



Université Mohamed Khider de
Biskra
Faculté des Sciences et de la
Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
MACHINE ELECTRIQUE

Réf. :

Présenté et soutenu par :

1- **BELKHEMMAR BILEL** / 2- **BOURMEL MOHCEN**

Le : juin 2022

Etude et calcul de l'effet de la conductivité t dans un capteur absolu par le contrôle non destructif par courant de Foucault

Jury :

Pr	HADRI HAMIDA Amel	Pr	Université de Biskra	Président
Dr	BECHA Habiba	MCB	Université de Biskra	Encadreur
Dr	KHELILI Fatiha	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2021/2022



Université Mohamed Khider de
Biskra
Faculté des Sciences et de la
Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
MACHINE ELECTRIQUE

Réf. :

Etude et calcul de l'effet de la conductivité t dans un capteur absolu par le contrôle non destructif par courant de Foucault

Le : Juin 2022

Présenté par :

- 1- Belkhemmar Bilel
- 2- Bourmel Mohcen

**Avis favorable de
l'encadreur :**

Dr.BECHA Habiba

Signature Avis favorable du Président du Jury

Pr HADRI HAMIDA Amel

Cachet et signature

Remerciement

Tout d'abord, nous devons remercier notre " ALLAH " pour son aide et de nous avoir aider pour faire la réalisation de ce travail et pour nous avoir donné force et patience tout au long de notre cheminement d'étude.

*Nous exprimons nos sincères remerciements à notre professeur **Dr. BECHA Habiba** pour sa confiance et sa patience, alors qu'elle nous a accompagnés dans notre travail, à chaque instant, étape par étape, et n'a jamais tardé à enseigner, encourager et remonter notre moral.*

*Nous remercions vivement Pr **HADRI AMEL** pour avoir accepté d'être le président du jury et **Dr KHELILI Fatiha** pour son évaluation de notre mémoire.*

Tout cela grâce à nos familles, amis et collègues qui nous ont encouragés et nous ont remonté le moral pour terminer ce travail de la meilleure façon.

Dédicaces

Je dédie ce travail

*A mes défunts grand-père et grand-mère, que Dieu
leur fasse miséricorde*

A mes très chers parents : fatma et Mohammed

A mes frères : Achref et Attaallah

A tous mes proches sans exception

A tous mes amis sans exception

A tous ceux qui me connais

Dédicace spéciale Pour ma bénomme

Bilel Belkhemmar



Dédicaces

A ma chère mère

A mon cher père

A mes frères

A ma chère sœur

A mes chères ami(e)s

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille

A tous mes autres ami(e)s,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment

Bourmel mohcen



Résumé--- nous présentons, étudions et calculons l'effet de la conductivité dans un capteur absolu par le contrôle non destructif par courant de Foucault CND-CF. Nous présentons une contribution à la modélisation tridimensionnelle des phénomènes électromagnétiques dans les matériaux magnétiques ou la méthode des volumes finis est adoptée comme méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristiques aux phénomènes physiques traités. La MVFC est appliquée pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault, basée sur un maillage structuré, c'est la méthode des volumes finis classique. Pour étudier des problèmes, l'ensemble des modèles mathématico-numériques ainsi développés et implémentés et appliques sous MATLAB. Nous abordons la réponse et la détermination de l'impédance de la sonde. On s'intéresse à la prise en compte de défauts de type fissure. Les résultats de ce travail à caractère électromagnétiques sont présentés.

Mots clés--- Contrôle Non Destructif (CND), Contrôle Non Destructif Par Courants de Foucault (CND-CF), Modélisation Numérique, Electromagnétisme, Volumes Finis, Méthode de Volumes Finis Classique,

---ملخص :

في عملنا هذا نقدم، ندرس ونحسب تأثير ناقلية قطعة ناقلة في كاشف مطلق عن طريق الفحص النوعي للهياكل بتيارات فوكوا كما نقدم مساهمة في النمذجة ثلاثية الأبعاد للظواهر الكهرومغناطيسية في المواد المغناطيسية ولقد اعتمدنا في هذه الدراسة على طريقة الحجم المنتهية لحل المعادلات التفاضلية ذات المشتقات الجزئية التي تفسر الظواهر الفيزيائية المراد دراستها هذه الطريقة يتم تطبيقها لفحص نوعي للهياكل من بين طرق الفحص الغير مكلف كثير الاستعمال نختر تيارات فوكو تعتمد على كاشف حتى نقدم نهج لطريقة الاحجام الجزئية الذي يعتمد على شبكة مهيكلة مصنفة لطريقة الاحجام الجزئية الكلاسيكية النماذج الرياضية والرقمية المقترحة لدراسة الظواهر الكهرومغناطيسية تنفذ وتحدد قيمة ممانعة الكاشف ونحن مهتمون في النظر للعيوب من نوع التشقق وتعرض النتائج طبيعة الكهرو مغناطيسية.

Table de matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : LE CONTROLE NON DESTRUCTIF	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition de Contrôles non destructifs (CND)	4
I.2.1. Principe.....	4
I.2.2. Classification des défauts détectés.....	4
I.2.2.1. Les défauts surfaciques.....	5
I.2.2.2. Les défauts internes.....	5
I.2.3. Procédure de CND.....	5
I.2.4. Les différentes méthodes de la CND.....	6
I.2.4.1. Examen visuel.....	6
I.2.4.2. Le Ressuage.....	7
I.2.4.3. La thermographie.....	8
I.2.4.4. La magnétoscopie	9
I.2.4.5. Radiographie	10
I.2.4.6. Ultrasons.....	11
I.2.5. CND PAR Courants de Foucault.....	12
I.2.5.1. Densité du courant	13
I.2.6. Domaine d'application	14
I.3. Conclusion.....	15
Chapitre II : Généralités sur les capteurs inductifs	
II.1. Introduction.....	16
II.2. Définition d'un capteur.....	16
II.3. Les capteurs à courants de Foucault.....	16
II.4. Principe des capteurs inductifs.....	17
II.5. Les formes d'enroulements des capteurs inductifs.....	18
II.6. Différents types des capteurs inductifs.....	19
II.6.1. Capteur absolu.....	19
II.6.2. Capteur double.....	20

Table des matières

II.6.3. Capteur différentiel.....	20
II.6.4. Capteur multiple.....	21
II.7. Disposition des bobines.....	21
II.7.1. Capteurs encerclant :.....	22
II.7.2. Capteurs internes.....	23
II.7.3. Capteurs sondes.....	23
II.8. Paramètres influant le contrôle CND.....	24
II.9. Limites du CND par courants de Foucault.....	25
II.10. Réponse de la sonde.....	25
II.10.1. Réponse de la sonde à double fonctions.....	25
II.10.2. Réponse de la sonde à fonctions séparées.....	26
II.11. Conclusion.....	28
Chapitre III : Modélisation du problème électromagnétique	
III.1. Introduction.....	29
III.2. Modélisation d'un dispositif en CND-CF.....	29
III.2.1. Equations de Maxwell.....	30
III.3. Conditions de transmission et conditions aux limites.....	33
III.3.1. Conditions de transmission.....	33
III.3.2. Conditions aux limites.....	33
III.4. Formulations de la magnétodynamique.....	34
III.4.1. Formulation en potentiel $A-V$	34
III.5. Méthodes numériques de discrétisation.....	36
III.5.1. Principales méthodes existantes.....	36
III.6. La méthode des volumes finis	37
III.7. Conclusion.....	38

Chapitre IV : Mise en œuvre de la méthode des volumes finis

IV.1. Introduction.....	39
-------------------------	----

Table des matières

IV.2. Méthode des volumes finis tridimensionnels avec un maillage cartésien (MVFC).....	39
IV.2.1. Discrétisation des équations électromagnétiques par la MVFC.....	40
IV.2.1.1. Intégration de $\nabla \times \mathbf{v} \nabla \times (\mathbf{A})$	41
IV.2.1.2. Intégration de $\nabla \cdot \mathbf{v} \nabla \cdot (\mathbf{A})$	44
IV.2.1.3. Intégration du terme source.....	45
IV.2.1.4. Intégration du terme $\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right)$	45
IV.2.1.5. Intégration de l'équation en divergence.....	46
IV.3. Méthodes numériques de résolution.....	48
IV.3.1. Méthodes directes.....	48
IV.3.2. Méthodes itératives.....	49
IV.4. Conclusion.....	50
Chapitre V : Applications et validations	
V.1. INTRODUCTION.....	51
V.2. Organigramme de l'algorithme de base des codes de calcul.....	51
V.3. Applications et validations.....	52
V.3.1. . Description du problème.....	52
V.3.2. Description géométrique de défaut.....	52
V.4. Les Résultats.....	53
V.4.1. Effet de la conductivité.....	53
V.4.1.1. <i>la variation de l'impédance</i>	53
V.4.1.2. <i>la variation de la réactance</i>	55
V.4.1.3. LA Variation de la résistance	58
V.5. manipulation.....	59
Conclusion générale.....	60

Listes des figures

Chapitre 1 :LE CONTROLE NON DISTRUCTIF

Fig I.1 : Principe du contrôle non destructif.....	4
Fig.I.2 : Schéma synoptique d'un système de CND.....	6
Fig .I.3 : PRINCIPE DE EXAMEN VISUELE.....	6
Fig .I.4: Principe du ressuage.....	7
Fig .I.5: PRINCIPE DE THERMOGRAPHIE.....	8
Fig .I.6: PRINCIPE DE MAGNETOSCOPIE.....	9
Fig .I.7: PRINCIPE DE RADIOGRAPHIE.....	10
Fig .I.8: Principe du contrôle par ultrasons.....	11
Fig .I.9: Principe du CND par courants de Foucault	12
Fig.I.10. Répartition des courants de Foucault pour une pièce.	14

Chapitre 2 :Généralités sur les capteurs inductifs

Fig.II.1: Rôle général d'un capteur.....	16
Fig. II.2: Capteur à courants de Foucault.....	17
Fig. II.3. Principe des capteurs inductifs.....	18
Fig .II.4: Modification des lignes de champ en fonction de la nature de la pièce.....	19
fig. II.5: Capteur absolu.....	19
Fig .II.6. Capteur double.....	20
Fig .II. 7: Capteur différentiel.....	21
Fig .II.8: Capteur matriciel.....	21
FIG.II.9. Capteurs encerclant.....	22
Fig. II. 10 Capteurs internes.....	23
Fig. II. 11: Capteur sonde.....	24

Fig. II.12: Sonde à double fonction.....	26
Fig.II.13: Sonde à fonctions séparées.....	27

Chapitre III : Modélisation du problème électromagnétique

Fig. III. 1 : Dispositif de CND-CF	29
Fig. III. 2 : Description du domaine d'étude.....	30
Fig III.3 : Interface entre deux milieux.....	33
Fig. III.4 : Maillage du domaine d'étude.....	38

Chapitre IV : Mise en œuvre de la méthode des volumes finis

Fig .IV. 1: Volume fini élémentaire.....	40
Fig .IV. 2: Approximation linéaire du potentiel à travers la facette t.....	42
Fig .IV. 3 : Illustration des nœuds supplémentaires, en haut de la figure, la structure du volume élémentaire modifié en 3D, en bas de la figure, la projection d'un volume élémentaire suivant le plan XY.....	43

Chapitre V : Applications et validations

Fig .V. 1 : Organigramme de l'algorithme de base des codes de calcul.....	51
fig. V. 2 : Description du problème.....	53
Fig. V.3. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Inconel-600, Aluminium, Cuivre.....	53
Fig. V.4: Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Aluminium.....	54
Fig. V.5 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Inconel-600.....	54
Fig. V.6 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux: Cuivre.....	55

Listes des figures

Fig. V.7 : Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Inconel-600, Aluminium, Cuivre.....55

Fig. V.8 : Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Cuivre.....56

Fig. V.9 : Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Inconel-600.....56

Fig. V.10: Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Aluminium.....57

Fig. V.11 : Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Inconel-600, Aluminium, Cuivre.....58

Fig. V.12 : Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Inconel-600.....58

Fig. V.13. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : cuivre.....59

Fig. V.14 : Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : aluminium.....59

Liste des abréviations

- CND : Contrôle Non Destructif.
 - CF : Courants de Foucault.
 - CND-CF : Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.
 - MEF : Méthode des Eléments Finis.
 - MIF : Méthode des intégrales de frontières.
 - MVF : Méthode des volumes finis.
 - MVFC : Méthode des volumes finis classique.
 - MVFM: Méthode des volumes finis modifiée.
 - MDF : Méthode des différences finis.
 - EDP : des équations aux dérivées partielles
-

Liste des tableaux

tableau. IV. 1. Description géométrique de défaut 52

Introduction général

Dans l'industrie, les exigences de la fiabilité, de réduction des coûts de sécurité deviennent de plus en plus contraignantes. Pour une meilleure exploitation d'un produit industriel, il faut le maintenir en marche dans de bonnes conditions de sécurité, ce qui nécessite une parfaite connaissance de l'évolution des pièces qui le constituent.

Cette connaissance implique un contrôle ne portant pas atteinte à l'intégrité des pièces et entravant le moins possible la disponibilité du produit. Ce ci justifie l'importance croissante que prend le contrôle non destructif.

Les méthodes de contrôle non destructif (CND) sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité,...), soit pour déceler la présence de défauts et les caractériser. [12]

En se basant sur plusieurs phénomènes physiques, de nombreuses méthodes ont été développées pour effectuer la tâche du CND. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault...)...etc. Le choix d'une méthode dépend d'un certain nombre de facteurs tels que les propriétés physiques de la pièce à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui...), les conditions de mise en œuvre. [16]

Les techniques du CND sont utilisées en contrôle de qualité pour assurer la bonne qualité d'une production, puis de garantir la tenue en service des pièces et des ensembles fabriqués. Elles sont également très appréciées en maintenance. Elles permettent de vérifier la continuité de la matière, et donc de déceler le manque de matière, les fissures, ...etc.

Les méthodes électromagnétiques sont fréquemment utilisées pour le contrôle des pièces électriquement conductrices et/ou magnétiques. Le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre, il est facile de créer des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde. En effet, pour un contrôle donné, comment peut-on créer une bonne répartition des courants de Foucault permettant d'avoir un signal de défaut aussi important que possible. Il est nécessaire avant toute chose d'avoir une connaissance suffisamment complète du phénomène physique. Les courants de Foucault n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent [12].

La modélisation d'une configuration réelle de CND-CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement et elle fait appel à des méthodes numériques à savoir la méthode des volumes finis (MVF). Cette méthode s'est imposée ces dernières années, comme un outil numérique efficace pour le traitement des problèmes électrotechniques.

Les techniques des courants de Foucault (CF) sont largement utilisées dans le domaine du CND, dès lors qu'il s'agit de matériaux électriquement conducteurs. Elle représente par exemple la moitié des contrôles dans le domaine de l'aéronautique.

Cette méthode est en effet sensible à des défauts dans l'état géométrique ou électromagnétique d'une pièce, 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. [4]

Les capteurs à courants de Foucault sont utilisés depuis plus d'un siècle pour le contrôle des pièces conductrices notamment les pièces métalliques. De nos jours, la théorie des capteurs à courants de Foucault est déjà largement développée. Ils trouvent leurs applications dans divers domaines industriels qui vont de la mesure des propriétés de la matière, des mesures dimensionnelles jusqu'à la détection de défauts dans les pièces métalliques.

Grâce à leur sensibilité aux défauts (les fissures de fatigue, les inclusions ou les effets de la corrosion), leur mise en œuvre, facile et robuste est largement répandue dans le cadre d'une utilisation industrielle

Ce mémoire est réparti en cinq chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre présente la définition, le but du contrôle non destructif (CND). Egalement, sont exposées les différentes techniques de contrôle non destructif les plus en plus utilisées dans le secteur industriel. Enfin Nous présentons quelques notions sur les courants de Foucault.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les notions de base concernant les capteurs inductifs à courants de Foucault, avec leurs principes, leurs différentes géométries existantes ainsi que leurs différents circuits magnétiques.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation des phénomènes électromagnétiques des matériaux constituant les pièces à contrôler, afin de le retranscrire dans un langage mathématique point de départ de la modélisation. A la fin de ce chapitre, les diverses méthodes numériques utilisées pour la discrétisation des équations aux dérivées partielles, caractéristiques des phénomènes physiques à traiter sont présentées. En particulier, la méthode des volumes finis adoptée comme méthode de résolution dans le cadre de travail de ce travail.

Dans le quatrième chapitre, nous passerons à la mise en œuvre de la MVF, une approche de cette méthode est présentée, basée sur un maillage structuré. Nous présentons aussi les méthodes de résolutions des systèmes d'équations algébriques obtenus après avoir appliqué la MVF. Nous exposerons à la fin de ce chapitre, le code de calcul développé et implémenté sous l'environnement MATLAB en décrivant ses fonctions pour des problèmes électromagnétique.

Le cinquième et dernier chapitre est consacré à la modélisation d'un certain nombre de problèmes, dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation obtenus à partir du codenumérique développé. Ensuite nous comparons les résultats obtenus avec les mesures expérimentales données. On terminera par donner des conclusions et des perspectives.

Chapitre I

I.1. Introduction

L'histoire du CND commence à la fin du XIX siècle, avec la physique moderne, mais c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie. Vers les années 1960-1970, le développement des centrales nucléaires et de l'aéronautique a engendré une forte accélération du progrès du CND, et des différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe, ...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service).[1]

Le contrôle non destructif regroupe un ensemble de techniques et de procédés permettant de fournir des informations sur l'état de santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des dégradations nocives à leur utilisation ultérieure.[2]

pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Celui-ci correspond à la détection et la caractérisation des différents défauts et imperfections qui menacent la sécurité de fonctionnement des Systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques. Aujourd'hui, on assiste à une demande très importante et généralisée, émanant de tous les secteurs industriels comme l'industrie automobile, aéronautique, pétrolière, navale et nucléaire. La qualité est devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle exigeante. Cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées. Elle joue un rôle économique non négligeable, dans le sens où elle permet une gestion optimisée de la maintenance.[3]

Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants :[4]

- **la fiabilité** : le contrôle doit remplir son cahier de charges, il doit détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter.
- **la possibilité d'inspection globale et locale** : il s'agit de la manière dont l'inspection est réalisée. Soit la technique permet l'inspection de l'ensemble de la pièce à la fois, on parle d'une inspection globale, ou juste d'une partie de celle-ci, ce sera alors une inspection locale.
- **la sensibilité** : il s'agit du rapport entre la variation de la mesure et la grandeur que l'on veut mesurer. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations de la grandeur mesurée sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.
- **la rapidité d'exécution** : il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant au niveau des coûts et qu'il puisse s'intégrer dans un cycle de production.
- **le coût** : le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- **la résolution** : la résolution est la plus petite variation du signal pouvant être détectée, par exemple la dimension du plus petit défaut. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur le CND, ainsi que recenser les différentes techniques de CND par CF.

I.2. Définition de Contrôles non destructifs (CND)

Méthodes et techniques qui permettent de rechercher des anomalies dans la matière et les matériaux sans les altérer, les contrôles non destructifs fait naturellement penser au diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient. le même principe appliqué aux pièces mécanique consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation pour permettre d'apprécier sans destruction, l'état de santé des pièces et de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées. Considérée sous cet aspect d'aptitude au bon fonctionnement. [5]

I.2.1. Principe

Le contrôle non destructif est regroupé un ensemble de techniques et /ou de procédés aptes à fournir des informations concernant la santé d'une pièce ou d'une structure, tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés.

Le terme santé s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide médicale, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif des contrôles non destructifs qui est la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou plus généralement la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné.

Le CND apparaît comme un élément majeur dans le contrôle de la qualité des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est la détection des hétérogénéités et anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physiques.[6]

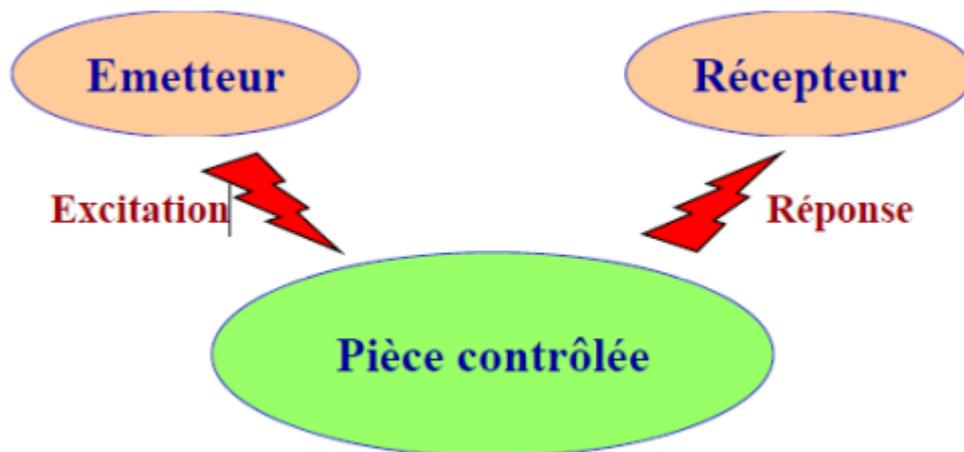


Fig . I.1 : Principe du contrôle non destructif

I.2.2. Classification des défauts détectés

En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci.

Les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement les défauts de surface, les défauts internes

I.2.2.1. Les défauts de surface

Se sont des défauts les plus problématiques sur le plan technologique et accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, Ils incluent les criques, les fissures, les piqûres, les craquelures.

a) Les défauts ponctuels

Correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelque μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixième de millimètre ce qui implique l'emploi pour leur détection des méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons. [7]

b) Les défauts d'aspect

qui correspondent à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.[8]

I.2.2.2. Les défauts internes

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé.[9]

I.2.3.Procédure de CND :

L'opération de contrôle non destructif d'un objet ne se borne généralement pas à la détection d'éventuels défauts. En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une procédure ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen.

Ce sont des opérations d'étalonnage, de calibrage, de balayage de la sonde, de traitement des données qui permettent d'atteindre ces objectifs désormais dans des bonnes conditions, grâce à l'apport intensif de l'informatique en temps réel.

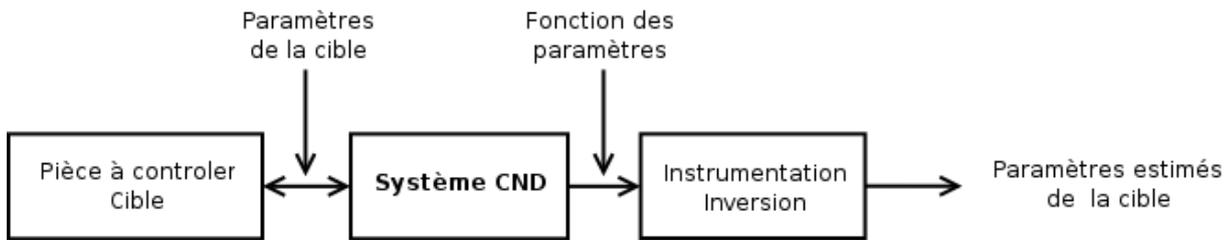


Fig. I.2. Schéma synoptique d'un système de CND

I.2.4. Les différentes méthodes de la CND

I.2.4.1. Examen visuel

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peuvent être une indication de défaut plus grave à l'intérieur, la Figure montre le principe de contrôle visuel. [10]

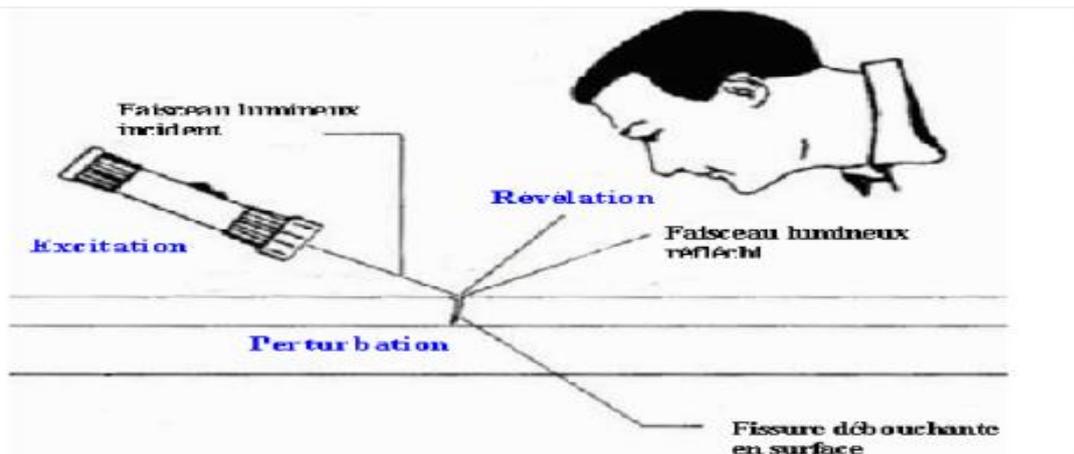


Fig.I.3 : principe d'examen visuel

Avantages

- Examen simple, rapide et pas coûteux;
- souplesse d'inspection
- Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.

Inconvénients

- Définition incomplète des critères.
- Détection limitée aux défauts superficiels;
- la surface doit être propre

I.2.4.2. Le ressuage

La technique est très ancienne et réside dans la simplicité de sa mise en œuvre. C'est une méthode globale qui autorise un examen de la totalité de la surface de la pièce. Elle permet de bien apprécier la longueur des défauts indépendamment de leur orientation. On peut mettre en évidence des discontinuités débouchantes de quelques dizaines de micromètres. Le contrôle par ressuage comporte trois étapes. La phase initiale consiste à nettoyer la surface de la pièce et d'appliquer un liquide pénétrant, soit par immersion, soit par pulvérisation. La durée d'application est variable selon le type de pénétrant, mais se situe en général entre 15 et 30 minutes. Le choix du liquide dépend essentiellement de la rugosité de la surface à contrôler. Le pénétrant peut être un produit coloré (faible sensibilité), un produit pré-émulsionné (sensibilité moyenne) ou un produit fluorescent (sensibilité élevée). Le pénétrant appliqué s'infiltré dans les petits interstices débouchant en surface, un certain temps est nécessaire pour laisser « poser » le pénétrant. La deuxième étape consiste à rincer la surface de la pièce pour enlever l'excès de pénétrant. Cette opération est délicate parce qu'un rinçage excessif ou insuffisant permet de fausser le résultat final. Dans la troisième étape on applique un révélateur, liquide ou sous forme de poudre, sur la surface rincée, puis séchée. Le liquide (pénétrant) qui s'est introduit dans les fissures « ressort » à la surface dans le révélateur et s'élargit au niveau du défaut. Il devient nettement visible par un éclairage approprié qui dépend du pénétrant utilisé. La méthode ne donne aucune indication sur le volume et donc de l'importance des défauts. [11]

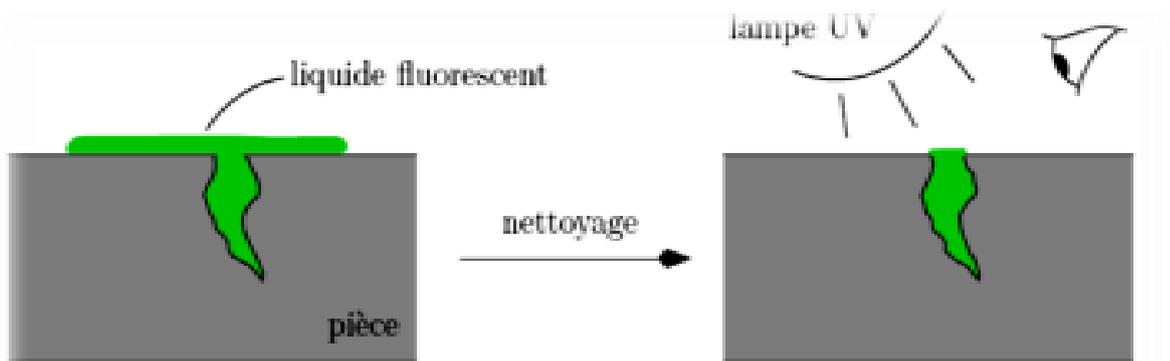


Fig .I.4: Principe du ressuage

Avantages

- Simplicité de mise en œuvre
- Prix modique dans une application manuelle
- résolution spatiale élevée

Inconvénients

- Pas de détection de défauts internes
- Pas d'appréciation de la profondeur des défauts.
- limite de l'application sur les matériaux non poreux

I.2.4.3.La thermographie

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermo grammes) des surfaces observées. Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple). Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique

[12]

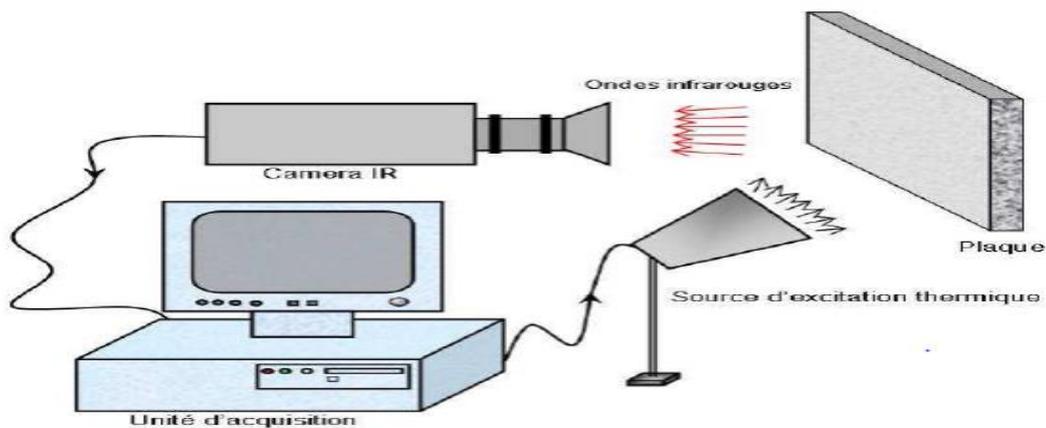


Fig .I.5: PRINCIPE DE THERMOGRAPHIE

Avantages :

- Méthode coûteuse en investissement
- L'archivage des résultats est garanti à l'aide de la caméra infrarouge.
- Méthode relativement rapide et sans contact ;

Inconvénients :

- Des difficultés de localisation de la profondeur des défauts ;
- L'interprétation des mesures pas toujours facile, surtout pour identifier la nature des défauts ;
- Des difficultés de mesure liées aux effets perturbateurs ;

I.2.4.4. La magnétoscopie

La magnétoscopie consiste à créer un flux magnétique intense à l'intérieur d'un ferromagnétique. En présence d'un défaut sur son chemin, le flux magnétique est dévié. Des particules colorées ou fluorescentes de type limaille de fer faisant office de révélateur (par analogie avec le ressuage) sont projetées dans la zone inspectée. Si leur répartition est homogène, la pièce inspectée est saine, sinon celle-ci fournit une signature caractéristique de la présence d'un défaut. Cette méthode fournit de bons résultats concernant la détection de défauts de surface mais atteint elle aussi rapidement ses limites dès lors que le défaut devient enfoui. Elle présente le même type d'inconvénient que la méthode de ressuage, en outre elle n'est applicable qu'aux matériaux magnétiques[13]

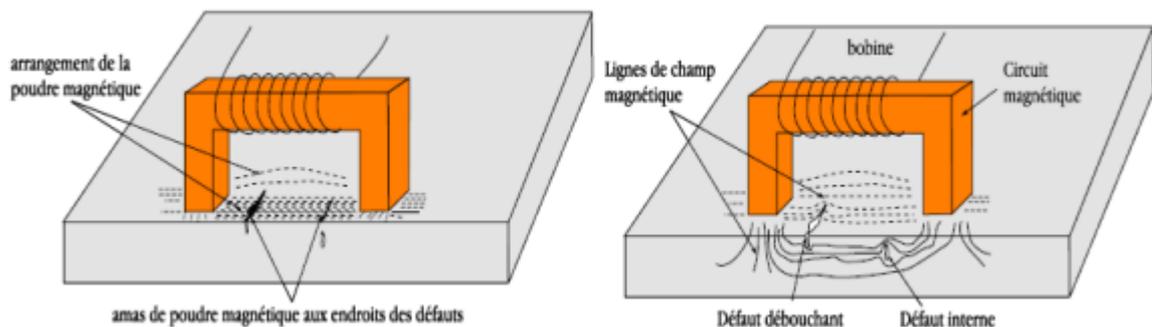


Fig .I.6: PRINCIPE DE MAGNETOSCOPIE

Avantages

- la méthode est relativement simple de mise en œuvre ;
- Simplicité de mise en œuvre.
- Possibilité d'automatisation.

Inconvénients

- la sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction ;
- Pas de détection de défauts internes.
- Utilisables que sur les matériaux ferromagnétiques

I.2.4.5. La radiographie

Le principe de La radiographie industrielle est pareil à la radiographie médicale : elle consiste à faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, comme les rayons X ou les rayons γ , la matière inspecter. Lors de leur passage à l'intérieur de la pièce, les photons voient leur énergie absorbée totalement ou partiellement par la matière, selon sa densité. Un film placé derrière la pièce est irradié par les photons qui ont encore suffisamment d'énergie. Il récupère ainsi le radiogramme, où les zones avec des défauts sont représentées par une variation de la densité optique

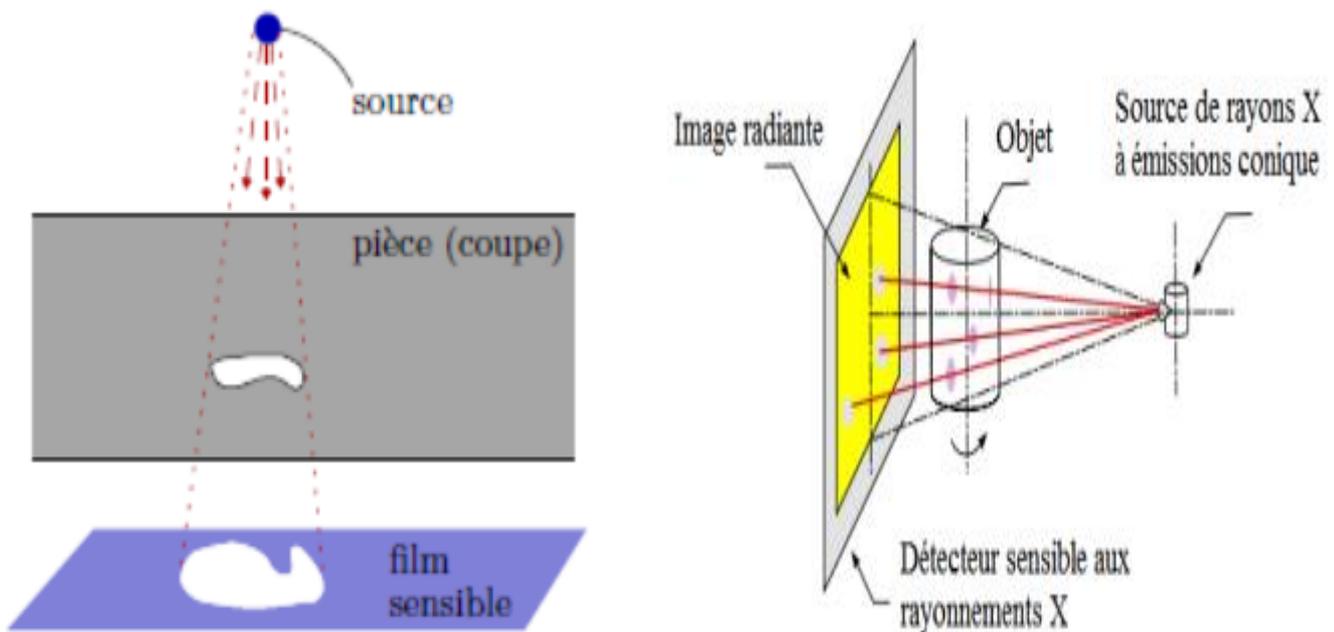


Fig .I.7: principe de radiographie

Avantages

- Contrôle des objets de forme compliquée ;
- Facile à Transporté
- Détection des défauts dans le volume de la pièce ;
- Bonne définition **des défauts avec détection de leur nature ;**

Inconvénients

- Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité;
- La nécessité de mettre en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel
- la faible productivité alliée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films

I.2.4.6. Ultrasons

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut. Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts en profondeur. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Par contre, c'est une méthode lente car il faut faire un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts.

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

Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour faire un aller-retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut. D'un point de vue pratique, on utilise un écran d'oscilloscope. Les echos sont représentés par des pics sur l'écran

[14]

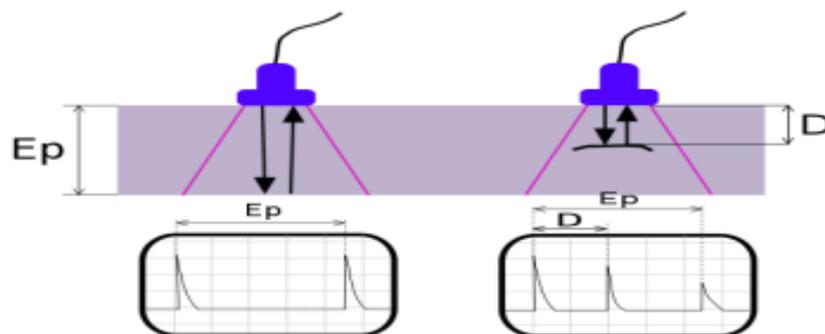


Fig .I.8: Principe du contrôle par ultrasons

Avantages :

- Détection, localisation et dimensionnement des défauts.
- Méthode de contrôle rapide ;
- Haute sensibilité de détection des défauts ;

Inconvénients :

- Technique souvent très coûteuse
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
la mise en œuvre est difficile sur certains matériaux ;

I.2.5.CND PAR Courants de Foucault

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

Été méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs de l'électricité. Elle consiste à placer une pièce conductrice dans un champ magnétique variable dans le temps. Celle-ci est alors parcourue par des courants induits, appelés "courants de Foucault" (physicien français 1819- 1868) Ainsi, une bobine placée à proximité d'une pièce conductrice et parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits dans la pièce. Ces courants créent eux-mêmes un flux magnétique induit qui s'oppose au flux d'excitation, modifiant par là-même la f.e.m. de la bobine

C'est l'analyse de cette variation de f.e.m (variation d'impédance) qui fournira les informations exploitables pour un contrôle; en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation de la f.e.m induite dans la bobine ou de manière équivalente la variation d'impédance (cas harmonique) décelable au niveau de la bobine d'excitation.

Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault se développent principalement sur la surface des corps conducteurs (effet de peau).

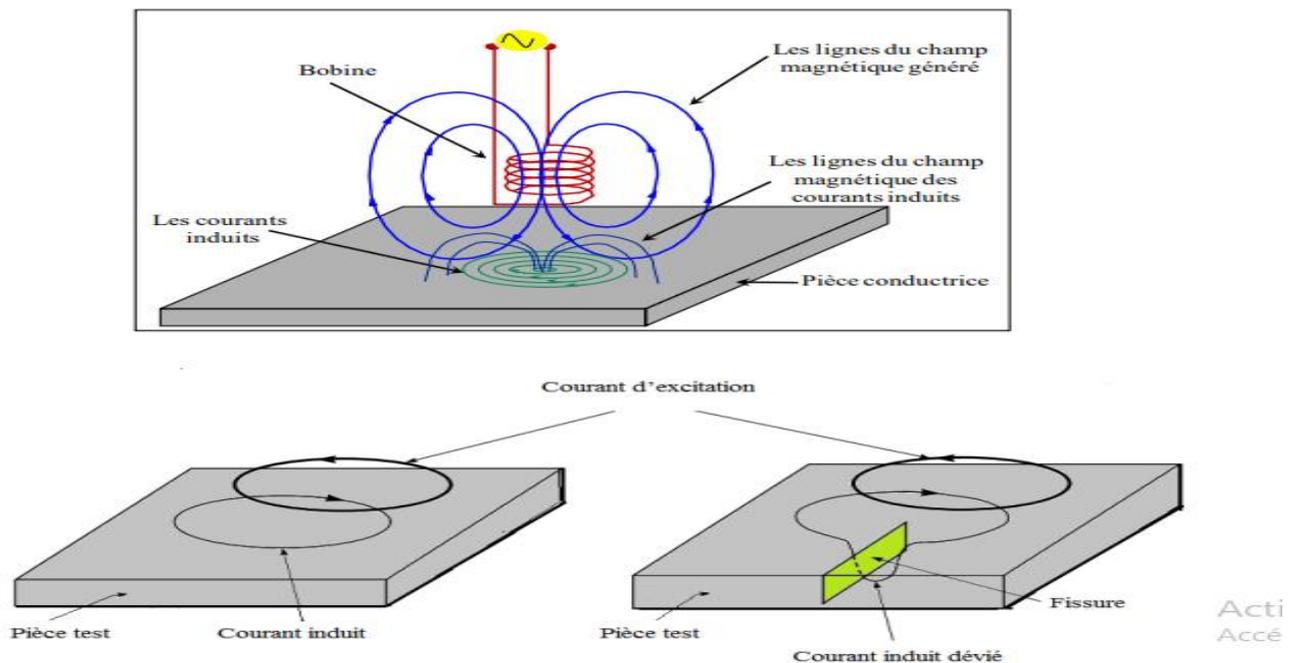


Fig .I.9: Principe du CND par courants de Foucault[1]

Avantages

- Permet la détection des défauts débouchants ou faiblement enfouis (quelques millimètres) dans tout matériau conducteur
- Simple, peu coûteux et rapide;
- Pas des conditions de sécurité ni pour l'opérateur ni pour l'environnement ;

Inconvénients

- La détection du défaut se fait d'une manière locale;
- La profondeur d'inspection est dépend de la fréquence d'excitation ;
- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs ;

I.2.5.1. 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

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

Avec

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.

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

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}$$

Où μ , σ et f représentent respectivement la perméabilité magnétique ($H. m^{-1}$), la conductivité électrique ($S. m^{-1}$) et la fréquence d'excitation (Hz).

On peut constater que la densité du courant décroît de manière exponentielle dans la profondeur (figure I.7).

Il en résulte qu'environ 37 % des courants induits passent entre la surface et cette profondeur δ , créant une zone de forte sensibilité [46] 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.

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.

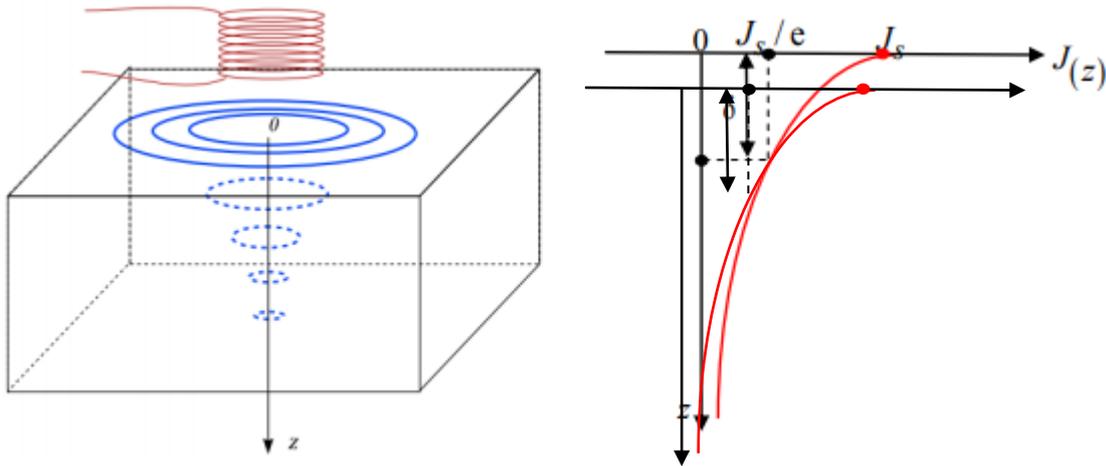


Fig.I.10. Répartition des courants de Foucault pour une pièce. [16]

I.2.6. Domaine d'application :

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

- Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau ;
- Contrôles de soudures ne présentant pas de vagues de solidifications de soudage trop marquées
- Suivi d'installations et de matériels en service
- Utiliser pour la recherche de fissures de fatigue au cours des opérations de maintenance du matériel aéronautique
- Mesure d'épaisseur de revêtements (conducteurs non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur...)

I.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de donner des généralités sur le CND le but et la définition. Tout d'abord, nous avons commencé par la présentation des différents types de défauts détectés en CND, Ensuite nous avons décrit les principes des techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel a savoir : l'examen visuel, le ressuage, ultrason, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la thermographie et enfin le procédé des courants de Foucault

nous avons évoqué les avantages et les inconvénients Pour chaque technique de CND

Il n'y a pas de technique de CND qui soit valable pour tous les matériaux et tous les défauts , le choix d'une technique dépend de plusieurs facteurs, nature (conducteur ou isolant), dimensions et état de surface du matériau à contrôler, type de défaut débouchant, sous cutané ou interne, le but du « CND» soit recherche de défaut ou caractérisation des pièces à contrôlées, mesure d'épaisseur...

Le choix d'un tel contrôle est justifié par sa simplicité, réalisation pratique non coûteuse.

Chapitre II

II.1. Introduction

Les capteurs inductifs ont été les premiers éléments sensibles au champ magnétique connus. Ils sont des bobines, qui peuvent être de différentes géométries, plates ou solénoïdes, et éventuellement contenir un noyau ferromagnétique afin de concentrer le champ magnétique et augmenter la sensibilité. L'examen non destructif par capteurs inductifs est un procédé relativement répandu dans le secteur industriel, mais restent encore intéressants grâce à leur précisions et leur robustesse avec plusieurs types parmi lesquelles, les capteurs à courants de Foucault qui sont utilisés depuis plus d'un siècle pour le contrôle des pièces conductrices. Notamment métalliques. De nos jours, la théorie des capteurs à courants de Foucault est déjà largement développée. on va présenter les généralités sur les capteurs ainsi les techniques de contrôle non destructive par courant de Foucault (CND-CF). [17]

II.2. Définition d'un capteur:

Un capteur est un organe de prélèvement d'informations qui élabore, à partir d'une Grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (généralement Électrique) représentative de la grandeur prélevée, et utilisable à des fins de mesure ou de Commande.

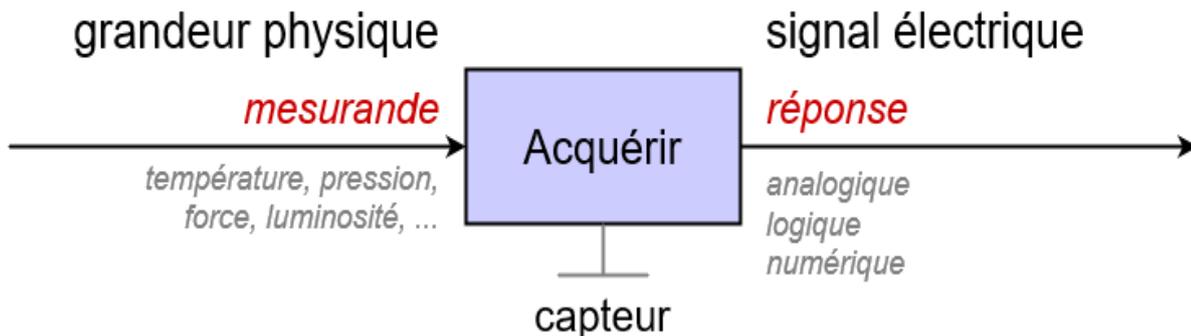


Fig.II.1: Rôle général d'un capteur.

II.3. Les capteurs à courants de Foucault

La technique du contrôle non destructif par courants de Foucault nécessite la mise en place d'un système permettant l'émission et la réception d'un champ magnétique alternatif. Ces deux fonctions peuvent être réalisées par un seul élément ou par deux éléments distincts. Les capteurs magnétiques transforment les variations du champ magnétique en une variation de tension mesurable. Nous pouvons classer les capteurs permettant de mesurer un champ magnétique variable en deux grandes familles :

– **les capteurs inductifs** : Historiquement les premiers éléments sensible au champ connus, ils sont des bobines qui transforment le champ magnétique qui les traverse en tension. Elles peuvent être utilisées en émission et en réception.

– les capteurs magnétiques : La variation de l'impédance ou de la résistance de ces capteurs est proportionnelle au champ magnétique dans lequel ils sont plongés. L'émission du champ magnétique alternative doit être réalisée par un autre élément.[1]

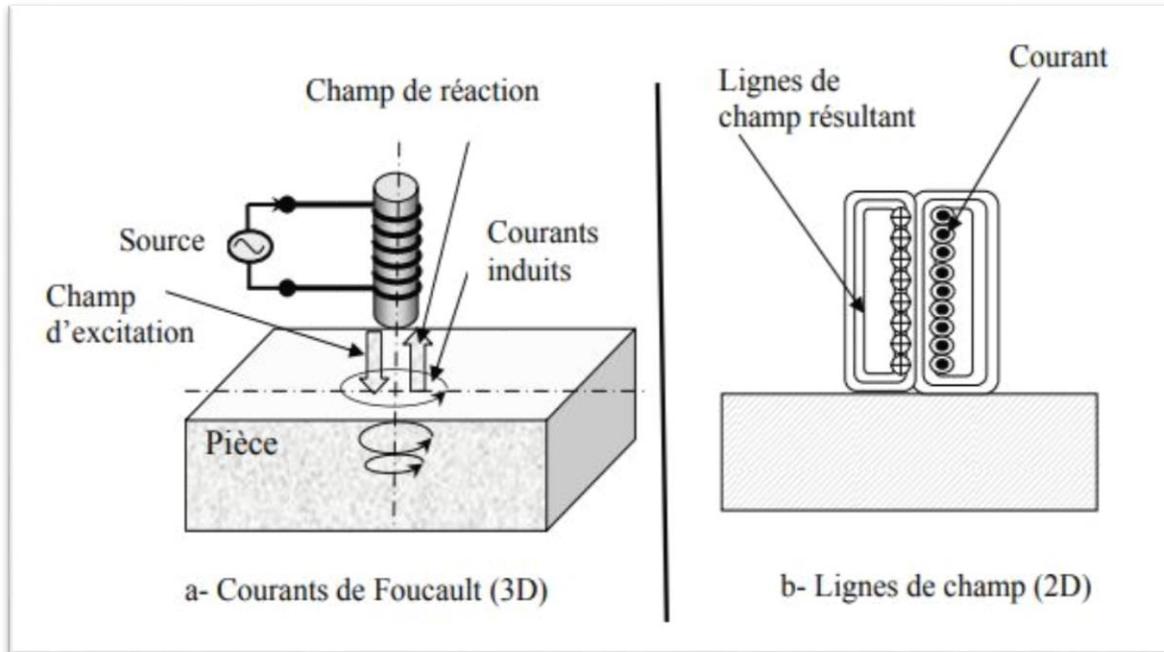


Fig. II.2: Capteur à courants de Foucault.

II.4. Principe des capteurs inductifs

Un capteur inductif est constitué d'une bobine parcourue par un courant variable dans le temps génère des courants induits dans les objets métalliques apportés à proximité de ce capteur.

Ces courants créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur modifient ainsi l'impédance du capteur. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour le contrôle. En effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques des objets considérés, et bien entendu des conditions d'excitation

(Paramètres électriques et géométriques du bobinage). On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants induits, puisse engendrer une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine. [3]. [19] [20] [18]

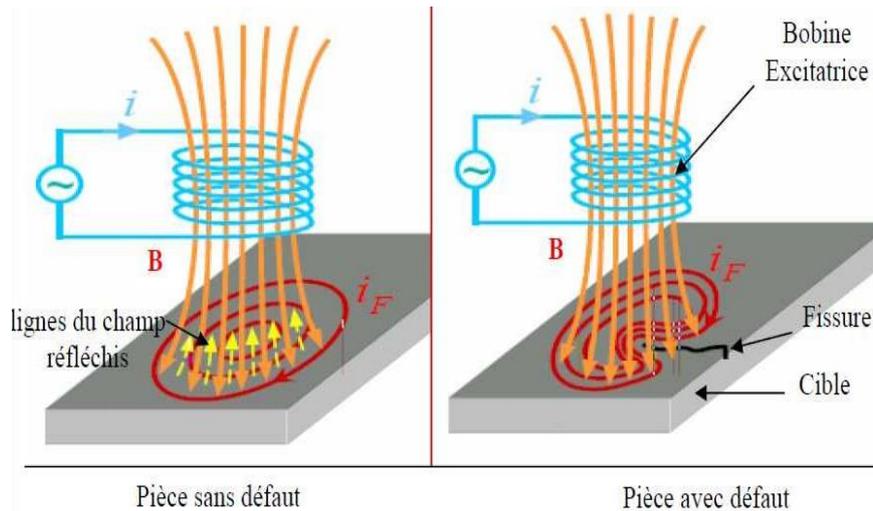


Fig. II.3. Principe des capteurs inductifs

II.5. Les formes d'enroulements des capteurs inductifs

En fonction de leur utilisation, les capteurs inductifs peuvent prendre des formes différentes pour optimiser l'une ou l'autre de leurs caractéristiques. [7]

- **Capteurs avec ou sans blindage :**

Les deux capteurs ont la même étendue de mesure. Le capteur sans blindage a un diamètre plus petit mais il doit être plus éloigné d'un capteur semblable pour éviter leur influence mutuelle. Il ne doit pas être inclus dans une pièce conductrice trop proche de la bobine active. Le capteur avec blindage peut, quant à lui, être inséré dans une pièce conductrice.

- **Capteurs à noyaux demi-tore ou demi-pot**

Pour la même étendue de mesure, le capteur inductif dont le noyau est composé d'un demi-tore est deux fois plus petite que celui dont le noyau est composé d'un demi-pot.

À basse fréquence, ces capteurs peuvent mesurer des pièces ferromagnétiques. À haute fréquence, on les utilise pour mesurer des pièces amagnétiques, seulement conductrices.

Si sa largeur est adaptée au pas, le capteur dont le noyau est en forme de bobine peut être utilisé pour contrôler la présence d'un filetage ou son diamètre moyen. Le capteur composé d'un solénoïde placé dans un tube ferromagnétique est assez insensible au centrage du fil s'il est assez long, sa réponse est proportionnelle à la section du fil, c'est-à-dire au carré de son diamètre.

- **Capteur inductif le plus simple**

Le plus simple des capteurs inductifs est composé d'une simple bobine (figure

II.4 a). La proximité d'une pièce ferromagnétique favorisera le passage du flux magnétique (figure II.4 b). En revanche une pièce conductrice s'opposera au flux magnétique par la génération de courants de Foucault (figure II.4 c). Les lignes de champ sont canalisées par la pièce électromagnétique, la réluctance du circuit magnétique est alors diminuée. Elles sont repoussées par la pièce seulement conductrice, la réluctance est alors augmentée.

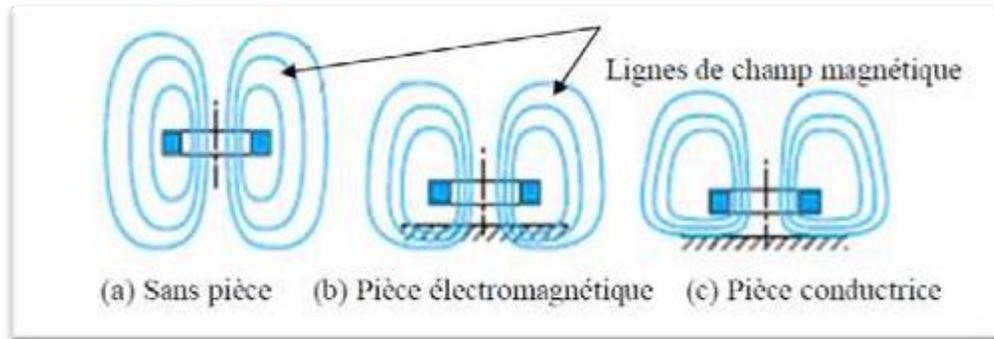


Fig .II.4: Modification des lignes de champ en fonction de la nature de la pièce

I.6. Différents types des capteurs inductifs

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

II.6.1 Capteur absolu

C'est un capteur à double fonction, il est constitué d'une seule bobine émettrice- réceptrice qui crée le flux alternatif grâce au courant qui la parcourt et subit des variations d'impédance que l'on peut détecter en mesurant très finement sa signal de sortie (figure II.5), l'exploitation se fait, en régime sinusoïdal, par la mesure de l'impédance équivalente de la bobine dans son environnement [12]

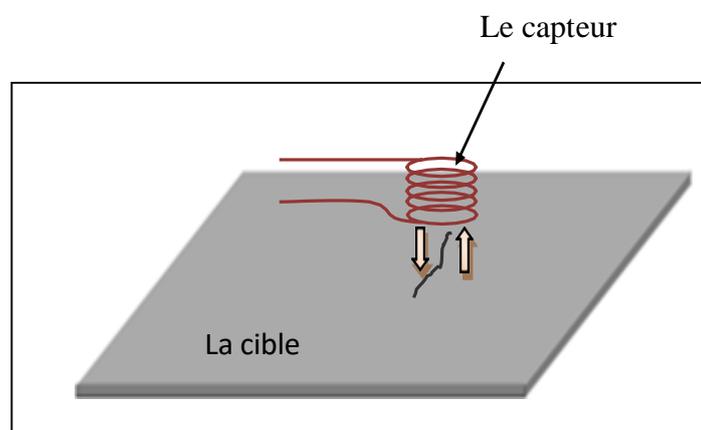


fig.II.5: Capteur absolu

Un capteur absolu est destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit à examiner par rapport à une référence fixe. Le signal récupéré par la bobine est très faible en comparaison au signal émis. C'est pourquoi on utilise, en contrôle par courants de Foucault, une mesure comparative. La méthode absolue utilise un capteur à double fonction et la mesure se fait par comparaison du signal reçu à une référence artificielle électronique. Ce mode de mesure permet d'accéder simultanément aux grandeurs utiles et perturbatrices (par exemple la température qui fait varier la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau à tester), [10][36][37].

II.6.2. Capteur double

C'est un capteur à fonctions séparées, il est constitué de deux bobines une excitatrice pour créer le flux et l'autre réceptrice pour le recueillir (figure II.6). Ces deux bobines sont moulées dans un même boîtier pour éviter toute modification fortuite de leur mutuelle. Ce type de capteur est très utilisé pour les contrôles à basses fréquences ($f < 1\text{kHz}$) [21] [22].

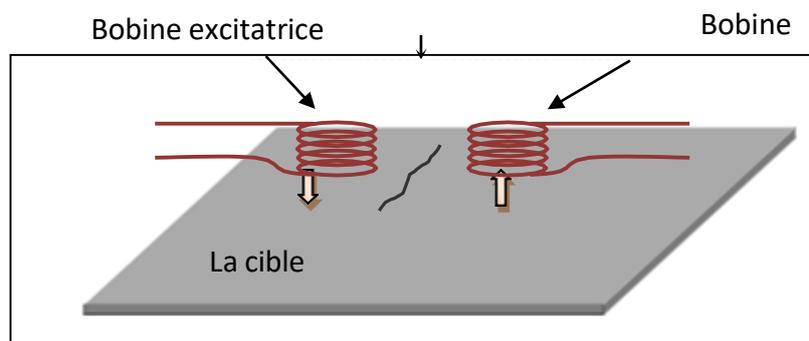


Fig .II.6. Capteur double

II.6.3. Capteur différentiel

Un capteur en mode différentiel est une sonde destinée à accéder aux seules variations locales des caractéristiques du produit examiné, par différence permanente de deux mesures simultanées en deux zones voisines. Le capteur peut être constitué de deux enroulements identiques dont on mesure l'écart de l'impédance (figure II.7). Cette sonde est particulièrement utilisée pour détecter des discontinuités lors de son déplacement le long d'une pièce en s'affranchissant des perturbations induites telle que les variations de la distance sonde-pièce (lift-off) [23], [24], [12].

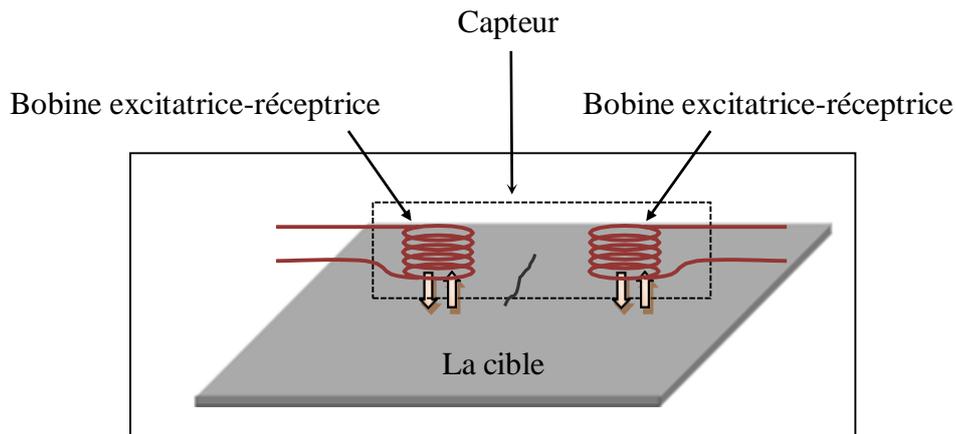


Fig .II. 7: Capteur différentiel.

II.6.4. Capteur multiple

Le capteur multiple (capteur matriciel) peut être réalisé par assemblage d'un ensemble de bobines identiques qui fonctionnent d'une manière autonome (figure II.8). La constitution d'un capteur matriciel est nécessaire pour répondre à certains critères. Dans le cas d'un contrôle effectué selon deux axes, la procédure d'inspection avec un capteur unique peut s'avérer trop longue. Pour remédier ce problème, il est très intéressant d'associer en ligne plusieurs capteurs élémentaires fonctionnent en même temps. En multiplexant les informations issues de chacun d'eux, il est possible d'accéder plus rapidement aux propriétés de la cible. L'association en ligne de plusieurs capteurs judicieusement espacés en fonction de la taille des défauts à détecter permet de recueillir des signaux suffisamment riches en information [38], [39].

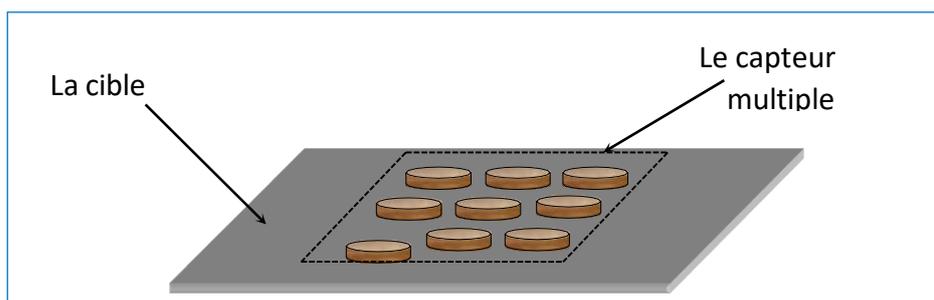


Fig .II.8: Capteur matriciel

II.7. Disposition des bobines

Les sondes à courants de Foucault sont extrêmement variées et il est impossible de les décrire toutes brièvement. Leurs dimensions varient du millimètre pour les plus petites sondes pick-up utilisant un noyau de ferrite, jusqu'à 120 ou 140 mm de diamètre pour les sondes les plus encombrantes.[27]

On rencontre en pratique essentiellement trois types de capteurs à courants de Foucault

II.7.1. Capteurs encerclant :

Ce sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Elles analysent un anneau de la pièce ayant une largeur égale à la largeur active de la bobine; les bobines sont immobilisées et protégées dans une pièce moulée dont l'alésage doit être de diamètre très peu supérieur à celui du produit. Les capteurs encerclant sont destinés au contrôle au défilé des produits longs de forme simple et de diamètre modeste tels que les fils, barres, tubes et petits profilés métallurgiques, (Figure (II. 9), [28]).



b) Différents modèles de capteurs encerclant

a) Contrôle d'un tube

Capteur encerclant

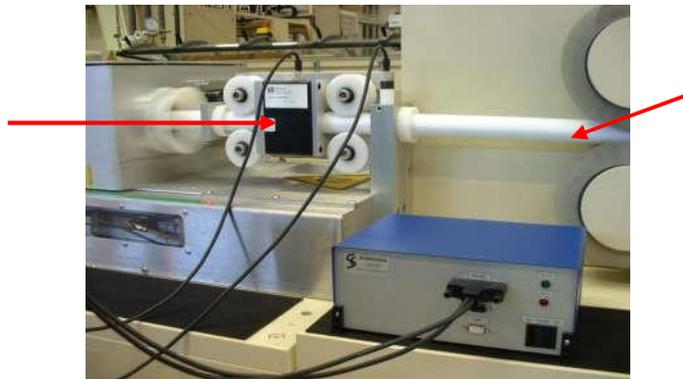
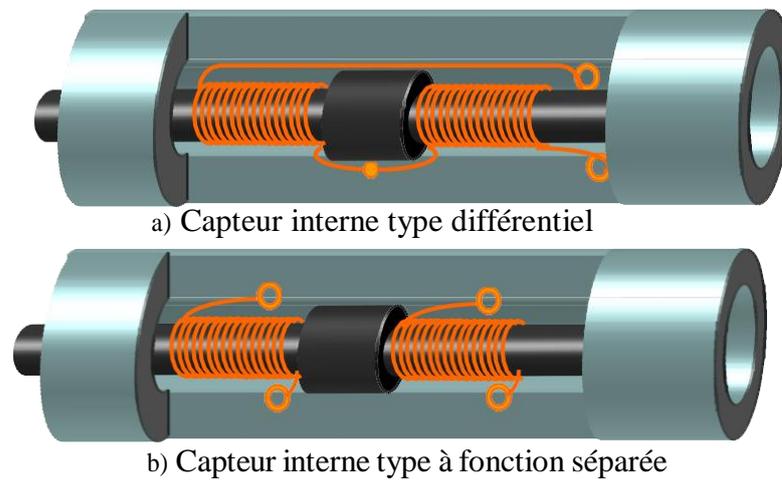


Fig .II.9. Pièce à contrôler

II.7.2. Capteurs internes

Ils sont destinés à l'examen d'un produit par l'intérieur pour le contrôle des produits par l'intérieur, les bobines sont moulées côte à côte de façon concentrique à l'axe du produit; ce type de capteur est principalement utilisé pour le contrôle des multiples tubes de petit diamètre qui constituent les échangeurs thermiques, condensateurs ou les générateurs de vapeur dans l'industrie nucléaire, (Figure (II. 10)).



c) Capteurs internes réels.

Fig. II. 10 Capteurs internes.

II.7.3. Capteurs sondes :

Ils sont connus aussi sous le nom de palpeurs ou bobines ponctuelles. Ces sondes comportent un ou plusieurs bobinages et peuvent être placées sur, ou à proximité de la surface de la pièce à contrôler, ils sont généralement moulés sur un noyau de ferrite d'axe perpendiculaire à la surface, très perméable aux faibles champs alternatifs, tout en gardant une bonne sensibilité ponctuelle de détection des défauts les plus fins. Ils analysent une zone quasiment égale à l'aire de leurs sections transversales. Ils permettent donc une inspection locale de la pièce et ils peuvent atteindre des régions d'accès réputées difficiles.

La géométrie des sondes est fonction des cibles à contrôler et du dimensionnement des fissures recherchées, ainsi on peut trouver des sondes plus ou moins à tête large (embase plate) pour le contrôle de surface importante et pour défauts relativement grands, (Figure (II. 11.a)). D'autre part on trouve des sondes à tête très fine (tête de crayon) pour permettre l'inspection dans les espaces restreints et pour détecter de petites discontinuités. Elles sont disponibles avec un support droit ou coudé, qui facilite la manipulation, (Figure (II. 11.b)).

Ces capteurs sont adaptés aux explorations ponctuelles en contrôle manuel ou au balayage de grandes surfaces en contrôle automatique



b) Sondes à tête fine

a) Sondes à tête large (embase plate)

Fig. II. 11: Capteur sonde.

II.8. Paramètres influant le contrôle CND

Les principaux paramètres influant le contrôle peuvent se répartir en pratique en trois catégories :

* Paramètres liés au matériau

Outre ceux liés à la forme géométrique de la cible, ce sont sa conductivité électrique σ et sa perméabilité magnétique μ . Toute variation locale de ces paramètres entraînant un déplacement du point de fonctionnement moyen de la sonde. Les variations de la conductivité électrique σ ou de la perméabilité magnétique μ ont des causes très diverses : présence de contraintes résiduelles importantes dues à la fabrication, des chocs ou martelages ultérieurs, zones décarburées,etc. [29]

* Paramètres liés au montage

Ils gouvernent le couplage entre le capteur et le matériau : il s'agit soit du coefficient de

remplissage pour les bobines encerclant, soit de la position du capteur par rapport à la surface de la pièce (lift-off). Les variations du lift-off provoquent des fluctuations de l'impédance qui peuvent prendre une amplitude telle qu'elles masqueront les indications caractéristiques du défaut. [29]

* Paramètres électriques

C'est essentiellement la fréquence d'excitation du capteur qui sera choisi en fonction des considérations précédentes, à savoir l'obtention d'un effet de peau adéquat par rapport à la profondeur des défauts. L'intensité de magnétisation alternative, liée à l'intensité du courant d'excitation, n'est pas un facteur déterminant du contrôle, dans la mesure où elle est choisie suffisamment faible pour éviter une saturation magnétique qui introduirait des non linéarités rendant l'exploitation des signaux très compliquée. Cette intensité doit être suffisamment forte pour que le rapport signal/bruit soit convenable au niveau des amplifications et autres traitements électroniques [17]

I.9. Limites du CND par courants de Foucault

- Il ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs.
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur.
- L'interprétation des signaux est souvent complexe.

II.10. Réponse de la sonde

L'objectif ultime de la modélisation du CND par CF est de déterminer la réponse de la sonde.

[15]

II.10.1 Réponse de la sonde à double fonctions

Il faut noter que les matériaux étudiés sont supposés linéaires et isotropes.

En considérant une bobine parcourue par un courant I sinusoïdal, de pulsation ω , il est possible de déterminer l'impédance Z de cette sonde par calcul de l'énergie magnétique.

Moyenne (W) emmagasinée dans tout l'espace et des pertes Joule P_j dans les milieux

Conducteurs définies par les relations suivantes : [15]

$$P_j = I_{eff}^2 \text{Re}(Z) = \int_{\Omega_c} \frac{1}{\sigma} |J|^2 d\Omega \quad (II.1)$$

$$W = I_{eff}^2 \frac{\text{Im}(Z)}{2\omega} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} |B|^2 d\Omega \quad (II.2)$$

Où B et J représentent respectivement l'induction magnétique et la densité de courant et I_{eff} la valeur efficace du courant. μ Et σ sont respectivement la perméabilité magnétique et la conductivité électrique.

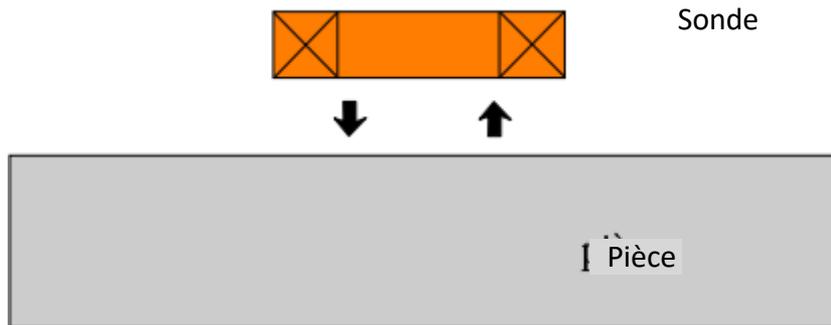


Fig. II.12: Sonde à double fonction

II.10.2. Réponse de la sonde à fonctions séparées

Pour une sonde à fonctions séparées constituée d'une bobine émettrice et d'une autre réceptrice (figure II.13) le calcul de la réponse par la méthode précédemment décrite s'avère inutilisable. On est en effet typiquement amené à calculer une transe-impédance Z : [15]

$$Z = \frac{V_2}{I_1} \quad (II.3)$$

Où V_2 est la tension aux bornes de la bobine de réception et I_1 est le courant d'alimentation de la bobine émettrice.

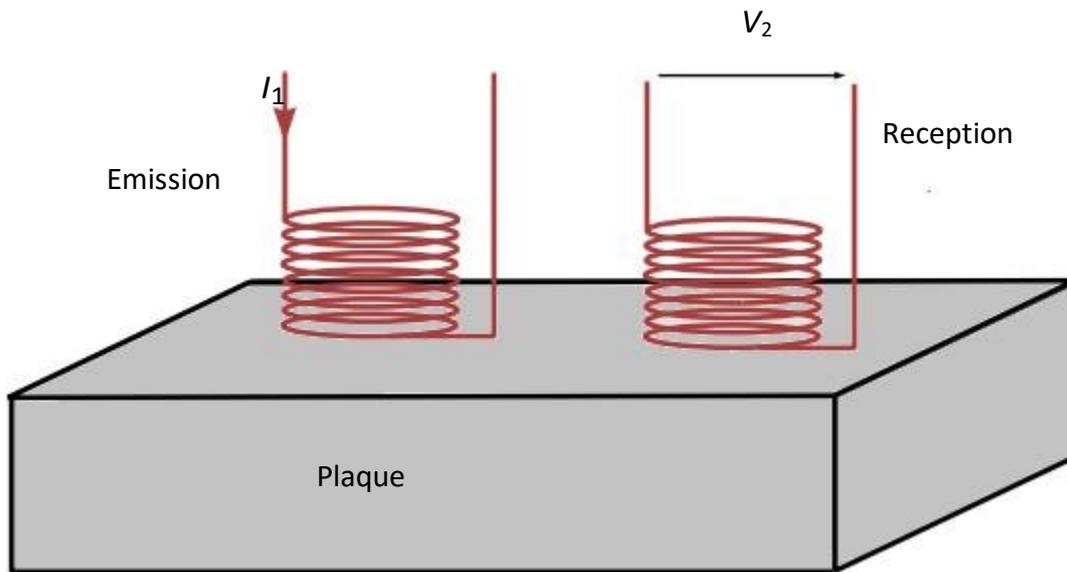


Fig.II.13: Sonde à fonctions séparées.

D'autre part, d'après la loi de Faraday (en régime sinusoïdal) on a :

$$V_2 = -j\omega\phi_2 \quad (II.4)$$

Avec ϕ_2 le flux de l'induction magnétique engendré dans la bobine de réception. En remplaçant l'expression de V_2 (relation (II.6)) dans l'équation (II.5) on trouve :

$$Z = -\frac{j\omega\phi_2}{I_1} \quad (II.5)$$

I étant connu, le calcul de la transe-impédance nécessite de déterminer le flux magnétique dans la bobine réceptrice.

Le flux de l'induction magnétique par la formulation A-V est donné par la relation suivante :

$$\phi_m = \int_{\Omega_b} A \cdot Nd\Omega \quad (II.6)$$

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit quelques notions sur la création des courants de Foucault et le principe du capteur inductif. Ensuite on a passé en revue les formes principales D'enroulements du capteur, différents types de capteurs à courants de Foucault, différentes Formes géométriques des circuits magnétiques, la disposition des capteurs et les différents modes D'excitation.

Chapitre III

III.1. Introduction

Les phénomènes électromagnétiques se présentent dans plusieurs dispositifs tels que les machines électriques, les appareils de coupure, les appareillages à haute tension, ...etc. Ces phénomènes sont produits par des charges électriques, des courants et des aimants permanents. L'électromagnétisme considère les phénomènes électriques et magnétiques à un niveau macroscopique [33]

Ce chapitre est consacré à l'étude du comportement et à la compréhension des techniques d'inspection par courants de Foucault qui nécessite un ensemble de connaissances sur les propriétés physiques des matériaux, sur les phénomènes électromagnétiques ainsi présentée aussi la formulation en potentiels A-V du modèle magnétodynamique. Nous exposons aussi les différentes méthodes numériques de discrétisation en particulier la méthode des volumes finis MVF

III. 2. Modélisation d'un dispositif en CND-CF

Un dispositif de contrôle ou une évaluation non destructif par courant de Foucault peut être présenté par un schéma synoptique (Fig. III. 1) constitué d'une bobine placée au dessus d'une pièce conductrice, fabriquée en Aluminium par exemple, ou magnétique (Acier,....etc.).

L'objectif ici, consiste à évaluer l'impédance du capteur dans les deux cas suivants ; sans et avec défaut dans la pièce de dimensions l , e et p . Ensuite on calcul la variation de l'impédance qui représente la grandeur d'intérêt dans un problème de CND-CF, par cela on peut caractériser les propriétés physiques et géométriques de la pièce en question. La figure (Fig. III. 2) représente le domaine d'étude relatif à un problème type en CND-CF. Dans cette figure, le domaine d'étude Ω est composé d'une région conductrice amagnétique, région non conductrice magnétique, région ferromagnétique et une source de courant. Des conditions aux limites seront imposées sur la frontière Γ , souvent sont les conditions dites de Dirichlet.

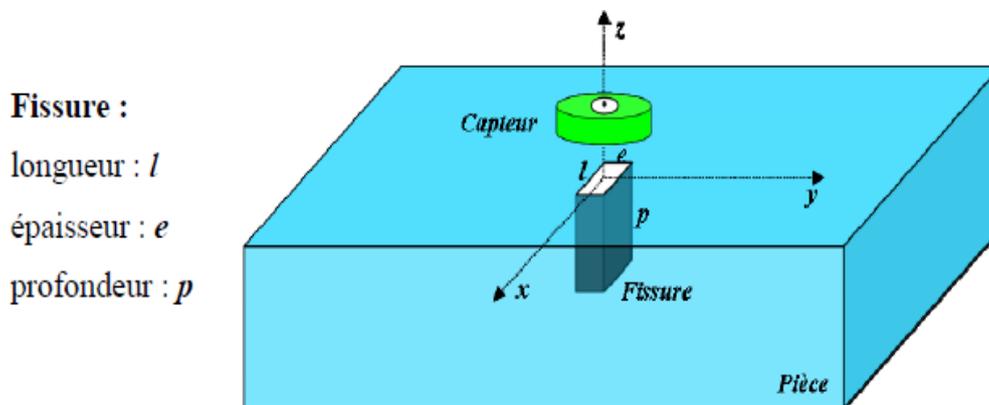


Fig. III. 1 : Dispositif de CND-CF [35].

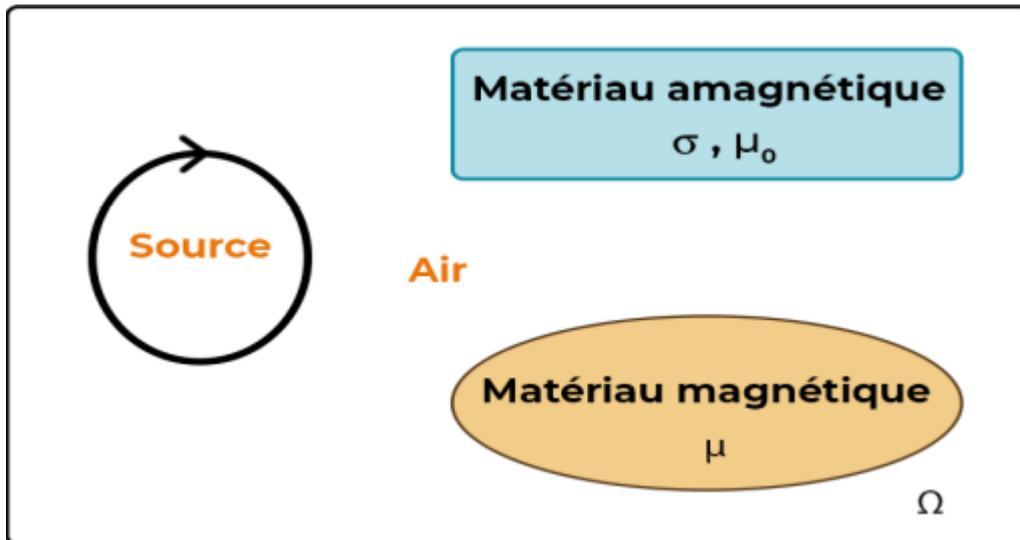


Fig. III. 2 : Description du domaine d'étude

III. 2. 1. Equations de Maxwell

J. C. Maxwell (1831-1879) a réuni l'ensemble des phénomènes électromagnétiques en quatre équations dites lois fondamentales de l'électromagnétisme. Les équations de Maxwell constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques :

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{théorème d'Ampère-Maxwell}) \quad (\text{III.1})$$

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

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{loi de conservation}) \quad (\text{III.3})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{théorème de Gauss}) \quad (\text{III.4})$$

Avec:

Deux grandeurs vectorielles magnétiques

H : Champ magnétique (A/m)

B : Induction magnétique (T)

Trois grandeurs vectorielles électriques

E : Champ électrique (V/m)

D : Induction électrique (C/m²)

J : Densité de courant électrique de conduction (A/m²)

Et la sixième, la densité de charges électriques libres ρ (C/m³).

Dans ces équations, ρ représente la densité volumique de charges électriques (C. m⁻³). **E** est le champ électrique (V. m⁻¹), **H** est le champ magnétique (A. m⁻¹). **D** est l'induction électrique (C. m⁻²), **B** est l'induction magnétique (Wb. m⁻² ou T) et **J_c** représente la densité du courant de conduction (A. m⁻²)

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 :

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

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

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

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

Tels que :

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

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

- ✓ $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ est la perméabilité magnétique du vide.
- ✓ μ_r : est la perméabilité relative du milieu considéré.
- ✓ $\varepsilon_0 = 8.8510^{-12}$ est la permittivité de l'air,
- ✓ 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.2), [40]. 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 I

Le terme $\frac{\partial D}{\partial t}$ 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, [40], [41] et [43]. Avec cette hypothèse et nous Combinons (III.1) et (III.4), nous obtenons l'équation de conservation de charges électriques :

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

Dans notre travail, nous nous intéressons à cette loi (III.10), puisque, les valeurs numériques dans chaque volume fini ou cellule du domaine de discrétisation du modèle a étudié (Fig.III.1), par la méthode des volumes finis MVF peuvent être vues comme des approximations de valeurs moyennes sur la cellule. Ainsi, il suffit de construire des fonctions donnant des approximations de ce qui passe d'une cellule à ses voisins. Automatiquement, la méthode est conservative, ce qui sort d'une cellule rentre exactement dans sa voisine.

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

$$\mathbf{J}_{ind} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}) \quad (\text{III.11})$$

$$\mathbf{J}_C = \mathbf{J}_S + \mathbf{J}_{ind} \quad (\text{III.12})$$

\mathbf{v} est le vecteur de la vitesse, \mathbf{J}_S est la densité du courant imposé dans l'inducteur et \mathbf{J}_{ind} est la densité des courants induits. Le terme $\sigma \mathbf{E}$ représente le courant de conduction résultant du champ électrique \mathbf{E} , et $\sigma \wedge (\mathbf{v}) \mathbf{B}$ exprime le courant résultant du mouvement. Dans notre travail la vitesse mécanique de déplacement (\mathbf{v}) est absente d'ou on peut décomposer le courant total d'équation par :

$$\mathbf{J}_C = \mathbf{J}_S + \sigma \quad (\text{III.13})$$

III.3. Conditions de transmission et conditions aux limites

III.3.1. Conditions de transmission

Les champs électromagnétiques admettent des discontinuités lors du passage entre deux milieux de propriétés différentes. Les conditions de transmission ou de passage s'écrivent alors à l'interface entre deux milieux [15]

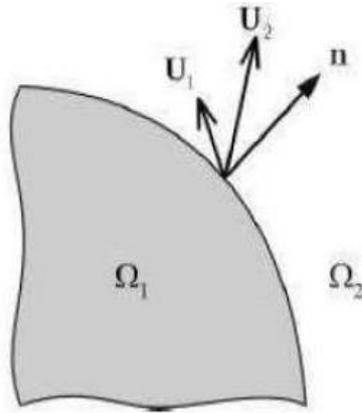


Fig III.3 : Interface entre deux milieux

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

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

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

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

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

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

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

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

III.3.2. Conditions aux limites

Pour assurer l'unicité de la solution de la résolution du système composé par les équations de Maxwell et les lois de comportement, des conditions aux limites sont imposées.

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

D'après l'équation (III.1) et on néglige le terme des courants de déplacement, on en déduit que :

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

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

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

III.4. 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 : \mathbf{E} , \mathbf{A} et $\mathbf{A}-\mathbf{V}$.
- Formulations de type magnétique : \mathbf{H} et $\mathbf{T}-\Phi$.

III.4.1. Formulation en potentiel A-V

En régime dynamique, Le modèle de la magnétodynamique consiste à l'étude des phénomènes magnétiques et électriques, dont Les champs électromagnétiques sont variables, soit par variation dans le temps des courants d'excitation, soit par mouvement d'aimants permanents.

Tenant compte des hypothèses simplificatrices et en considérant la loi de conservation (III.10), Le modèle de la magnétodynamique issu des équations de Maxwell s'écrit :

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial T} \quad (\text{III.22})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_c \quad (\text{III.23})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{III.24})$$

Il est nécessaire 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.16), la variable d'état A est exprimée en fonction de l'induction magnétique B par la relation suivante :

$$B = \nabla \times A \quad (III. 25)$$

$$A \wedge \mathbf{n}|_{\Gamma} = \mathbf{0} \quad (III. 26)$$

A partir de cette relation (III.17), le terme B dans (III.14) sera remplacé par A et nous obtenons :

$$\nabla \times \left(E + \frac{\partial A}{\partial t} \right) = \mathbf{0} \quad (III. 27)$$

Cette relation nous permet de définir un potentiel scalaire électrique V , tel que :

$$E = - \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) \quad (III. 28)$$

Combinons les équations (III.6), (III.11), (III.15), (III.17) et (III.20) nous obtenons :

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) = J_s \quad (III. 29)$$

En considérant la loi de conservation (III.10), on trouve comme deuxième équation :

$$\nabla \cdot \left[-\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) \right] = \mathbf{0} \quad (III. 30)$$

Le système d'équations (III.21) et (III.22) constitue la formulation en potentiels A - V :

$$\begin{cases} \nabla \times (\nu \nabla \times A) + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) = J_s \\ \nabla \cdot \left[-\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) \right] = \mathbf{0} \end{cases} \quad (III. 31)$$

La résolution du système (III.23) nécessite la connaissance des conditions aux limites relatives au domaine d'étude car elle admet une infinité de solutions. Pour assurer l'unicité de la solution, des conditions aux limites sont imposées.

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 (A, V) est une solution de (III.23), il existe alors une infinité de solutions donnée par $(A + \nabla \varphi)$. En remplaçant ce dernier dans (III.23), 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 . Egaleme nt Cette jauge est introduite dans la formulation A-V à travers un terme dit de pénalité donné par :

$$\nabla(\nu_p \nabla \cdot \mathbf{A}) \quad (III.32)$$

Afin d'avoir une meilleure approximation du potentiel, le paramètre ajouté ν_p est remplacé par la reluctivité ν . Mettant le terme (III.24) dans la première équation du système (III.22), nous obtenons la formulation A-V jaugée qui peut être appliquée à divers problèmes d'électrotechnique :

$$\begin{cases} \nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla(\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = \mathbf{J}_s \\ \nabla \cdot \left[-\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) \right] = 0 \end{cases} \quad (III.33)$$

III.5. Méthodes numériques de discrétisation

III.5.1. Principales méthodes existantes

Il existe deux grandes catégories de méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles mathématiques représentant les phénomènes qui décrivent le comportement des dispositifs électromagnétiques. Ces méthodes sont : Les méthodes analytiques, Les méthodes numériques.

Les méthodes analytiques

une résolution analytique repose sur le calcul direct d'une solution exacte des équations différentielles. Les premiers travaux se sont basés sur des méthodes de résolution analytiques des équations issues des modèles à une seule dimension. Pour les modèles bidimensionnels, la solution analytique peut s'avérer très complexe même si pour des géométries simples, on peut trouver des solutions exactes à partir de la méthode de séparation des variables

Méthodes numériques

Les méthodes numériques ont pour objectif de remplacer un problème continu défini avec un modèle mathématique souvent différentiel par un problème discret sous une forme algébrique. Dans les formulations issues de la physique de l'électrotechnique on peut citer les méthodes : différences finis (MDF), éléments finis (MEF) et intégrales de frontières (MIF) qui sont de plus en plus utilisées. Historiquement, ce sont les différences finies qui ont été les premières méthodes utilisées, substituées après par les éléments finis vers les années 70. La méthode des différences

finies est relativement simple de mise en œuvre, mais présente l'inconvénient d'avoir une faible qualité d'approximation des variables et l'incapacité de modéliser les géométries complexes. Par ailleurs, elle exige un schéma de maillage très fin, qui peut ainsi se traduire par un coût de calcul prohibitif. Sans doute ce sont les éléments finis qui occupent une grande place dans les problèmes de modélisation. Contrairement à la MDF, les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes ; ainsi ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul par la prise en compte de différents types de fonctions d'interpolations des variables. La diversité dans le choix de l'élément de maillage donne une flexibilité importante à la méthode. La méthode des volumes finis qui fait l'objet de ce travail de thèse, commence à prendre place dans le domaine de la modélisation des problèmes d'électrotechnique [30]

III.6. La méthode des volumes finis

la méthode des volumes finis a été mise en œuvre initialement pour les simulations numériques des lois de conservation en mécanique des fluides (Navier Stokes...). Ultérieurement, elle a été utilisée pour résoudre les équations elliptiques et paraboliques. Elle s'appuie sur une subdivision du domaine d'étude en un nombre fini de sous-domaines élémentaires appelés volumes de contrôle. Ces volumes peuvent être construits autour des points d'un maillage initial (maillage dual) mais ce n'est pas une nécessité. Dans cette méthode, les inconnues sont les valeurs moyennes de la solution sur chaque cellule de contrôle. La méthode consiste à projeter et résoudre le problème sur chaque cellule. Elle nécessite la mise en place de termes de flux (appelé flux caractéristiques) qui ont pour but de décrire les échanges entre cellules voisines, en respectant les propriétés de conservation. La méthode des volumes finis permet de traiter des géométries complexes, ce qui constitue un avantage par rapport à la méthode des différences finis [16]

La méthode des volumes finis offre des meilleurs résultats de convergence à la modélisation des matériaux ayant des propriétés non linéaires. Cependant, sa discrétisation devient délicat quand il s'agit des opérateurs d'ordre 2 contenant le gradient (ex la placcien)[31]

La méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude Ω en volumes élémentaires (tétraèdres, hexaèdres, prismes...etc.) de telle manière que chaque volume entoure un nœud (figure III.5). L'équation EDP du problème est intégrée sur un volume élémentaire. Afin de calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, ...etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Par rapport aux éléments finis, la discrétisation par la méthode des volumes finis conduit à un système linéaire avec une matrice plus

creuse. Cet avantage permet une convergence plus rapide des solveurs itératifs [29]

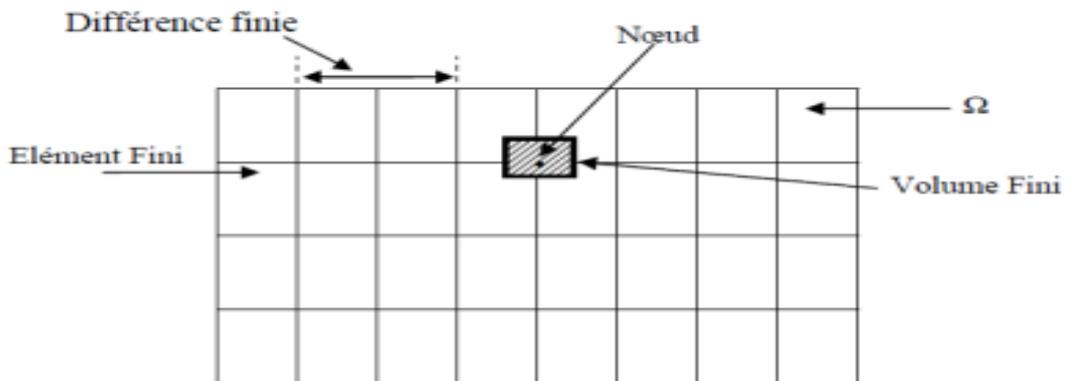


Fig. III.4 : Maillage du domaine d'étude.

III.7.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons explicité les diverses méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles. on a donné les notions de base de l'électromagnétisme ainsi que les équations de Maxwell régissant les phénomènes électromagnétiques

On plus les lois de comportement, la formulation en potentiel A-V du modèle magnétodynamique et les différentes méthodes numériques de discrétisation en particulier la méthode des volumes finis MVF

Chapitre IV

IV.1.Introduction :

Le principe de la méthode des volumes finis (MVF) est basé sur le calcul de la forme intégrale de l'équation EDP, comme dans le cas de la loi de Gauss pour le champ électrostatique et la loi d'Ampère pour la magnétostatique. Donc on note une signification physique de la méthode plus explicite que dans le cas des autres méthodes numériques. La grande simplicité de sa mise en œuvre a fait que la MVF a connu un essor fulgurant depuis les années quatre vingt. Considérons un domaine Ω dans lequel un champ U , scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation EDP suivante :

$$\mathfrak{S}(U) = F$$

Où \mathfrak{S} est un opérateur différentiel et F est une fonction connue, appelée terme source. La solution de l'équation (III.40) par la méthode des volumes finis, consiste d'abord à découper le domaine Ω en volumes élémentaires D_i ($i = 1, 2, \dots$). En effet, pour un problème donné, l'élément de maillage hexaédrique est supérieur par rapport aux autres éléments en termes de temps de calcul et de précision. La résolution numérique basée sur la MVF consiste à intégrer l'équation (IV.1) dans chaque volume élémentaire dans lequel le champ U est approximé par une fonction linéaire :

$$\int_{D_i} J(U) = \int_{D_i} F$$

La méthode des volumes finis peut être vue comme une méthode de résidus pondérés dans laquelle les fonctions de poids sont égales à l'unité [30]

IV.2. Méthode des volumes finis tridimensionnels avec un maillage cartésien (MVFC)

La méthode des volumes finis classiques notée 'MVFC' est basée sur un maillage structuré (Fig.III.1), elle consiste à subdiviser le domaine de calcul en volumes élémentaires de forme quadrilatère pour les applications en deux dimensions et de forme hexaédrique pour les applications en trois dimensions. C'est une discrétisation de type Différences Finies ("marches d'escaliers") qui facilite la construction du maillage.

Nous présentons dans cette partie la mise en œuvre de la méthode des volumes finis classiques (MVFC), utilisée pour la discrétisation des équations aux dérivées partielles des phénomènes électromagnétiques. Le maillage cartésien ou structuré, est constitué de volumes élémentaires de forme hexaédrique ou cubique. A chaque volume D_p de forme hexaédrique, on associe un nœud dit principal P et six facettes : e et w selon la direction x , n et s selon la direction y , t et b selon la direction z (Fig.IV.1). Les volumes voisins de D_p , sont représentés par leurs nœuds voisins proches E et W suivant l'axe x , N et S suivant l'axe y , T et B suivant l'axe z . [15]

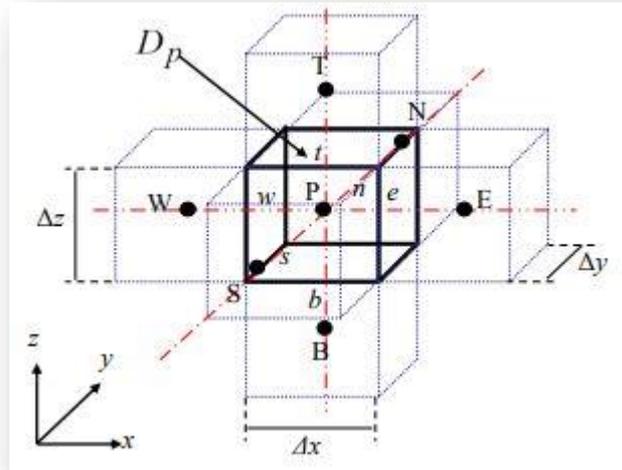


Fig .IV. 1: Volume fini élémentaire.

IV.2.1. Discrétisation des équations électromagnétiques par la MVFC

La MVFC intègre sur chaque volume élémentaire D_p , de volume $d\tau = dx dy dz$, les équations des problèmes à résoudre. Elle fournit ainsi d'une manière naturelle des formulations discrètes.

Rappelons la formulation tridimensionnelle des équations électromagnétiques en potentiels A-V donnée précédemment par (III.26) :

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla(\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) &= \mathbf{J}_s \\ \nabla \cdot \left(-\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) \right) &= 0 \end{aligned} \quad (IV.1)$$

L'application de la MVFC consiste à intégrer les équations différentielles du système (IV.1) dans chaque volume élémentaire D_p correspondant au nœud principal P :

$$\begin{aligned} \iiint_{D_p} \nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) d\tau - \iiint_{D_p} \nabla(\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) d\tau + \iiint_{D_p} \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) d\tau &= \iiint_{D_p} \mathbf{J}_s d\tau \\ \iiint_{D_p} \nabla \cdot \left(-\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) \right) d\tau &= 0 \end{aligned} \quad (IV.2)$$

Pour calculer les intégrales du système d'équations (IV.2), chaque opérateur différentiel doit être développé puis projeté sur les trois axes x, y et z du référentiel. Dans le but d'alléger les

Chapitre IV : Mise en œuvre de la méthode des volumes finis

développements, par la suite, on va seulement présenter la méthode pour une seule composante.

IV.2.1.1 Intégration de $\nabla \times v \nabla \times (A)$

$$\begin{aligned} & \iiint_{d\tau} \langle \nabla \times (v \nabla \times A) \rangle_y d\tau \\ &= \int_w^e \int_s^n \int_b \left[\frac{\partial}{\partial x} v \left(\frac{\partial A_x}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} v \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} v \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} v \left(\frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \end{aligned} \quad (IV.3)$$

Les quatre termes différentiels dans (IV.3), peuvent être représentés par une forme générale donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial i} v \left(\frac{\partial A_j}{\partial k} \right) \quad \mathbf{i, j, k, , = x y z} \quad (IV.4)$$

Tenant compte de cette écriture, on distingue deux cas ; $i = k$ et $i \neq k$. Soit par exemple le calcul du quatrième terme dans (IV.4) et qui correspond à $i = k = z$ et $j = y$:

$$\begin{aligned} & \int_w^e \int_s^n \int_b \left[\frac{\partial}{\partial z} v \left(\frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \\ &= \int_w^e \int_s^n \left[\left\{ v \left(\frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \right\} \Big|_b^t \right] dx dy \\ &= \left[\left\{ v \left(\frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \right\} \Big|_t - \left\{ v \left(\frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \right\} \Big|_b \right] \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (IV.5)$$

Considérons une variation linéaire du potentiel magnétique à travers les facettes t et b (Fig.III.2)

Pour calculer les termes $\left(\left[v \left(\frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \right] \Big|_t, \left[\left\{ v \left(\frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \right\} \right] \Big|_b \right)$ dans (IV.5), on considère une variation linéaire du potentiel magnétique à travers les facettes t et b (Fig.III.2), on peut écrire :

$$\left\{ v \left(\frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \right\} \Big|_t = v_t \frac{A_y^T - A_y^P}{\Delta z_t} \quad (IV.6)$$

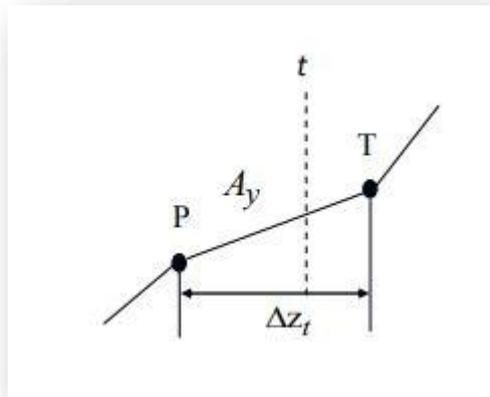


Fig .IV. 2: Approximation linéaire du potentiel à travers la facette t .

De même, on exprime la dérivée sur la facette b . Remplaçant ces dérivées dans (IV.5), on aura la combinaison linéaire suivante :

$$c_t A_y^T + c_b A_y^B - (c_t + c_b) A_y^P \quad (IV. 7)$$

tel que :

$$c_m = v_m \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z_m} \text{ pour } m = t, b \quad (IV. 8)$$

Où v_t : réductivités magnétiques du facette t .

v_b : réductivités magnétiques du facette b .

où v_t et v_b sont respectivement, les réductivités magnétiques des facettes t et b .

de la même manière présentée précédemment, on développe le deuxième terme dans (IV.3) qui correspond à $i = k = x$. Pour le développement du premier et du troisième terme dans (IV.3), c'est à dire les termes qui correspondent à $i = x, k = y$ et à $i = z, k = y$ respectivement, le problème de la MVFC se pose.

Dans le cas de la formulation (IV.2), le terme en rotationnel $\nabla \times (v \nabla \times A)$ et le terme en gradient $\nabla (v \nabla A)$ ne présentent pas une forme en divergence exigée par la formulation classique de la MVF, en effet, la méthode des volumes finis dans son origine, été dédiée à la résolution des problèmes thermiques définis essentiellement par des équations aux dérivées partielles où les opérateurs prennent essentiellement une forme en divergence [Patankar 82].

Chapitre IV : Mise en œuvre de la méthode des volumes finis

Pour prendre en compte de l'effet des opérateurs rotationnel et gradient qui apparaissent dans la formulation électromagnétique, il est nécessaire d'implémenter huit nœuds supplémentaires en plus de ceux de base [44] dans le volume élémentaire D_p représentée dans la figure III.1. Dans ce cas, le nœud principal P de chaque volume élémentaire est entouré par quatorze nœuds voisins (les nœuds de base : W,E,N,S,T,B et les nœuds supplémentaires : $TW,TE,TS,TN,BW,BE,BS,BN,NE,NW,SE$ et SW) au lieu de six nœuds voisins comme il est indiqué dans la figure III.3. Cette modification permet alors de discrétiser les deux termes de la formulation électromagnétique (IV.2) dans le cas tridimensionnel.

Si on considère maintenant le premier terme dans (IV.3) soit pour $i = j = x$ et $k = y$:

$$\int_w^e \int_b^t \left[\frac{\partial}{\partial x} v \left(\frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right] dx dy dz$$

$$= \left\{ v \left(\frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right\}_w^e \Delta y \Delta z \quad (IV.9)$$

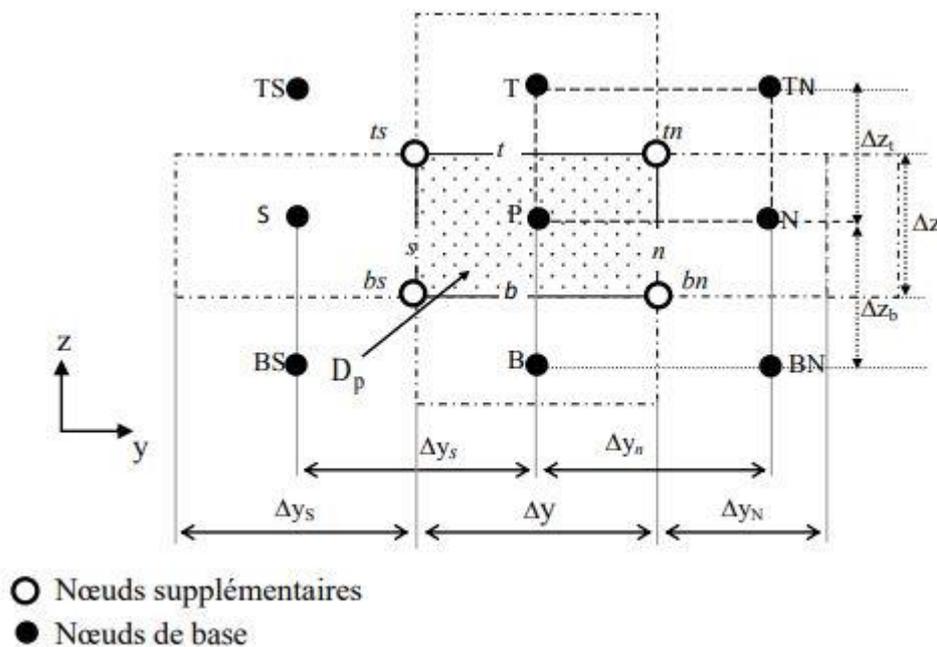


Fig. IV. 3. Illustration des nœuds supplémentaires, en haut de la figure, la structure du volume élémentaire modifié en 3D, en bas de la figure, la projection d'un volume élémentaire suivant le plan XY.

Chapitre IV : Mise en œuvre de la méthode des volumes finis

A partir de cette modification proposée, la dérivée du potentiel A_x dans les facettes e et w peut être exprimée par :

$$\left\{ v \left(\frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right\} \Big|_e = v_e \frac{A_x^{ne} - A_x^{se}}{\Delta y} \quad (IV.10)$$

Les potentiels A_x^{ne} et A_x^{se} dans les nœuds supplémentaires ne et se sont exprimés en fonction des potentiels des nœuds de base voisins :

$$A_x^{ne} = \frac{1}{4} (A_x^P + A_x^E + A_x^N + A_x^{NE}) \quad (IV.11)$$

De même :

$$A_x^{se} = \frac{1}{4} (A_x^P + A_x^E + A_x^S + A_x^{SE}) \quad (IV.12)$$

D'où :

$$\left\{ v \left(\frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right\} \Big|_e = \frac{1}{4\Delta y} v_e (A_x^N + A_x^{NE} - A_x^S - A_x^{SE}) \quad (IV.13)$$

De la même manière, on peut calculer la dérivée du potentiel dans la facette w . Après arrangement, le terme (IV.9) aboutit à une combinaison linéaire donnée par la forme suivante :

$$\begin{aligned} & q_e (A_x^N + A_x^{NE} - A_x^S - A_x^{SE}) - q_w (A_x^N + A_x^{NW} - A_x^{SW} - A_x^S) \\ q_m &= \frac{1}{4} v_m \Delta z \text{ pour } m = e, w \end{aligned} \quad (IV.14)$$

De la même manière, on intègre les autres termes dans l'équation (IV.3)

IV .2.1.2. Intégration de $\nabla v \nabla \cdot (A)$

$$\begin{aligned} & \iiint_{\tau} \langle \nabla (v \nabla \cdot A) \rangle_y d\tau \\ &= \int_w^e \int_b^n \int_b^t \left[\frac{\partial}{\partial y} v \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} v \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} v \left(\frac{\partial A_z}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \end{aligned} \quad (IV.15)$$

Les trois termes de l'équation différentielle (IV.15) peuvent être écrits sous la forme générale

Chapitre IV : Mise en œuvre de la méthode des volumes finis

(IV.4).on peut intégrer cette équation différentielle (IV.15) par la MVFC comme décrit précédemment. Le résultat de cette intégrale mène à une combinaison linéaire, qu'on peut les mettre sous la forme :

$$(c_n + c_s)A_y^P + \sum_{\substack{i=x,y,z \\ m=e,w... \\ M=E,W...}} q_m A_i^M \quad (IV.16)$$

Où

$$c_m = v_m \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y_m} \text{ pour } m = n, s \quad (IV.17)$$

$$q_m = \frac{1}{4} v_m \Delta z \text{ pour } m = e, w$$

IV.2.1.3. Intégration du terme source

Supposant que la distribution du courant source est uniforme et constante dans le volume élémentaire DP , on peut alors écrire :

$$\iiint_{D_p} \langle J_s \rangle_y dx dy dz = J_{sy} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (IV.18)$$

IV.2.1.4. Intégration du terme $\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right)$

$$\begin{aligned} & \int_w^e \int_s^n \int_b^t \left\langle \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) \right\rangle_y dx dy dz \\ &= \sigma_p \left(\frac{\partial A_y^P}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial y} \Big|_p \right) \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (IV.19)$$

Dans notre travail ce terme exprime les courants induits dans les matériaux conducteurs où σ représente alors la valeur de la conductivité électrique apparente dans chaque nœud principal P. Dans (IV.19) la dérivée du potentiel V au nœud P doit être exprimée par une différence de potentiels aux

Chapitre IV : Mise en œuvre de la méthode des volumes finis

facettes, n et s. Et comme les facettes, n et s, sont situées sur les médianes des segments P-N et P-S, respectivement, cette dérivée devient :

$$\left. \frac{\partial V}{\partial y} \right|_p = \frac{V^N - V^S}{\Delta y_n + \Delta y_s} \quad (\text{IV.20})$$

En regroupant tout les termes développés précédemment, on aboutit à l'équation algébrique (IV.21). Cette équation exprime la composante suivant y du potentiel vecteur magnétique A dans chaque nœud principal P (A_y^P) du maillage en fonction des potentiels Ax, Ay, Az et V des nœuds voisins :

$$c_p A_y^P + \sigma_p D_p A_y^P = \left[\sum_{m=e,w\dots} c_m A_y^M + \sum_{\substack{i=x,z \\ m=e,w\dots}} q_m A_i^M + \frac{\sigma_p D_p}{\Delta y_n + \Delta y_s} (V^N - V^S) + J_{sy} D_p \right] \quad (\text{IV.21})$$

Avec

$$A_{i(i=x,y,z)}^P = \frac{\partial A_i^P}{\partial t} \quad (i = x, y, z), \quad c_p = \sum_{m=e,w\dots} c_m \quad (\text{IV.22})$$

De la même manière les deux composantes x et z du potentiel vecteur magnétique A seront calculées :

$$c_p A_x^P + \sigma_p D_p A_x^P = \left[\sum_{m=e,w\dots} c_m A_x^M + \sum_{\substack{i=y,z \\ m=e,w\dots}} q_m A_i^M + \frac{\sigma_p D_p}{\Delta x_e + \Delta x_w} (V^E - V^W) + J_{sx} D_p \right] \quad (\text{IV.23}) + (\text{IV.24})$$

$$c_p A_z^P + \sigma_p D_p A_z^P = \left[\sum_{m=e,w\dots} c_m A_z^M + \sum_{\substack{i=x,y \\ m=e,w\dots}} q_m A_i^M + \frac{\sigma_p D_p}{\Delta z_t + \Delta z_b} (V^T - V^B) + J_{sz} D_p \right]$$

IV.2.1.5. Intégration de l'équation en divergence

Pour la discrétisation de la deuxième équation aux dérivées partielles du système (IV.2), la MVFC est utilisée aussi. L'intégration de cette équation dans chaque volume élémentaire DP qui correspond au nœud principal P donne :

Etude et calcul de l'effet de la conductivité t dans un capteur absolu par le contrôle non destructif par courant de Foucault

Chapitre IV : Mise en œuvre de la méthode des volumes finis

$$\begin{aligned} & \int_w^e \int_S \int_b^n \nabla \cdot \left[\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) \right] dx dy dz \\ &= \int_{ws}^e \int_b^n \int_b^t \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\sigma \left(A_x + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\sigma \left(A_y + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\sigma \left(A_z + \frac{\partial V}{\partial z} \right) \right] \right\} dx dy dz \end{aligned} \quad (IV.25)$$

L'intégration, du premier terme de (III.25) donne :

$$\left[\sigma_e \left(A_x^e + \frac{\partial V}{\partial x} \Big|_e \right) + \sigma_w \left(A_x^w + \frac{\partial V}{\partial x} \Big|_w \right) \right] \Delta y \Delta z \quad (IV.26)$$

En approximant le potentiel vecteur magnétique Ax aux facettes e et w par des combinaisons linéaires des potentiels aux nœuds voisins (par exemple A_x^e par la moyenne des potentiels aux nœuds E et W), et en considérant une variation linéaire du potentiel V entre les facettes e et w, l'expression (IV.26) conduit à :

$$\left[\sigma_e \left(\frac{1}{2} (A_x^E + A_x^P) + \frac{V^E - V^P}{\Delta x_e} \right) + \sigma_w \left(\frac{1}{2} (A_x^P + A_x^W) + \frac{V^P - V^W}{\Delta x_w} \right) \right] \Delta y \Delta z \quad (IV.27)$$

De la même manière, on peut calculer les autres termes dans l'équation (IV.25). Finalement en regroupant tout ces termes développés précédemment, nous obtenons l'équation algébrique (IV.28) qui exprime le potentiel scalaire électrique V au nœud P :

$$V^P = \frac{1}{u_p} \left[\sum_{m=e,w\dots} u_m V^M + \sum_{\substack{i=x,y,z \\ m=e,n\dots}} cv_m A_i^M \right] \quad (IV.28)$$

Avec (par exemple pour m = e) :

$$cv_e = \frac{1}{2} \sigma_e \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x_e}, u_e = \sigma_e \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \quad (IV.29)$$

et

$$u_p = \sum_{m=e,w\dots} u_m \quad (IV.30)$$

Finalement les équations (IV.21), (IV.23), (IV.24) et (IV.28) sont réécrites pour l'ensemble des éléments de maillage, ensuite elles sont assemblées et nous obtenons un système d'équations qu'on peut mettre sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} [M_1] & [0] \\ [M_2] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} \\ \dot{V} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [N_{11}] & [N_{12}] \\ \mathbf{0} & [N_{22}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (IV.31)$$

Ou sous une forme condensée :

$$[M] \begin{bmatrix} \dot{A} \\ \dot{V} \end{bmatrix} + [N] \begin{bmatrix} A \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (IV.32)$$

Avec

$$\begin{bmatrix} A \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ V \end{bmatrix} \text{ et } [J_s] = \begin{bmatrix} J_{sx} \\ J_{sy} \\ J_{sz} \end{bmatrix}$$

IV.3. Méthodes numériques de résolution

Pour la résolution des systèmes d'équations algébriques linéaires, il existe deux familles de méthodes : les méthodes directes et les méthodes itératives

IV.3.1. Méthodes directes

Ces méthodes sont applicables pour les systèmes linéaires de petite taille. Elles sont précises et exactes mais demandent beaucoup d'espace mémoire et temps de calcul. Parmi les méthodes directes nous citons : Méthode d'Euler, Cramer, Gauss, Jordon, Croute,...etc. Pour la résolution du système algébrique non-linéaire (IV.32) à chaque pas de temps la méthode d'Euler est utilisée. On introduit pour cela une suite de vecteurs A_m , V_m et T_m . Ces vecteurs sont une approximation de $A(m\Delta t)$, $V(m\Delta t)$ et $T(m\Delta t)$. La méthode d'Euler est la méthode la plus simple qui fait intervenir un paramètre θ compris entre 0 et 1 [45].

Elle consiste à remplacer l'équation (IV.32) par le schéma suivant :

$$[M] \begin{bmatrix} \frac{A^{m+1} - A^m}{\Delta t} \\ \frac{V^{m+1} - V^m}{\Delta t} \end{bmatrix} + [N] \begin{bmatrix} \theta A^{m+1} + (1 - \theta)A^m \\ \theta V^{m+1} + (1 - \theta)V^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta J_s((m+1)\Delta t) + (1 - \theta)J_s(m\Delta t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (IV.33)$$

$$[C] \begin{bmatrix} \frac{T^{m+1} - T^m}{\Delta t} \end{bmatrix} + [K][\theta T^{m+1} + (1 - \theta)T^m] = [\theta Q((m+1)\Delta t) + (1 - \theta)Q(m\Delta t)] \quad (IV.34)$$

Chapitre IV : Mise en œuvre de la méthode des volumes finis

Pour $\theta = 0$, la méthode est explicite. Elle nécessite de choisir un pas de temps Δt suffisamment petit sinon la solution devient instable. Pour $\theta = 1$, la méthode est implicite, elle est inconditionnellement stable [Pelletier] Pour cette raison et après plusieurs tests numériques, elle semble être un bon compromis entre rapidité de convergence du processus itératif et stabilité numérique. Avec cette méthode ($\theta = 1$), la solution est obtenue implicitement comme solution d'un système non linéaire que l'on va résoudre par la méthode de Gauss-Seidel non linéaire. Ce système est tel que :

$$[M] \begin{bmatrix} A^{m+1} - A^m \\ \frac{\Delta t}{v^{m+1} - v^m} \\ \Delta t \end{bmatrix} + [N] \begin{bmatrix} A^{m+1} \\ v^{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_s((m+1)\Delta t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (IV.35)$$

$$[C] \begin{bmatrix} T^{m+1} - T^m \\ \Delta t \end{bmatrix} + [K][T^{m+1}] = [Q((m+1)\Delta t)] \quad (IV.35)$$

IV.3.2. Méthodes itératives

Ces méthodes sont mieux adaptées aux matrices creuses de grande taille. Parmi ces méthodes, nous citons : Méthode de Jacobi, Gauss Seidel, relaxation. Après discrétisation des équations aux dérivées partielles des phénomènes électromagnétiques et thermiques par la méthode des volumes finis, le problème se ramène à l'inversion de systèmes d'équations matricielles (III.35) et (III.36). Du fait que ces systèmes sont souvent de grandes tailles, il devient alors impossible de les inverser par une méthode directe. D'où la nécessité d'utiliser des méthodes de résolution itératives. Ces méthodes sont particulièrement utilisées pour la résolution des systèmes ayant des matrices de rang élevé, comportant de nombreux éléments nuls (matrice creuses), ils font passer d'un estimé $X(k)$ de la solution à un autre estimé $X(k+1)$ de cette solution

Parmi ces méthodes nous avons utilisée la méthode de Gauss-Seidel. Cette méthode consiste à transformer le système algébrique, comme par exemple, $[B][X] = [D]$ en :

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la méthode des volumes finis tridimensionnels avec un maillage cartésien (MVFC), la méthode des volumes finis a été mise en œuvre pour la discrétisation du modèle magnétodynamique dans le cas tridimensionnel et les méthodes numériques de résolution pour la résolution des systèmes d'équations algébriques linéaires, telle que la méthode de Gauss Seidel.

Chapitre V : Applications et validations

V.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations obtenus à partir des codes numériques développés et implémentés sous environnement MATLAB, où la méthode des volumes finis a été adoptée comme méthode de résolution des équations aux dérivées partielles. Nous proposons dans le présent chapitre une application en vue de la validation du modèle mathématico-numérique développé. Nous intéressons à modéliser un capteur absolu de contrôle non destructif par courants de Foucault [15]

V.2. Organigramme de l'algorithme de base des codes de calcul:

La (figure IV.1) représente l'organigramme de l'algorithme de base des codes de calcul développés sous MATLAB. Il comporte trois parties principales : partie d'entrée, partie de résolution et partie de sortie

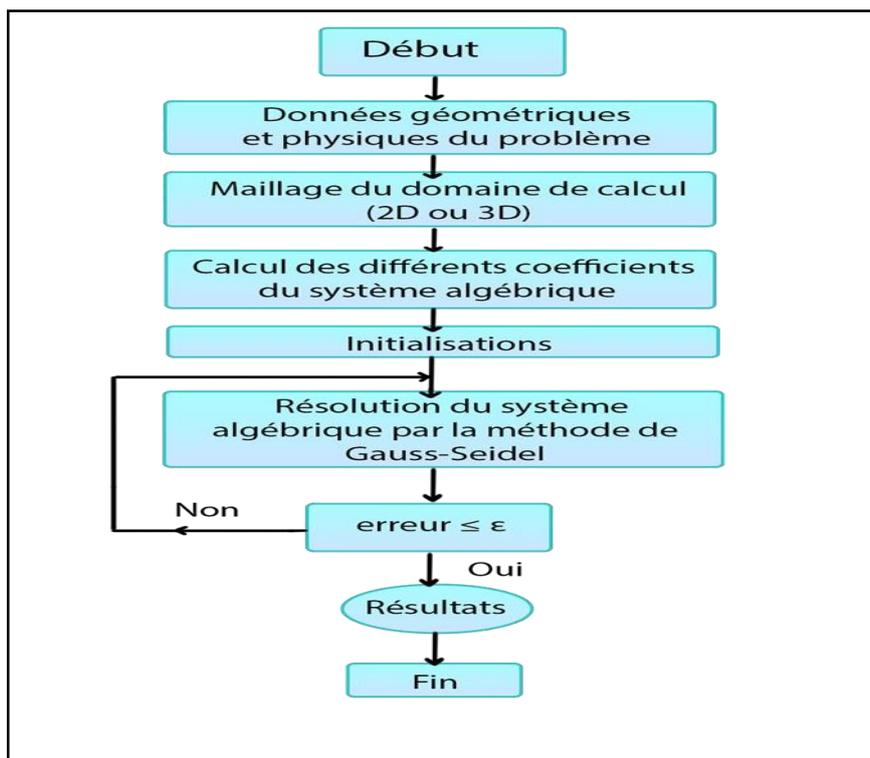


FIG .V. 1 : Organigramme de l'algorithme de base des codes de calcul

V.3.Application et validation

Dans cette application, le capteur considéré est un capteur absolu. Le code de calcul utilisé est MVF2D-axi.

V.3.1. Description du problème

Dans cette application un tube métallique est considéré :

- De conductivité électrique $\sigma=10^6 \text{ S.m}^{-1}$
- De formes cylindriques creuses infiniment longues.
- Avec un défaut interne.
- Le capteur placé à l'intérieur du tube.

V.3.2. Description géométrique de défaut

Diamètre extérieur	19.05 mm
Diamètre intérieur	16.47 mm
L'ouverture du défaut	0.4 mm
Le profondeur	0.49 mm
L'épaisseur	1.50 mm
Largeur	1.50 mm
Nombre de spires	120 spire

Tab. IV.1. Description géométrique de défaut

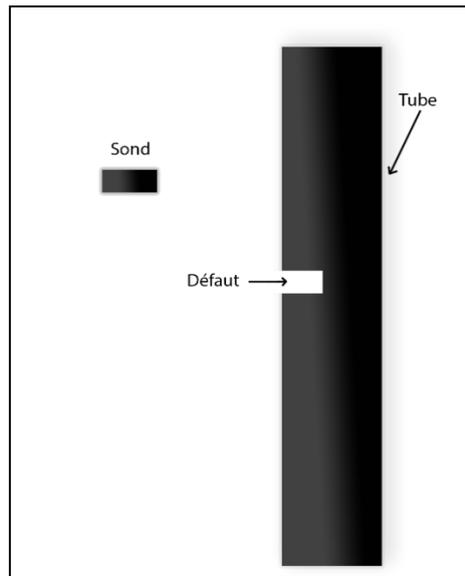


fig. V. 2 : Description du problème

V.4. LES RESULTATS

V.4.1. EFFET DE LA CONDUCTIVITE

V.4.1.1. LA VARIATION DE L'IMPEDANCE

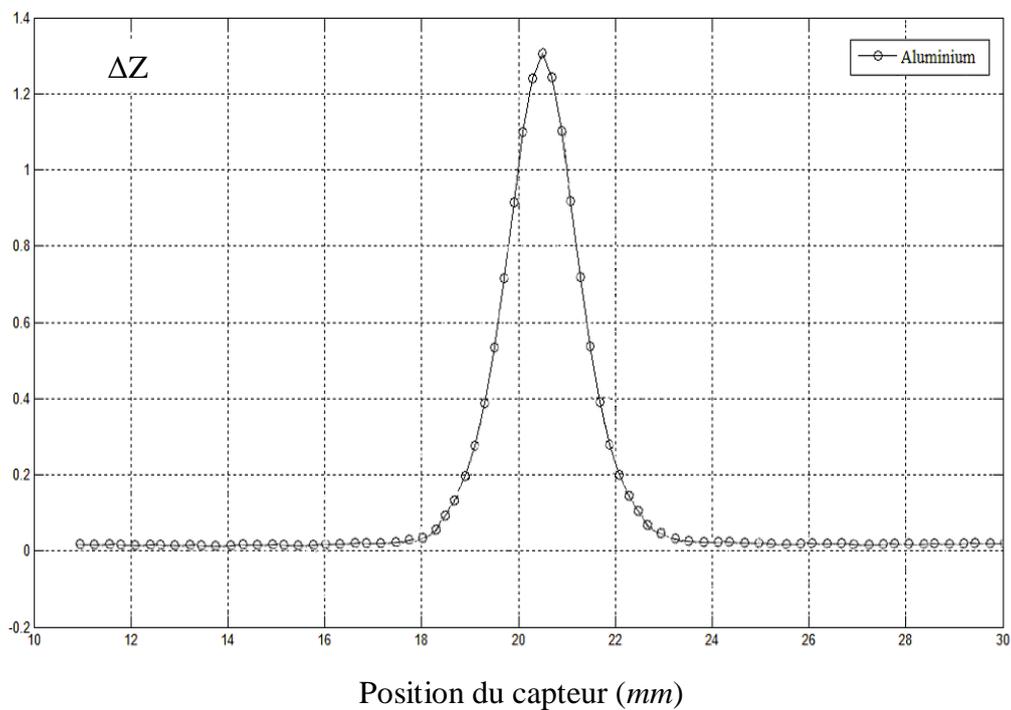


Fig. V.3: Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour matériaux : Aluminium

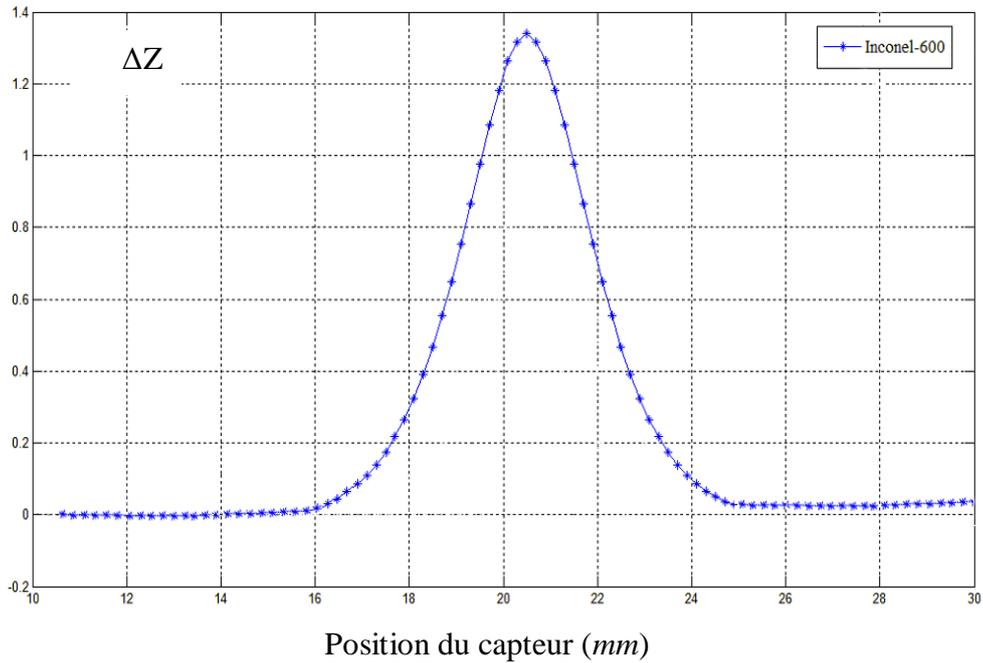


Fig. V.4 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour matériaux : Inconel-600

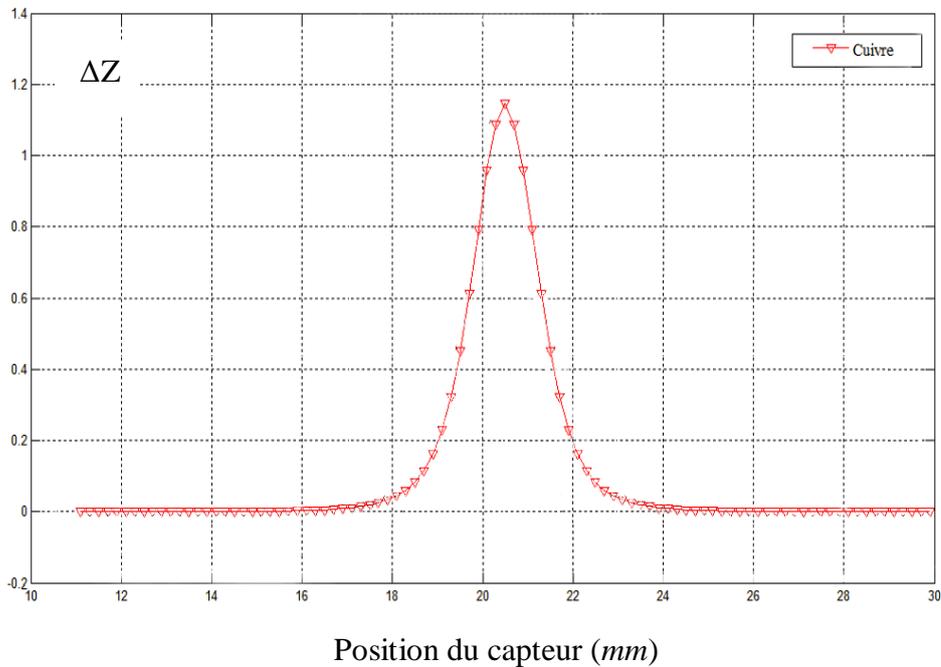


Fig. V.5 : Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour matériaux: Cuivre.

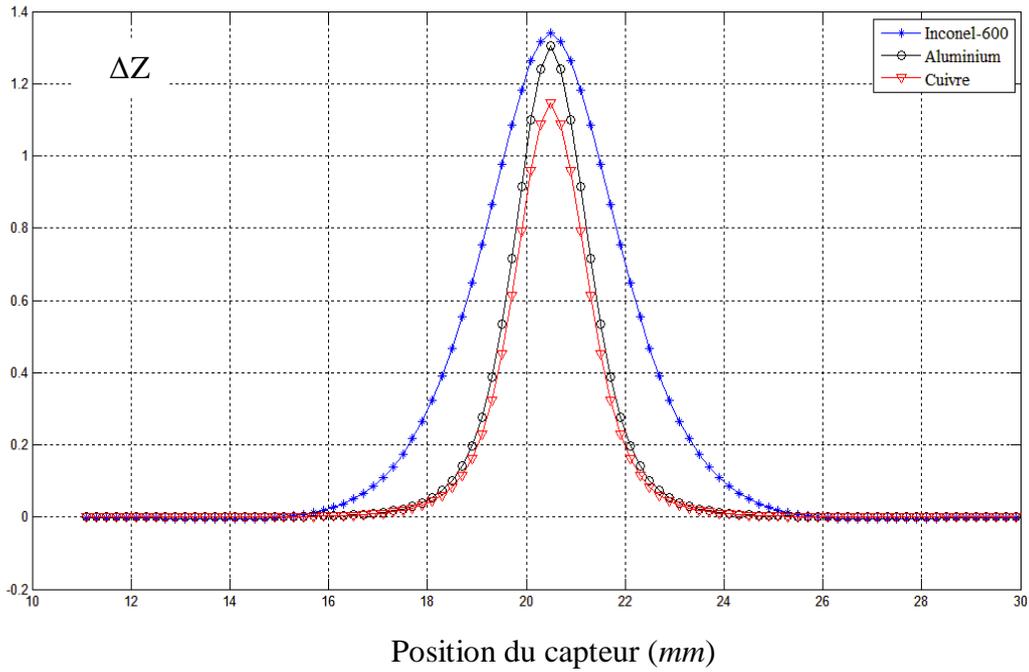


Fig. V.6. Variation de l'impédance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Inconel-600, Aluminium, Cuivre.

V .4.1.2. la variation de la réactance

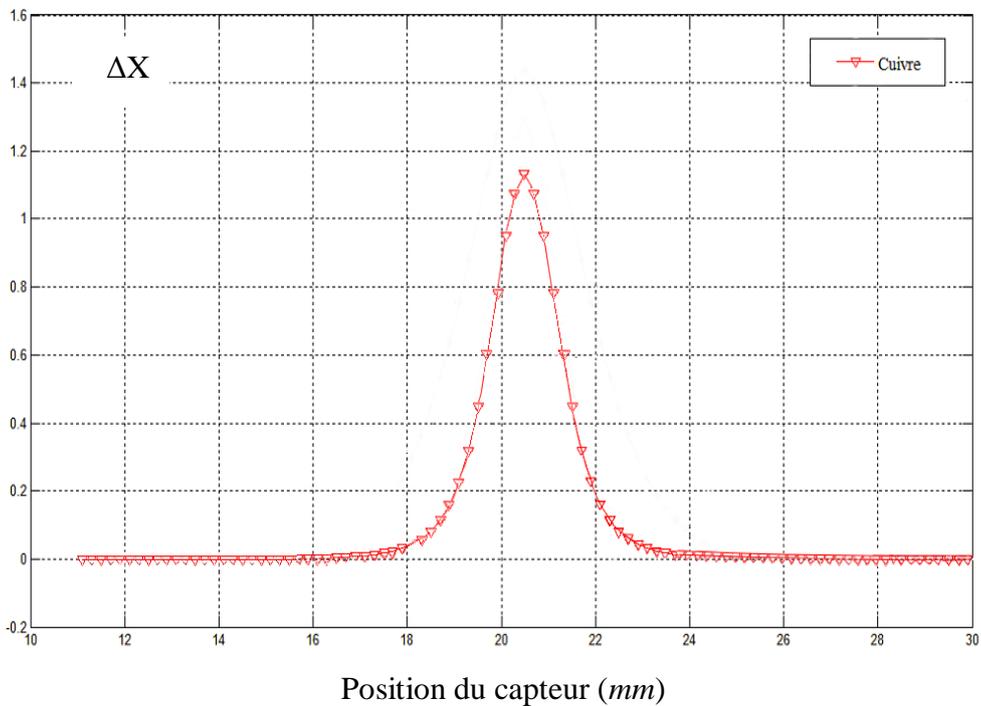


Fig. V.7 : Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour matériaux : Cuivre.

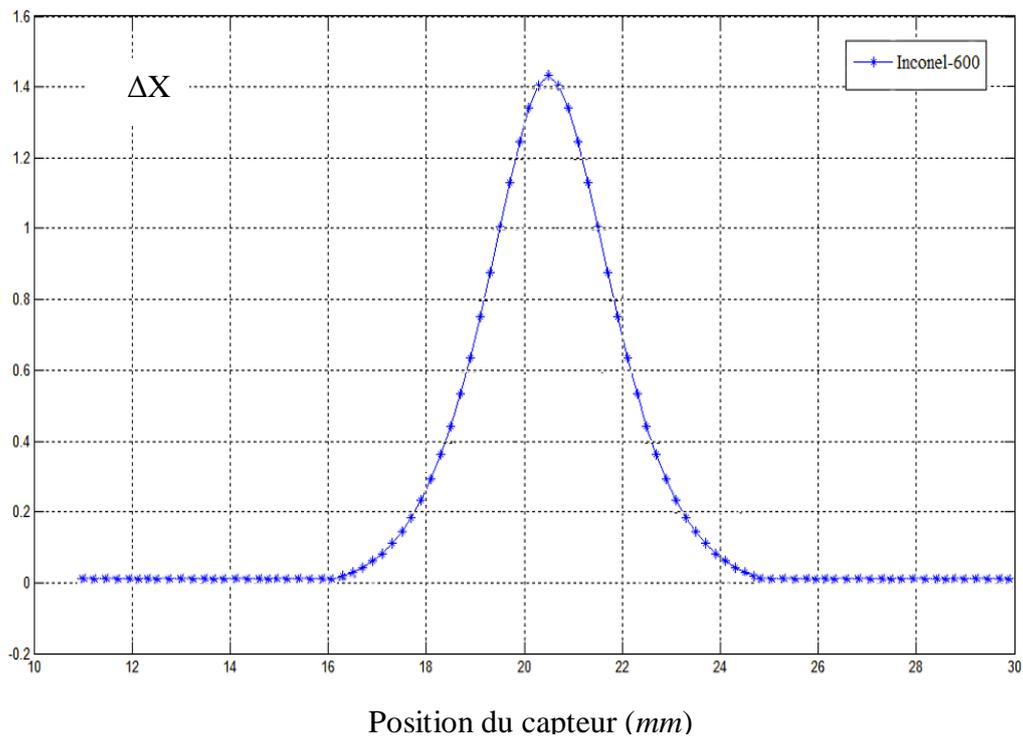


Fig. V.8 : Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour matériaux : Inconel-600.

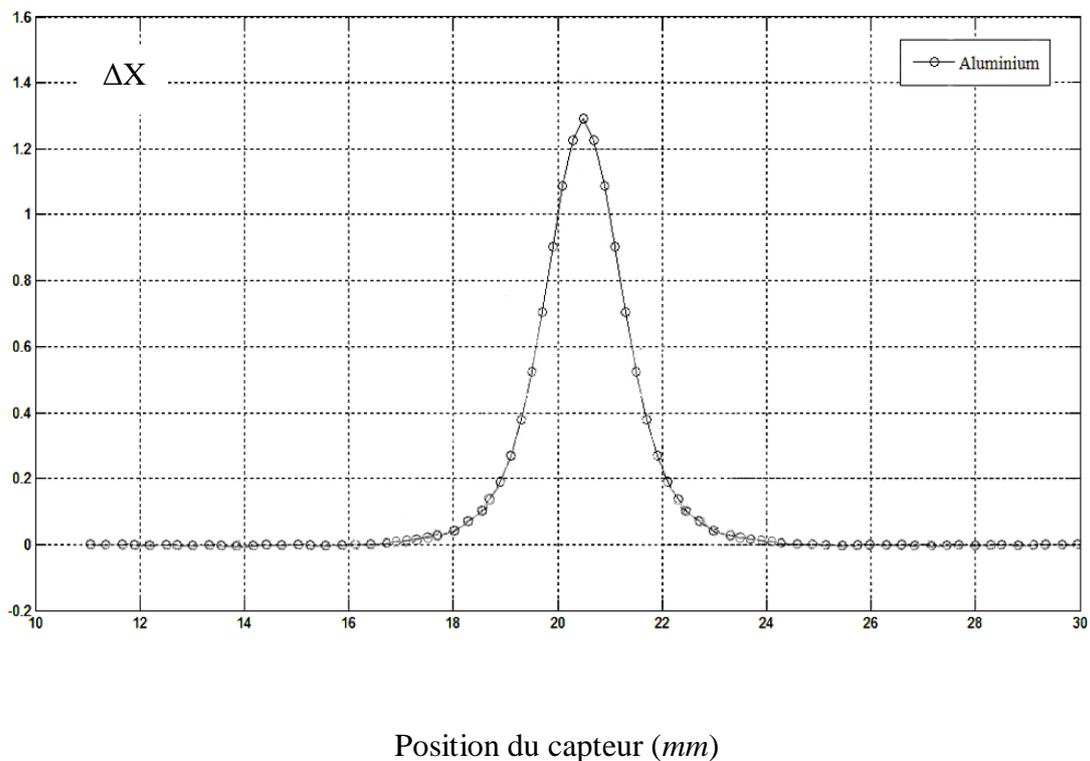


Fig. V.9: Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour matériaux : Aluminium.

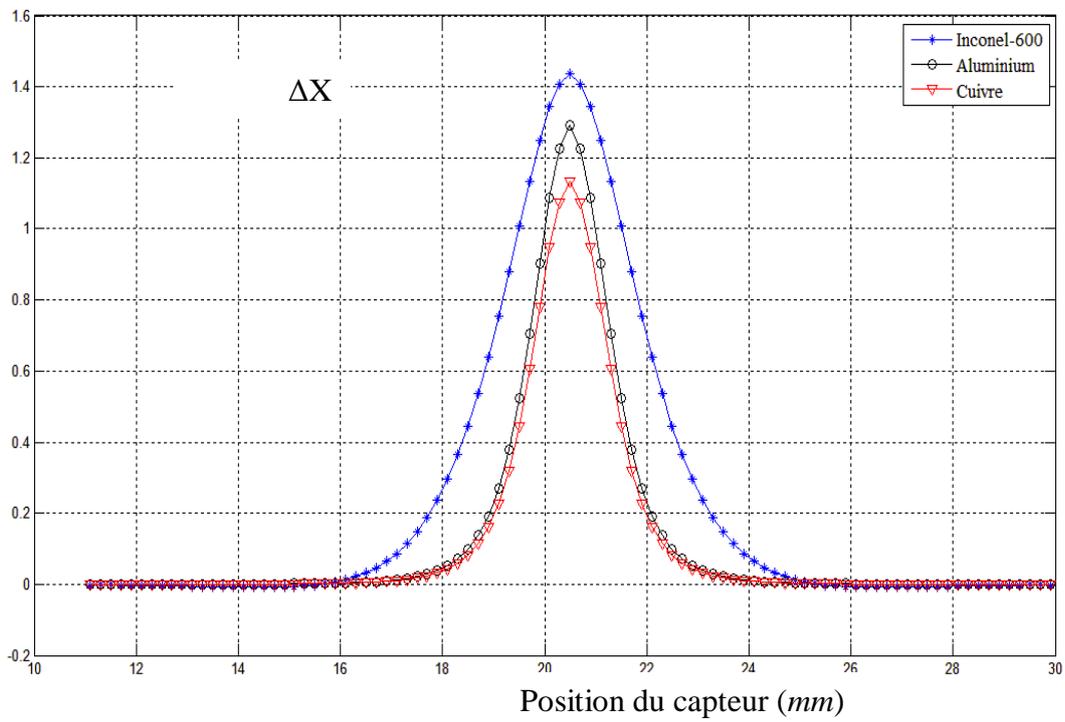


Fig. V.10 : Variation de la réactance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Inconel-600, Aluminium, Cuivre.

V.4.1.3.LA Variation de LA resistance :

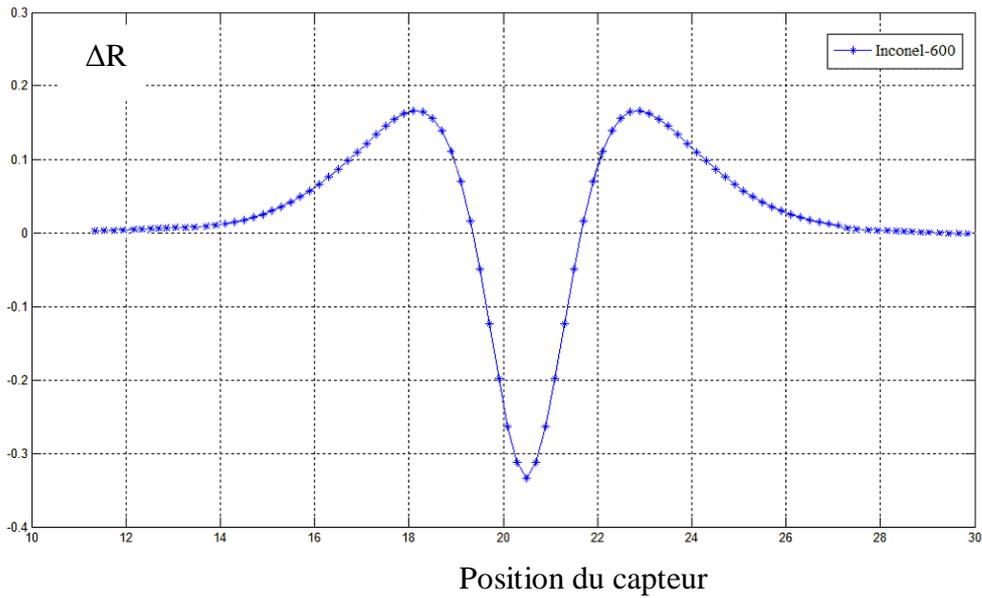


Fig. V.11: Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour matériaux : Inconel-600,

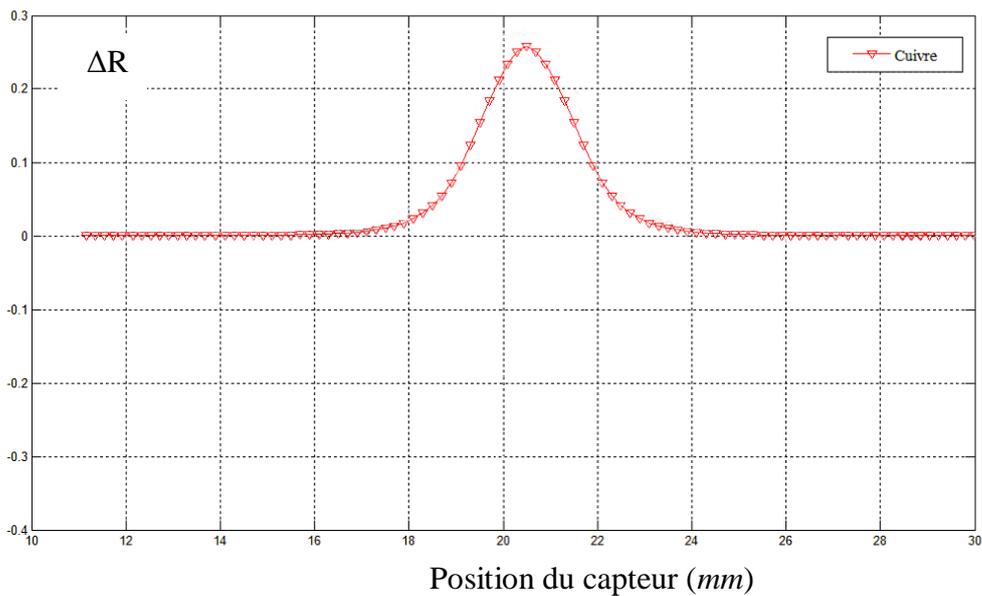


Fig. V.12. Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour matériaux : cuivre

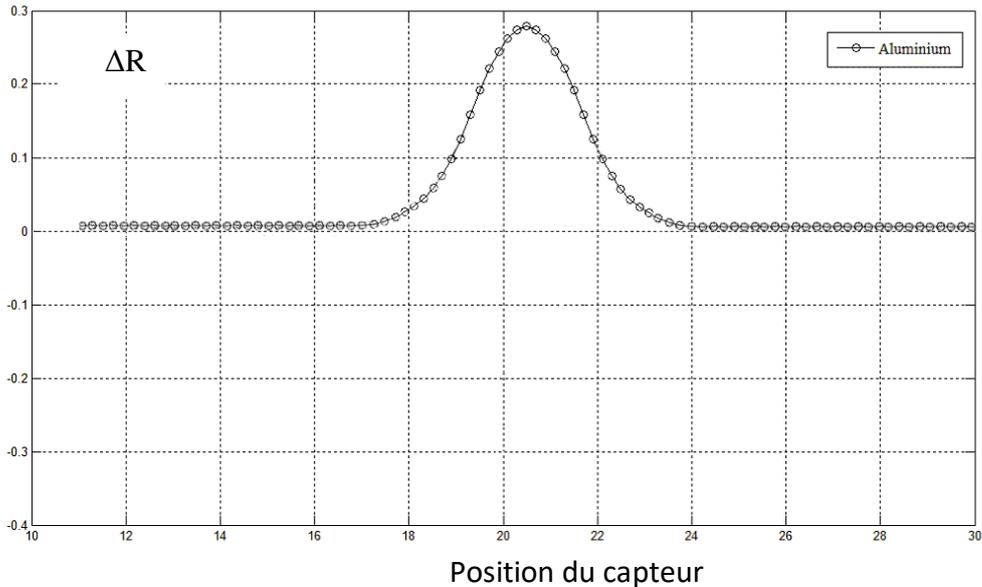


Fig. V.13 : Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour matériaux : aluminium

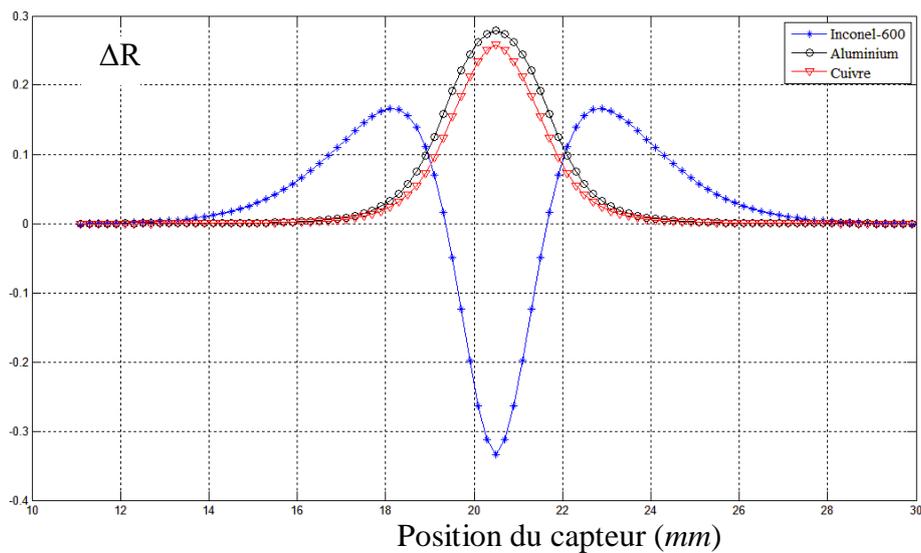


Fig. V.14 : Variation de la résistance en fonction de la position du capteur pour différents matériaux : Inconel-600, Aluminium, Cuivre.

V.5. manipulation

On remarque que la valeur de la variation d'impédance, est importante pour un tube en Inconel600. Donc l'impédance du capteur est inversement proportionnelle à la conductivité du matériau.

Conclusion general

Conclusion générale

Les exigences croissantes en termes de sûreté de fonctionnement d'un produit industriel ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces qui le constituent, conduisent à mettre en place des contrôles qualités de plus en plus poussés. L'utilisation des courants de Foucault permet un contrôle non destructif fiable, rapide et peu coûteux des milieux conducteurs. La simplicité de ce contrôle et sa robustesse d'utilisation en font une technique très utilisée industriellement depuis plusieurs décennies

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent de la modélisation par la méthode des volumes finis de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault. Nous avons élaboré un code de calcul tridimensionnel dédié à la modélisation et à la simulation des configurations de CND par courants de Foucault.

Ce code de calcul programmé et implémenté sous l'environnement MATLAB, s'appuie sur la discrétisation en trois dimensions des équations de Maxwell par la méthode des volumes finis. Afin d'obtenir la résolution numérique du problème étudié, nous avons poursuivi le développement des codes de calcul numérique des grandeurs électromagnétiques où la méthode des volumes finis MVF a été adoptée. Le code utilise une approche de la MVF où le maillage structuré est utilisé (MVFC)

Nous avons présenté les résultats des simulations obtenus à partir des codes numériques développés et implémentés sous environnement MATLAB, où la méthode des volumes finis à été adoptée comme méthode de résolution des équations aux dérivées partielles. Nous avons proposé une application en vue de la validation du modèle mathématico-numérique développé.

Nous avons traité des problèmes de CND-CF présentant des défauts de faible ouverture (fissure), La détection des fissures permet de prévenir la destruction des pièces en fonctionnement et d'augmenter la fiabilité des produits industriels.

Ou nous avons testé le code de calcul MVF2D-axi sur un problème de contrôle non destructif par courants de Foucault constitué d'un tube métallique et un capteur absolu.

Les résultats numériques obtenus sont très encourageant et montrent l'efficacité de code MVF2D-axi pour la modélisation des capteurs inductifs. Les différents capteurs étudiés sont sensibles à la détection des défauts de faibles dimensions.

Les résultats obtenus sont très encourageant et montrent que la MVF est une méthode très prometteuse en terme de précision. Les codes de calcul développés peuvent être appliqués à d'autres types de problèmes de CND-CF.

Etude et calcul de l'effet de la conductivité t dans un capteur absolu par le contrôle non destructif par courant de Foucault

Conclusion general

On remarque que lorsqu' on varie la conductivité de la pièce (différents matériaux: Inconel-600, Aluminium, Cuivre.,) pour différent position du capteur On remarque que la valeur de la variation d'impédance, est importante pour un tube en Inconel600. Donc l'impédance du capteur est inversement proportionnelle à la conductivité des matériaux.

En termes des perspectives, nous proposons l'utilisation des codes de calcul développés pour étude des systèmes électromagnétiques avec Confrontation entre la MVFC, MVFM, MEF.

D'une manière plus large, il y a encore un vaste champ de travail pour améliorer le traitement des problèmes de CND-CF par la MVF. Ces problèmes portent notamment sur le déplacement de la sonde lors d'un scan, la modélisation de sondes plates ...

Bibliographie

- [1] **ZORNI, Chiara**, « Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction », Thèse de Doctorat, université Paris-Sud11, Paris 2012
- [2] **Brahim RAMADANE**, « Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision » Thèse de Doctorat, Université de Nantes. 2009.
- [3] **J. Dumont-Fillon**, « Contrôle non destructif (CND) », Techniques de l'ingénieur, R 1400, Mesures mécaniques et dimensionnelles, 1996
- [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] **BERGOUG ALI** : Contrôle Non Destructif des joints de soudure ; Université Badji Mokhtare Annaba 2018/2019
- [6] **Melle ZEMOURI Nassima** : Etude et Réalisation d'un Système Multicapteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 21/07 /2016
- [7] **BENSALAH Oussama** : Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentiel, UNIVERSITE DE M'SILA ; 2011/2012
- [8] **Gaouir Chemseddine, Rezkoune Rassim** : Modèles neuronaux pour le CND à flux de fuite magnétique , Université Mohammed Seddik Benyahia Jijel- 2019
- [9] **Rabhi Mouldi** : cours, contrôle non destructif CND, 2017, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Gafsa.
- [10] **TALEB M'HAMMED Mustapha et GHEDAMSI Elhachmi** , « 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: s.n., 2012 /2013
- [11] **Aliraid** : cours, contrôle non destructif ressuage, magnétoscopie, radiographie, courant de Foucault et ultrasons, 2018, université Med Boudiaf d'Oran

bibliographie

- [12] **Y. Choua**, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault"
- [13] **Vincent.Thomas** ; « Système multi-capteurs et traitement des signaux associés pour l'imagerie par courants de Foucault de pièces aéronautiques » ; Engineering Sciences ; Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, France ; 2010
- [14] **Maillou.h** : cours, « contrôle non destructif », 12 Octobre 2013, Lycée pierre Mendés France.
- [15] **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.
- [16] **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, Spécialité Physique, Ecole Doctorale « STITS, Laboratoire de Génie Electrique de Paris », Université de Paris-Sud, 2012.
- [17] **oussama_ABID**; Application de la méthode des volumes finis pour la modélisation d'un capteur inductif
- [18] **Abelhak. 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.
- [19] **Nabil. BENHADDA**, "Modélisation des capteurs inductif par courant de Foucault", Mémoire de Magister, Spécialité électrotechnique, Option matériaux d'électrotechnique, Université de Batna, 2006.
- [20] **Latifa OUKHELLOU**, "Paramétrisation et Classification de Signaux en Contrôle Non Destructif. Application à la Reconnaissance des Défauts de Rails par Courants de Foucault", Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 1997.
- [21] **Gilles Peix**, ,,,,"Contrôle non destructif par courant de Foucault", I.N.S.A. de Lyon, 1988
- [22] **C. Ravat, Y. Le Bihan, P.-Y. Joubert, C. Marchand, M. Woytasik, E. Dufour Gergam, J. Moulin, E. Martincic**, "Detection of small surface breaking cracks using a microcoil array eddy current sensor", CNI"09, Colloque National sur l'Inductique, Laghouat, N° 98, Avril 2009.
- [23] **N. Burais, A. Nicolas**, "Modèles pour la simulation des END par courants de Foucault", Journées COFREND, Lyon, Oct 2004.

Etude et calcul de l'effet de la conductivité t dans un capteur absolu par le contrôle non destructif par courant de Foucault

bibliographie

- [24] **A. Lakhdari, A. Cheriet, M. Feliachi**, "Modélisation d'un capteur différentiel de CND-CF par la méthode des volumes finis", CEE'10, 6th International conférence en électrique engineering, Batna, MAT97, N° 58, pp. 492-495, Oct 2010
- [25] **F. Gauthier**, "Les rails du métrosous le regard des courants de Foucault", Mesures physiques, Mesures.750, Dec 2002.
- [26] **L. Oukhellou, P. Aknin**, "Structure multicapteur originale a courants de Foucault pour la détection en voie de défauts de rail", COFREND, Congrès sur les essais non destructifs. Nantes, 1997.
- [27] **G Asch, 2002**. Les Capteurs en Instrumentation Industrielle. France: Dunod, 5ème Edition, 2002.
- [28] Lacroix, 1996 Essais non Destructifs. Techniques de l'Ingénieur M110 et M111, 1996. pp. 1-21 et 1-17.
- [29] **A. Lakhdari**, "Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : Application a la détection des fissures", Mémoire de Magister, Spécialité électrotechnique, Option électricité industrielle, Université de Biskra, 2011
- [30] **Ahmed Cheriet**, Contribution a la modélisation tridimensionnelle par la méthode des volumes finis de dispositifs électromagnétiques, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2007.
- [31] **A. KAMENI NTICHI**, Etude par des méthodes analytiques et numériques de la répartition des champs induits dans les supraconducteurs à haute température critique., Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy I, 2009
- [32] **El ghoul Islam Nacereddine**, " Contrôle non destructif (CND)", Technique del'ingénieur, traité mesure et contrôle, R1400, 1996
- [33] **Wissem Slimane**, « Conception d'un Système Multi-Capteurs à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif », mémoire de magistère, université el hadj lakhda Batna2008 .
- [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] **Bachir 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.
- [36] **M. Mephane** , « Modélisation de contrôle ultrasonore de tube d'acier présente des défauts de type », direction de l'information scientifique et technique, gif-sur-yvert frane: s.n., 1998

Etude et calcul de l'effet de la conductivité t dans un capteur absolu par le contrôle non destructif par courant de Foucault

bibliographie

- [37] **Charles J. Hellier** ,« Handbook of nondestructive testing », mcgraw-hill professional; 1 edition (march 14, 2001).
- [38] **F. Gauthier**, “Les rails du métrosous le regard des courants de Foucault”, Mesures physiques, Mesures.750, Dec 2002
- [39] **L. Oukhellou**, “Paramétrisation et Classification de Signaux en Contrôle Non Destructif. Application à la Reconnaissance des Défauts de Rails par Courants de Foucault”, Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 1997.
- [40] **L. Alloui**, “ Modélisation tridimensionnelle des matériaux supraconducteurs”, Thèse de doctorat, Spécialité génie électrique(Electrotechnique), de l’université paris sud, 2007.
- [41] **F. Z. Louai**, “Modèles magnétodynamiques d’éléments finis pour structures tridimensionnelles de chauffage par induction”, Thèse de doctorat, Spécialité systèmes électroniques et informatiques, Université de Nantes, 1995.
- [42] **A. Kameni, D. Netter, F. Sirois, B. Douine, and J. Lévêque**, “ New Hybrid FEFV Method for Computing Current Distribution in 2-D Superconductors: Application to an HTS Cylinder in Transverse Magnetic Field,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no.3, pp. 2423-2427, June. 2009
- [43] **S. Emmanuel**, “Diagnostic des machines asynchrones: modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts”, Thèse de doctorat, Automatique et informatique appliqué, Université de Nantes, 1999.
- [44] **L. Alloui, F. Bouillault and S. M. Mimoune**, “Numerical Study of the Influence of flux creep and of Thermal Effect on Dynamic Behaviour of Magnetic Levitation Systems with a high-Tc superconductor using control volume method”, EPJ. App. Phys., Vol. 37, No. 2, pp. 191-195, Feb. 2009
- [45] **J. P. Nougier**, “Méthodes de calcul numérique”, 3ème édition, Edition Masson.
- [46] **Gilles Peix**, ,,,“Contrôle non destructif par courant de Foucault”, I.N.S.A. de Lyon, 1988.

