22) représentent l'influence de la variation de gap (le vide entre les deux couches revêtement-substrat) [0.04, 0.08 et 0.1 mm] sur la réponse de la sonde .

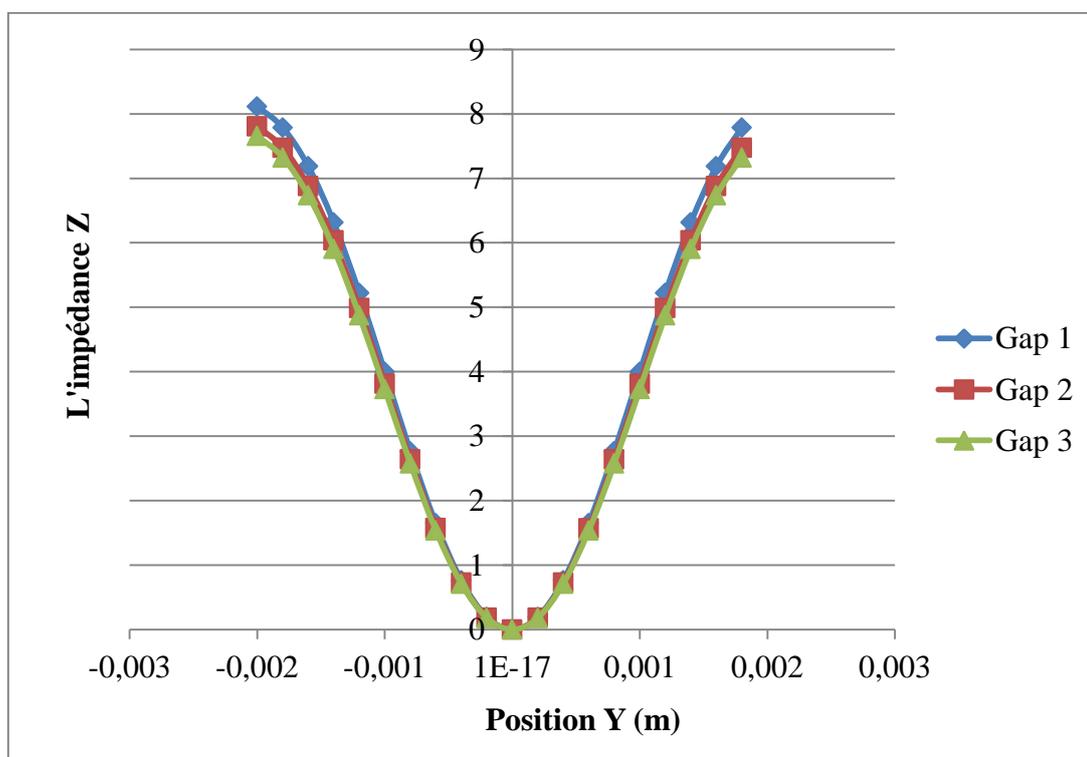


Figure (4.21) : L'évolution de l'impédance pour différents valeurs de gap.

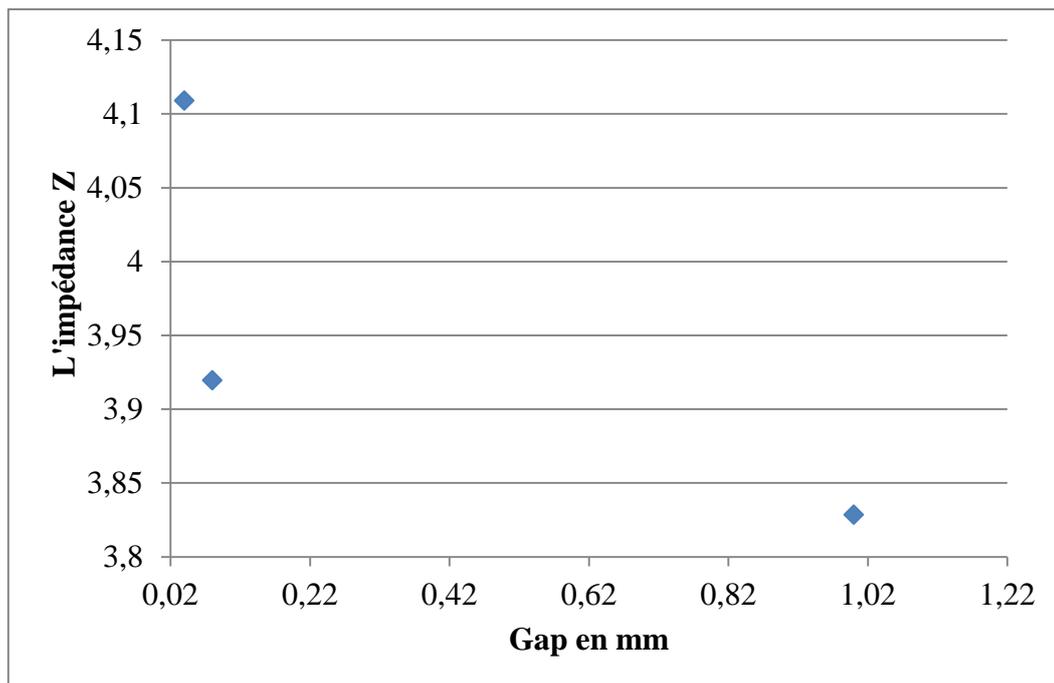


Figure (4.22) : L'évolution d'impédance en position « 0 » pour différentes valeurs de gap.

Nous constatons que l'impédance diminue avec l'augmentation de l'écart entre les deux couches (substrat-révétement). Donc l'impédance est inversement proportionnelle à les valeurs de gap.

4.2.4 Etude d'une configuration avec défaut :

Le problème traité dans cette partie est d'étudier l'effet de variation de différents paramètres en présence d'un défaut ayant les caractéristiques suivantes :

La longueur de défaut $L = 10\text{mm}$.

L'épaisseur de défauts $e = 0.2\text{ mm}$.

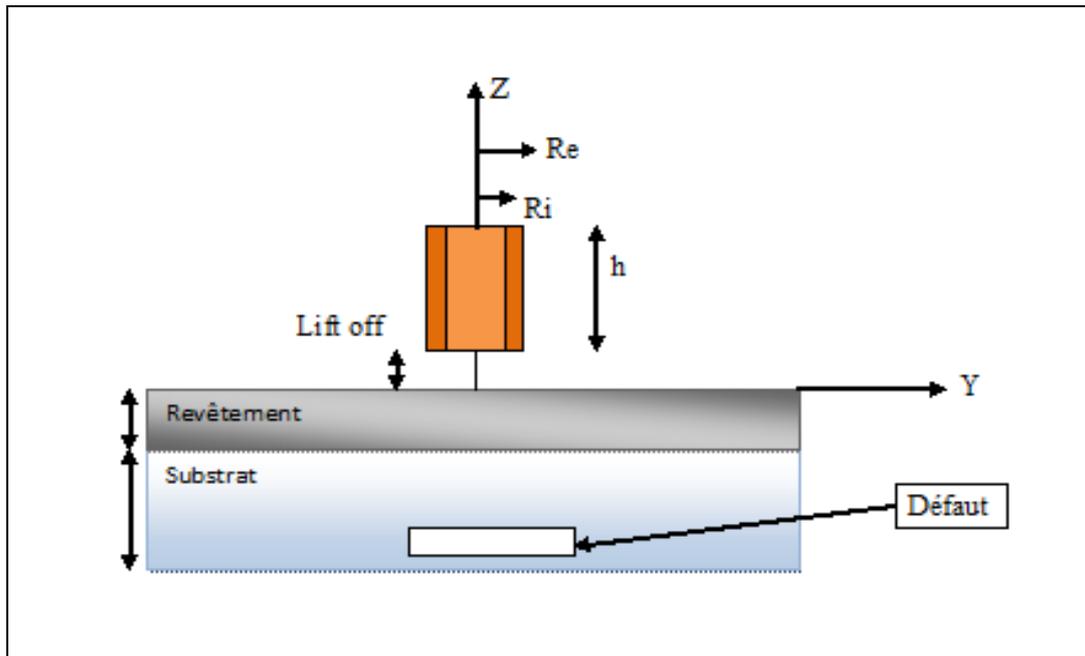


Figure (4.23) : Configuration bobine-pièce avec défaut.

4.2.4.1 Influence de fréquence :

La figure (4.24) illustre la variation de l'impédance en fonction de la position pour différents fréquences d'excitation (50 kHz , 125 kHz , 200 kHz , 300 kHz), en gardant les même paramètres précédents avec un défaut localisé sur le substrat de la pièce.

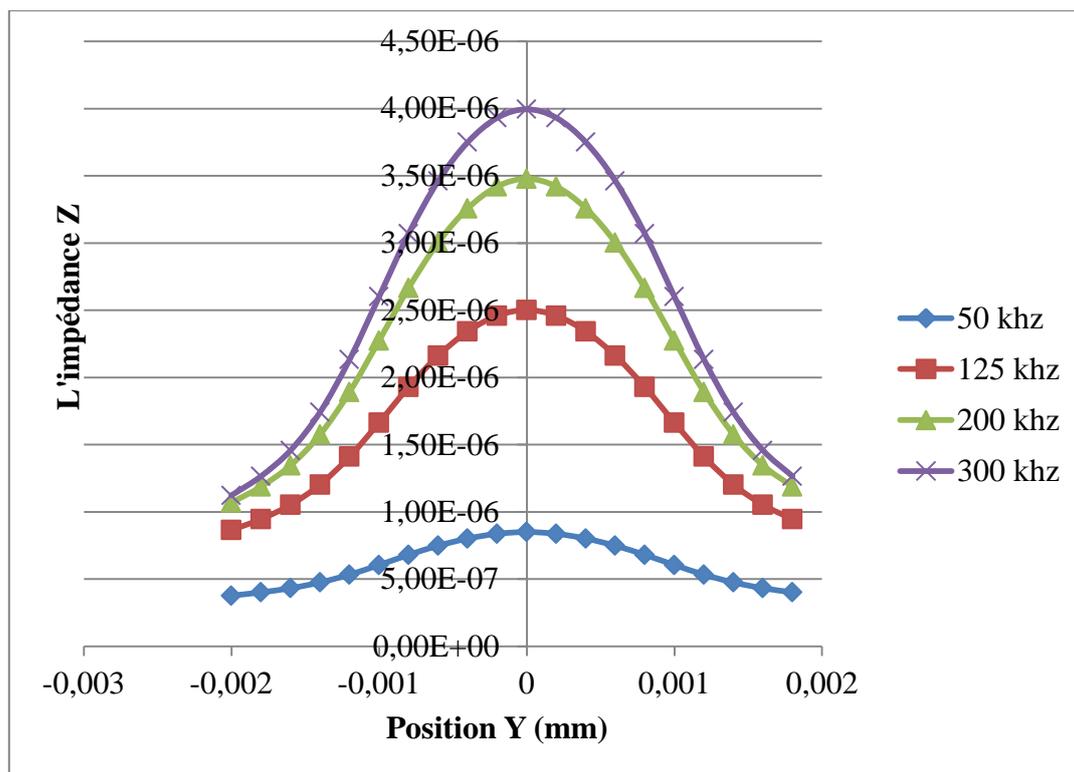
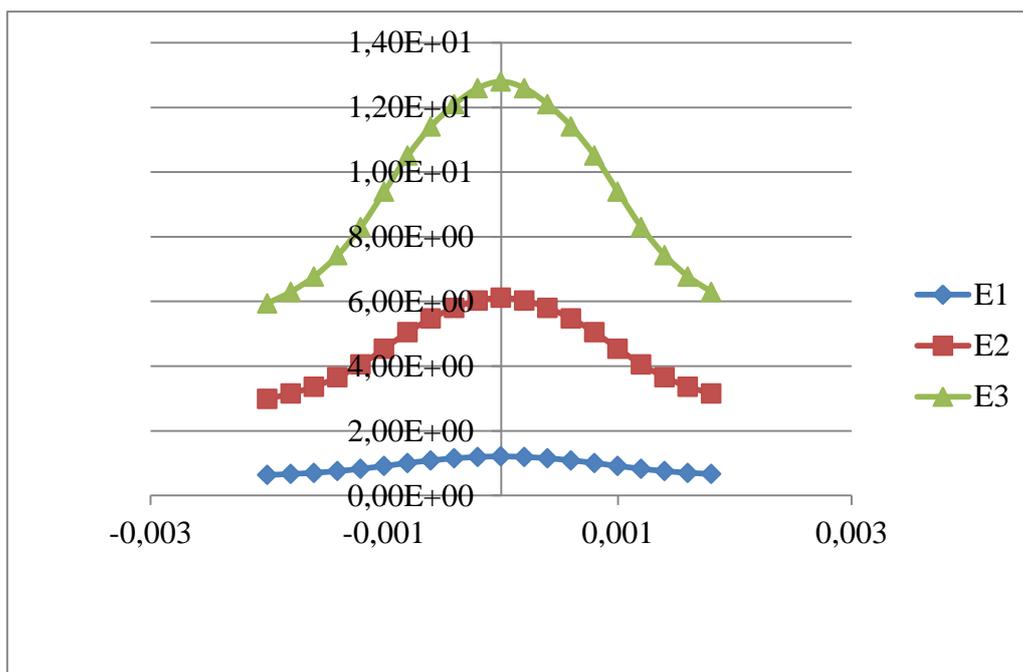


Figure (4.24) : Variation d'impédance pour différents fréquences en présence de défaut.

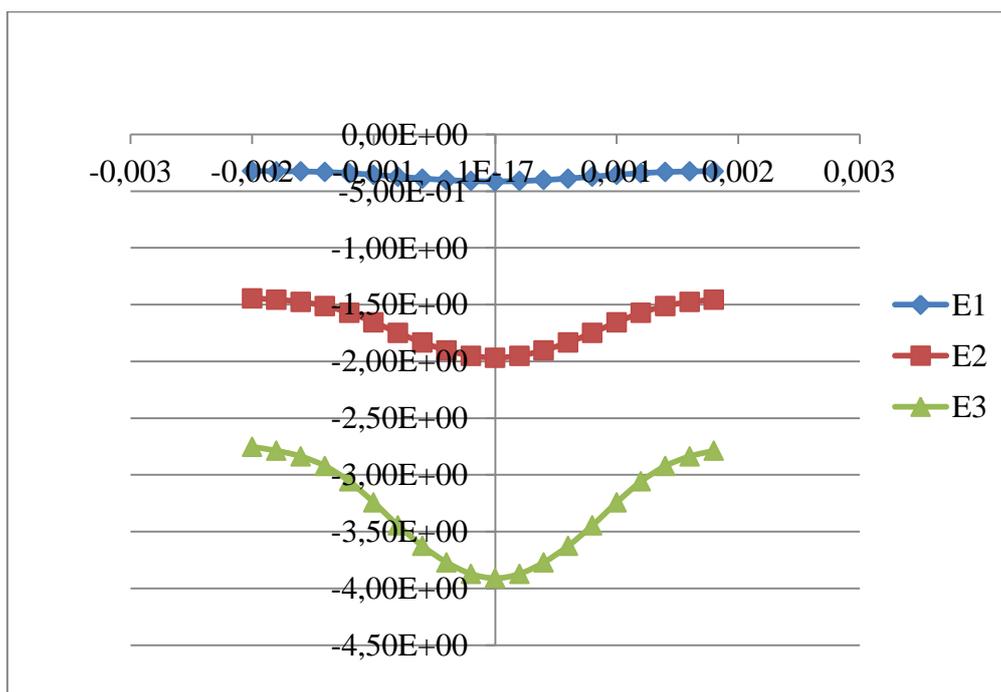
En présence de défaut nous constatons qu'une augmentation de fréquence produit une augmentation d'impédance.

4.2.4.2 Influence de l'épaisseur de défaut :

Pour une fréquence de 10 kHz, la figure montre l'évolution d'impédance pour différents épaisseurs de défauts (0.3 , 0.6 , 0.8 mm).



Partie réel.



Partie imaginaire.

Figure (4.25) : L'évolution d'impédance pour différents épaisseur de défaut.

Chapitre 4 : Application et Simulation

Pour une fréquence donnée, une augmentation de la valeur de profondeur du défaut provoque une diminution des composantes imaginaires (partie réactive X_n). Ainsi qu'une augmentation des composantes de la résistance R_n (partie réelle).

Une faible valeur de l'impédance correspond à la valeur inférieure de la profondeur du défaut. La variation de l'impédance est importante pour des profondeurs du défaut plus importantes.

4.2.4.3 Influence de la position de défaut:

D'autres simulations ont été réalisées en jouant sur la position de défaut proche ou éloigné de la surface du substrat et du revêtement, les figures ci-dessous présentes les réponses de la sonde.

a) Dans le substrat :

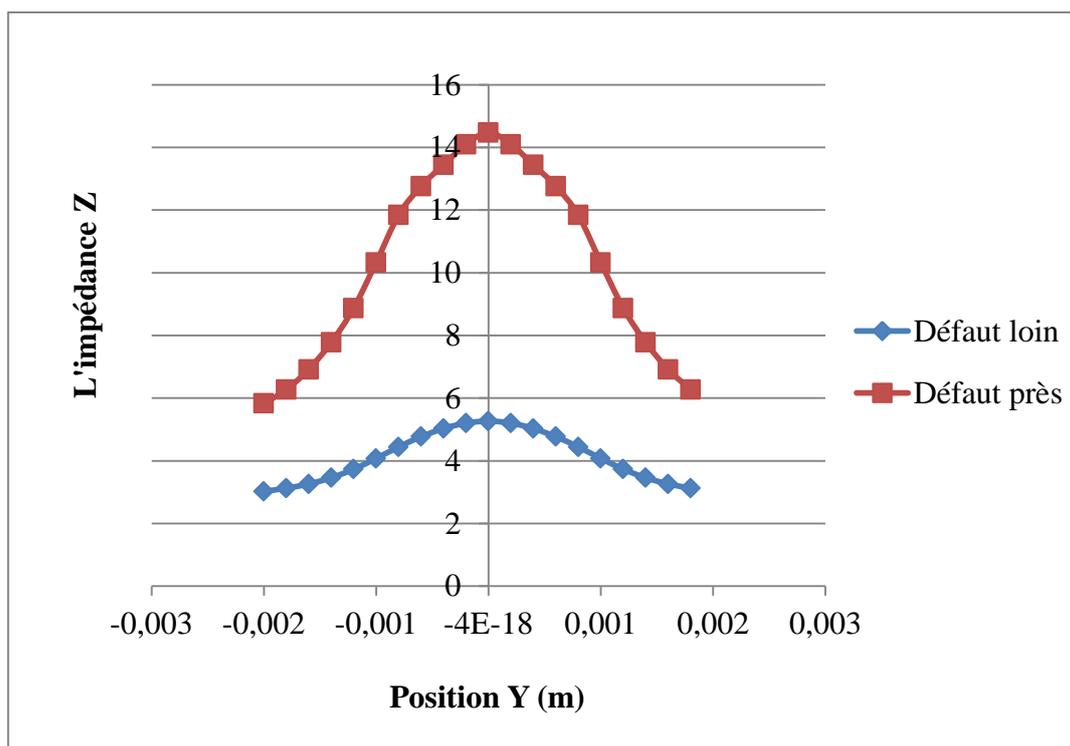


Figure (4.26) : La variation d'impédance avec un défaut localisé sur le substrat.

b) Dans le revêtement :

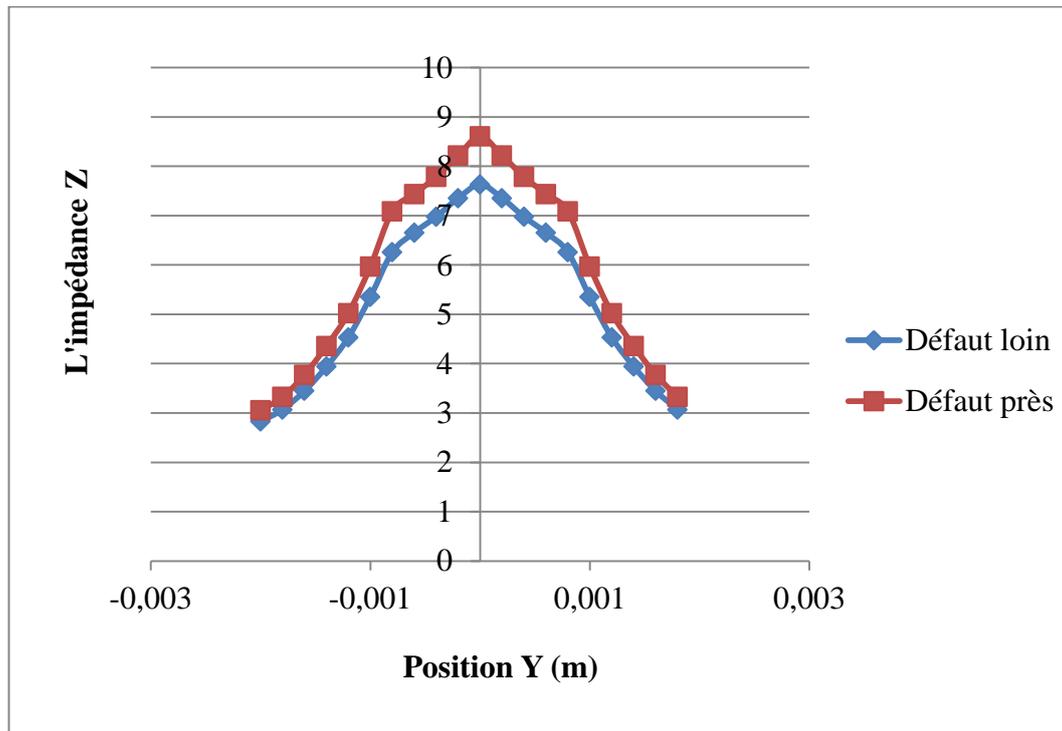


Figure (4.27) : La variation d'impédance avec un défaut localisé sur le revêtement.

D'après les graphes précédents, nous constatons que la position de défaut influe sur l'évolution de l'impédance pour une fréquence donnée, ou une faible valeur d'impédance correspond à une position du défaut éloignée de la surface (substrat ou revêtement) ce qui explique l'effet de peau.

4.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus par deux techniques de CND qui sont le ressuage et le CF pour contrôler une aube du deuxième étage de compresseur axiale.

En simulant le CND par courant de Foucault à l'aide d'un code développé, nous avons étudiées l'influence des paramètres physiques et géométriques sur la variation d'impédance tels que : l'écart entre les couches de la structure étudiée, la profondeur de la pièce et de défaut, la fréquence d'excitation et la position de défaut.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

L'aéronautique, l'aérospatiale et le nucléaire sont des secteurs industriels qui imposent des normes de sécurité contraignantes, et qui ont recouru au contrôle non destructif (CND) pour s'assurer de l'état d'intégrité de leurs équipements.

Les aubes de compresseur sont parmi les composants les plus soumis à des sollicitations mécaniques (vibrations et les différentes pressions et températures....) et à un environnement de fonctionnement corrosif, ces chargements entraînent des phénomènes de fatigue et fluage qui provoquent des endommagements conduisant à des accidents catastrophiques.

Lors de notre stage à la base de maintenance d'Air Algérie, nous avons constaté que le CF n'était pas utilisé pour contrôler les aubes de compresseur en raison d'un manque de sondes adaptées à des géométries complexes.

Pour contrôler des pièces de géométries de plus en plus complexes, une simulation a été effectuée à l'aide d'un code interne basé sur la modélisation d'un problème CND par CF par la méthode MEF ce qui nous a permis d'optimiser la conception des sondes, d'augmenter la fiabilité du contrôle et maîtriser les paramètres influant sur ce contrôle pendant l'inspection d'une pièce.

Les outils de simulation permettent la conception des éléments (pièces, capteurs,..) et la prédiction de leur comportement sans réalisation effective afin de concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix de matériaux, etc.) tout en limitant le nombre de prototypes à réaliser.

A partir de notre expérience expérimentale et numérique nous avons obtenus les résultats suivants :

- le contrôle par ressuage permet de gagner du temps en examinant plusieurs pièces en même temps mais il ne peut être utilisé que pour détecter les défauts de surface.
- Le contrôle de géométries complexes par CF dépend des sondes adéquates, c'est pourquoi nous avons fabriqué notre propre sonde.
- L'augmentation des paramètres (la profondeur de substrat ou de défaut et l'écart entre les couches) entraîne une diminution d'impédance Z ce qui explique le phénomène de peau.

Conclusion générale

- L'augmentation de la fréquence a un effet direct sur l'impédance, les basses fréquences ne donnent pas des résultats nettes donc il est bien d'utiliser les hautes fréquences pour capter les variations d'impédance.
- La position de défaut influant sur l'évolution d'impédance, les défauts débouchant près de surface sont très sensibles et détectés par les sondes (CF).

PERSPECTIVES:

- Concevoir des nouvelles sondes adéquates au contrôle des aubes de compresseur.
- Étude de problème inverse en vue de caractérisation des matériaux et de défauts de l'aube.

REFERENCES

REFERENCES :

[1] **BOURAYOU, R.** (2016). Etude expérimentale par Contrôle Non Destructifs de l'endommagement des aubes (ailettes) d'un turboréacteur « CFM56-7B ». Mémoire de Master. Université BADJI MOKHTAR ANNABA.

[2] **BRAHIMI, Y., & BADI, A.** (2020). Etude et Simulation d'un Capteur Rotatif à Courants de Foucault pour l'Inspection des Structures Aéronautiques. Mémoire de Master. Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.

[3] **GAOUIR, C., & REZKOUNE, R.** (2019). Modèles neuronaux pour le CND à flux de fuite magnétique. Mémoire de fin d'études. Université Mohammed SeddikBenyahia Jijel.

[4] **RABHI, M.** (2017). CONTROLE NON DESTRUCTIF CND. Cours. Institut Supérieur des Etudes Technologiques de GAFSA.

[5] **DEFFANE, Z., & KORICHI, A.** (2019). Caractérisation Non destructive par Courants de Fa. Mémoire de Master. Université SAAD DAHLB BLIDA .

[6] **kADA, k., & GHARABI, t.** (2018, juin). Contrôle non destructif. Mémoire de Master .Université Ahmed doraya - Adrar.

[7] **KHEBAL, M., & DALI , A.** (2019). Contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques. Mémoire de Master. Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.

[8] **ZAIDI, H.** (2012, décembre). Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples. Thèse de Doctorat. UNIVERSITE PARIS-SUD.

[9] **BENHADDA, N.** (2006, Septembre). Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault . Mémoire de Magistère En Electrotechnique. Université El Hadj Lakhdar Batna.

[10] **ALI RAID.** (2018). CONTRÔLE NON DESTRUCTIF: RESSUAGE, MAGNÉTOSCOPIE, RADIOGRAPHIE, COURANTS DE FOUCAULT ET ULTRASON. Université des sciences et de la technologie d'ORAN. MED BOUDIAF.

[11] <https://www.otec.de/fr/actualite/otec-news/2018/aubes-de-turbine/>

[12] **ZEMOURI, N.** (2016, juillet). Etude et Réalisation d'un Système Multi capteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs. Mémoire de Fin d'Etude de Magister. Université MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU.

[13] **MEKKAOUI, K.** (2021). CARACTERISATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES DES STRUCTURES AERONAUTIQUES SOUDEES PAR FSW EN UTILISANT LA METHODE ELECTROMAGNETIQUE. Mémoire de Master. Université SAAD DAHLEB BLIDA-1-.

[14] **TITOUAH, L., & ZIANE, A.** (2014). Caractérisation Non Destructive par Courants de pulsés d'une rainure associée à méthode des circuits électrique couplés. Mémoire Master. Université A. MIRA-BEJAIA.

Référence

- [15] **BOUALI, F.** (2010, Janvier). Utilisation d'une méthode semi-analytique pour l'étude du contrôle non destructif en régime pulsé. Mémoire de Magister en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri. Tizi-ouzou.
- [16] **BELKHEMMAR, B., & BOURMEL, M.** (2022, juin). Etude et calcul de l'effet de la conductivité t dans un capteur absolu par le contrôle non destructif par courant de Foucault. Mémoire de master. Université Mohamed Khider de BISKERA.
- [17] **HAMEL, M.** (2018, Septembre). ETUDE ET CARACTERISATION DES FISSURES FINES EN EVALUATION NON DESTRUCTIVE. Thèse de doctorat. Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [18] **BOUABDALLAH, E., & MATALLAH, M.** (2022, juin). Réalisation d'une maquette didactique pour les mesures CND « courant Foucault ». Master Académique. Université KASDI MERBAH OUARGLA.
- [19] **BENNOUD, S.** 12-14th November 2014. Modeling and Simulation of Defects Due to corrosion in Turbine Blades of Turbojet. *6th International Symposium on NDT in Aerospace, Madrid, Spain.*
- [20] **ABDOU, A.** (2018, Février). Contrôle non Destructif (CND):étude et modélisation d'un capteurs inductif à Courants de Foucault. Magister en Électrotechnique. Université Batna 2.
- [21] **NAIM, F.** (2016). Etude d'un compresseur axial du moteur TV3-117 BM. Mémoire de Master. Université SAAD DAHLAB Blida.
- [22] **BOULGHITI, B., & NASSAMOU, M. L.** (2018). Analyse thermomécanique des aubes du compresseur d'un turboréacteur. PROJET DE FIN D'ETUDES. Département de Génie Mécanique: Centre Universitaire Belhadj Bouchaib Ain T'émouchent.
- [23] **MIR, D., & HADJIRI, A.** (2021). Etude énergétique de fonctionnement d'un compresseur centrifuge d'air. Projet de Fin d'Etudes. Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib.
- [24] **ALLALI, S. S.** (2022). Analyse du fonctionnement de la turbine à gaz V94.2 et étude de l'effet de l'encrassement du système de filtration sur les performances du groupe de puissance. Mémoire de projet de fin d'études. Ecole Nationale Polytechnique.
- [25] **HEBRI, M., & KAROUB, M.** (2009). Simulation Numérique du Phénomène de pompage dan les Compresseurs Axiaux. Projet Fin d'Etude. Université SAAD Dahleb Blida.
- [26] **BOUASLA, M.** (2015). CONTRIBUTION A L'ETUDE AEROTHERMODYNAMIQUE D'UN COMPRESSEUR CENTRIFUGE MULTI-ETAGES. Mémoire de Master. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.
- [27] **YOUSFI, H.** (2014). Etude expérimentale sur la Fatigue des Matériaux en Flexion Rotative. Mémoire de MAGISTERE EN MECANIQUE. UNIVERSITE DE BATNA.
- [28] **GEURGUIT, B., & LAMINE, A. E.** (2018). SIMULATION DE LA FATIGUE MATÉRIAUX PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENT FINIS. Mémoire de Master. Université de M'sila
- [29] **EL MALKI ALAOUI, A.** (2005). Influence du chargement sur la propagation en fatigue de fissures courtes dans un acier de construction navale. Thèse de Doctorat. Université de Metz.

Référence

[30] **BILLOT, T.** (2010, Décembre). Comportement et endommagement en fatigue et fatigue- fluage à haute température de différents états microstructuraux du superalliage base-nickel Udimet 720. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique France.

[31] **DIHA, Abdallah.** Fatigue des Matériaux Cours et Exercices. s.l. : Université LARBI TEBESSI de TEBESSA, 2022.

[32] **BENNOUD, S.** (2017). ETUDE ET SIMULATION DE CONTROLE DES PIECES EN AERONAUTIQUE PAR LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES. Thèse de Doctorat. Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales Blida.

[33] **BOUTANA, M. N.** (2009, Février). MODELISATION MICRO STRUCTURALE EN FATIGUE/FLUAGE À FROID DES ALLIAGES DE TITANE QUASI ALPHA PAR LE MODÈLE DES AUTOMATES CELLULAIRES. Thèse De Doctorat. Ecole de Technologie Supérieur Université du QUÉBEC.

[34] **BOUYEGH, S.** (2010). Contribution à la modélisation des mécanismes de fluage-corrosion à haute température. Cas des superalliages à base de Nickel riche en Cobalt. Thèse de Magister en Métallurgie. Université BADJI MOKHTAR -ANNABA.

[35] **ALLAI, B.** FATIGUE et MECANIQUE de la RUPTURE.cours.

[36] **SEKSAF, M. R.** (2013, Juin). Influence de l'érosion sur les grilles d'aubes d'un compresseur axial d'une turbine à gaz. Projet de fin d'étude. Ecole Nationale Polytechnique.

[37] **REZOUG, K.** (2012, Mai Université SAAD DAHLAB BLIDA). ETUDE DE LA FATIGUE OLIGOCYCLIQUE DE L'ACIER HLE ""X60"".

[38] **LEHMANN, G., & LEPOURRY, P.** (1984). Le Turboreacteur Théorie (éd. 2 eme Edition). Ecole Nationale De L'Aviation Civile.

[39] **BENKHADA, A.** Mécanique de la Repture. *Cours.*