



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Réseaux Electriques

Présenté par :

1. GHENDIR AOUN Walid
2. CHOUIKHI Abdallah

Intitulé :

Modélisation du Contrôle Non Destructif
Par Courants de Foucault

Soutenu le : 27 / 05 / 2025

Devant le jury composé de :

Dr : GUIA Talal

Président

Dr : KHECHKHOUCHE Ali

Examineur

Dr : MERAZGA Azeddine

Encadreur

Année académique : 2024/2025

Résumé

La détection et la caractérisation d'un défaut est l'un des problèmes les plus rencontrés dans les secteurs industriels, aéronautique et nucléaire. Pour choisir la technique la mieux adaptée à une application pour se renseigner des caractéristiques physiques et géométriques des différents matériaux, un certain nombre de critères peut être pris en compte tels que la facilité de mise en œuvre de la technique et son faible coût. Parmi ces techniques de Contrôle non destructif (CND), celle des courants de Foucault (CF) est largement utilisée industriellement en raison principalement de son caractère non polluant. Elle est très sensible aux défauts de type « fissures » situés à la surface ou à l'intérieur de la structure inspectée. A cet égard, nous avons proposé d'étudier un problème de CND par la technique des CF. Ce travail comprend un aperçu général sur les différentes techniques de CND et une étude bien détaillée sur la théorie des CF en plus de des différentes méthodes de résolution des problèmes des systèmes CND-CF Comme la méthode d'éléments finis, qui est considérée comme l'une des méthodes les plus utilisées dans ce domaine et le système de COMSOL Multiphysics. Enfin, nous avons présenté la formulation par éléments finis de l'équation du magnétisme dynamique harmonique AV-A et défini l'expression de l'impédance, qui est considérée un indicateur de la présence ou de l'absence d'un défaut.

Mots clés :

Contrôle non Destructif, Courants de Foucault, Capteur, Matériaux conducteurs, COMSOL, Méthodes des Eléments Finis.

ملخص

يعد اكتشاف العيوب وتوصيفها أحد أكثر المشاكل شيوعاً التي تواجهها القطاعات الصناعية والجوية والنووية. ولاختيار التقنية الأنسب للتعرف على الخصائص الفيزيائية والهندسية للمواد المختلفة، يمكن أخذ عدد من المعايير في الاعتبار مثل سهولة تنفيذ التقنية وانخفاض تكلفتها. ومن بين تقنيات الفحص غير المتلف (CND)، تستخدم تقنية تيارات فوكو (CF) على نطاق واسع في الصناعة بسبب طبيعتها غير الملوثة. فهو حساس للغاية تجاه العيوب من نوع "الشقوق" الموجودة على السطح أو داخل الهيكل الذي يتم فحصه. وفي هذا الصدد، اقترحنا دراسة مشكلة الفحص غير المتلف باستخدام تقنية (CF). يتضمن هذا العمل نظرة عامة على تقنيات الفحص غير المتلف المختلفة ودراسة مفصلة لنظرية (CF) بالإضافة إلى الطرق المختلفة لحل مشاكل الأنظمة CND-CF مثل طريقة العناصر المحدودة والتي تعتبر من أكثر الطرق استخداماً في هذا المجال ونظام Comsol Multiphysics. أخيراً، قدمنا صياغة العناصر المحدودة للمعادلة المغناطيسية الديناميكية التوافقية AV-A وجددنا عبارة المعاوقة، والتي تعتبر مؤشر على وجود أو عدم وجود عطب.

الكلمات المفتاحية:

الفحص الغير متلف، تيارات فوكو، حساس، المواد الناقلة، كومصول، طريقة العناصر المحدودة،

Dédicace

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, ma maman que j'adore.

A mes frères, mes sœurs et mes amis je dédie ce travail pour leur conseils, aides, et encouragement.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin des études universitaires.

*Dédicace spéciale pour ma binôme **Chouikhi Abdallah** et sans oublier tous mes amis.*

J'adresse mes plus sincères dédicaces à tous mes proches, amis et collègues, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Ghendir Aoun Walid

Je tiens à dédier ce travail à :

Mon cher père (Qu'il repose en paix et qu'il soit au paradis).

Ma mère qui n'a jamais cessé de m'encourager, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs, de me soutenu et m'a permis d'arriver là où je suis aujourd'hui. Aucun mot n'est assez fort pour vous témoigner toute ma reconnaissance. Que Dieu vous garde et vous protège.

A mes sœurs et à mes frères vous êtes la joie de notre famille, merci pour l'ensemble des moments que nous passons ensemble.

A mes amis : Merci pour votre amitié précieuse.

*A ma binôme « **Ghendir Aoun Walid** » je te souhaite un avenir plein de joie.*

J'adresse mes plus sincères dédicaces à tous mes proches, amis et collègues, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Chouikhi Abdallah

Remerciements

Nous tenons profondément à remercier Dieu de nous avoir éclairci les chemins du savoir et ceux de la vie.

Nous exprimons notre sincère gratitude à nos parents, qui nous ont soutenus par tous les moyens afin que nous réussissions dans nos études, notamment par leurs encouragements qui nous animent de volonté.

*Nous tenons à remercier notre encadreur, Monsieur **Merazga Azeddine**, Docteur à l'Université d'Eloued qui nous a guidés durant toute la réalisation de ce travail, en particulier à travers les discussions et les débats enrichissants qui ont permis de faire progresser nos recherches.*

Nos remerciements aussi aux membres du jury, qui ont accepté de juger ce modeste travail.

Nous remercions toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'achèvement de ce mémoire de master.

TABLE DE MATIERES

LISTE DES FIGURES.....	I
LISTE DES TABLEAUX	III
LISTE DES ABREVIATIONS	IV
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : REVUE DE LITTERATURE.....	3
I.1. Introduction	3
I.2. Historique	3
I.3. Les objectifs du CND	5
I.4. Procédure de CND	6
I.5. Domaine d'application	7
I.6. Principe de la détection d'un défaut	8
I.7. Origines des défauts	8
I.8. Les différents défauts détectés en CND	9
I.8.1. Les défauts surfaciques	9
a) Les défauts ponctuels	9
b) Les défauts d'aspect	9
I.8.2. Les défauts internes	10
I.9. Les techniques de contrôle non destructif	10
I.9.1. L'examen visuel	10
I.9.2. Le ressuage	11
I.9.3. Ultrasons	13
I.9.4. Magnétoscopie	15
I.9.5. Radiographie	17
I.9.6. Thermographie	18
I.9.7. Courants de Foucault	19
I.10. Conclusion.....	19
CHAPITRE II : THEORIE DE COURANTS DE FOUCAULT.....	21
II.1. Introduction.....	21
II.2. Les Courants de Foucault.....	21
II.3. Principe des courants de foucault.....	22

II.4. Matériel utilise	24
II.5. Schéma synoptique du dispositif.....	24
II.6. Objectifs des CND-CF.....	25
II.7. Domaine d'application du CND par courant de Foucault	26
II.8. Principaux paramètres influant sur le contrôle	26
II.9. Densité du courant	27
II.11. Effet de peau	27
II.12. Modes d'excitation.....	29
II.12.1. Excitation mono fréquence.....	29
II.12.2. Excitation multifréquence	29
II.12.3. Excitation pulsée	30
II.13. Gammes de fréquences	30
II.13.1. Gammes basses fréquences (1Hz :1KHz)	30
II.13.2. Gamme moyenne fréquence [1kHz :1MHz.....	31
II.13.3. Gamme haute fréquence : >1MHz	31
II.14. Les capteurs.....	31
II.14.1. Classification des capteurs	31
II.14.2. Types de capteurs	32
II.14.2.1. Capteur axial encerclant où bobine encerclant	32
II.14.2.2. Capteur axial interne ou sonde	32
II.14.2.3. Sonde ponctuelle ou palpeur.....	33
II.14.2.4. Bobine plate.....	33
II.14.2.5. Sonde interne tournante	34
II.14.3. Fonctions du capteur	34
II.14.3.1. Capteur à double fonction.....	35
II.14.3.2. Capteur à fonctions séparées	35
II.14.4. Modes de contrôles.....	36
II.14.4.1. Mode différentiel	36
II.14.4.2. Mode de contrôle compensé	37
II.14.4.3. Mode de contrôle absolu.....	38
II.15. Plan d'impédance normalisée	38
II.16. Les avantages de CF	40
II.17. Les inconvénients de CF.....	41
II.18. Conclusion	41

CHAPITRE III : METHODOLOGIE DE MODELISATION.....	42
III.1. Introduction.....	42
III.2. Intérêt de modélisation.....	42
III.3. Equations de maxwell.....	43
III.3.1. Loi de comportement	45
III.3.2. Conditions de transmission et conditions aux limites.....	46
III.3.2.1. Conditions de transmission.....	46
III.3.2.2. Conditions aux limites.....	48
III.3.3. Conditions de jauge.....	48
III.4. Formulation électromagnétique	49
III.4.1. Modèle magnétodynamique	49
III.4.2. Formulations de la magnétodynamique	49
III.4.2.1. Formulation AV	49
III.4.2.2. Formulation A*	53
III.4.2.3. Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique $T - \Phi$	53
III.4.2.4. Formulation $\varphi \varphi r$	54
III.5. Méthodes de résolutions	55
III.5.1. Méthodes analytiques.....	55
III.5.2. Méthodes semi analytiques	56
III.5.3. Méthodes numériques	56
III.5.3.1. Méthode des Eléments de Frontière	57
III.5.3.2. Méthode des différences finis	57
III.5.3.3. La Méthode des Eléments Finis (MEF)	58
III.5.3.4. La méthode des volumes finis (MVF).....	59
III.6. Les logiciels de simulation	61
III.7. Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique AV-A harmonique.....	61
III.7.1 Calcul de l'impédance	64
III.7. Conclusion	65
CONCLUSION GENERALE	66
REFERENCES	68

LISTE DE FIGURES

Figure I.1 . Schéma synoptique d'un système de CND	7
Figure I.2 . Principe du contrôle non destructif	8
Figure I.3 . L'examen visuel	11
Figure.I.4 . Principe du ressuage	12
Figure I.5 . Principe de l'ultrason.....	14
Figure I.6 . Principe de la magnétoscopie	16
Figure I.7 . Principe de la radiographie.....	17
Figure I.8 . Principe de la thermographie.....	18
Figure. II.1. Jean Bernard Léon Foucault	22
Figure. II.2. David Hughes	22
Figure.II.3. Principe du CND par courants de Foucault.	23
Figure.II.4. Schéma synoptique de la chaîne de contrôle	24
Figure.II.5. Les différentes fonctions d'un capteur CF.....	25
Figure.II.6. Répartition des courants de Foucault pour une pièce	28
Figure.II.7. Bobine encerclant	32
Figure.II.8. Bobine interne glissante.....	33
Figure.II.9. Bobine simple avec noyau.	33
Figure. II.10. Bobine plate	34
Figure.II.11. Capteur interne tournant	34
Figure II.12. Capteur à double fonction (Capteur absolu).....	35
Figure. II.13. Capteur à fonctions séparées. (Capteur différentiel)	36
Figure.II.14. Contrôle en mode différentiel.	37
Figure. II.15. Mesure en mode compensé.....	37

Figure.II.16. Mode de contrôle absolu.....	38
Figure.II.17. Influence de σ ou du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée (cas d'une pièce amagnétique).....	40
Figure.III.1. Domaine d'étude.....	43
Figure.III.2 . Interface entre deux milieux.....	47
Figure.III.3. Schématisation d'un plan de symétrie.	51
Figure.III.4. Grille de maillage par différences finis.	58
Figure.III.5. Un domaine d'étude discrétisé en Elément finis.	59
Figure.III.6. Maillage du domaine d'étude.	60
Figure.III.7. Modèle magnétodynamique avec défaut conducteur.	61

LISTE DE TABLEAUX

Tableau III-1 : Résumé sur les formulations de résolution.....55

LISTE DES ABREVIATIONS

CND : Contrôle Non Destructif.

CF : Courants de Foucault.

CND-CF : Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.

MEF : Méthode des Eléments Finis.

MEF : Méthode des Eléments de frontières.

MVF : Méthode des volumes finis.

MDF : Méthode des Différences Finis

EDP : des équations aux dérivées partielles

Introduction générale

Dans le domaine industriel, les exigences en matière de fiabilité, de réduction des coûts et de sécurité deviennent de plus en plus importantes. Durant l'exploitation d'un produit industriel, son maintien en état de marche dans de bonnes conditions de sécurité nécessite une bonne connaissance de l'évolution des pièces qui le composent.

Cela conduit à une activité de recherche importante de la part des ingénieurs, visant à développer des systèmes et des méthodes de détection des défauts permettant un contrôle rapide et fiable de ce type de pièces. Par le passé, les anciennes méthodes utilisées pour mesurer et détecter les défauts étaient basées sur un prélèvement statistique ou la mise à l'essai d'une pièce ou d'un échantillon par des essais destructifs.

Mais avec le développement de la science, de nouvelles méthodes ont été découvertes. Ces méthodes permettent d'extraire des informations sur une structure sans porter atteinte à son intégrité. Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée, les conditions de mise en œuvre, etc.

L'augmentation de la productivité, la fabrication de produits de qualité et la complexité croissante des pièces à contrôler rendent indispensables les techniques de Contrôle Non Destructif (CND). Celles-ci font partie des techniques modernes utilisées dans le contrôle qualité pour assurer la conformité des produits fabriqués et garantir leur tenue en service.

Le CND regroupe l'ensemble des méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, que ce soit au cours de la production, en cours d'utilisation ou lors de la maintenance. Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité, etc.), soit pour détecter la présence de défauts et les caractériser. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les techniques utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault).

Les courants de Foucault (CF) font partie des techniques destinées au CND qui s'appliquent aux structures électriquement conductrices. Ils sont robustes, peu coûteux et particulièrement adaptés à la détection de défauts de type fissures entraînant des interruptions

de la conductivité électrique. Cette technique a été adoptée dans les secteurs de l'industrie aéronautique, nucléaire, manufacturière, etc. À l'heure actuelle, elle est devenue indispensable dans tous les secteurs. Bien que la méthode de Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (CND-CF) soit largement utilisée, elle présente des limites en termes de détection dans des matériaux composites ou en présence de géométries complexes.

Le CND-CF repose sur l'ensemble des courants électriques créés dans un objet conducteur, soit par la variation dans le temps d'un champ magnétique dans lequel est plongé l'objet, soit par le déplacement de cet objet dans un champ magnétique constant. Les CF ne sont pas faciles à mesurer. La modélisation d'une configuration réelle de CND-CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement, mais fait appel à des méthodes numériques efficaces pour le traitement des problèmes électrotechniques.

L'objectif de notre travail consiste à mener une étude approfondie sur le CND-CF, afin de mieux comprendre et appliquer cette technique au contrôle de la qualité des matériaux, pour détecter les défauts et garantir de bonnes performances.

L'ensemble de notre travail sera organisé comme suit :

- Le premier chapitre présentera une revue de littérature et un aperçu général du contrôle non destructif.
- Le deuxième chapitre abordera la théorie des courants de Foucault, ses bases, ses principes et les phénomènes associés.
- Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation du CND-CF, qui joue un rôle important dans la conception de nouvelles sondes et l'optimisation de nouveaux dispositifs de CND-CF.

Chapitre I : Revue de littérature

I.1. Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) est un ensemble de méthodes permettant de caractériser l'état d'intégrité de structures, de matériaux ou de pièces sans les altérer. Il peut être réalisé lors de la production, de l'utilisation ou de la phase de maintenance. Cette étape du processus industriel vise à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées.

Cette définition est assez large. Plus précisément, le CND concerne exclusivement « la santé de la matière ». En effet, ces techniques sont utilisées dans le cadre du contrôle qualité pour s'assurer de la conformité d'une production, mais aussi pour garantir la tenue en service des pièces et des ensembles fabriqués. Très appréciées en maintenance, elles permettent de vérifier la continuité de la matière, et donc de détecter les manques de matière, les fissures, etc.

Le CND est largement répandu dans le milieu industriel, notamment dans les secteurs pétrolier, nucléaire, aéronautique et automobile. En effet, une simple fissure dans une pièce ou un composant de ces systèmes peut avoir des conséquences graves pour le personnel et engendrer des pertes économiques et matérielles importantes.

I.2. Historique

L'apparition des rayons X a marqué une étape clé dans le développement du Contrôle Non Destructif. Durant la Première Guerre mondiale, le gouvernement britannique a été le premier à appliquer cette technologie pour détecter les défauts dans les pièces métalliques. Il est rapidement apparu que les rayons X permettaient d'inspecter l'intérieur des matériaux avec une grande précision, révélant ainsi des défauts invisibles pour les méthodes traditionnelles.[1]

Au fil du temps, plusieurs techniques de CND ont été développées : essais par ultrasons, magnétoscopie, ressuage, courants de Foucault, etc. Chacune possède ses avantages et ses limites, mais toutes ont pour principal atout d'offrir une évaluation complète des matériaux, composants et structures.[1]

Les avancées numériques ont également transformé le CND, avec l'apparition de méthodes plus sophistiquées comme la radiographie numérique ou l'imagerie ultrasonore. Ces innovations ont permis d'améliorer à la fois la précision et la rapidité des inspections.[1]

Le CND est ainsi devenu un outil incontournable dans la fabrication, l'assemblage et la maintenance industrielle, permettant de contrôler l'ensemble du processus, de la matière première au produit fini. Ses objectifs incluent la détection de défauts, la mesure d'épaisseurs ou encore l'analyse de propriétés telles que la conductivité électrique.[2]

S'il est difficile de dater précisément l'apparition du CND, les jalons suivants en marquent les grandes étapes : [2]

- **1800** : Première observation thermographique par Sir William Herschel
- **1831** : Observation de l'induction électromagnétique par Michael Faraday
- **1840** : Première image infrarouge produite par John Herschel
- **1868** : Première mention de l'inspection de défauts (fissures longitudinales détectées à l'aide d'une aiguille aimantée — S. M. Saxby)
- **1879** : Utilisation des courants de Foucault pour le contrôle des alliages métalliques (David Hughes)
- **1895** : Découverte des rayons X (Wilhelm Conrad Röntgen)
- **1898** : Découverte du radium (Marie et Pierre Curie)
- **1922** : Première radiographie industrielle (Dr. Horace Lester)
- **1927** : Contrôle des rails par courants de Foucault (Dr. Elmer Sperry & Harcourt Drake)
- **1929** : Développement de la magnétoscopie (Alfred deForest et Foster Doane)
- **1929** : Expérimentation des transducteurs à quartz (Sergey Sokolov)
- **1930** : Utilisation pratique des rayons gamma (Dr. Robert Mehl)
- **1935–1940** : Développement des premiers systèmes à courants de Foucault
- **1940–1944** : Développement de la méthode ultrasonique (Dr. Floyd Firestone)
- **1946** : Commercialisation du premier instrument ultrasonique portable (Branson)

Le CND, tout comme l'instrumentation scientifique, constitue un domaine d'application privilégié des découvertes en physique. Ce n'est toutefois qu'à partir de la Seconde Guerre mondiale que ses techniques se sont véritablement développées dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie (inspection des aciers, radiographie des soudures). Les années 1960–1970 ont ensuite été marquées par une dynamique forte, portée par les besoins croissants de secteurs tels que l'automobile, l'aéronautique ou le nucléaire. [3]

Aujourd'hui, le CND continue à se développer vers de nouveaux domaines. Les objectifs se transforment : il ne suffit plus de détecter un défaut, il faut aussi le localiser avec précision et en analyser la nature. Cela suppose des techniques capables de détecter des hétérogénéités physiques complexes ou des anomalies comme des variations de microstructure, de texture ou de rugosité.[3]

Ces objectifs restent toutefois difficiles à atteindre en raison des contraintes physiques et du rythme modéré des avancées. En revanche, l'automatisation progresse rapidement grâce à l'informatique, avec des équipements plus performants, fiables, simples d'utilisation et conformes aux protocoles stricts. Le coût reste un frein à l'adoption à grande échelle de certaines technologies de pointe.[3]

Le développement du CND a été grandement favorisé par l'évolution de l'électronique, des instruments de mesure et surtout de l'informatique. La modélisation physique permet aujourd'hui de concevoir des capteurs adaptés à chaque application. Le traitement des données et des images joue un rôle fondamental dans l'interprétation des résultats, améliorant encore la précision du CND.[1]

I.3. Les objectifs du CND

Le Contrôle Non Destructif a pour but, comme son nom l'indique, de vérifier l'intégrité d'une pièce sans compromettre sa capacité à être utilisée par la suite. Il peut consister : [4]

- Soit en l'évaluation d'un paramètre caractéristique (épaisseur, distance, propriétés électromagnétiques, etc.),
- Soit en la détection d'une altération de ce paramètre (fissure, inclusion, porosité, corrosion, fatigue, etc.).

Ce type de contrôle est souvent répété à plusieurs étapes du cycle de vie d'une pièce. Il doit satisfaire plusieurs critères essentiels : [4]

A – Rapidité d'exécution

Le contrôle doit être rapide pour limiter l'immobilisation des pièces et les coûts liés au temps de travail ou au fonctionnement de l'usine.

B – Coût

Le coût du contrôle qualité, en particulier pour des pièces complexes, doit être réduit autant que possible.

C – Reproductibilité

Une même pièce contrôlée plusieurs fois doit donner des résultats identiques, indépendamment des conditions extérieures.

D – Fiabilité

Le contrôle doit répondre aux spécifications : il doit détecter tous les défauts qu'il est censé pouvoir détecter, quelles que soient les conditions d'inspection.

E – Sensibilité

La sensibilité est le rapport entre la variation du signal mesuré et celle du mesurande. Plus elle est élevée, plus les petits défauts sont détectables.

F – Résolution

La résolution est la plus petite variation détectable. Elle est souvent exprimée comme le pouvoir de résolution, c'est-à-dire la taille du plus petit défaut visible. Un bon pouvoir de résolution permet de détecter des défauts de très petite taille.

I.4. Procédure de CND

Le CND ne se limite pas à la simple détection de défauts. Bien que le choix de la méthode, du procédé et de l'équipement soit déterminé en amont, une procédure complète doit être suivie avec des objectifs précis : garantir la fiabilité de l'examen, assurer sa reproductibilité, localiser, identifier, caractériser (taille, type) les défauts, les classer, les représenter visuellement, prendre des décisions sur l'affectation de la pièce, et enfin archiver les résultats et les conditions de l'examen.[5]

Les opérations d'étalonnage, de calibrage, de balayage de la sonde et de traitement des données sont essentielles pour atteindre ces objectifs. Elles sont aujourd'hui rendues plus efficaces grâce à l'intégration de l'informatique en temps réel.[5]

On peut représenter la mise en œuvre d'un système de CND selon le synoptique de la figure I.1.

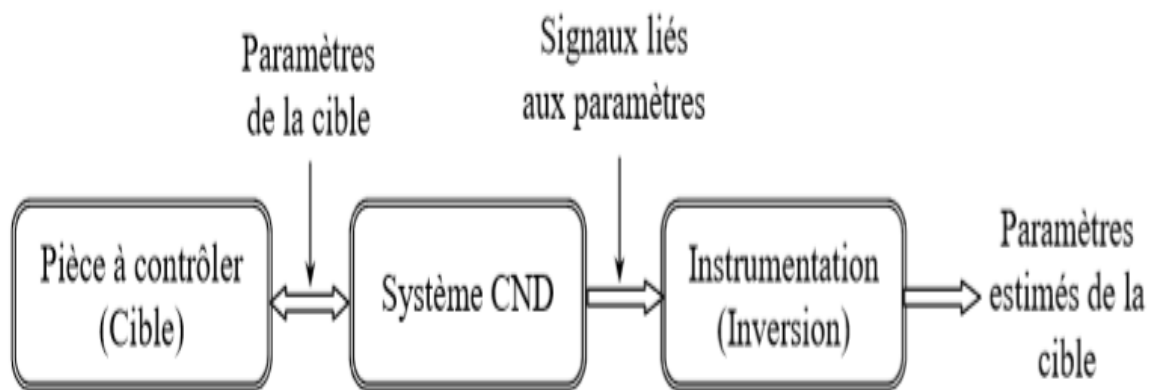


Figure I.1 : Schéma synoptique d'un système de CND

La cible est caractérisée par un ensemble de paramètres qu'il convient d'estimer afin de poser un diagnostic sur l'intégrité de l'objet. L'utilisation d'un système de CND permet de générer plusieurs signaux dépendant des paramètres à mesurer. Souvent, une étape d'« inversion », plus ou moins complexe, est nécessaire pour retrouver les paramètres d'origine de la pièce.[5]

I.5. Domaine d'application

Les techniques de CND sont largement appliquées dans les domaines suivants :[6]

- Le secteur énergétique (réacteurs, chaudières, turbines, etc.).
- L'industrie automobile (vérification des moteurs et des composants).
- L'industrie pétrolière (contrôle des pipelines, tubes et soudures).
- L'industrie navale.
- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, pièces motrices).
- Le secteur ferroviaire, tant en fabrication qu'en maintenance, notamment pour les éléments de sécurité (essieux, roues, bogies).

- L'industrie militaire.

I.6. Principe de la détection d'un défaut

Les techniques et procédés de CND permettent d'obtenir des informations sur l'état d'une pièce ou d'une structure sans causer de dommages susceptibles d'affecter leur utilisation future.

Le principe de détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à mesurer la réponse obtenue. De manière générale, quelles que soient les méthodes utilisées, les étapes suivantes peuvent être distinguées :[7]

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

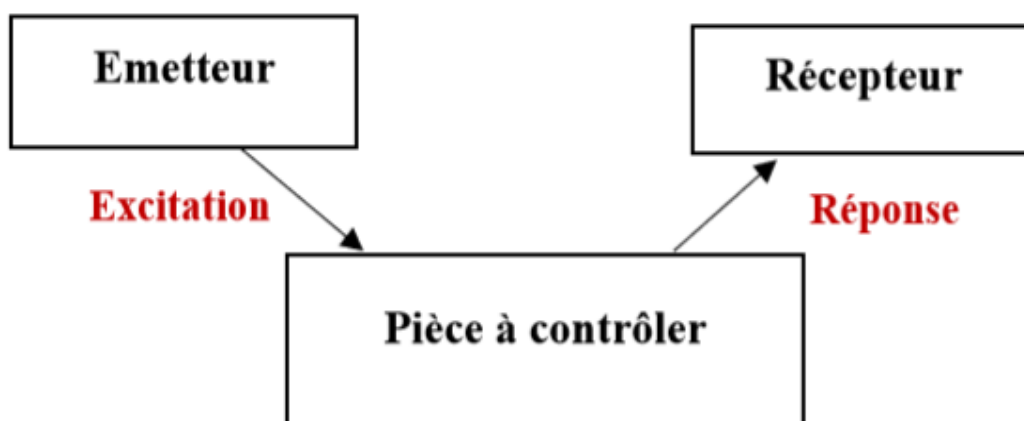


Figure I.2 : Principe du contrôle non destructif

I.7. Origines des défauts

Les origines et causes des défauts sont multiples. On peut citer les exemples suivants : [7]

- Défauts liés au moulage.
- Défauts de soudage.
- Fissuration.

- Endommagement de composites.
- Hétérogénéité dans les matériaux.
- Défauts de collage : absence de colle, fissuration de colle, manque d'adhésion.
- Défauts de fixation des composants électroniques.

I.8. Les différents défauts détectés en CND

Détecter un défaut revient à identifier une hétérogénéité dans le matériau, une variation locale de ses propriétés physiques ou chimiques, susceptible d'affecter son bon fonctionnement. Cela peut inclure des porosités, criques, rivets, soudures, fissures, délaminages, corrosion, défauts de collage, variation du taux fibre/matrice, décohésion fibre-matrice, problèmes de cotation, de forme, etc. [8]

Les défauts sont couramment répartis en deux grandes catégories selon leur localisation : les défauts de surface et les défauts internes.

I.8.1. Les défauts surfaciques

Ces défauts peuvent parfois être observés à l'œil nu, mais pas toujours. Ils se classent en deux catégories :

a) Les défauts ponctuels

Ces défauts sont parmi les plus critiques sur le plan technologique. Ils incluent criques, piquûres, fissures et craquelures, pouvant initier une rupture, notamment par fatigue. Dans les pièces métalliques, leur épaisseur est souvent très faible (quelques micromètres) et devient problématique dès qu'elle dépasse quelques dixièmes de millimètre. Leur détection requiert l'usage de techniques sensibles telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault ou les ultrasons.[9]

b) Les défauts d'aspect

Ils concernent les zones présentant des anomalies géométriques ou physiques (rugosité excessive, surépaisseur, taches) rendant le produit non conforme. Le contrôle visuel peut suffire, mais est souvent remplacé par des systèmes optiques automatisés.[9]

I.8.2. Les défauts internes

Ce sont des hétérogénéités variées situées à l'intérieur du volume de l'objet. Leur nature, forme et dimensions varient selon les secteurs. Dans l'industrie métallurgique, on trouve des criques internes, porosités, soufflures, inclusions, etc., affectant l'intégrité des pièces. Dans d'autres cas, il peut s'agir de corps étrangers dans un contenant. Ces défauts ne sont pas visibles directement, d'où l'usage de méthodes comme la radiographie, les ultrasons, l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge ou la neutronographie.[9]

I.9. Les techniques de contrôle non destructif

Il existe plusieurs techniques de CND, classées comme suit :

I.9.1. L'examen visuel [10]

L'examen visuel est une méthode simple, rapide et riche en informations. Elle permet de détecter des défauts débouchant ou des hétérogénéités superficielles (taches, marques, etc.), notamment sur les tôles, tissus ou verres.

Bien que l'œil humain soit très performant, il présente des limites. Il convient donc de prévoir des moyens d'aide à l'observation (éclairage, lampes, miroirs, etc.) pour assurer des conditions de vision optimales.

Le processus d'examen visuel comprend trois phases :

- **Phase d'excitation** : génération du faisceau lumineux ;
- **Phase de perturbation** : orientation de la pièce dans le faisceau pour révéler les défauts
- **Phase de révélation** : observation de la surface à travers le faisceau réfléchi.

L'œil peut être remplacé par une cellule photoélectrique ou une caméra pour une inspection automatisée.

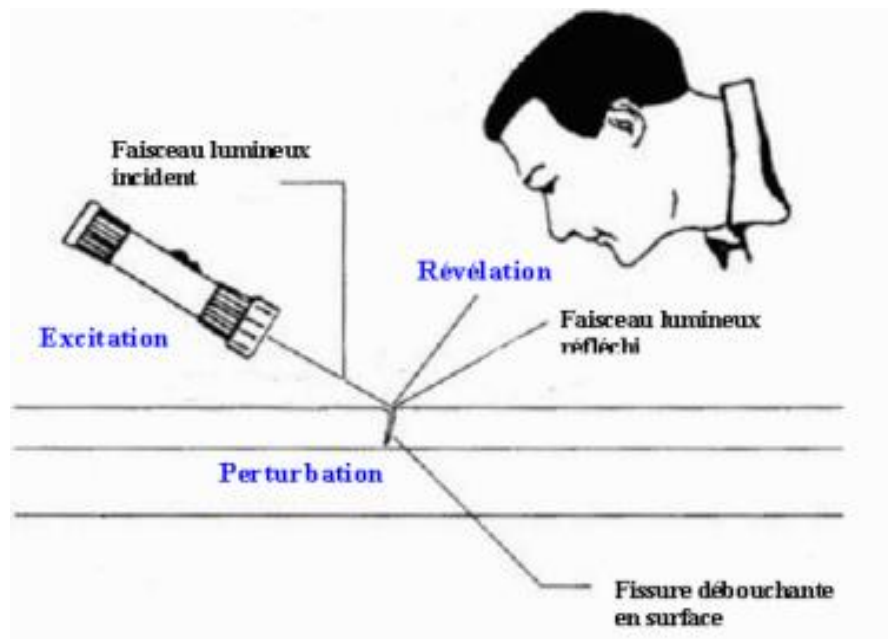


Figure I.3 : L'examen visuel

Avantages :[11]

- Inspection flexible.
- Méthode simple, rapide et économique.

Inconvénients :[11]

- Limité aux défauts visibles.
- Surface propre nécessaire.
- Aucun obstacle ne doit gêner la ligne de visée.
- Méthode restreinte aux surfaces accessibles.

I.9.2. Le ressuage

Le ressuage est une méthode de CND permettant de détecter des défauts de surface invisibles à l'œil nu (fissures, piqûres, déformations), de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Il comporte trois étapes : [12]

1. **Préparation** : nettoyage de la surface, puis application d'un liquide pénétrant (coloré, pré-émulsionné ou fluorescent selon la rugosité et la sensibilité souhaitée). Ce liquide pénètre les microfissures.
2. **Rinçage** : élimination du liquide en surface sans retirer celui resté dans les défauts. Cette étape est cruciale.
3. **Révélation** : application d'un révélateur (poudre ou liquide) qui attire le liquide résiduel en surface, révélant visuellement les défauts sous éclairage adapté.

Cette méthode n'évalue pas la profondeur ou l'importance du défaut ; elle permet uniquement de les détecter.

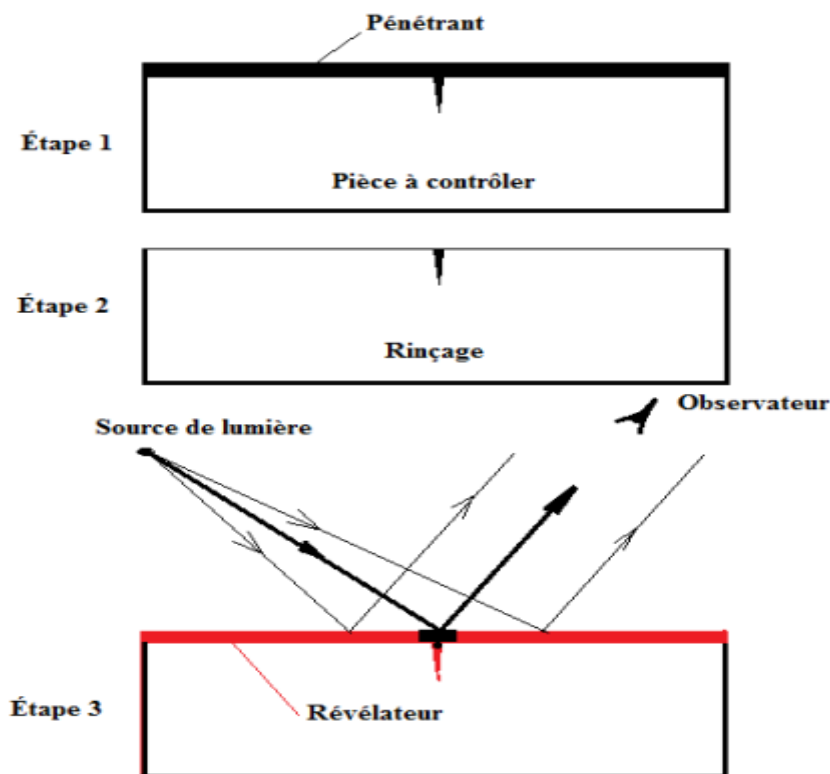


Figure.I.4 principe du ressuage

Avantages : [13]

- Les défauts sont directement visibles à la surface des pièces.
- Les produits et équipements nécessaires au ressuage sont peu coûteux.

- Haute sensibilité pour la détection de petites discontinuités surfaciques.
- Contrôle rapide et économique, adapté aux pièces de grande taille ou de volume important.
- Efficace pour l'inspection des pièces à géométrie complexe.
- Une large gamme de matériaux peut être contrôlée : métalliques, magnétiques, conducteurs, etc.

Inconvénients : [13]

- Nécessite un accès visuel direct à la zone à inspecter.
- Seuls les défauts débouchant directement en surface peuvent être détectés.
- La préparation et le nettoyage rigoureux de la surface sont essentiels, car la présence de contaminants peut masquer les défauts.
- Le respect strict de chaque étape du processus est crucial pour garantir la fiabilité des résultats.
- Température de contrôle à respecter pour de bons résultats.
- Précautions nécessaires en raison de la toxicité et du caractère polluant de certains produits utilisés.

I.9.3. Ultrasons

Le contrôle par ultrasons repose sur la propagation d'ondes ultrasonores dans le matériau à inspecter, ainsi que sur leur réflexion et absorption. L'onde émise par un transducteur traverse la pièce, se réfléchit sur ses limites ou sur d'éventuels défauts, puis revient vers le transducteur, qui joue souvent à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur. L'analyse des signaux de retour permet de localiser précisément les anomalies internes. Cette technique est appréciée pour sa haute résolution spatiale et sa capacité à détecter des défauts profonds. [14]

L'interprétation des signaux est relativement simple lorsque la pièce présente une géométrie régulière et des propriétés homogènes. Toutefois, cette méthode peut s'avérer lente, car elle nécessite un balayage manuel ou automatisé de toute la surface à inspecter. Pour une analyse complète, plusieurs faces de la pièce sont souvent examinées afin de reconstituer une image tridimensionnelle des défauts.

Deux approches sont couramment utilisées : [14]

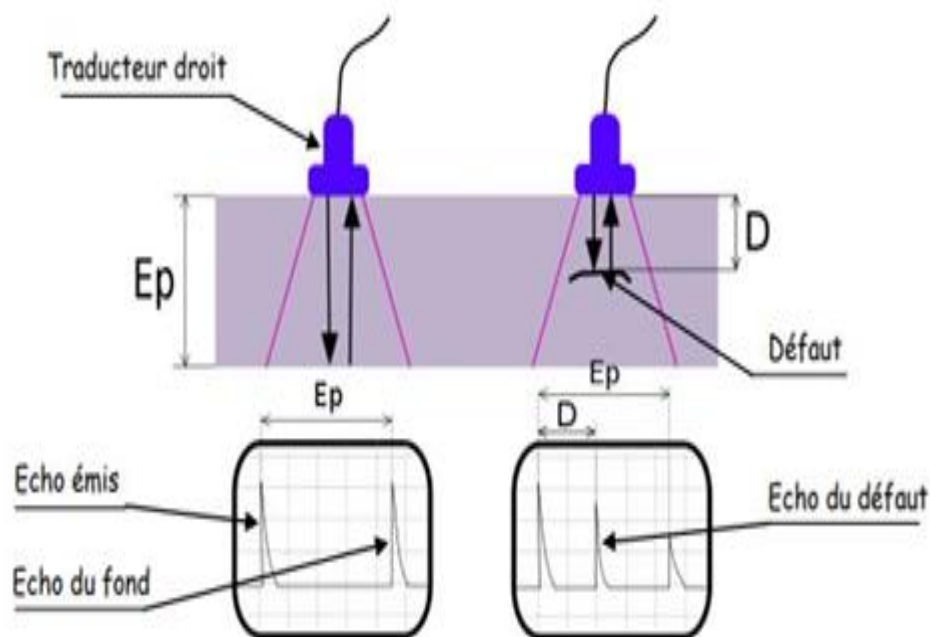
- **La méthode par contact**, où le capteur est directement appliqué sur la pièce, avec un produit de couplage (gel, eau) pour assurer une bonne transmission des ondes.
- **La méthode par immersion**, où la pièce et le capteur sont plongés dans un fluide, généralement de l'eau.

Les ondes ultrasonores réfléchies génèrent un "écho", détecté par le capteur. Lorsqu'une pièce possède deux faces parallèles, la détection de défauts repose sur la comparaison du temps de parcours aller-retour de l'onde ultrasonore dans l'épaisseur totale avec celui observé en présence d'un défaut.

Les signaux réfléchis sont visualisés sur un oscilloscope, où chaque écho apparaît sous forme de pic, permettant ainsi l'identification et la localisation des anomalies internes.

Principe du contrôle par ultrasons : [14]

Exemple : Contrôle d'une tôle.



Ep : épaisseur de la plaque.

D : distance de localisation du défaut

Figure I.5 : Principe de l'ultrason

- Sur l'écran de l'oscilloscope, un premier pic (impulsion d'entrée) apparaît à gauche et un second (écho de fond) à droite. L'intervalle entre ces deux signaux correspond à un aller-retour de l'onde dans l'épaisseur.
- Lorsqu'un défaut est présent sous le palpeur, un écho supplémentaire apparaît. Sa position indique la profondeur du défaut.

Avantages : [11]

- Détection de défauts de très petite taille.
- Grand pouvoir de pénétration, permettant l'inspection de pièces épaisses.
- Localisation précise et évaluation fiable de la taille des défauts.
- Contrôle rapide et automatisable.

Inconvénients : [11] [15]

- Matériel coûteux.
- Requier un personnel qualifié.
- Sensible à la géométrie, à la nature et à l'orientation des défauts.
- Utilisation obligatoire d'un couplant (gel, eau, huile) pour assurer la transmission des ultrasons.

I.9.4. Magnétoscopie

La magnétoscopie repose sur l'induction d'un champ magnétique dans une pièce ferromagnétique. Lorsqu'un courant électrique traverse un matériau conducteur, il génère un champ magnétique. En contrôlant l'orientation de ce courant, on dirige le champ magnétique pour révéler d'éventuelles discontinuités.[16]

Deux modes de magnétisation sont utilisés :[16]

- **Magnétisation circulaire** : un courant axial traverse la pièce, créant un champ circulaire permettant de détecter les défauts perpendiculaires à la direction du courant.
- **Magnétisation longitudinale** : le champ magnétique, généré par une bobine, est parallèle à l'axe de la pièce et permet de détecter des défauts transversaux.

Les fuites du champ magnétique, dues aux discontinuités, sont révélées à l'aide de limaille de fer, d'un film magnétisable ou d'appareils spécifiques.

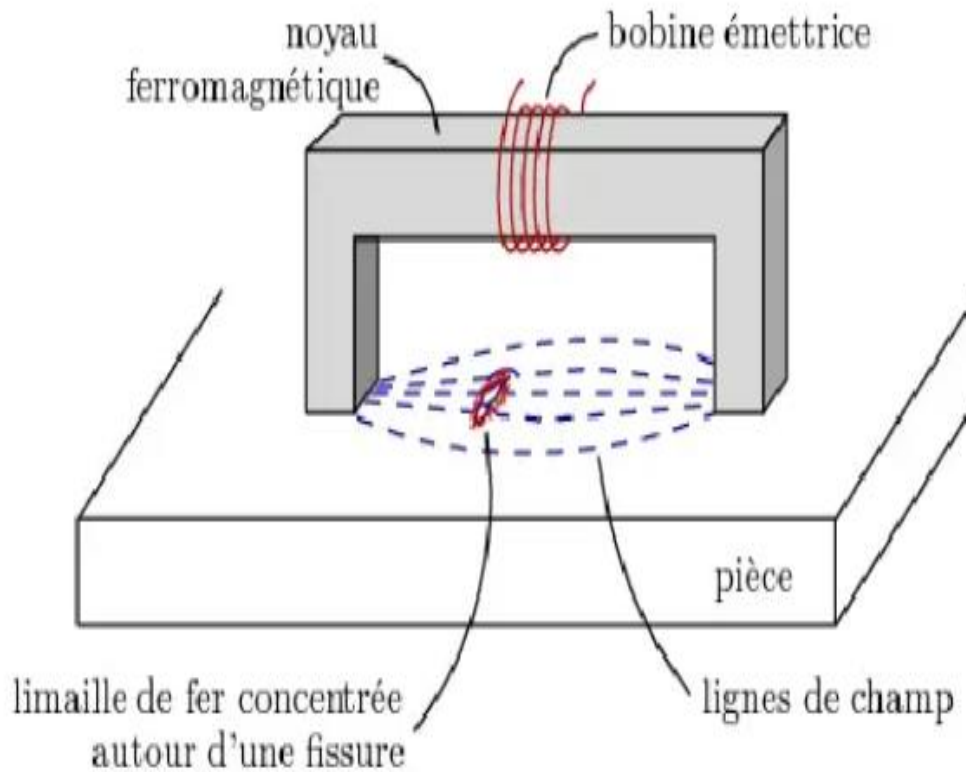


Figure I.6 : Principe de la magnétoscopie

Avantages :[11][18]

- Méthode rapide et simple à mettre en œuvre manuellement.
- Coût faible.
- Détection des défauts de surface et de subsurface.
- Méthode portable et flexible.

Inconvénients :[11][18]

- Applicable uniquement aux matériaux ferromagnétiques.
- L'orientation et l'intensité du champ magnétique doivent être bien maîtrisées.
- Moins efficace pour les défauts internes profonds.

- La sensibilité dépend fortement de la position et de l'orientation du défaut.

I.9.5. Radiographie

La radiographie utilise des rayons ionisants (X ou γ) qui traversent la pièce à inspecter. Le rayonnement atténué est capté par un film ou un capteur électronique, permettant de produire une image mettant en évidence les défauts internes. L'absorption du rayonnement dépend de l'épaisseur et de la densité du matériau traversé. [17]

Cette méthode permet d'identifier de nombreuses discontinuités : porosités, soufflures, inclusions, fissures, criques, manques de fusion, etc. Les défauts parallèles au faisceau sont bien visibles, tandis que ceux perpendiculaires peuvent être plus difficiles à détecter. [17]

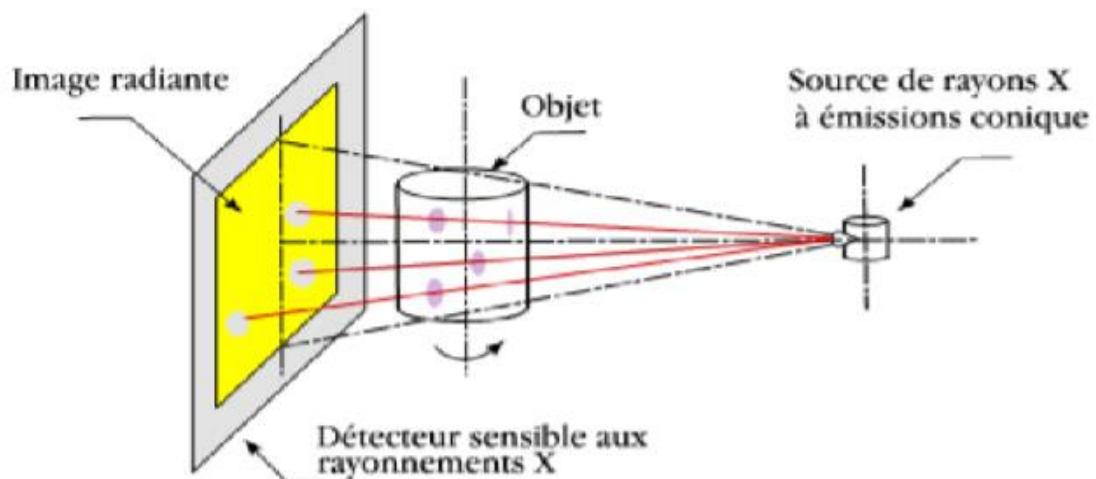


Figure I.7 : Principe de la radiographie

Avantages : [18]

- Inspection de grandes surfaces en une seule fois.
- Applicable à divers matériaux.
- Mise en évidence de défauts internes.
- Technique portable.

- Enregistrement permanent des résultats.
- Appréciation possible de la taille et de la forme des défauts.

Inconvénients : [18]

- Analyse des images nécessitant une expertise élevée.
- Rayonnements dangereux pour la santé humaine.
- Technique coûteuse.
- Accès aux deux faces de la pièce requis.
- Plage d'épaisseur limitée.
- Inadaptée aux pièces à géométrie complexe.

I.9.6. Thermographie

La thermographie repose sur la détection des variations de température en surface, causées par des discontinuités internes ou superficielles. On distingue :[7]

- **Thermographie passive** : observation des différences de température naturelles de la pièce.
- **Thermographie active** : une source de chaleur (laser, lampe, etc.) est utilisée pour exciter la pièce, et la réponse thermique est analysée.

Les défauts apparaissent comme des anomalies thermiques sur les images captées par une caméra infrarouge.

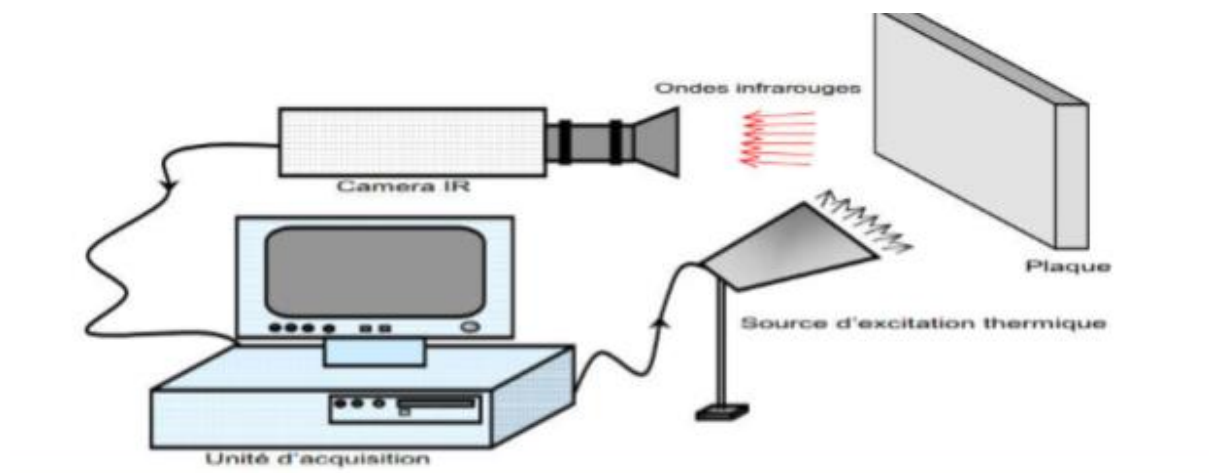


Figure I.8 : Principe de la thermographie

Avantages :[11]

- Technique rapide et sans contact.
- Bonne détection des cavités, fissures, délaminages, etc.
- Inspection complète de la surface.
- Sensibilité élevée aux défauts peu profonds.
- Enregistrement automatique des résultats.

Inconvénients :[11]

- Contrôle lent selon le mode.
- Coût élevé du matériel.
- Sensibilité aux perturbations extérieures.
- Difficile de localiser la profondeur des défauts.
- Identification précise des défauts parfois difficile.
- Pièce à géométrie simple préférable.

I.9.7. Courants de Foucault

La méthode des courants de Foucault (CND-CF) repose sur le principe de l'induction électromagnétique. Elle est applicable à tout matériau conducteur. Un champ magnétique variable génère des courants de Foucault dans la pièce, et toute discontinuité perturbe ce champ, ce qui permet de détecter des défauts.

Cette technique est largement utilisée en milieu industriel pour le contrôle de surface ou de faible profondeur, notamment dans l'aéronautique, l'automobile et la maintenance.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble du contrôle non destructif (CND), en abordant sa définition, son historique, ses objectifs, les défauts détectés ainsi que les principes de détection.

Nous avons ensuite détaillé les principales techniques utilisées en industrie : l'examen visuel, le ressuage, les ultrasons, la magnétoscopie, la radiographie, la thermographie, et enfin

les courants de Foucault. Pour chaque méthode, nous avons exposé les avantages et les inconvénients.

Aucune technique n'est universelle. Le choix dépend de nombreux facteurs : nature, dimensions, accessibilité et état de surface du matériau.

Nous avons conclu en introduisant le contrôle par courants de Foucault, qui fera l'objet d'une étude approfondie dans le chapitre suivant.

Chapitre II : Théorie des courants de foucault

II.1. Introduction

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

Le courant de Foucault est parmi les méthodes CND, c'est une approche classée parmi les techniques électromagnétiques il s'agit d'une méthode d'inspection destinée aux matériaux conducteurs d'électricité, Grâce à sa profondeur de pénétration importante et avec l'utilisation d'un signal pulsé, cette technique permet une inspection rapide, avec une grande sensibilité, tout en fournissant des informations détaillées sur la nature des défauts. Elle offre également l'avantage de pouvoir examiner les deux faces d'un échantillon sans avoir à le déplacer.

Le CND-CF consiste à utiliser les courants induits, ou courants de Foucault pour l'évaluation et le diagnostic des pièces examinées, son utilisation augmente de plus en plus grâce à sa facilité de mise en œuvre.

II.2. Les Courants de Foucault

Les courants de Foucault, ou courants induits, sont des courants électriques générés dans un matériau conducteur soit par la variation temporelle d'un champ magnétique auquel il est soumis, soit par le déplacement de ce matériau à travers un champ magnétique constant.

Ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851 et le premier chercheur à avoir fait des essais de CND par CF a été le physicien britannique « David Hughes » en 1879.



Figure. II.1. Jean Bernard Léon Foucault.

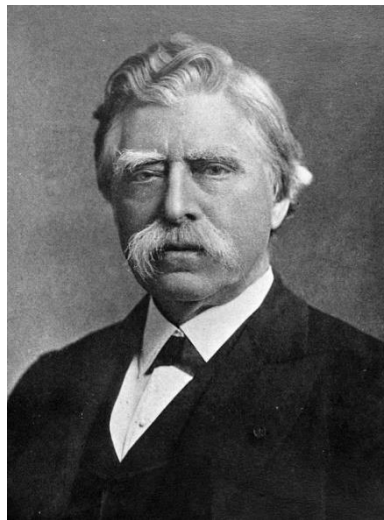


Figure. II.2. David Hughes

II.3. Principe des courants de Foucault [11]

Le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) concerne l'ensemble des matériaux électriquement conducteurs. Ces courants sont des courants induits générés en circuit fermé à l'intérieur d'un objet conducteur placé dans un champ magnétique variable dans le temps.

L'examen par courants de Foucault repose sur le principe suivant : lorsqu'une bobine traversée par un courant variable, tel qu'un courant alternatif, est placée à proximité d'un matériau conducteur, elle induit des courants de Foucault dans ce matériau. Ces courants induits génèrent à leur tour un champ magnétique qui s'oppose à celui de la bobine, modifiant ainsi la

force électromotrice (f.e.m.) et l'impédance de celle-ci. L'analyse de ces variations d'impédance permet d'obtenir des informations utiles pour le contrôle du matériau. En effet, la trajectoire, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des propriétés physiques et géométriques de l'objet examiné, ainsi que des conditions d'excitation, telles que les caractéristiques électriques et la configuration de la bobine.

Il apparaît dès lors qu'un défaut, en introduisant une discontinuité électrique qui perturbe le cheminement des courants de Foucault, peut provoquer une variation de la f.e.m induite ou, en régime harmonique, une variation de l'impédance, mesurable au niveau de la bobine d'excitation.

Ce principe de fonctionnement, relativement simple, est surtout appliqué à la détection de défauts en surface, les courants de Foucault étant majoritairement confinés aux couches superficielles des matériaux conducteurs l'effet de peau superficielles des matériaux conducteurs(l'effet de peau).

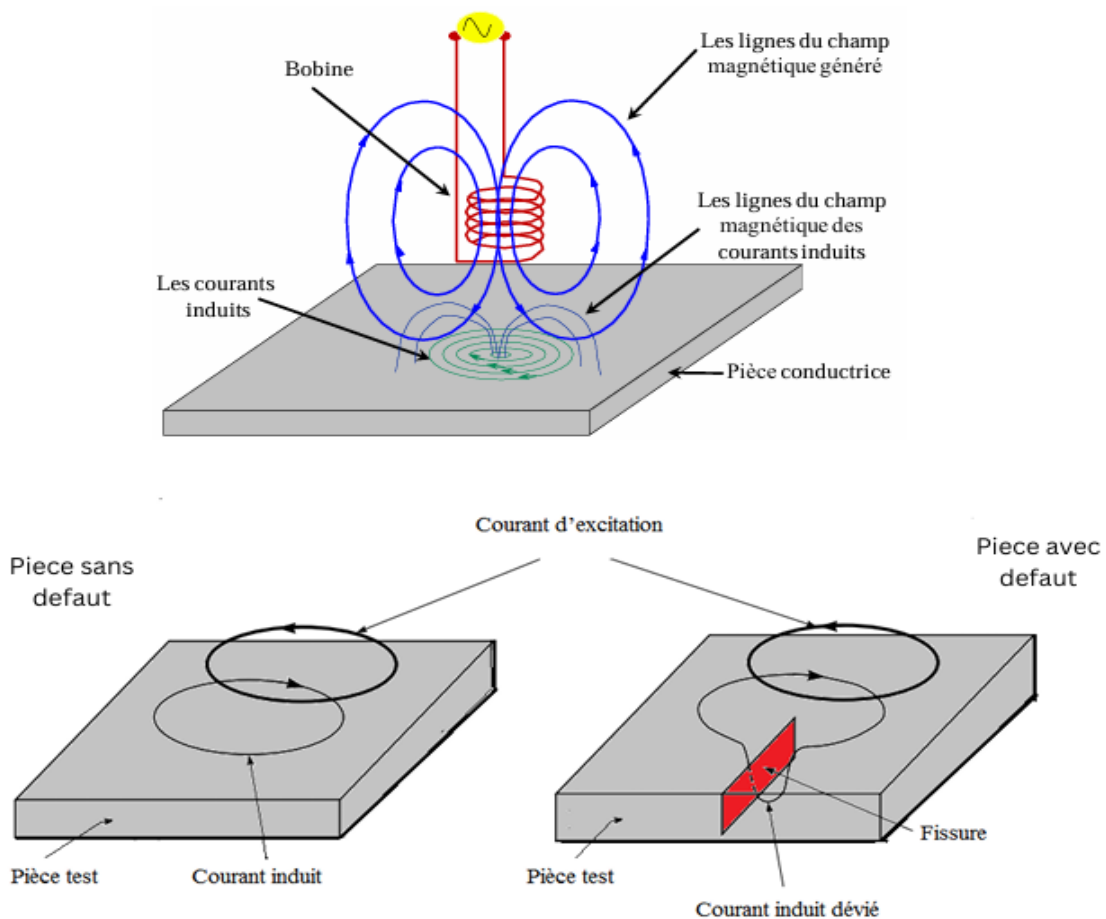


Figure.II.3. Principe du CND par courants de Foucault.

II.4. Matériel utilise

Généralement en utilise : [19]

- Un générateur de courants de Foucault numérique multifréquence, avec fréquences multiplexées ou non.
- Un enregistreur graphique thermique multivoies permettant la visualisation des signaux de courants de Foucault.
- Un système de stockage numérique des signaux sur disque magnéto-optique.
- Un dispositif pousseur-tireur de sonde à vitesse réglable.
- Des capteurs de différents types, chacun étant adapté à la géométrie et à la nature du matériau à contrôler.

II.5. Schéma synoptique du dispositif

Le contrôle non destructif par courants de Foucault repose principalement sur une chaîne composée d'un générateur alimentant la sonde, de la pièce à examiner, et d'un système de visualisation chargé d'afficher une grandeur dérivée des courants de Foucault.[20]

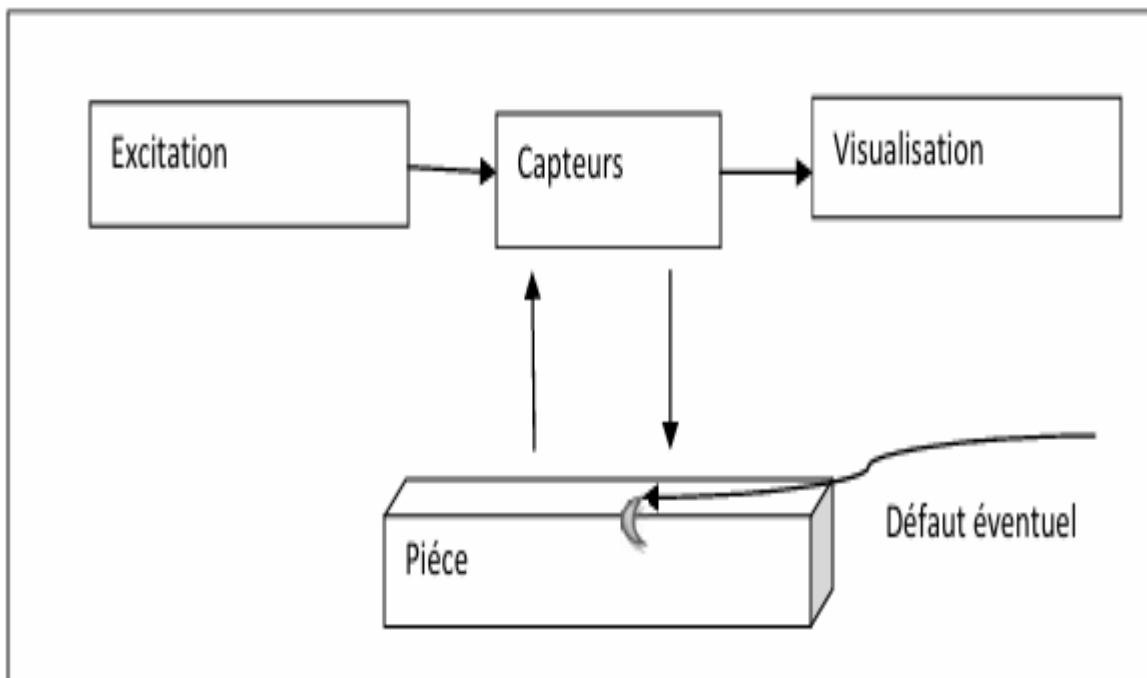


Figure.II.4. Schéma synoptique de la chaîne de contrôle

II.6. Objectifs des CND-CF

Un capteur à courants de Foucault peut remplir plusieurs fonctions, car l'impédance du système capteur/pièce dépend des propriétés électromagnétiques et géométriques de cette dernière. Il peut ainsi soit à analyser ces caractéristiques, soit à évaluer l'intégrité de la pièce en détectant et en identifiant d'éventuels défauts. La figure (II.5) illustre les différentes fonctions d'un capteur CF. [21]

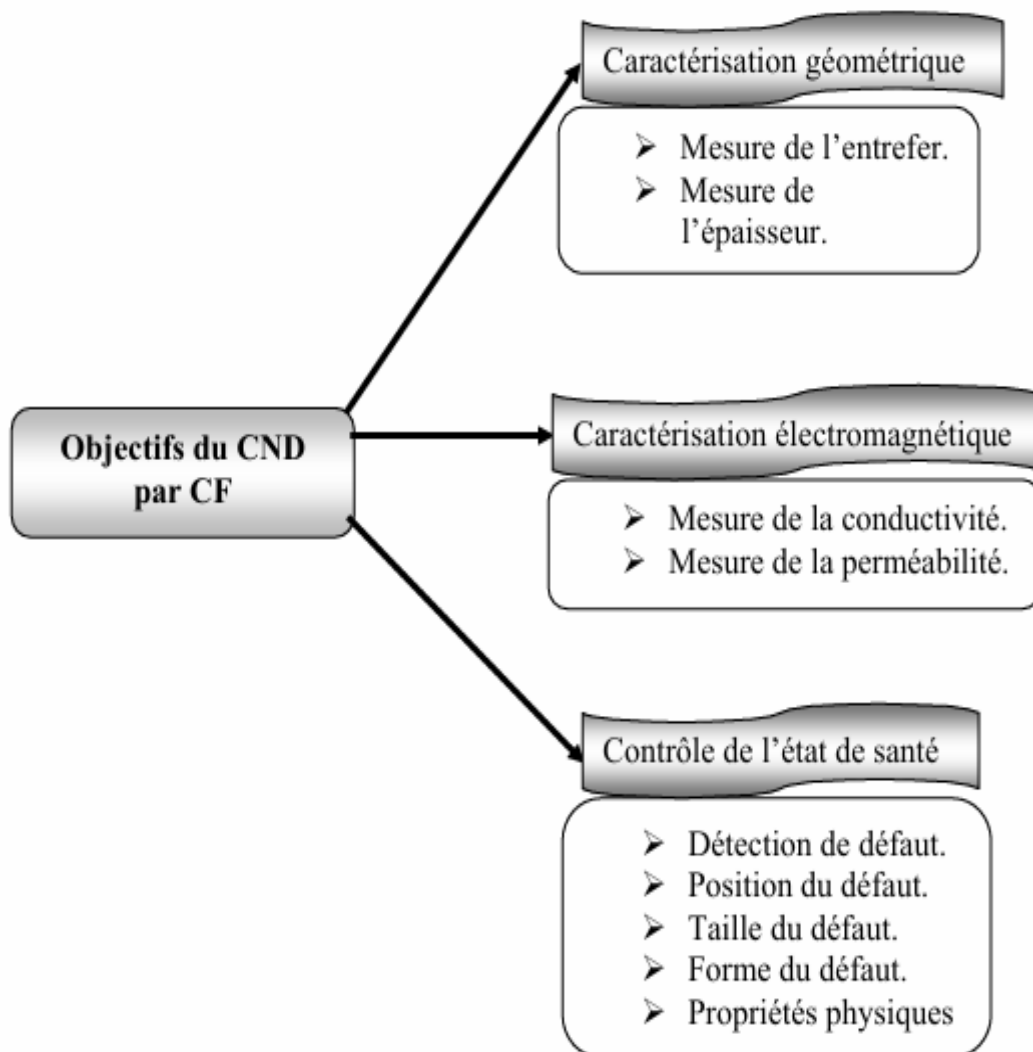


Figure.II.5. Les différentes fonctions d'un capteur CF

II.7. Domaine d'application du CND par courant de Foucault

Le CND-CF (contrôle non destructif par courant de Foucault) peut être appliqué aux :

- Matériaux conducteurs magnétiques ou amagnétiques.
- Contrôles de filtrages (détection de métaux dans un environnement donné).
- Contrôles des tôles minces.
- Contrôle d'épaisseur de revêtement.
- Matériaux composites comportant des fibres conductrices.

II.8. Principaux paramètres influant sur le contrôle

Les principaux paramètres à considérer lors d'un contrôle, selon les éléments évoqués précédemment, peuvent être classés en trois catégories principales :[22]

- Les paramètres liés au matériau à inspecter,

En plus de la forme géométrique, les paramètres essentiels à prendre en compte sont la conductivité électrique (σ) et la perméabilité magnétique (μ). Toute variation de ces propriétés, telles que des changements dans la conductivité ou la perméabilité, peut causer des défauts, des chocs ou des perturbations dans le matériau.

- Les paramètres liés au montage

Les déplacements du capteur par rapport à la surface de la pièce peuvent causer des variations importantes de l'impédance. Ces variations peuvent être d'une amplitude telle qu'elles risquent de masquer les signaux caractéristiques des défauts.

- Les paramètres électriques

La fréquence d'excitation de la bobine est un paramètre essentiel que l'on maîtrise totalement. Elle est choisie de manière à garantir un effet de peau optimal à la profondeur des défauts, tout en positionnant le point de fonctionnement sur le diagramme complexe de façon à bien distinguer les différentes influences sur l'impédance Z .

En revanche, l'intensité du courant alternatif alimentant la bobine n'a qu'un rôle secondaire, à condition qu'elle reste suffisamment faible pour éviter toute saturation magnétique. Une telle saturation introduirait des non-linéarités rendant l'analyse des signaux difficile.

II.9. Densité du courant

Si on considère une pièce plane infinie excitée par une nappe de courants extérieure, de fréquence f , parallèle au plan, le module de la densité de courant dans la pièce est exprimé par la relation suivante :[11]

$$J_{(z)} = J_s \exp(-z\sqrt{\pi f \sigma \mu}) = J_s \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \quad (\text{II.1})$$

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

$J_{(z)}$: Le module de la densité de courant à la profondeur z . :

J_s : Le module de la densité de courant à la surface de la pièce ($z = 0$). :

δ : La profondeur de pénétration ou épaisseur de peau.

II.11. Effet de peau

Il s'agit d'un phénomène physique qui apparaît dans les matériaux conducteurs lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique (ou un courant) variable dans le temps. Dans ce cas, le champ électromagnétique se concentre dans une fine couche en surface, d'épaisseur δ .

La profondeur de pénétration δ est donc donnée par la relation suivante :[11]

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

δ = l'épaisseur de peau [m].

f = la fréquence du courant [Hz].

μ = la perméabilité [H/m].

σ = la conductivité électrique [S/m].

On peut constater que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur. Il en résulte qu'environ 37 % des courants induits passent entre la surface et cette profondeur δ , créant une zone de forte sensibilité et qui est très importante du point de vue de la sensibilité à la détection des défauts dans la technique de contrôle non destructif par courants de Foucault.[5][11]

La réponse d'une cible à une excitation est recueillie par un élément sensible à une grandeur électromagnétique. Dans la majorité des cas il s'agit de mesurer une impédance ou une différence de potentiel (d.d.p) représentative de la variation d'un flux. Cette mesure s'effectue souvent par l'intermédiaire d'une bobine.[11]

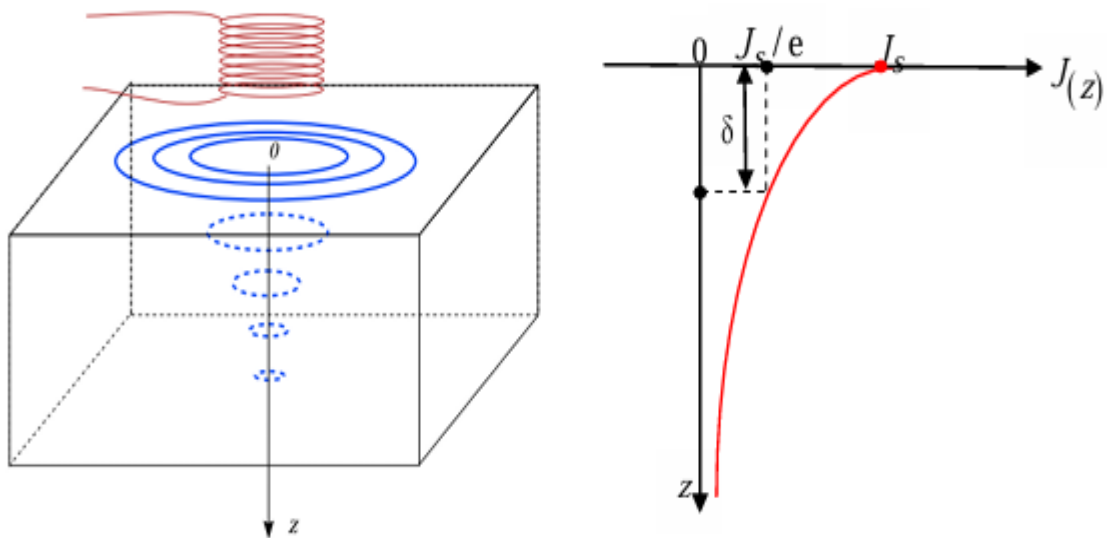


Figure.II.6. Répartition des courants de Foucault pour une pièce

II.12. Modes d'excitation

L'extraction de l'information sur la pièce à contrôler est liée au mode d'excitation de la sonde. On peut distinguer trois modes d'excitation :

- Excitation monofréquence.
- Excitation multifréquence.
- Excitation pulsée.

II.12.1. Excitation mono fréquence [23]

Les courants de Foucault sont induits par une excitation sinusoïdale à fréquence constante, fournie par un générateur pouvant fonctionner à fréquence fixe ou variable. Le choix de la fréquence dépend principalement de l'application spécifique et des paramètres à examiner. Cette fréquence joue un rôle essentiel, car elle détermine à la fois la profondeur de pénétration des courants et la capacité à distinguer les signaux associés à différents types de défauts.

Une fréquence trop faible entraîne des courants de faible amplitude, rendant les mesures sensibles au bruit et donc peu fiables. En revanche, une fréquence trop élevée peut introduire des effets capacitifs indésirables, notamment dus aux capacités inter spires du capteur.

Il n'existe pas de règle unique permettant de choisir la fréquence idéale. Ainsi, cette méthode d'excitation présente certaines limitations : elle ne permet pas toujours une caractérisation précise des défauts et reste sensible à l'influence de plusieurs facteurs perturbateurs.

II.12.2. Excitation multifréquence [24]

Le contrôle par courant de Foucault en mode mono-fréquentiel ne fournit que deux types d'informations : la résistance et la réactance normalisées. Cette méthode permet de localiser un défaut dans l'espace et, dans certains cas, d'en estimer la taille. Toutefois, elle présente des limites : elle ne permet ni de distinguer plusieurs défauts présents simultanément, ni d'isoler les effets de perturbations externes, comme celles causées par les entretoises dans les tubes des générateurs de vapeur.

La technique multifréquence constitue une amélioration de la méthode mono-fréquentielle. Elle utilise plusieurs fréquences (souvent entre deux et quatre), ce qui permet d'obtenir jusqu'à $2n$ informations pour n fréquences employées. Cette approche élargit ainsi la capacité d'analyse en permettant la discrimination d'un nombre plus important de paramètres.

Le recours à cette technique répond à un double objectif : localiser le défaut avec précision et en extraire les caractéristiques malgré la présence de bruits parasites d'origines diverses. Cependant, cette méthode implique un coût plus élevé, ce qui limite son utilisation aux secteurs où la sécurité est un enjeu majeur.

II.12.3. Excitation pulsée

Le contrôle par courants de Foucault pulsés représente une technique innovante et en plein essor dans le domaine du contrôle non destructif. À l'origine, cette méthode a été utilisée pour mesurer l'épaisseur de matériaux, mais son champ d'application s'est progressivement élargi : inspection d'assemblages rivetés, détection d'inclinaisons, analyse de surfaces irrégulières, caractérisation de revêtements, identification de défauts profonds et de phénomènes de corrosion, notamment dans des structures composées de plusieurs couches. [10]

Contrairement à la méthode classique, où le champ électromagnétique est généré par une excitation sinusoïdale, la technique pulsée repose sur l'émission d'impulsions de courant. Elle est particulièrement adaptée à l'examen de matériaux multicouches et de forte épaisseur. [8]

L'onde électromagnétique générée se propage à travers le matériau et est captée par une sonde réceptrice séparée, conçue pour être isolée du rayonnement direct de la bobine émettrice. Le caractère « pseudo-échographique » du signal recueilli permet une sensibilité accrue à la structure interne du matériau. Cela en fait une méthode efficace pour la mesure d'épaisseurs de revêtements et la détection de défauts enfouis sous la surface. [8]

II.13. Gammes de fréquences

II.13.1. Gammes basses fréquences (1Hz :1KHz)

Les courants de Foucault à basse fréquence permettent d'évaluer l'état général d'une pièce. Cette méthode est appropriée pour l'inspection de produits de grande épaisseur ou pour le contrôle de qualité (tri de matériaux en fonction de leur nuance interne) ainsi que pour la détection de défauts volumineux et profonds. Elle est principalement employée pour les produits ferromagnétiques en raison des préoccupations liées à la pénétration. Cette technique est largement répandue dans le secteur industriel. Sa mise en œuvre est aisée, elle est très peu coûteuse et affiche une sensibilité au manque de matériau. Toutefois, si la fréquence est trop

faible, l'amplitude des courants de Foucault sera insuffisante, ce qui réduit la précision des mesures en raison du bruit parasite. [20]

II.13.2. Gamme moyenne fréquence [1kHz :1MHz

C'est le secteur le plus utilisé pour mesurer des épaisseurs faibles, comme les plaques ou les barres co-filées. Ce domaine de fréquence inclut aussi la surveillance de la santé (détection des fissures débouchantes, les inclusions, occlusion, etc.) ainsi que l'inspection des propriétés métallurgiques (traitements de surface, conductivité, etc.). [3]

II.13.3. Gamme haute fréquence : >1MHz

Les fréquences dépassant 1 MHz sont très rarement exploitées. Elles peuvent provoquer des capacités indésirables entre les spires du capteur ainsi qu'entre le capteur et le matériau. Leur usage se restreint principalement à la mesure de l'entrefer, à la détection des microfissures de surface et à la modélisation des micro-bobines dans les secteurs des télécommunications et de la résonance magnétique nucléaire. [3]

II.14. Les capteurs

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable. Il est un élément de base des systèmes d'acquisition de données. Nous pouvons aussi affirmer qu'il est plus qu'un instrument de mesure, car il se comporte comme une interface entre un processus physique et une information manipulable (donnée accessible à l'utilisateur).[25]

II.14.1. Classification des capteurs

Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs. La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle. Résumons les trois critères déjà cités.[21]

Selon la Géométrie on a :

- Sonde interne
- Sonde encerclant
- Bobine ponctuelle
- Bobine plate

Selon la fonction on a :

- Doubles fonctions
- Fonctions séparées

Selon le mode on a :

- Mode absolu
- Mode compensé
- Mode différentiel

II.14.2. Types de capteurs

Selon la forme géométrique, on distingue cinq principales configurations :

II.14.2.1. Capteur axial encerclant où bobine encerclant

Ce sont des capteurs dont les bobines de mesure entourent complètement le produit à contrôler. Ils sont conçus pour l'inspection des produits longs ou des pièces en défilement, tels que les tubes ou les barres. Ce type de capteur est le plus couramment utilisé dans le domaine industriel.[26]

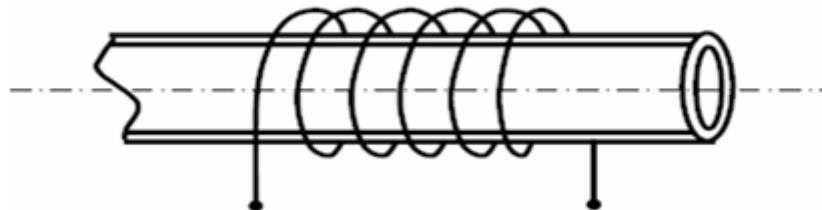


Figure.II.7. Bobine encerclant

II.14.2.2. Capteur axial interne ou sonde

Il s'agit d'un capteur utilisé pour l'examen intérieur de produits creux, avec des enroulements de mesure qui entourent l'axe de translation. Il peut être fonctionner avec ou sans noyau. [26]

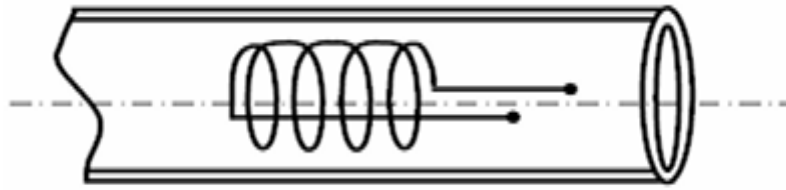


Figure.II.8. Bobine interne glissante

II.14.2.3. Sonde ponctuelle ou palpeur

Elle permet l'inspection des objets à des endroits spécifiques, avec l'axe du capteur perpendiculaire à la surface de la pièce. Ce palpeur offre la possibilité d'effectuer un contrôle local, même pour les pièces aux géométries complexes. [27]

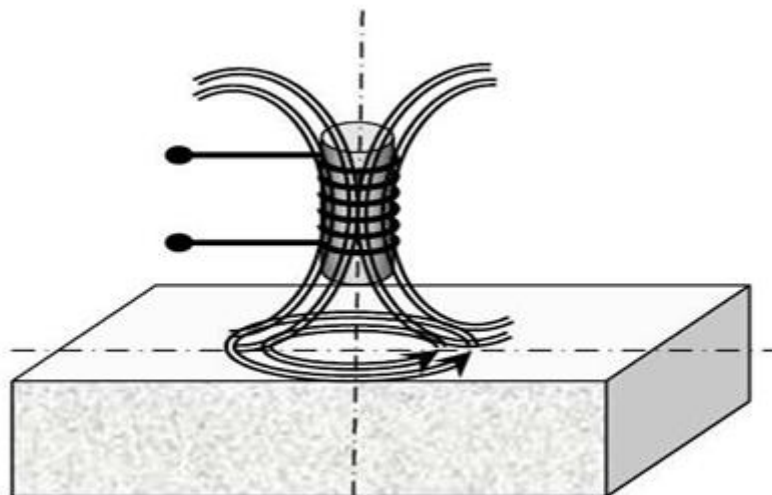


Figure.II.9. Bobine simple avec noyau.

II.14.2.4. Bobine plate

Comme la bobine ponctuelle, ce capteur fonctionne sur les surfaces des pièces. Sa géométrie lui permet de couvrir une zone d'action plus vaste. (figure II.10).[21]

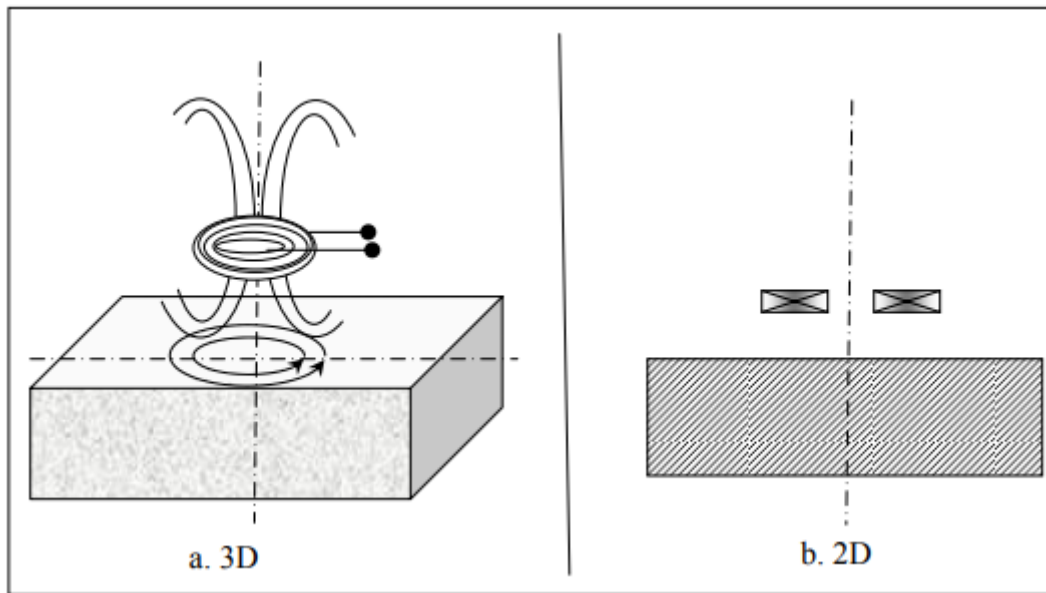


Figure. II.10. Bobine plate

II.14.2.5. Sonde interne tournante

Ce genre de capteur effectue une rotation autour de l'axe de translation, générant ainsi un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Cela permet de localiser précisément le défaut sur la surface interne du tube. [21]

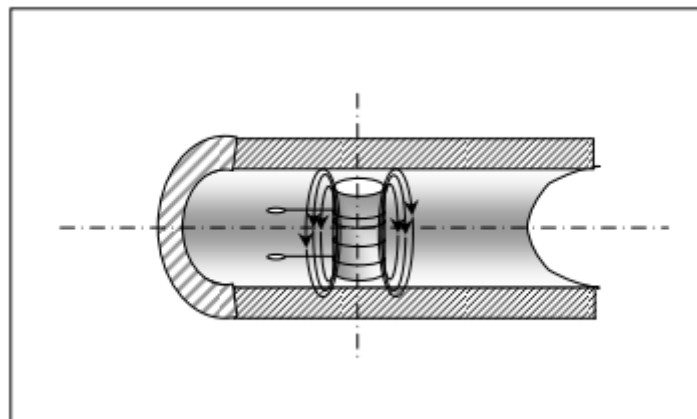


Figure.II.11. Capteur interne tournant

II.14.3. Fonctions du capteur

En principe tous les capteurs assurent deux fonctions : La fonction d'alimentation et de mesure. Si ces dernières sont assurées par un seul enroulement, on parle de capteur à double fonction, sinon il s'agit d'un capteur à fonctions séparées.

II.14.3.1. Capteur à double fonction

Les capteurs à double fonction sont les plus fréquemment employés dans les applications de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) utilisant une excitation sinusoïdale.

Ce type de capteur inductif est constitué d'une seule bobine assurant simultanément les fonctions d'émission et de réception du champ magnétique (Figure II.12).[2]

L'analyse se base sur la mesure de l'impédance de la sonde, laquelle fournit des informations sur la présence et la gravité d'éventuels défauts. [2]

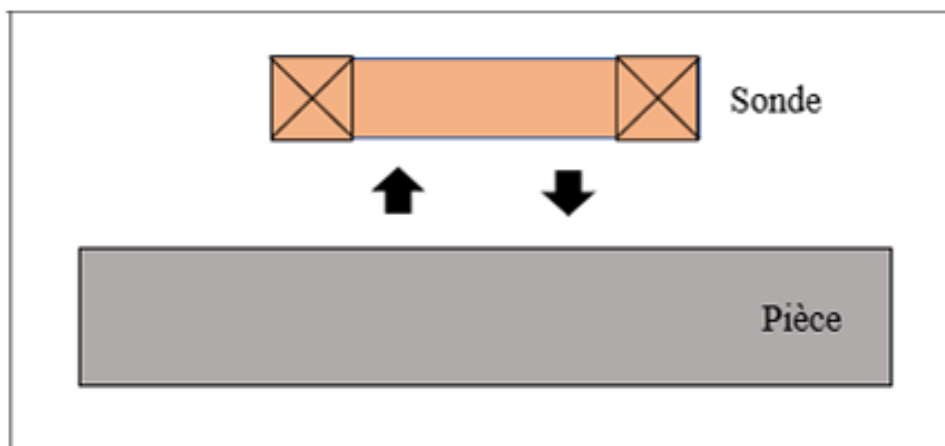


Figure II.12. Capteur à double fonction (Capteur absolu)

II.14.3.2. Capteur à fonctions séparées

Les capteurs de ce type comportent deux enroulements distincts : l'un dédié à l'excitation, l'autre à la réception. Ce type de configuration est couramment utilisé pour détecter des défauts de grande taille ou situés en profondeur. Le principe repose sur le transfert du champ magnétique d'une région à une autre. [2]

Pour détecter ce type de défauts, il est nécessaire d'agrandir la bobine d'excitation, ce qui entraîne une diminution de la résolution spatiale. Afin de compenser cette perte, la réception est assurée par une bobine plus petite. Selon les configurations, les deux enroulements peuvent être placés de façon enchevêtrée ou séparée. [2]

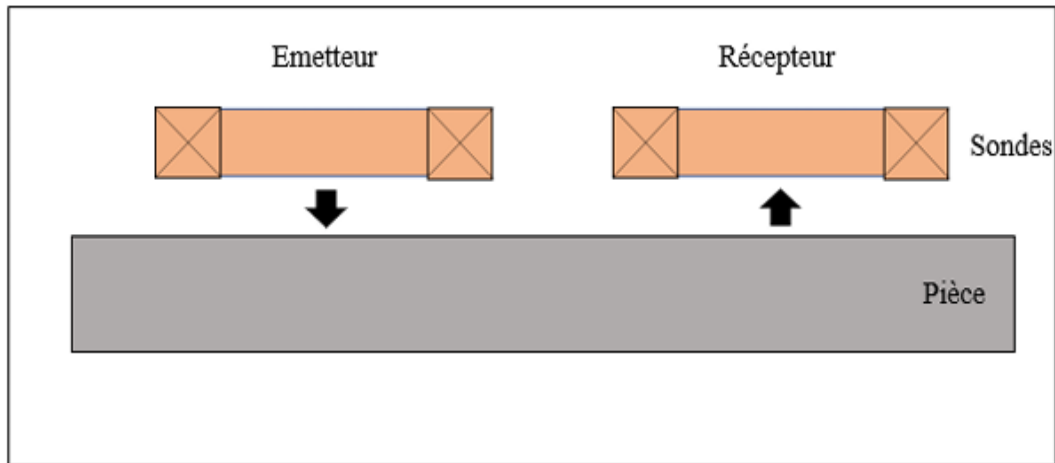


Figure. II.13. Capteur à fonctions séparées. (Capteur différentiel)

II.14.4. Modes de contrôles

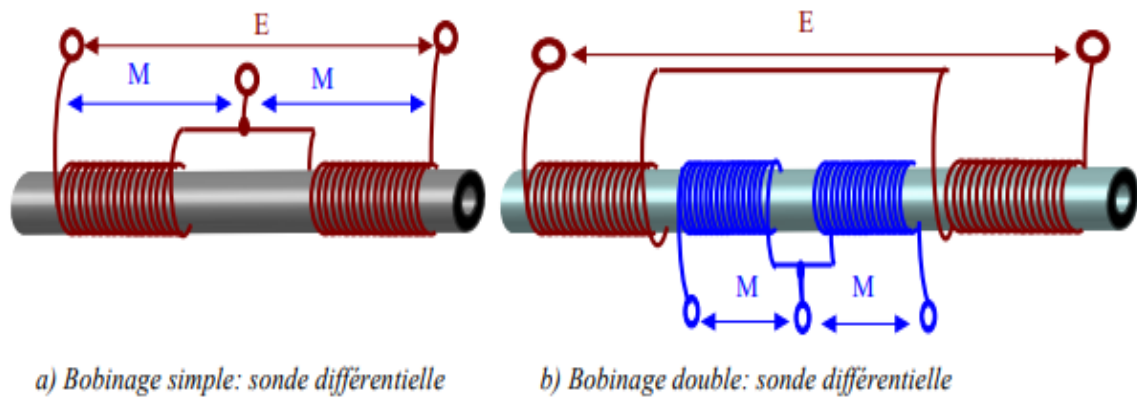
On distingue deux modes de contrôle : mode différentiel, mode compensé et mode absolu.

II.14.4.1. Mode différentiel [28]

Un capteur en mode différentiel permet de mesurer uniquement les variations locales des caractéristiques du produit examiné, en comparant deux mesures simultanées effectuées dans deux zones voisines. La bobine de réception se compose de deux enroulements montés en opposition.

Dans les applications de contrôle, il est souvent difficile d'éliminer les effets perturbateurs, comme les variations locales du *lift-off* ou de la perméabilité magnétique, qui altèrent les signaux de défaut. Une solution pour surmonter cette difficulté consiste à utiliser un capteur constitué de deux bobines identiques, placées côte à côte et câblées en différentiel électrique. Ainsi, les variations locales des propriétés électromagnétiques affecteront les deux sondes de manière similaire, ce qui ne crée pas de déséquilibre. Cependant, un défaut unitaire touchera une seule bobine, produisant un déséquilibre qui pourra être détecté grâce au signal différentiel, permettant ainsi de localiser le défaut par asymétrie.

La Figure (II.14) présente un montage différentiel pour le contrôle d'une barre pour un bobinage simple et double



E : excitation

M : mesure

Figure.II.14. Contrôle en mode différentiel.

II.14.4.2. Mode de contrôle compensé [22]

Pour éliminer l'influence des grandeurs perturbatrices, on utilise le mode absolu compensé. Ce procédé de contrôle fait appel à deux bobines :

L'une est placée près de la surface à inspecter, tandis que l'autre est positionnée sur une surface saine du même matériau, comme illustré à la figure (II.15). La première capte à la fois les signaux utiles et les perturbations, alors que la seconde ne capte que les signaux parasites. En comparant les deux mesures, il est possible d'extraire uniquement les signaux utiles liés au défaut.

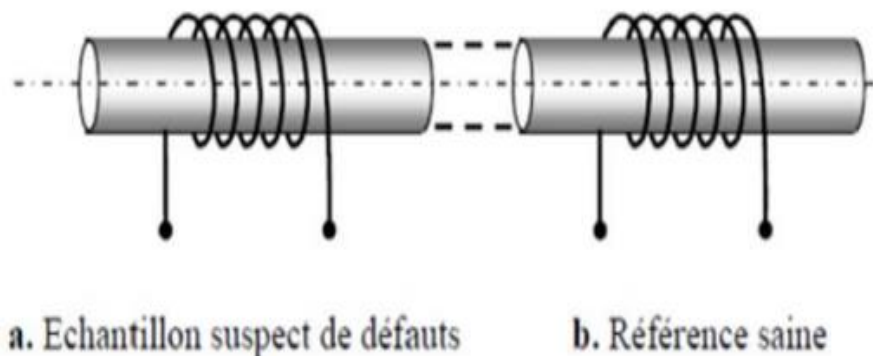
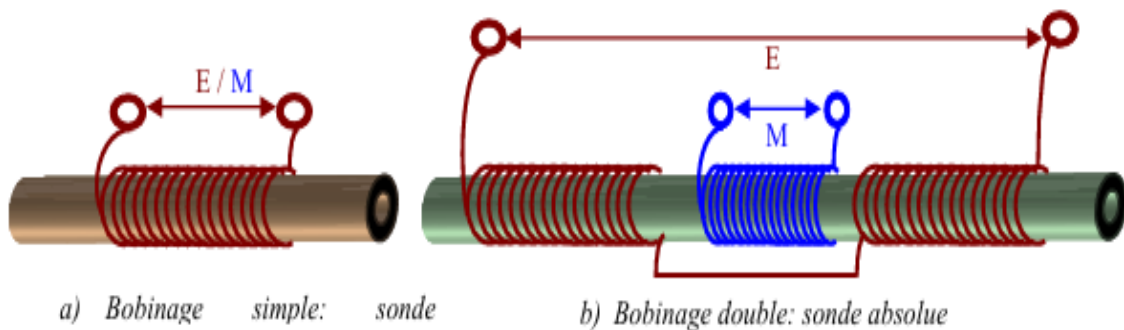


Figure. II.15. Mesure en mode compensé.

II.14.4.3. Mode de contrôle absolu [28]

Un capteur en mode absolu permet de mesurer non seulement les grandeurs utiles, mais aussi les grandeurs perturbatrices, telles que la température, qui peut affecter la perméabilité magnétique (μ) et la conductivité électrique (σ) du matériau testé.

Pour éliminer l'impact de certaines grandeurs perturbatrices et simplifier les ajustements dans le plan d'impédance, on utilise le mode absolu compensé avec une référence externe. Dans cette configuration, la bobine de mesure est associée à une bobine externe, alimentée dans les mêmes conditions, qui sert de référence pour les mesures.



E : excitation

M : mesure

Figure.II.16. Mode de contrôle absolu

II.15. Plan d'impédance normalisée

Inspecter un matériau, cela revient à examiner l'impédance complexe Z du capteur en interaction avec la cible [23]. Pour un bobinage de N spires parcouru par un courant alternatif sinusoïdal I_{exc} , cette impédance est définie par : [15]

$$Z = \frac{V_{exc}}{I_{exc}} = R + jX \quad (II.3)$$

V_{exc} : La grandeur complexe associée à la tension d'excitation.

I_{exc} : La grandeur complexe associée au courant d'excitation.

Une sonde est donc caractérisée par deux paramètres : **[15]**

- La composante résistive R , qui représente les pertes par courants de Foucault résultant de la pénétration du champ dans la cible, ainsi que les pertes internes du bobinage d'excitation.
- La composante inductive X , qui représente la réactance du bobinage d'excitation, en lien avec la topologie des lignes de champ magnétique émises par la sonde.

Dans l'expression de cette impédance, on ne conserve que les variations dues à la présence de la cible, d'où on introduit la notion d'impédance normalisée Z_n qui se déduit de Z à l'aide de l'expression : **[15] [29]**

$$Z_n = R_n + jX_n = \frac{Z - R_0}{X_0} \quad (\text{II.4})$$

Avec $Z_0 = R_0 + jX_0$ est l'impédance à vide de capteur (sans cible).

Grâce à cette normalisation, la mesure devient indépendante de certaines caractéristiques propres à la bobine d'excitation, telles que le nombre de spires, les pertes à vide ou encore la variation de la réactance avec la fréquence. Elle ne dépend plus que des paramètres structurels comme la fréquence d'excitation et la géométrie de la sonde ainsi que des propriétés de la cible, à savoir sa géométrie, sa conductivité électrique σ , sa perméabilité magnétique et la distance entre la sonde et la cible (lift-off). **[29]**

L'analyse des variations de Z_n se fait dans le plan des impédances normalisées, en traçant X_n en fonction de R_n . Pour un capteur donné, toute modification d'un des paramètres de la pièce provoque un déplacement du point représentant Z_n dans ce plan.

La figure (II.17); illustre l'allure des trajectoires que décrit le point d'impédance de la sonde pour des variations de conductivité électrique σ et de distance de mesure (lift-off). **[15]**

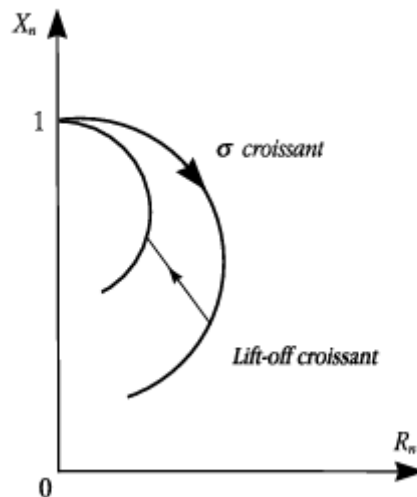


Figure.II.17. Influence de σ ou du lift-off sur le diagramme d'impédance normalisée (cas d'une pièce amagnétique)

La prédétermination de ces trajectoires pour une cible quelconque est un problème relativement complexe qui nécessite une modélisation complète du dispositif. Un modèle de type transformateur a par exemple permis d'identifier, à partir des deux mesures (R_n, X_n) , la conductivité locale de la cible et la distance séparant la sonde de la cible. [15]

La présence de défauts ou d'inhomogénéités de la cible induit une modification dans l'espace de l'un ou de plusieurs des paramètres influents (σ , lift – off ...), qui se traduit dans le plan d'impédance (R_n, X_n) , par un déplacement du point représentatif de la sonde. [15]

II.16. Les avantages de CF [19] [28][30]

- Simplicité d'utilisation.
- Coût faible.
- Contrôle rapide
- Grande sensibilité de détection des défauts (dimensionnelles, structurales...).
- Automatisation facile avec des résultats instantanés.
- Absence de contact entre la sonde et la pièce à contrôler.
- Capacité de mesure à des températures très élevées et en milieu aquatique.

- Inspection possible pour des pièces de géométrie simple (tubes, barres, rubans et câbles).
- Recherche de défauts à des profondeurs faibles.
- Ne présente aucun risque pour l'opérateur ni pour l'environnement.

II.17. Les inconvénients de CF [19][28][30]

- Méthode applicable uniquement aux défauts externes.
- Limitée aux matériaux ayant des propriétés conductrices d'électricité.
- La profondeur d'inspection dépend de la fréquence d'excitation.
- Peu adaptée à la détection des défauts situés en profondeur.
- Très sensible au lift-off (décollement entre bobine et pièce inspectée)
- Mesures locales et limite à des formes de pièces simples.
- Le personnel d'inspection doit être formé et posséder les compétences requises.

II.18. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mené une étude complète sur les courants de Foucault. Où nous avons rappelé en détail la définition de CF, le principe de détection d'un éventuel défaut, l'équipement utilisé dans ce type de contrôle, le domaine d'application de cette méthode et les objectifs à atteindre grâce à l'utilisation de cette technologie.

Pour l'extraction de l'information sur la pièce à contrôler, on a cité les modes d'excitation de la sonde ; excitation monofréquence, excitation multifréquence, excitation pulsée. Et les gammes de fréquence adaptées pour diagnostiquer chaque défaut. Après nous avons défini les capteurs et divisé ses types selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle. Enfin, nous avons conclu ce chapitre en évoquant les avantages et les inconvénients de cette technologie.

Ce deuxième chapitre a été consacré à la présentation de la théorie de courants de Foucault. Le prochain sera consacré à la méthodologie de modélisation.

Chapitre III : Méthodologie de modélisation

III.1. Introduction

La technique de contrôle non destructif par courants de Foucault est employée pour inspecter des objets conducteurs, afin de concevoir des systèmes de contrôle optimisés et de démontrer leurs performances. La procédure d'inspection exige un ensemble de connaissances concernant les propriétés physiques des matériaux, les phénomènes électromagnétiques, les défauts, ainsi que les pièces examinées.

Il est donc essentiel de développer une modélisation permettant de comprendre le comportement de cette technique, afin d'optimiser et de prédire la détectabilité des défauts. Cette modélisation fait appel à des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques, basées sur des grandeurs physiques (température, vitesse, champ électromagnétique...) qui décrivent l'état du système.

La modélisation du CND par courants de Foucault consiste à établir une structure mathématique basée sur la résolution des équations de Maxwell, permettant de prédire la réponse du capteur en fonction des paramètres de la cible. Cette résolution peut être analytique, semi-analytique ou numérique, selon la complexité de la configuration.

III.2. Intérêt de modélisation

La technique de contrôle non destructif par courants de Foucault est employée pour inspecter des objets conducteurs, afin de concevoir des systèmes de contrôle optimisés et de démontrer leurs performances. La procédure d'inspection exige un ensemble de connaissances concernant les propriétés physiques des matériaux, les phénomènes électromagnétiques, les défauts, ainsi que les pièces examinées. [15]

Il est donc essentiel de développer une modélisation permettant de comprendre le comportement de cette technique, afin d'optimiser et de prédire la détectabilité des défauts. Cette modélisation fait appel à des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques, basées sur des grandeurs physiques (température, vitesse, champ électromagnétique...) qui décrivent l'état du système. [3]

La modélisation du CND par courants de Foucault consiste à établir une structure mathématique basée sur la résolution des équations de Maxwell, permettant de prédire la réponse du capteur en fonction des paramètres de la cible. Cette résolution peut être analytique, semi-analytique ou numérique, selon la complexité de la configuration. [30]

III.3. Equations de maxwell

Les problèmes de modélisation liés au calcul des courants de Foucault, qui sont l'objet de notre étude, peuvent être représentés par un modèle comprenant l'air, le matériau conducteur et une source de courant électrique (Figure III.1). Ces trois objets forment le domaine de calcul Ω , délimité par la frontière Γ . [11]

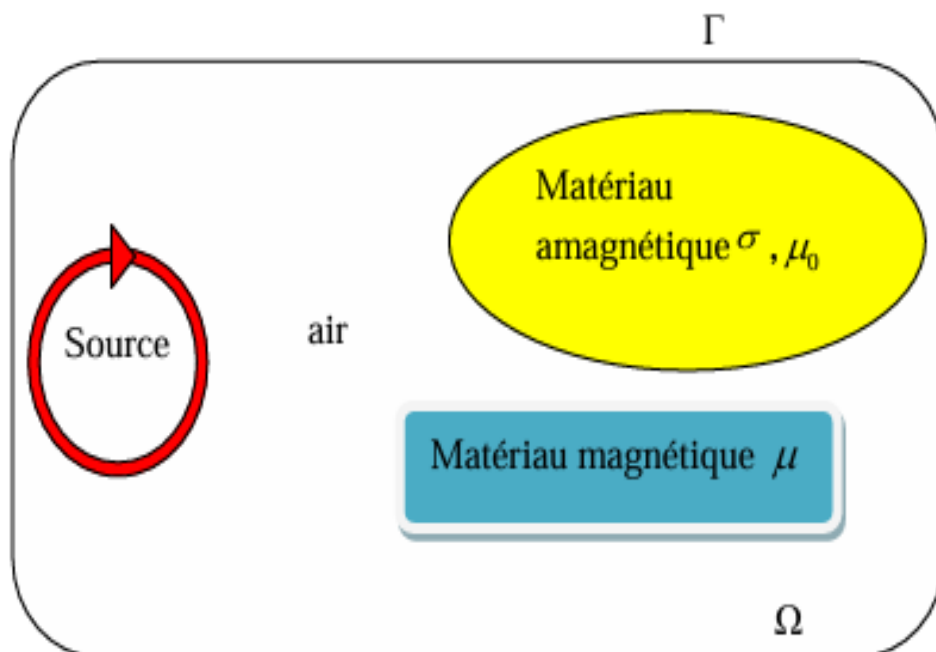


Figure.III.1: Domaine d'étude

C'est vers la fin du 19ème siècle que Maxwell a proposé un ensemble de quatre équations. Ces équations relient le champ électrique E (ou l'induction électrique D) et le champ magnétique H (ou l'induction magnétique B) à leurs sources (densité de charge ρ et densité de courant \mathbf{J}) par l'intermédiaire des trois paramètres : [31]

La conductivité électrique σ , la perméabilité magnétique μ , la permittivité électrique ε .

Ces phénomènes électromagnétiques sont régis par les quatre équations de Maxwell :[11]

(Théorème d'Ampère-Maxwell)

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{III.1})$$

(Loi de Faraday)

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

(Loi de conservation)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.3})$$

(Théorème de Gauss)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{III.4})$$

ρ : la densité volumique de charges électriques (C/m^3).

\vec{E} : le champ électrique (V/m)

\vec{H} : le champ magnétique (A/m)

\vec{D} : l'induction électrique (C/m^2)

\vec{B} : l'induction magnétique (T)

\vec{J}_c : la densité du courant conduction (A/m^2).

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

L'équation de Faraday représente la loi d'induction qui établit la relation entre le champ électrique et l'induction magnétique. C'est la formulation mathématique du phénomène inductif dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur en mouvement soumis à un champ magnétique constant.

Les équations (III.1) et (III.2) définissent le lien qui existe entre les champs et leurs sources. Par contre, l'équation (II.3) et (II.4) donnent respectivement la notion de conservation de la charge électrique et le champ magnétique.

III.3.1. Loi de comportement

Afin de calculer l'évolution des champs électriques et magnétiques, les lois constitutives et qui sont caractéristiques des milieux considérés doivent être ajoutées, ces relations sont données par : [36]

- Loi d'Ohm

Elle exprime la relation qui lie la densité du courant au champ électrique E à travers la conductivité σ , elle est donnée par :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (III.5)$$

- Dans un milieu magnétique

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (III.6)$$

- Dans un milieu diélectrique

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (III.7)$$

\vec{J} : le courant de conduction résultant du champ électrique E

μ : la perméabilité magnétique (H/ m),

ε : la permittivité électrique (F/ m)

σ : la conductivité électrique (S/ m).

Tels que :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (III.8)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (III.9)$$

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

μ_r : est la perméabilité relative du milieu considéré.

$\varepsilon_0 = 8.85.10^{-12}$ est la permittivité de l'aire,

ε_r : est la permittivité relative du milieu considéré.

Dans un problème de modélisation, Les coefficients μ et σ doivent être définis dans les différentes zones du domaine considéré (Fig.III.1), [33]. Dans l'air, par exemple, ces coefficients valent respectivement $(\mu_0, 0)$. Souvent, dans les matériaux linéaires, ces coefficients sont des scalaires constants. Ils dépendent dans des cas particuliers de l'intensité de l'intensité des champs appliqués. [11]

Le terme $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ dans l'équation (III.1) exprime la densité des courants de déplacement. On se placera dans l'hypothèse de l'électrotechnique et on considère pour le cas des basses fréquences, ce terme peut être négligé.[33]

Avec cette hypothèse et nous Combinons (III.1) et (III.4), nous obtenons l'équation de conservation de charges électriques :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_c = 0 \quad (\text{III.10})$$

Pour un milieu conducteur la densité du courant est donnée par la loi d'Ohm généralisée : [5]

$$\vec{J}_c = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{III.11})$$

$$\vec{J}_{ind} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (\text{III.12})$$

\vec{v} : le vecteur de la vitesse,

\vec{J}_s : la densité du courant imposé dans l'inducteur

\vec{J}_{ind} : la densité des courants induits

Le terme $\sigma \vec{E}$ représente le courant de conduction résultant du champ électrique \vec{E}

$\sigma \wedge (\vec{v} \wedge \vec{B})$ exprime le courant résultant du mouvement

Dans notre travail la vitesse mécanique de déplacement (\vec{v}) est absente d'où on peut décomposer le courant total d'équation par : [11]

$$\vec{J}_c = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{III.13})$$

III.3.2. Conditions de transmission et conditions aux limites

III.3.2.1. Conditions de transmission

Les champs électromagnétiques peuvent présenter des discontinuités lorsqu'ils passent d'un milieu à un autre ayant des propriétés physiques différentes. Dans ce cas, des conditions

de passage doivent être imposées à l'interface entre les deux milieux pour décrire leur comportement. [5]

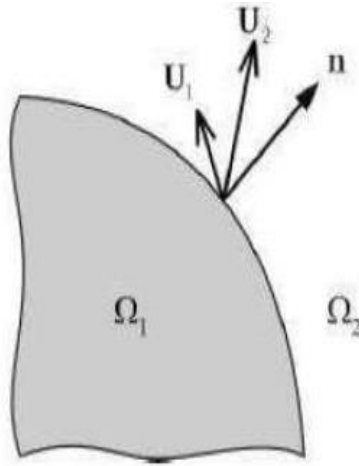


Figure.III.2 : Interface entre deux milieux

Conservation de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E}^{\rightarrow} :

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = \vec{0} \quad (\text{III.14})$$

Conservation de la composante normale de l'induction magnétique \vec{B}^{\rightarrow} :

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III.15})$$

Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H}^{\rightarrow} :

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \wedge \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{III.16})$$

Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique \vec{D}^{\rightarrow} :

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (\text{III.17})$$

Où ρ_s est la densité surfacique de charge, J_s la densité surfacique de courant et le vecteur normal à la surface de séparation des deux milieux Ω_1 et Ω_2 et dirigé vers l'extérieur du milieu 1.

III.3.2.2. Conditions aux limites

La résolution du système composé par les équations de Maxwell et les lois de comportement admet une infinité de solutions. Pour assurer l'unicité de la solution, des conditions aux limites sont imposées.[11]

$$\vec{B} \cdot \vec{n} |_{\Gamma} = 0 \quad (\text{III.18})$$

D'après l'équation (III.1), on en déduit que :

$$\vec{J} \cdot \vec{n} |_{\Gamma} = 0 \quad (\text{III.19})$$

$$\vec{E} \wedge \vec{n} |_{\Gamma} = 0 \quad (\text{III.20})$$

$$\vec{H} \wedge \vec{n} |_{\Gamma} = 0 \quad (\text{III.21})$$

III.3.3. 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. Soient \vec{U} et \vec{V} deux champs de vecteurs, les conditions de jauge s'écrivent de façon générale par : [32]

(Jauge de Coulomb)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (\text{III.22})$$

(Jauge de Lorentz)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} + K \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.23})$$

(Jauge adapté pour les éléments d'arêtes)

$$\vec{V} \cdot \vec{U} = 0 \quad (\text{III.24})$$

Par exemple, lorsqu'on utilise une formulation en potentiel vecteur, la solution est obtenue à un gradient près. La jauge de Coulomb s'écrit donc :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{III.25})$$

III.4. Formulation électromagnétique

III.4.1. Modèle magnétodynamique

La magnétodynamique consiste en l'étude des phénomènes magnétiques et électriques en régime dynamique, en négligeant les courants de déplacement. Les champs électromagnétiques sont alors variables, soit par variation dans le temps des courants d'excitation, soit par mouvement d'aimants permanents. Le modèle de la magnétodynamique issu des équations de Maxwell s'écrit : [7]

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{III.26})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.27})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.28})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (\text{III.29})$$

Pour définir complètement le problème magnétodynamique, il est encore nécessaire de considérer les relations constitutives des milieux.

III.4.2. Formulations de la magnétodynamique

Pour représenter le modèle de la magnétodynamique à partir des équations de Maxwell dans le domaine simulé, présenté dans la figure (III.2), en vue de calculer les variables électromagnétiques souhaités, plusieurs formulations ont été développées. Les principales formulations rencontrées sont : [34]

- Formulations de type électrique : E , A et $A-V$.
- Formulations de type magnétique : H et $T-\Phi$.

III.4.2.1. Formulation AV

En régime dynamique, le modèle magnétodynamique décrit les phénomènes entre les phénomènes magnétiques et électriques lorsque les champs électromagnétiques sont

variables. Ces variations peuvent résulter soit de l'évolution temporelle des courants d'excitation, soit du mouvement d'aimants permanents. [11]

En adoptant certaines hypothèses simplificatrices et en s'appuyant sur le principe de conservation exprimé par la relation (III.10), le modèle magnétodynamique peut être formulé à partir des équations de Maxwell comme suit : [11][31]

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.30})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{III.31})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.32})$$

Il est important de considérer les relations constitutives des milieux pour définir complètement le problème magnétodynamique.

La formulation A-V est obtenue par la combinaison du système d'équation de Maxwell. Comme l'induction magnétique est à divergence nulle (III.32), la variable d'état A est exprimée en fonction de l'induction magnétique B par la relation suivante :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (\text{III.33})$$

$$\vec{A} \wedge \vec{n}|_{\Gamma} = 0 \quad (\text{III.34})$$

A partir de cette relation (III.33), le terme B dans (III.30) sera remplacé par A et nous obtenons :

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{III.35})$$

D'après cette relation on peut définir un potentiel scalaire électrique V, tel que :

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right) \quad (\text{III.36})$$

D'après la combinons des équations (III.6), (III.11), (III.31), (III.33) et (III.36) nous obtenons :

$$\vec{\nabla} \times (v\vec{\nabla} \times \vec{A}) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right) = \vec{J}_s \quad (\text{III.37})$$

En appliquant la loi de conservation (III.10), on obtient une deuxième équation :

$$\vec{\nabla} \cdot \left[-\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right) \right] = 0 \quad (\text{III.38})$$

Le système d'équations (III.37) et (III.38) constitue la formulation en potentiels A-V :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \times (\nu \vec{\nabla} \times \vec{A}) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right) = \vec{J}_s \\ \vec{\nabla} \cdot \left[-\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right) \right] = 0 \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

La résolution du système (III.23) requiert la définition de conditions aux limites adaptées au domaine étudié, car celui-ci admet une infinité de solutions. Afin de garantir l'unicité de la solution, il est nécessaire d'imposer des conditions aux limites. L'une des conditions fréquemment utilisées consiste à imposer un champ magnétique normal nul sur la surface extérieure Γ ; dans ce cas, on impose dans le calcul :

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0 \quad \text{sur } \Gamma \quad (\text{III.40})$$

Cette condition est dite condition de type Dirichlet. Une autre condition dite de Newman peut être utilisée en présence d'un plan de symétrie :

$$\vec{n} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = 0 \quad \text{sur } \Gamma_s \quad (\text{III.41})$$

Où Γ_s est le plan de symétrie de vecteur unitaire normal \mathbf{n} comme le montre la figure (III.3).

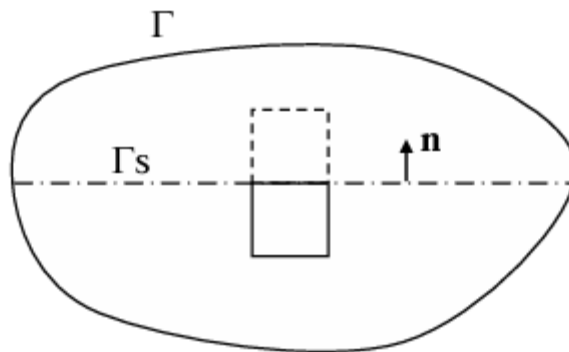


Figure.III.3. Schématisation d'un plan de symétrie.

En effet la connaissance des conditions aux limites n'est pas toujours suffisante pour avoir la solution du problème. Une jauge doit être introduite, en effet, le problème d'unicité de la solution se pose ; on remarque que si le couple (\vec{A}, V) est une solution de (III.31), il existe alors une infinité de solutions donnée par $(\vec{A} + \vec{\nabla}\varphi)$.

En remplaçant ce dernier dans (III.31), le système reste inchangé. Afin de rendre la solution unique et d'améliorer le processus de convergence, nous avons fait appel à la jauge de Coulomb, cette jauge est la plus couramment utilisée. Également Cette jauge est introduite dans la formulation A-V à travers un terme dit de pénalité donnée par :

$$\vec{\nabla}(v_p \vec{\nabla} \cdot \vec{A}) \quad (\text{III. 42})$$

Afin d'avoir une meilleure approximation du potentiel, le paramètre ajouté v_p est remplacé par la reluctivité v .

Mettant le terme (III.42) dans la première équation du système (III.38), nous obtenons la formulation A-V jaugée qui peut être appliquée à divers problèmes d'électrotechnique : [11]

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \times (v \vec{\nabla} \times \vec{A}) - \vec{\nabla}(v \vec{\nabla} \cdot \vec{A}) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right) = \vec{J}_s \\ \vec{\nabla} \cdot \left[-\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right) \right] = 0 \end{cases} \quad (\text{III. 43})$$

Le nombre d'inconnues est donc de 4 (les trois composantes de A et le potentiel V). Les courants de Foucault seront alors exprimés par : [7][32]

$$\vec{J}_1 = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right) \quad (\text{III. 44})$$

Ils sont donc calculés directement à partir de A et V. L'induction, par contre, est obtenue par dérivation spatiale de la solution, ce qui peut poser des problèmes de précision lorsque la solution est obtenue de manière numérique.

III.4.2.2. Formulation A*

Si le domaine étudié présente une conductivité constante, nous pouvons introduire la variable d'état A* définie par : [7]

$$A^* = \int E \, dt \quad (\text{III.45})$$

Les courants de Foucault s'expriment sous la forme :

$$\vec{J}_l = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{III.46})$$

Dans ce cas, le nombre d'inconnues est seulement de trois.

III.4.2.3. Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique T - φ :

Cette formulation est duale de la formulation AV. Nous posons : [3]

$$\vec{J} = \vec{\nabla} \times \vec{T} \quad (\text{III.46})$$

T est le potentiel vecteur électrique. Il existe une grandeur scalaire φ telle que : [3]

$$\vec{H} - \vec{T} = -\vec{\nabla} \phi \quad (\text{III.47})$$

où φ est le potentiel scalaire magnétique. Nous obtenons la formulation T φ : [7]

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{u} \vec{\nabla} \times \vec{T} \right) + u \left(\frac{\partial (\vec{T} - \vec{\nabla} \phi)}{\partial t} \right) = \vec{J}_s \quad (\text{III.48})$$

Pour assurer l'unicité de la solution, il faut ajouter une condition sur T. La condition utilisée est la jauge de Coulomb :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{T} = 0 \quad (\text{III.49})$$

Cette formulation conduit donc à quatre inconnues. Elle permet d'avoir directement le champ. Par contre, les courants de Foucault s'obtiennent par dérivation spatiale de la solution. [7]

III.4.2.4. Formulation φ φ r [7]

Alors que pour des régions conductrices, la présence des courants de Foucault impose trois, voire quatre inconnues, dans les régions isolantes, le phénomène peut être représenté par une seule inconnue, donc une grandeur scalaire. Dans une telle région, nous pouvons exprimer le champ magnétique sous la forme :

$$\vec{H} = \vec{H}_s - \vec{\nabla}\varphi_r \quad (\text{III.50})$$

Où H est le champ dû courant source :

$$\vec{J}_s = \vec{\nabla} \times \vec{H}_s \quad (\text{III.51})$$

Et φ_r est le potentiel scalaire magnétique réduit. Dans une région isolante, nous pouvons écrire :

$$\vec{H} = -\vec{\nabla}\varphi \quad (\text{III.52})$$

Où φ est le potentiel scalaire magnétique total.

On obtient ainsi une formulation scalaire φ φ r.

Formulation	AV	A*	TΦr	φ φ r
Équations	$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ $\vec{j}_1 = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right)$	$A^* = \int E dt$ $\vec{j}_1 = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)$	$\vec{H} - \vec{T} = -\vec{\nabla} \phi$ $\vec{j} = \vec{\nabla} \times \vec{T}$	$\vec{H} = \vec{H}_s - \vec{\nabla} \phi_r$ $\vec{H} = -\vec{\nabla} \phi$
Domaine d'application	S'applique dans tous les cas	Ne s'applique qu'à des milieux ou σ est constante	S'applique dans tous les cas	S'applique dans milieux isolants
Induction	Obtenu par dérivation spatiales	Obtenu par dérivation spatiales	Obtenu directement	Obtenu directement
Courants de foucault	Obtenu directement	Obtenu directement	Obtenu par dérivation spatiales	Nul (Isolant)
Nombres d'inconnus	Quatre (4) ou trois (3) si isolant	Trois (3)	Trois (3)	Un (1)

Tableau III-1 : Résumé sur les formulations de résolution.[7]

III.5. Méthodes de résolutions

III.5.1. Méthodes analytiques [30]

La résolution analytique vise à obtenir une solution exacte des équations différentielles décrivant un système physique. Dans le domaine du contrôle non destructif par courants de Foucault (CF), plusieurs configurations électromagnétiques ont été résolues de cette manière.

Par exemple, des solutions analytiques ont été développées pour des configurations axisymétriques en utilisant la séparation des variables. Des études ont également été réalisées pour des cas plus complexes, comme les bobines avec noyau magnétique ou inclinées sur des surfaces planes.

Cependant, trouver une solution analytique pour une configuration électromagnétique donnée devient souvent très difficile, voire impossible. Chaque nouvelle situation (présence de défauts, bords de pièce, géométries irrégulières, etc.) implique de revenir aux équations de l'électromagnétisme et d'élaborer une approche spécifique, ce qui peut conduire à des modèles trop complexes pour être résolus analytiquement. Ainsi, dans la plupart des cas, On doit alors se tourner vers des approches numériques pour obtenir une solution approximative, mais cohérente avec les exigences de modélisation.

III.5.2. Méthodes semi analytiques

Ce sont des méthodes hybrides qui associent des approches analytiques et numériques. Elles sont principalement utilisées pour résoudre certains types de problèmes spécifiques. Cette combinaison permet d'obtenir des expressions analytiques facilement manipulables et de réduire le temps de simulation, tout en garantissant des résultats suffisamment proches des valeurs réelles.

III.5.3. Méthodes numériques

Le comportement des dispositifs électromagnétiques est décrit par des équations aux dérivées partielles. Pour les résoudre, on utilise soit des méthodes analytiques, soit des méthodes semi analytiques soit les méthodes numériques. Dans le cas des géométries complexes, les approches numériques sont privilégiées. Elles reposent sur des techniques de discrétisation qui transforment les équations différentielles en un système d'équations algébriques, en tenant compte des conditions aux limites. La solution obtenue donne une approximation de la grandeur recherchée aux nœuds d'un maillage représentant la géométrie du problème. [35]

Les méthodes numériques permettent d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées. Parmi ces méthodes, on pourra citer : la méthode des différences finies (MDF), la méthode des éléments finis (MEF), la méthode des éléments de frontières (MEF) et la méthode des volumes finis (MVF). [15]

III.5.3.1. Méthode des Eléments de Frontière

Elle est basée sur une méthode plus générale d'équations intégrales, Les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations intégrales. Ces dernières utilisent la fonction de Green comme noyau, représentant la réponse du système à une source ponctuelle dans le cadre de la géométrie considérée. Toutefois, la difficulté à déterminer cette fonction restreint l'usage de cette approche aux géométries simples ou canoniques. Par ailleurs, son application n'est pertinente que lorsque les courants de Foucault sont confinés à une très faible profondeur, négligeable par rapport aux autres dimensions (excitation haute fréquence, profondeur de pénétration nulle).[3]

III.5.3.2. Méthode des différences finis [36]

La méthode des différences finies consiste à discrétiser les équations aux dérivées partielles (EDP) afin de les résoudre numériquement. Elle est couramment employée dans le domaine temporel. Pour les problèmes de nature harmonique, on utilise soit une source sinusoïdale, soit un signal à large bande analysé dans le domaine fréquentiel.

Cette approche permet d'approximer la solution de l'EDP en un ensemble de points répartis sur une grille. Les dérivées des fonctions présentes dans l'équation sont alors estimées à partir de leurs valeurs discrètes, en utilisant des développements en série de Taylor. Les opérateurs aux différences finies ainsi obtenus tendent vers les opérateurs différentiels lorsque le pas de la grille (h) devient très petit.

L'approximation ne se fait pas sur l'ensemble continu du domaine, mais uniquement aux nœuds du maillage, définis par la discrétisation. C'est à partir de cette grille que les équations différentielles sont traduites en équations algébriques, permettant leur résolution numérique.

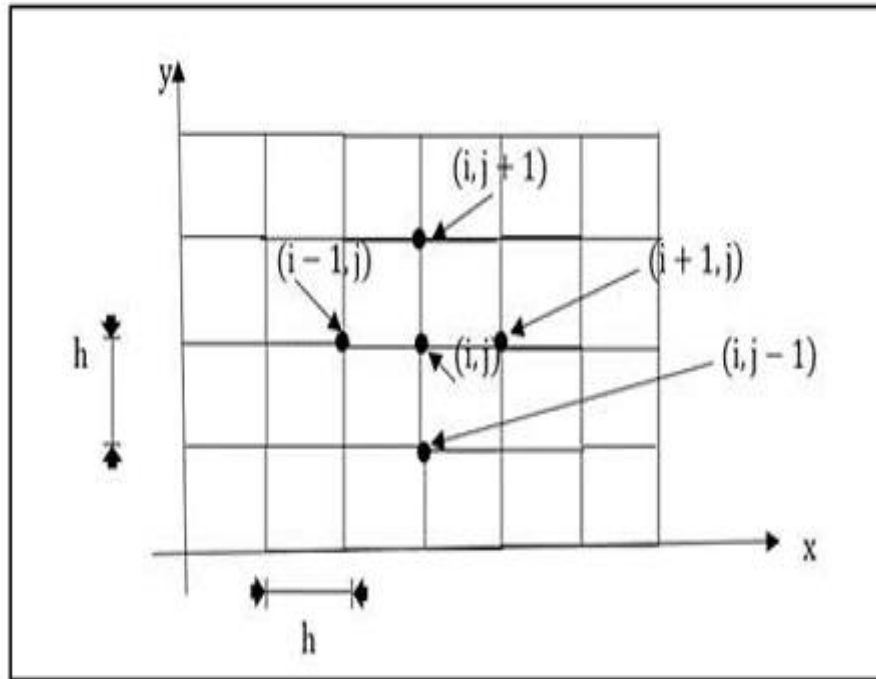


Figure.III.4. Grille de maillage par différences finis.

III.5.3.3. La Méthode des Éléments Finis (MEF)

La méthode des éléments finis (MEF) est particulièrement efficace pour résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP), notamment dans le cas de géométries complexes et quelles que soient les conditions physiques du problème. Reconnue comme l'une des méthodes les plus puissantes et performantes en modélisation, elle est largement utilisée pour des simulations en deux et trois dimensions.[11]

Le principe de la MEF repose sur le découpage (Maillage) du domaine d'étude en sous-régions élémentaires ou éléments (figure.III.5), à l'intérieur desquelles la grandeur recherchée est approximée par des fonctions polynomiales. Cette approche permet une grande flexibilité dans la représentation de géométries complexes et dans l'application des conditions aux limites.[35]

Cependant, la MEF génère généralement des systèmes d'équations algébriques de grande taille, ce qui implique une consommation importante de mémoire et des temps de calcul élevés. En électromagnétisme, cette méthode est très couramment utilisée, bien qu'elle nécessite des ressources de calcul considérables pour être mise en œuvre efficacement. [11]

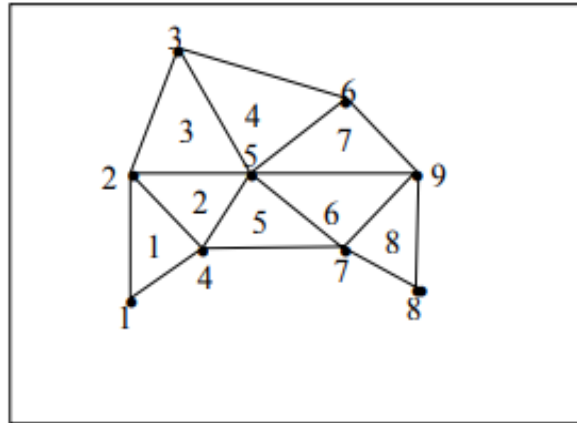


Figure.III.5. Un domaine d'étude discrétisé en Elément finis.

D'une façon générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes : [2]

- 1- Obtention de la formulation variationnelle du problème et définition des espaces fonctionnels de solutions admissibles.
- 2- Réalisation d'un maillage, correspondant à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangles, tétraèdres, hexaèdres ...) sur lesquels les champs sont écrits en termes d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base à support local.
- 3- Calcul des matrices élémentaires qui, après assemblage, génèrent un système matriciel creux.
- 4- Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème.

III.5.3.4. La méthode des volumes finis (MVF) [5]

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation largement utilisée, notamment en mécanique des fluides. Avec le temps, son utilisation s'est étendue à d'autres domaines de l'ingénierie tels que le transfert thermique, l'électromagnétisme, et bien d'autres encore.

Cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en volumes élémentaires (tétraèdres, hexaèdres, prismes, etc.), chacun étant centré autour d'un nœud du maillage (Figure. III.6). L'équation aux dérivées partielles (EDP) régissant le problème est alors intégrée sur chaque volume élémentaire. Pour effectuer cette intégration, la fonction inconnue est approximée à l'aide de fonctions d'interpolation (linéaire, parabolique, exponentielle, etc.) définies entre des nœuds voisins.

La forme intégrale obtenue est ensuite discrétisée sur l'ensemble du domaine. Comparée à la méthode des éléments finis, la discrétisation par volumes finis produit un système linéaire dont la matrice est plus creuse (moins dense), ce qui favorise une convergence plus rapide des algorithmes itératifs utilisés pour la résolution numérique.

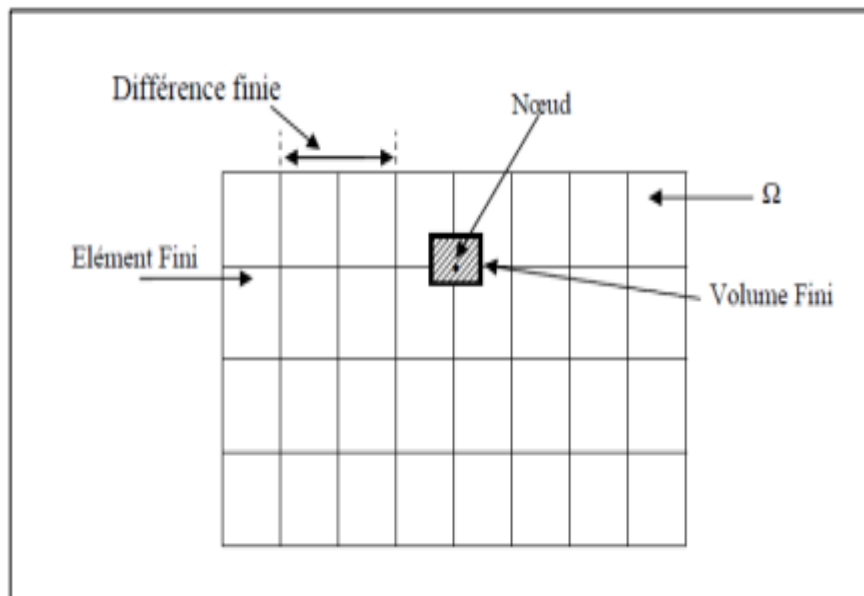


Figure.III.6. Maillage du domaine d'étude.

Pour résoudre un phénomène spécifique à l'aide de la méthode MVF, les étapes suivantes doivent être suivies :

- 1- Définir l'équation du phénomène.
- 2- Discrétisation de du domaine.
- 3- D'intégration de l'équation sur chaque volume de contrôle.
- 4- Traitement des conditions aux limites.
- 5- Formation du système d'équation algébrique résultant et sa résolution.
- 6- Présentation les résultats (comparaison avec la solution analytique où à l'expérience).

III.6. Les logiciels de simulation

Actuellement, la modélisation des systèmes dépend des outils numériques de simulation en raison du développement technologique des machines en plus des défauts complexes que nous rencontrons. Parmi ces outils numériques, on a le système de COMSOL Multiphysics.

COMSOL Multiphysics est un logiciel d'analyse, de résolution et de simulation par éléments finis, utilisé dans diverses applications de physique et d'ingénierie, notamment les phénomènes couplés et multiphysiques. Le programme facilite l'utilisation d'interfaces utilisateur traditionnelles basées sur la physique, ainsi que de systèmes d'équations différentielles aussi il constitue une plateforme pour toute modélisation de CND visant à caractériser des défauts.

III.7. Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique AV-A harmonique

La magnétodynamique étudie les phénomènes magnétiques et électriques en régime dynamique, harmonique ou transitoire, en prenant en compte les courants induits. Généralement, un problème de magnétodynamique est illustré par la Figure (III.7). [36]

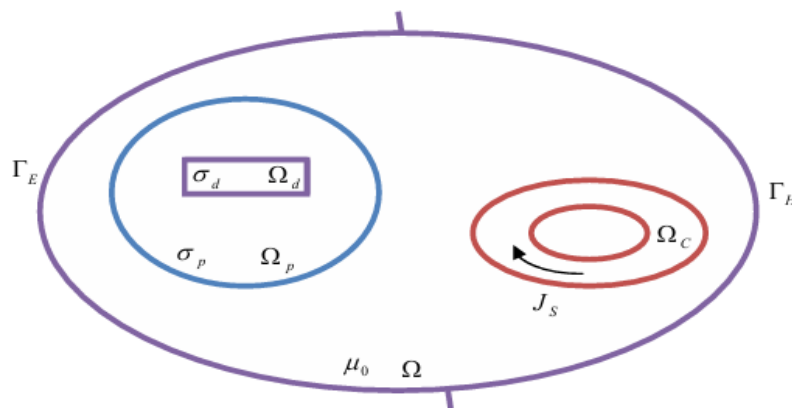


Figure.III.7. Modèle magnétodynamique avec défaut conducteur.

Le système d'équations en potentiel vecteur magnétique et scalaire (AV – A) électrique à résoudre est

$$\begin{aligned} \text{rot} \left[\frac{1}{u} \text{rot}(\vec{A}) \right] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \overrightarrow{\text{grad}V} &= \vec{J}_s \\ \text{div} \left[\sigma \frac{\partial}{\partial t} (\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}V}) \right] &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III. 53})$$

Dans le cas de dispositifs constitués de matériaux linéaires et soumis à une excitation sinusoïdale, l'opérateur de dérivation par rapport au temps $\frac{\partial}{\partial t}$ est remplacé par le facteur $j\omega$

$$\begin{aligned} \text{rot} \left[\frac{1}{u} \text{rot}(\vec{A}) \right] - \text{grad} \left[\frac{1}{u} \text{div}(\vec{A}) \right] + j\omega\sigma (\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}V}) &= \vec{J}_s \\ \text{div} (j\omega\sigma (\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}V})) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III. 54})$$

Pour fixer la fonction scalaire et garantir l'unicité de la solution, un terme de pénalité sera ajouté pour exprimer la condition de Jauge de Coulomb : [37]

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{III. 55})$$

La formulation AV – A en éléments nodaux avec terme de pénalité est :

$$\text{rot}(v.\text{rot} \vec{A}) - v_p.\text{div}(\overrightarrow{\text{grad} A}) + j\omega\sigma \vec{A} + \sigma \overrightarrow{\text{grad}V} = \vec{J}_s \quad (\text{III. 56})$$

Avec :

$v = \frac{1}{u}$: Réductivité magnétique

v_p : Terme de pénalité ayant la dimension d'une réductivité magnétique.

La formulation magnétodynamique harmonique sous forme intégrale est obtenue par une discrétisation spatiale en utilisant la méthode des éléments finis, ce qui permet en plus d'interpoler les inconnues sur les éléments du maillage. En appliquant la méthode de Galerkin et le théorème de Green avec des conditions aux limites homogènes, nous obtenons la formulation intégrale AV – A définis sur les nœuds du maillage du domaine Ω .

$$\int_{\Omega} (v.(\text{rot} \vec{A})(\text{rot} \vec{N}_1) + \text{div}(\vec{N}_1)v_p.\text{div}(A))d\Omega + \int_{\Omega} j\omega\sigma \vec{N}_1.(\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}V})d\Omega = \int_{\Omega} \vec{N}_1.J_s.d\Omega \quad (\text{III. 57})$$

$$\int_{\Omega} j\omega\sigma a_i \text{grad}(A) \cdot d\Omega + \int_{\Omega} j\omega\sigma \text{grad}(a_i) \cdot \text{grad}(v) \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{III. 58})$$

Avec :

N_i : Fonction de projection vectorielles

a_i : Fonction de projection scalaire.

Le domaine d'étude Ω est donnée par un ensemble d'éléments géométriques de formes simple sur lesquelles la variable inconnue est exprimée par une combinaison des valeurs nodales du potentiel vecteur magnétique A.

$$A_s^e = \sum_{j=1} N_j \cdot A_{xj} \cdot e_x + N_j \cdot A_{yj} \cdot e_y + N_j \cdot A_{zj} \cdot e_z \quad (\text{III. 59})$$

A_{xj}, A_{yj}, A_{zj} : Composantes du potentiel vecteur magnétique au nœud j.

$N_j(x, y, z)$: Fonction d'approximation nodale associée au nœud j.

e_x, e_y, e_z : Vecteurs unitaires

L'inconnue sera donnée par une combinaison des valeurs nodales du potentiel vecteur magnétique A. L'introduction de (III.59) dans les équations intégrales (III.57) et (III.58) permet le des intégrants volumique dont l'assemblage donne un système d'équation algébrique dont les degrés de liberté sont liés au nombre de nœuds du maillage.

$$\begin{bmatrix} K_{xx} + M & & & G_{xv} \\ K_{yx} & K_{yy} + M & & G_{yv} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} + M & G_{zv} \\ G_{vx} & G_{vy} & G_{vz} & G_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ F_v \end{bmatrix} \quad (\text{III. 60})$$

Où :

$$K_{ij} = \int_{\Omega} (v \cdot (\text{rot } \vec{A})) (\text{rot } \vec{N}_i) + \text{div}(\vec{N}_i) v_p \cdot \text{div}(A) D\omega \quad (\text{III. 61})$$

$$M_{ij} = \int_{\Omega} j\omega\sigma \cdot N_i N_j \cdot d\Omega \quad (\text{III. 62})$$

$$G_{uv} = \int_{\Omega} j\omega\sigma\vec{N}_i \cdot \text{grad}(V)d\Omega \quad (\text{III. 63})$$

$$F = \int_{\Omega} N_i \cdot J_s \cdot d\Omega \quad (\text{III. 64})$$

Avec $u = x, y, z$ et $v = x, y, z$ obtenue par permutations cyclique.

III.7.1 Calcul de l'impédance

La variation d'impédance peut être déterminée en calculant l'énergie magnétique emmagasinée et les pertes joules W_m dans tout l'espace d'étude et les pertes Joule P_j , [9], [38], définies par les relations suivantes :

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_v \frac{1}{\mu} |\vec{B}|^2 dv \quad (\text{III. 65})$$

$$P_j = \frac{1}{2} \iiint_{\text{Conducteur}} \frac{1}{\sigma} |\vec{j}|^2 dv \quad (\text{III. 66})$$

D'après W_m et P_j , on peut connaître la valeur de la résistance R et à la réactance X , du capteur [38]. Les expressions reliant la résistance aux pertes Joule, et la réactance de l'énergie magnétique sont données par les relations suivantes : [37]

$$R = \frac{1}{I^2} P_j \quad (\text{III. 67})$$

$$X = \frac{2\omega}{I^2} W_m$$

Avec I et ω représentent respectivement le courant d'excitation parcourant la bobine et sa pulsation.

D'où on peut déduire les variations ΔX et ΔR

$$\Delta X = \frac{\omega}{u \cdot I^2} \iiint_v (|B_0|^2 - |B|^2) \cdot dv \quad (\text{III. 68})$$

$$\Delta R = \frac{1}{2 \cdot \sigma \cdot I^2} \iiint_{\text{Conducteur}} (|J_0|^2 - |J|^2) \cdot dv \quad (\text{III. 69})$$

B_0 : Induction pour pièce de référence (sans défaut)

B : Induction pour pièce de à tester (avec défaut)

J_0 : Densité des courants induits

J : Densité des courants induits.

III.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation du CND par CF où il a fait l'objet d'une présentation des Équations de Maxwell, les conditions aux limites, les conditions de transmission ainsi que les conditions de jagues.

Ensuite on a vu les formulations de la magnétodynamique électriques et magnétiques et les propriétés de chaque formulation.

Enfin on a présenté les différentes méthodes utilisées pour la résolution de ces équations différentielles aux dérivées partielles, telle que, les méthodes analytiques, semi analytiques, numériques et le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics. Apres on a donné une Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique AV-A harmonique.

Conclusion générale

Les exigences croissantes en matière de sûreté de fonctionnement des produits industriels, ainsi que la volonté d'optimiser la durée de vie des pièces qui les composent, conduisent à la mise en place de contrôles qualité de plus en plus rigoureux.

L'utilisation des courants de Foucault permet un contrôle non destructif fiable, rapide et peu coûteux des matériaux conducteurs. La simplicité de cette méthode et sa robustesse en font une technique largement utilisée dans l'industrie depuis plusieurs décennies.

Le travail présenté dans ce mémoire revêt une grande importance dans le domaine industriel, car la détection des défauts à l'aide de techniques de contrôle non destructif par courants de Foucault permet de prévenir la défaillance des pièces en service et d'augmenter la fiabilité des produits industriels.

Une recherche bibliographique sur le contrôle non destructif par courants de Foucault a été réalisée. La compréhension des phénomènes physiques mis en jeu constitue l'étape fondamentale pour l'élaboration de modèles mathématiques destinés à la conception des capteurs et à la mise en œuvre de contrôles efficaces.

Nous avons commencé notre travail par un aperçu historique du CND et des étapes de son évolution. Nous avons ensuite présenté les différents types de défauts possibles et décrit le principe de leur détection.

Par la suite, nous avons abordé les principales techniques utilisées dans ce domaine, telles que l'examen visuel, le ressuage, les ultrasons, la magnétoscopie, la radiographie et la thermographie. Nous avons expliqué le principe de fonctionnement de chaque méthode, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté la technique des courants de Foucault, son principe de fonctionnement, les équipements utilisés, les types d'excitation, les gammes de fréquences, ainsi que les objectifs majeurs de cette méthode de contrôle. Nous avons ensuite abordé l'élément central de ce système, à savoir le capteur, en détaillant ses différents types selon la géométrie, la fonction et le mode de fonctionnement. Enfin, nous avons conclu cette

partie par l'introduction du plan d'impédance normalisée, en exposant les avantages et les limites de la méthode.

Dans la troisième partie, nous avons brièvement rappelé les équations de Maxwell appliquées au CND-CF, en précisant les simplifications propres aux courants de Foucault. Nous avons également présenté les différentes formulations de la magnétodynamique, ainsi que les principales méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles (EDP), telles que la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis, etc. Ensuite, nous avons introduit le logiciel COMSOL Multiphysics, reconnu comme l'un des outils les plus puissants en simulation multiphysique.

Finalement, nous avons conclu ce travail en formulant l'équation magnétodynamique AV-A en régime harmonique à l'aide de la méthode des éléments finis, et en déterminant la variation d'impédance, paramètre clé dans la détection des défauts.

Références

- [1] <https://www.sourcadz.com/blog/breve-histoire-du-cnd>
- [2] I. REBBAT et A. ZANE, Evaluation non destructive par courants de Foucault des structures multicouches rivetées, Application au contrôle des fuselages d'avions, Université M'hamed Bougara De Boumerdes, Mémoire de Master, 2022.
- [3] M. HAMEL, Etude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive. Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, Thèse de doctorat, 2018.
- [4] C. RAVAT, « Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif », thèse de doctorat, Paris, 2008.
- [5] A. LAKHDARI, "Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : Application à la détection des fissures", Mémoire de Magister, Spécialité électrotechnique, Option électricité industrielle, Université de Biskra, 2011.
- [6] W. ADOUNE et Y. BAHRI, Caractérisation des différents endommagements sur les pipes industrielles par les méthodes non destructives, Université Saad dahlab de blida 1, Mémoire de master, 2022.
- [7] M.R. ZAOUI, Contrôle non destructif cnd par courants de foucault cf modélisation 3D, Université Mohamed Boudiaf, Mémoire de master, M'SILA 2015.
- [8] W. SLIMANE, « Conception d'un Système Multi-Capteurs à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND) », Mémoire de magister en Electrotechnique, Université d'Elhadj Lakhder Batna, 2008.
- [9] N. BENHADDA, "Modélisation des capteurs inductif par courant de Foucault", Mémoire de Magister, Spécialité électrotechnique, Option matériaux d'électrotechnique, Université de Batna, 2006.
- [10] F. BOUALI, « Utilisation d'une méthode semi analytique pour l'étude du contrôle non destructif en régime pulsé ». Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2010.

- [11] H. BECHA., “Application de la methode des volumes finis pour la modelisation de configurations de controle non destructif par courants de foucault”, Thèse de doctorat, Spécialité génie électrique (Electrotechnique), de l’université de biskra 2018.
- [12] A. BENZAAMA, cours de Contrôle des structures, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed BOUDIAF, 2023 / 2024.
- [13] Dr M. NEZAR, Brochure du TP de l’unité 203, Evaluation et Contrôle non destructif, Université de Batna 2, 2017.
- [14] H. MAILLOU H, Cours : Les contrôles non destructifs, BTS AERONAUTIQUE LES PROCEDES DE MESURES ET DE CONTRÔL, Lycée Pierre Mendès France, 12 Octobre 2013.
- [15] Y. CHOUA, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault", Thèse de Doctorat, Spécialité Physique, Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l’Information des Télécommunications et des Systèmes », Université de Paris-Sud 11, 2009.
- [16] M.M. TALEB et E. GHEDAMSI, « Modélisation semi analytique d'un système de CND-CF pour la caractérisation d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.
- [17] A. BENHALIMA et A. SAOUDI, Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques), Mémoire de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf, M’SILA, 2018.
- [18] E. ABDELKRIM et Y. CHERAHRAH, Contrôle Non Destructifs par Capteurs à Courants de Foucault à Champs Magnétique Tournant. Université Mohamed Boudiaf, 2020.
- [19] MI SAADOUN.chapitre 2. Université Ibn Khaldoun Tiaret .2019
- [20] F. MEDANI et B. AKROUR., Etude du contrôle non destructif par courant de Foucault en utilisant la méthode des éléments finis. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2017.

- [21] T. BOUCHALA, “Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les Systèmes de CND par Courants de Foucault”. Thèse de Doctorat, Université El-Hadj Lakhder, Batna, 2014.
- [22] L. HAOUCHENE et M. OUADOU. Etude et simulation d’un système d’imagerie par courants de Foucault. Université M’hamed Bougara de Boumerdes. Mémoire de Master, 2020.
- [23] N. ZEMOURI. Etude et Réalisation d’un Système Multicapteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs. Mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
- [24] M SEBAÏ · Le CND par Courants de Foucault, Chapitre 2. 2005.
- [25] S. ZERGUINI. Elaboration de modèles Electromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault. Thèse de doctorat en science. Université De Constantine
- [26] K. SIDI AHMED. Méthode des circuits couplés basée sur le calcul des mutuelles appliquée aux dispositifs électromagnétique, Master Académique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2014
- [27] A. ARDJAL. Modélisation par éléments finis 2D du contrôle non destructif par courant de Foucault en vue de la caractérisation de défauts complexes. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Mémoire de Master, 2013
- [28] A. ABDOU, " Contrôle non destructif par courant de Foucault ; Etude et réalisation d’un capteur inductif", Mémoire de Magister, Spécialité électrotechnique, Option matériaux d’électrotechnique, Université de Batna, 2006.
- [29] A. ABBASSI, Etude pour la Réalisation d’un Banc D’essai Destiné pour la Détection de Défauts et la Caractérisation des Matériaux de l’aéronautique, Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022.
- [30] H. ZAIDI. Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples, thèse de doctorat. Université paris-sud. 2012.

- [31] B. BELKHEMMAR et M. BOURMEL, 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 Biskra, 2022.
- [32] D. HACHI, Contribution à la modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault en vue de la caractérisation des matériaux conducteurs : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision, Thèse De Doctorat En Sciences, Université Amar Telidji, Laghouat, 2022.
- [33] L. Alloui, " Modélisation tridimensionnelle des matériaux supraconducteurs", Thèse de doctorat, Spécialité génie électrique (Electrotechnique), de l'université paris sud, 2007.
- [34] A. ABAKAR, "Modélisation tridimensionnelle de systèmes électromagnétiques comportant des régions filaires et des régions minces : application en CEM 50Hz à des dispositifs EDF", Thèse de doctorat, Spécialité génie électrique, Institut national polytechnique de Grenoble, 2001.
- [35] Y. BELKHIRI. Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques et Mécaniques Couplés par la Méthode des Volumes Finis (CVM). Memoire De Magister, Université De Batna, 2003.
- [36] S. LAYADI et N. TARZOUT, Modélisation numérique d'un capteur différentiel dédié au contrôle non destructif par courants de Foucault des structures tubulaires, Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara De Boumerdes, 2022.
- [37] M'hemed. Rachek, Mouloud Féliachi. 2005. Modélisation par Eléments Finis Tridimensionnelle des Phénomènes Magnetodynamique Harmonique avec la Formulation AV-A. 2005. pp. 173-177.
- [38] B. HELIFA, Contribution a la simulation du CND par courants de Foucault en vue de la caractérisation des fissures débouchantes, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2012.
- [39] S. Bennoud and M. Zergoug. 2014. Modeling and Simulation for 3D Eddy Current Testing in Conducting Materials.: International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, 2014. pp. 747-750. Vol. 8 No :4.