

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A .Mira – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

Projet de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme

Master en électrotechnique

Option :

Machines électriques

Thème

***Etude du CND par courant de Foucault appliqué aux cas des
pièces conductrices et isolantes***

Réalisé par :

Mr. Bounia Ahmed

Mr. Hadibi Hocine

Composition du jury :

Mr. Maouche Bachir

M^{me}. Medjahed Sakina

Encadré par :

M^{me}. Bendahmane Akila

Président

Examineur

Promotion juin 2018

REMERCIEMENTS

Nous rendons grâce à dieu de nous avoir donné le courage et la patience afin de mener ce Travail à terme.

Arrivé au terme de notre travail, nous tenons à exprimer vivement notre profonde gratitude à Mr. MAOUCHE BACHIR, Mr. BOUZIDI ATHMANE, Mr. AKROUNE NACER et Mr. MEZIANI BACHIR pour leurs précieuses aides. Et un remerciement à notre promoteur M^{me}. BENDAHMANE AKILA pour l'aide, le suivi et l'intérêt qu'il n'a cessé de nous apporter jusqu'à l'achèvement de ce travail.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des membres du jury Mr. MAOUCHE BACHIR ET M^{me}. MEDJAHED SAKINA qui ont fait l'honneur de juger ce travail.

Enfin, nos chaleureux remerciements vont également à nos deux familles pour leur soutien moral et matériel sans égal durant tous nos études et notre vie.

Dédicaces

« Louange au bon Dieu, le possesseur de toute la grâce »

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents : ma mère qui a sacrifié sa vie pour mon bien-être. Mon père à qui je voue un profond respect pour tout le dévouement qu'il m'a consacré ;

À mon frère Aissa ;

À mes sœurs ;

À mon binôme Mr Hocine Hadibi ;

B.Ahmed

Dédicaces

« Louange au bon Dieu, le possesseur de toute la grâce »

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, pour leur tendresse, leur soutien et leurs

prières tout ou long de mes études

À mes deux frères, et trois sœurs

À toute ma famille

À toute la famille AIT EL HADI

À mon binôme Mr. BOUNIA AHMED et sa famille

À mes amis sans exception chacun avec son nom.

H. Hocine

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I

Contrôle non destructif par courant de Foucault

I.1.Introduction	02
I.2. Généralités sur les contrôles non destructifs	02
I.3. Techniques de CND et concepts généraux	04
I.3.1. Techniques du CND.....	04
I.3.2. Principes Généraux.....	05
I.4.Différentes topologies du contrôle non destructif.....	05
I.4.1. Examen visuel.....	05
I.4.2. Ressuage	06
I.4.3.Radiographie	08
I.4.4. Magnétoscopie	08
I.4.5. Ultrasons.....	09
I.4.5. Thermographie.....	10
I.4.7. Courants de Foucault	11
I.4.7.1.Influence des propriétés du matériau et de la fréquence sur V_0 et φ	12
I.4.7.2. Notion d'impédance	13
I.4.7.3.Influence de la conductivité électrique du matériau	13
I.4.7.4.Influence de la géométrie du matériau	14
I.4.7.5.Influence de la perméabilité magnétique du matériau.....	15
I.4.7.6Influence de la fréquence du signal d'excitation	15
I.4.7.7. Principes de détection des défauts	17
I.4.8.Capteur	17
I.4.8.1.Type du capteur	18
I.4.8.2. Capteur axial encerclant ou bobine encerclante	18
I.4.8.3.Capteur axial interne ou sonde	18
I.4.8.4. Paramètres du capteur	19
I.4.8.5. Domaines d'utilisation des capteurs	19

Table des matières

I.4.8.6. Fonctions du capteur	20
I.4.9.Mode de travail	21
I.4.10. Matériau à inspecter	22
I.4.10.1. Epaisseur de peau	22
I.5.Conclusion.....	23

Chapitre II

Equation de Maxwell

II.1.Introduction	24
II.2. Équations de base de l'électromagnétisme	24
II.2.1.Historique	24
II.2.2.Équations de Maxwell	24
II.2.3.Loix de comportement des milieux	25
II.2.4. Condition de passage	26
II.3.Hypothèse simplificatrice	28
II.4.Reformulation du problème à l'aide du potentiel vecteur.....	29
II.4.1.Formulation en coordonnées axisymétriques	30
II.4.2Formulation bidimensionnelle dans un repère cartésien	33
II.5.Conditions aux limites	33
II.6.Conclusion	34

Chapitre III

Méthodes des éléments finis et applications

III.1.Introduction	35
III.2. Le concept fondamental de la méthode des éléments finis	35
III.3.Etude de la méthode des éléments finis	35
III.3.1.Méthode de Galerkin	35
III.4. Conditions aux limites.....	36
III.5.Discrimination du domaine	37
III.6.Fonction d'interpolation d'un triangle a trois nœuds	38
III.7.Formulation éléments finis de l'équation électromagnétique.....	39
III.7.1.Formulation faible.....	39
III.8. Introduction des conditions aux limites	40

Table des matières

III.9.Méthode de résolution	40
III.10.Conclusion.....	41

Chapitre IV

Simulation et résultats

IV.1.Introduction.....	42
IV.2.Calculer de l'impédance	42
IV.3. Application du CND par CF pour le cas d'une pièce conductrice.....	43
IV.4. Application du CND pour le cas des pièces isolantes.....	52
IV.4.1. Description du Dispositif d'étude.....	56
IV.4.2.Interprétation des résultats.....	58
IV.5. Conclusion	59
Conclusion générale.....	60
Bibliographie	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction général

Le danger des fissures des structures métalliques dans le secteur industriel (aviation, automobile, centrale nucléaire), exige un contrôle de qualité au niveau de la production. Ceci oblige le dimensionnement des pièces au plus juste afin de garantir leur disponibilité et garantir leurs performances tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Pour répondre à ces exigences, quel que soit le domaine (aviation, automobile, centrale nucléaire) qui nous intéresse, des techniques de **contrôle non-destructif** (CND) ont été conçues [1].

Les techniques de (CND) sont très diverses dans leurs principes ; parmi elles, le ressuage, la magnétoscopie, les ultrasons, la radiographie, la thermographie et les courants de Foucault, etc.

Le contrôle par CF est une méthode qui consiste à évoluer l'état d'intégrité d'une pièce par la mesure de la variation de l'impédance issue du couplage électromagnétique entre le capteur et la pièce à tester. La circulation des courants dans la pièce est modifiée par l'existence de défaut (trous, fissures, rayures) à cause de la variation des caractéristiques électromagnétiques et géométriques.

Notre étude consiste à l'étude d'un problème du contrôle non destructif par courants de Foucault appliqué aux cas de pièces conductrices ou composite. Pour cela une formulation électromagnétique est très nécessaire pour modéliser les différents phénomènes physiques. Pour la résolution de l'équation régissant le modèle électromagnétique obtenu, nous proposons la méthode des éléments finis.

Dans le premier chapitre nous définirons les différentes méthodes de contrôle non destructif et les différents types de capteurs ainsi que leurs fonctions.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des équations de Maxwell afin d'aboutir à la formulation du problème électromagnétique.

Le troisième chapitre, concernera le concept fondamental de la méthode des éléments finis utilisé pour résoudre l'équation électromagnétique.

Le dernier chapitre sera dédié pour la simulation du couplage électromagnétique entre le capteur et la pièce à contrôler et l'interprétation des résultats obtenus.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES CONTROLES NON DESTRUCTIFS

I.1.Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans la phase de maintenance. Les termes « Essais Non Destructifs » (END) ou « Examens Non Destructifs » évoquent aussi le diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient. Le même principe appliqué aux pièces industrielles consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation pour apprécier sans destruction leur état de santé et formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées [1].

Une définition des contrôles non destructifs plus proche de la réalité industrielle consiste donc à dire qu'il s'agit de « qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapport à des normes de recette ».

Nous allons à présent passer en revue les différentes techniques employées pour la recherche d'irrégularités géométriques.

I.2. Généralités sur les contrôles non destructifs

Une pièce industrielle contient des défauts et des anomalies dès sa phase de fabrication (Retassures, inclusions, fissures,...). Comment alors assurer la sécurité et évaluer l'impact d'une anomalie ou d'un défaut? Les Contrôles Non Destructifs (CND) apportent un moyen de répondre à cette question. Ils constituent un outil essentiel pour le contrôle de la qualité.

Ces contrôles mettent en œuvre des techniques d'évaluation permettant d'apprécier sans destruction l'état de santé des pièces et ainsi de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées. Ainsi, le CND vise des aspects d'assurance qualité d'aptitude au bon fonctionnement et de sécurité. Ces derniers nécessitent une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts et de leur évolution dans le temps. Sous cet angle, l'absence de contrôle peut conduire à des conséquences catastrophiques dans certains secteurs industriels [2].

Généralement on peut distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la technique d'inspection employée : [1].

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

a) objectif du contrôle non-destructif (CND) [3]

D'une manière générale, l'objectif du contrôle non-destructif (CND) est de caractériser l'intégrité de structures industrielles sans les dégrader. Le développement de capteurs et de systèmes de CND performants permet de caractériser au mieux les structures inspectées et de détecter au plus tôt les éventuels défauts (fissures, corrosion...) consécutifs à la fatigue des structures.

En règle générale, on peut considérer que les quatre principaux critères de performance de ces systèmes sont :

- la simplicité de leur mise en œuvre (besoin éventuel d'un couplant, pollution éventuelle, besoin de protection de l'opérateur...)
- leurs possibilités de caractérisation (capacité à délivrer des informations significatives sur la présence et/ou sur la nature des défauts qui soient directement exploitables par l'opérateur...)
- la rapidité de leur mise en œuvre,
- le coût total des opérations.

Ces quatre critères sont étroitement liés : le coût des opérations de contrôle est tributaire du coût de la main-d'œuvre puisqu'un système de CND est d'autant plus économique qu'il est capable de fournir rapidement une information fiable et directement exploitable par un personnel peu qualifié.

Diverses techniques ont été développées pour rechercher des défauts dans différents types de structures et de matériaux. Leurs performances respectives peuvent éventuellement être évaluées voire comparées à l'aide des critères précités. Toutes les techniques ne sont cependant pas comparables, chacune étant appropriée à l'inspection d'une certaine catégorie de matériau.

Dans ce qui suit, nous allons traiter de quelques techniques de CND classiques et rappeler leurs principales caractéristiques.

I.3. Techniques de CND et concepts généraux [4]

I.3.1. Techniques du CND

Les techniques de CND sont nombreuses, Citons à titre d'exemple :

- L'examen visuel.
 - Le ressuage.
 - La magnétoscopie.
 - Les ultrasons.
 - La radiographie.
 - La thermographie.
 - Les courants de Foucault.



Figure I.01 : examen visuel

Le contrôle non destructif permet de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production (les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défaut), soit en cours d'utilisation (apparition de défaut). Il faut donc déterminer, à la casse et de façon empirique, quelle taille de défaut est acceptable et ensuite pouvoir les détecter, sans casser la pièce et la remplacer si besoin, ces techniques sont très utilisées dans :

- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs)
- L'industrie navale (contrôle des coques des bateaux)
- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion)

I.3.2. Principes Généraux [5]

Quel que soit la technique adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND selon le synoptique de la figure I.02:

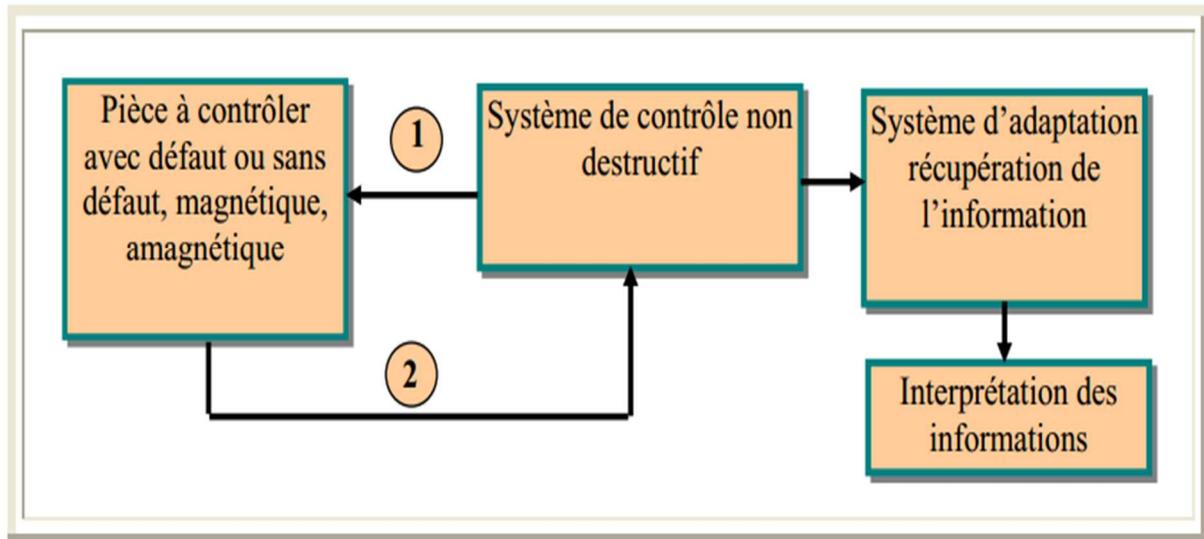


Figure I.02 : Schéma synoptique du CND

La cible se caractérise par un ensemble de paramètres, qu'on va estimer afin de former un diagnostic. La mise en œuvre d'un système CND adéquat permettra de produire un certain nombre de signaux, qui sont en fonction des paramètres recherchés. Une étape d'une version et souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce, [5].

I.4. Différentes topologies du contrôle non destructif

Dans ce paragraphe, seront présentées brièvement les diverses techniques mises en œuvre pour le contrôle des pièces en précisant pour chaque type, ses caractères propres, ses possibilités et ses limitations

I.4.1. Examen visuel

Le contrôle visuel est une technique essentielle qui donne un aperçu de l'état extérieur d'une pièce. Il est destiné à déceler les défauts tels que les fissures, les inclusions, et le manque de pénétration dans la soudure. Il implique l'utilisation de gabarits et de calibres. Pour le cas de la soudure on utilise des loupes, des caméras vidéo, des calibres et des règles graduées [6].

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus générale, puisque c'est le point finale de la majorité des autres procédés non destructifs.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités superficielles.

Dans tous les cas, l'observation d'un objet les conditions d'éclairage sont essentielles pour la fiabilité du contrôle optique. Un éclairage de plus de trois cents lux en lumière blanche est nécessaire. Il s'agit en suit d'adopter le type et l'orientation de l'éclairage de la natures des défauts en vue d'améliorer le contraste [7].

a) Avantage

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

b) Inconvénients

- Détection limite aux défauts visibles;
- La surface doit être propre.

I.4.2. Ressuage [8].

Bien avant d'employer le magnétisme ou l'ultra-son à la recherche de fissures dans les pièces mécaniques, on avait remarqué que certains liquides à faible tension superficielle ont la propriété de pénétrer dans des fissures ou défauts apparaissant à la surface des pièces et de ressortir par la suite en dessinant le spectre de ces défauts.

C'est en se basant sur cette propriété des forces capillaires, tout en mettant en application une technique plus élaborée, qu'est née la méthode de contrôle dite de «*ressuage*».

Cette méthode simple d'utilisation a ses limites

- Si l'embouchure du défaut est étroit il est difficile de le distinguer,
- Il ne permet pas non plus la caractérisation géométrique de défaut et ne s'applique qu'aux défauts (absence de matière),

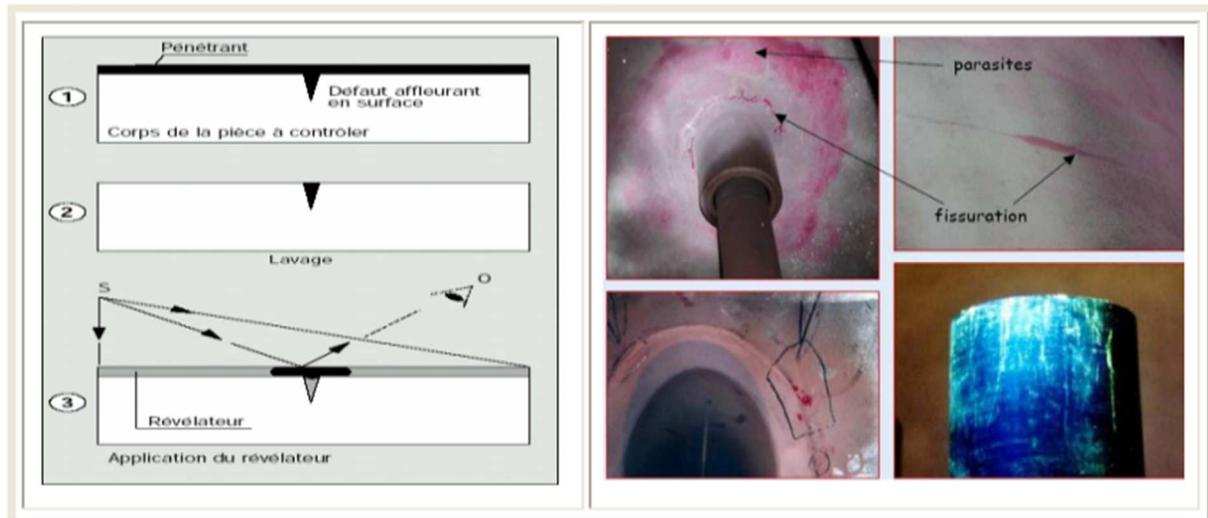


Figure I.03 : Examen par ressuage

a) Avantage

- Simple à mettre en œuvre et relativement sensible aux fissures ouvertes (et en surface).
- Elle n'est pas automatisable et les résultats restent à l'appréciation de l'opérateur. De plus, elle peut être effectuée sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux de géométrie et dimensions quelconques;
- Facilité de mise en œuvre (pour pénétration pré émulsionnée);

b) Inconvénients

- Il est nécessaire de faire un décapage et un dégraissage soigné avant l'inspection;
- L'interprétation des résultats est subjective: Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.
- Danger des solvants toxiques, corrosifs, inflammable.

c) Domaine d'application [4].

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

I.4.3. Radiographie

La radiographie est une technique basée sur le bombardement d'un corps (un tube, une pièce...) par les rayons X ou γ . Applicable généralement dans le domaine de médecine, mais actuellement elle s'applique dans d'autres domaines (mécanique, électrotechnique, matériaux...); c'est en effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui de contrôle de maintenance.

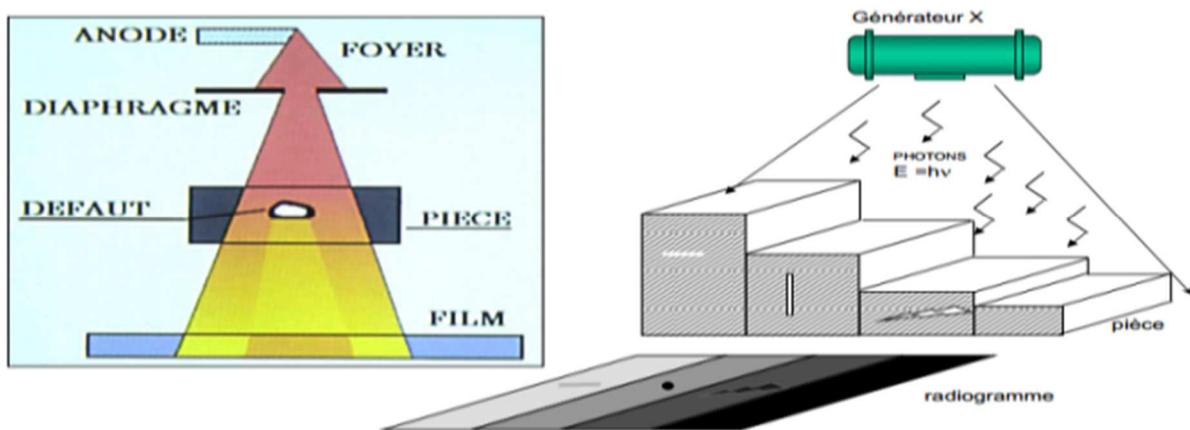


Figure I.04 : Examen par radiographie

- **Domaine d'application**

Traditionnellement, les domaines d'application du contrôle radiographique sont ceux de la fonderie et du soudage métallique avec la mise en évidence de porosités, soufflures, inclusions non métalliques, criques, manque de pénétration. Les nouvelles techniques de contrôle en temps réel sont en train d'élargir ce domaine d'application hors des industries métallurgiques.

I.4.4. Magnétoscopie [1]

Le contrôle par magnétoscopie fait appel aux propriétés magnétiques du matériau inspecté. L'effet de dispersion du flux de fuite peut être mis en évidence en aspergeant la surface contrôlée d'une liqueur magnétique constituée de très fines particules ferromagnétiques et d'un liquide porteur (poudre de fer ou de magnétite colorée). Les particules noires ou fluorescentes viennent s'agglomérer sur le champ de fuite, à l'endroit du défaut, le rendant ainsi parfaitement visible.

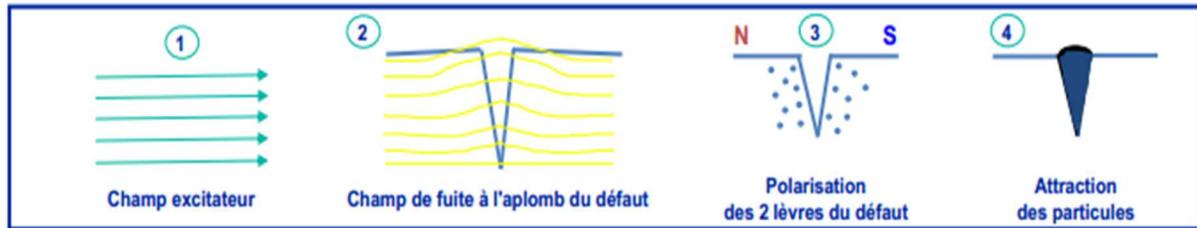


Figure I.05 : Examen par Magnétoscopie

I.4.5. Ultrasons

L'ultrason est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage 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.

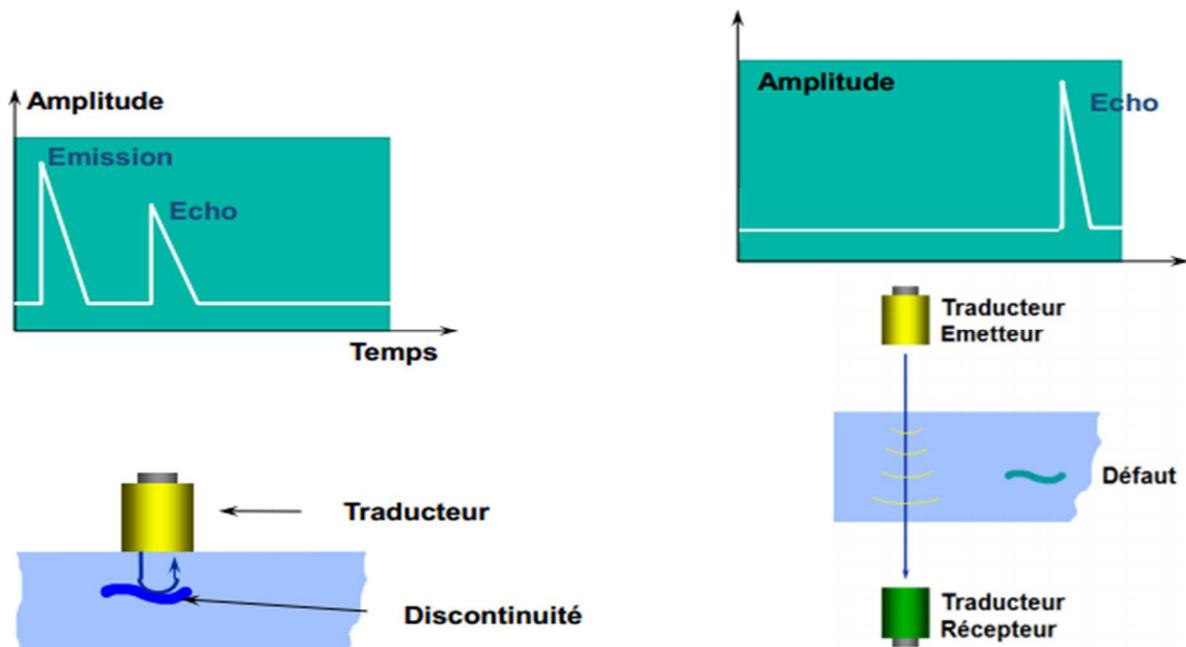


Figure I.06 : Examen par ultrason

a) avantages [8]

- On peut obtenir une sensibilité de contrôle constant dans toute l'épaisseur du produit à inspecter.
- Les défauts détectés sont : les criques, les pailles, les arrachements, les rayures, tous les défauts ayant un bon pouvoir réflecteur par rapport à l'orientation principale du champ ultrasonique.

b) inconvénients

- Le contrôle est relativement lent.
- Il est nécessaire d'employer un produit de couplage, et de s'assurer que les tubes à contrôler ont un état de surface convenable.
- Si l'on veut obtenir des cadences industrielles, il faut les appareillages complexes, adapter à ces cadence et nécessitant de ce fait des investissements importants.
- Les signaux exploitables étant très faibles, les installations peuvent être sensibles aux parasites industriels.

c) domaine d'application

L'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques.

I.4.6. Thermographie

Les méthodes de contrôle thermique consistent à exciter un matériau ou une structure par un apport d'énergie (mécanique, chauffage par induction, air chaud ...). La diffusion de la chaleur dans le matériau et l'impact qu'elle a sur la distribution de la température sur la surface renseignent sur les propriétés thermo physiques des matériaux et sur d'éventuels défauts à l'aide d'une caméra infrarouge les résultats d'examen sont implantés sur un PC comme montre la figure suivante :

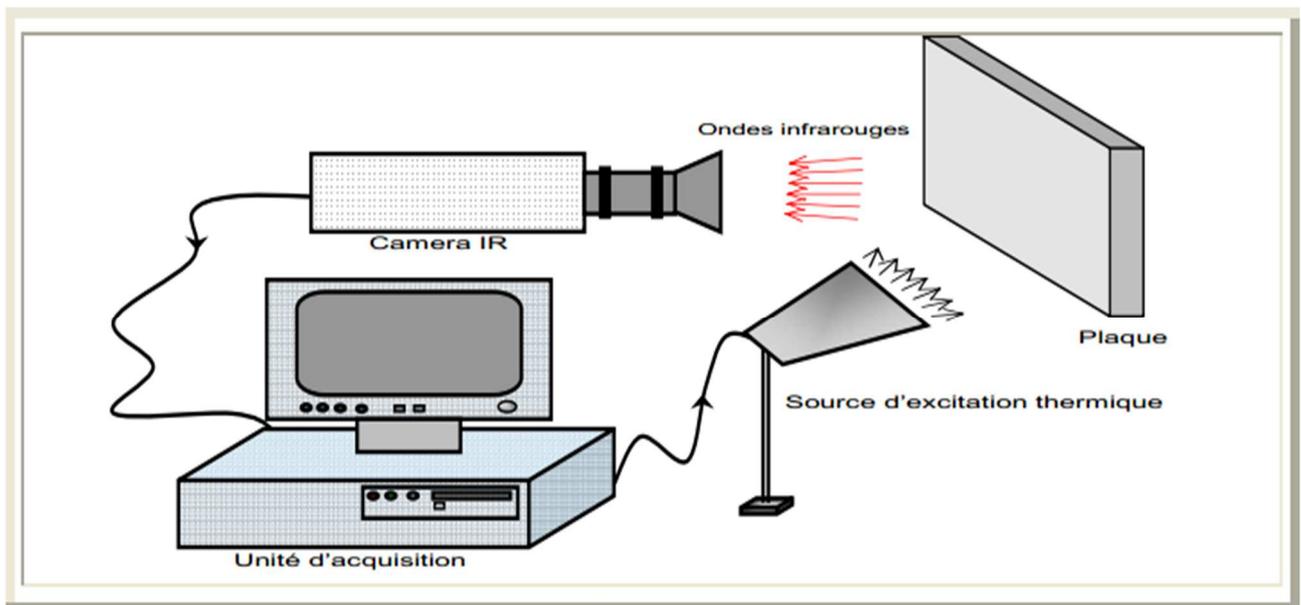


Figure I.07 : Examen par Thermographie

- **Domaine d'application**

La magnétoscopie s'applique aux matériaux ferromagnétiques comme le fer, la fonte, les aciers non alliés et faiblement alliés. Elle ne s'applique pas sur l'aluminium et certains aciers inoxydables. Elle s'applique sur les revêtements anticorrosion.

I.4.7. Courants de Foucault

Lorsque des pièces métalliques conductrices sont plongées dans des champs magnétiques variables, ou lorsqu'elles sont elles-mêmes en mouvement dans un champ fixe, cela a pour effet d'induire dans ces pièces des courants parasites appelés : Courants de Foucault.

Les courants de Foucault peuvent être nuisibles, provoquant des échauffements des tôles des machines électriques à courant alternatif sinusoïdal et les transformateurs. Nous remédions à ces effets en construisant des noyaux au moyen d'empilement de tôles minces séparées par un vernis isolant [9].

Mais dans le domaine du CND, les courants de Foucault (CF) occupent une place importante. On applique dans des domaines industriels très variés tel que l'aéronautique, l'automobile, le nucléaire, la sidérurgie ...

Les courants sont influencés par un grand nombre de paramètres, ce qui est à la fois un avantage et une limitation de la méthode. La destruction dépend de la fréquence, de la conductivité et de la perméabilité magnétique du matériau, ainsi que de la géométrie relative pièce-bobine. La présence de défauts, débouchant ou proches de la surface, en modifiant ses caractéristiques, change la distribution des courants induits [10], [20].

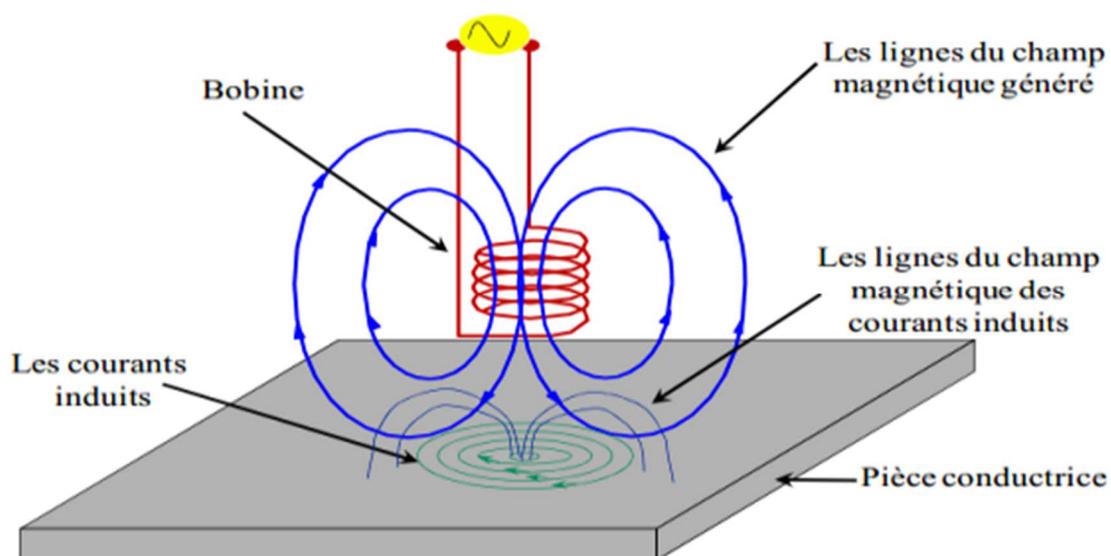


Figure I.08 : Examen par Courants de Foucault.

Entraînant une variation de l'impédance du solénoïde. La technique est applicable à tous les matériaux conducteurs de l'électricité. Dans l'examen par les courants de Foucault citons deux méthodes [4] :

➤ **Méthode directe**

Cette méthode consiste à passer un courant dans un tube figure (I.09.a) où dans une plaque figure (I.09.b). Lorsqu'un défaut orienté selon l'axe entre électrodes, perturbe la distribution du champ est donc détectée. Un défaut transversal par rapport à cet axe n'est pas détecté.

➤ **Méthode indirecte :**

L'examen par cette méthode basé sur la génération d'une induction par un solénoïde ou un aimant permanent, applicable pour les tubes et plaques. La présence d'un défaut transversal par rapport aux lignes du champ dévie celle-ci est détecté. Contrairement à un défaut orienté parallèlement aux lignes du champ

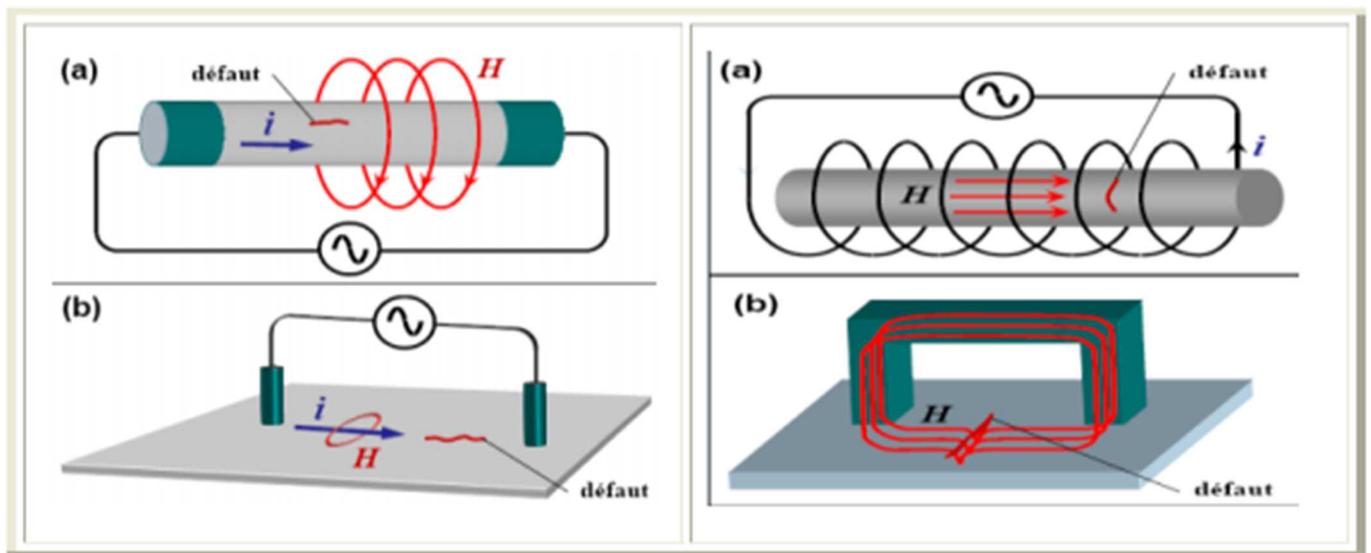


Figure I.09.a : Examen par courants de Foucault
D'un défaut Transversal (méthode directe)

Figure I.09.b: Examen par courants de
Foucault d'un défaut Transversal (indirect)

I.4.7.1. Influence des propriétés du matériau et de la fréquence sur V_0 et φ [10]

Dans toute technique de contrôle, la démarche consiste à résoudre le problème inverse. Dans le cadre d'un contrôle par CF, nous cherchons, à partir des mesures expérimentales du module V_0 et de la phase φ de la tension $V(t)$, à extraire la propriété physique et géométrique

du matériau. Il faut donc d'abord résoudre le problème direct qui consiste à relier le comportement des paramètres de mesure aux différents paramètres du matériau.

I.4.7.2. Notion d'impédance

Les grandeurs accessibles à l'opérateur sont le courant $i(t)$ et la tension $V(t)$. Leurs représentations respectives peuvent être montrées dans le plan de Fresnel. Sachant que le courant i est une constante durant le contrôle, nous pouvons nous affranchir de cette grandeur et ne faire intervenir que la notion d'impédance électrique Z . La représentation dans le plan d'impédance complexe devient **Figure I.10**.

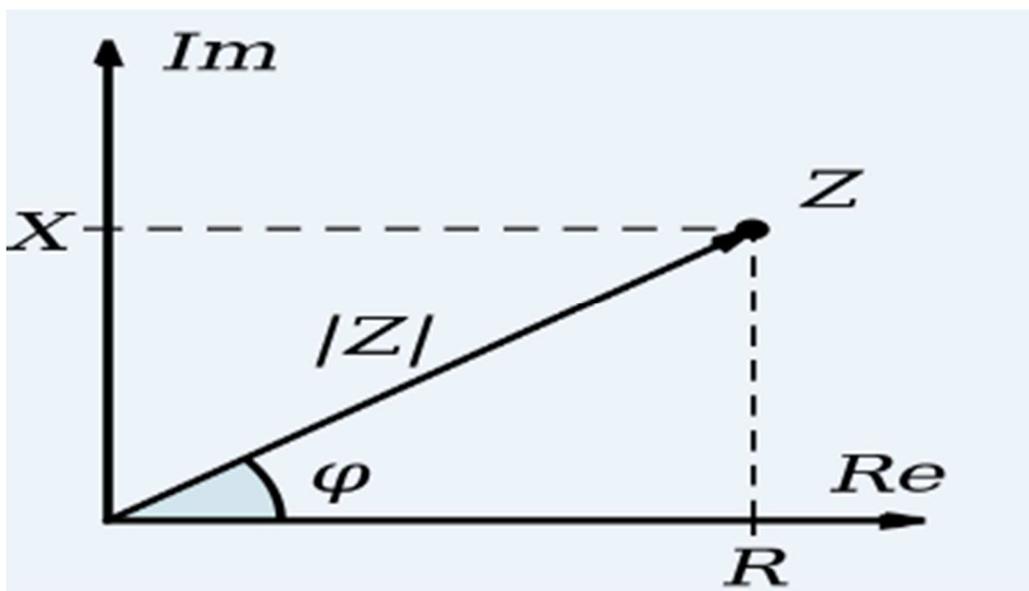


Figure I.10 : représentation de Z dans le plan d'impédance.

I.4.7.3. Influence de la conductivité électrique du matériau

En faisant l'hypothèse d'un couplage bobine/matériau parfait, le calcul de l'impédance globale de l'ensemble bobine/matériau décrit un demi-arc de cercle fonction du paramètre σ . En raisonnant à la limite. Pour $\sigma = 0$, aucun CF n'est généré dans le matériau isolant et l'impédance globale correspond à celle de la bobine dans l'air ($l_0 \omega$). Quand la conductivité électrique augmente, la densité de CF augmente, et donc la partie inductive de l'impédance diminue. Pour une conductivité infinie, l'induction magnétique induite est égale et opposée à l'induction inductrice, ce qui donne une induction totale nulle.

Ce demi-cercle n'existe que pour le cas parfait défini précédemment. La courbe utilisée industriellement, qui correspond notamment à des épaisseurs réalistes de matériau, s'oriente vers une forme en « virgule », qui reste cependant toujours le lieu des extrémités des vecteurs «impédance ».

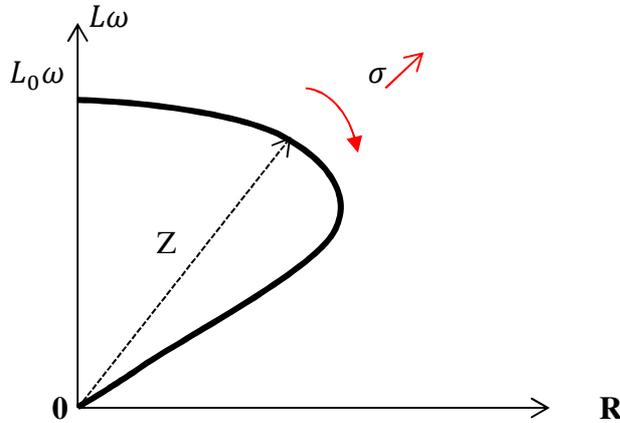


Figure I.11 : Influence de la conductivité. Si elle augmente, l'inductance diminue

I.4.7.4. Influence de la géométrie du matériau

En considérant le cas d'un tube (ou d'une barre) à l'intérieure d'une bobine encerclante, on introduit le coefficient de remplissage (lift off) $\eta = r1/r2 = \sqrt{s1/s2}$ ou $r1$ et $r2$ ($s1$ et $s2$) sont respectivement les rayons (ou section) de la barre et de la bobine. On trouve ainsi l'impédance complexe de l'ensemble bobine/matériau comme montre la figure ci-dessus pour différentes valeurs de coefficient de remplissage.

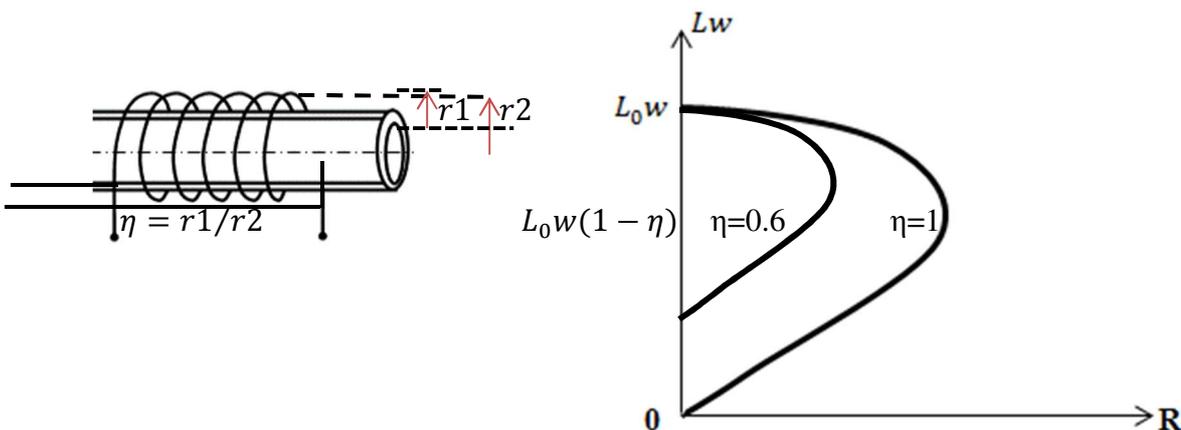


Figure I.12 : si le remplissage diminue l'impédance montre une homothétie égale à η.

Le même raisonnement à la limite confirme que, pour $\sigma = 0$, quel que soit le coefficient de remplissage, aucun courant de Foucault n'est généré et $Z = jL_0\omega$. A courant constant,

l'impédance est proportionnelle à la tension, donc au flux résultant, sa valeur devient égale à $L_0\omega(1 - n)$.

I.4.7.5. Influence de la perméabilité magnétique du matériau

On rappelle que la perméabilité magnétique μ du matériau permet de relier le champ magnétique à l'excitation magnétique, soit $B = \mu H = \mu_0\mu_r H$. Ainsi, le diagramme d'impédance résultant présentera une homothétie égale à μ_r comme montre la **Figure I.13**.

En réalité, la non-linéarité du comportement des matériaux ferromagnétique se traduit par une valeur μ_r fonction du niveau de l'excitation magnétique. Mais dans le cas particulier du contrôle par courant de Foucault, l'utilisation de faibles niveaux nous permet de négliger ces phénomènes de non-linéarité et d'hystérésis et de considérer μ_r comme une constante.

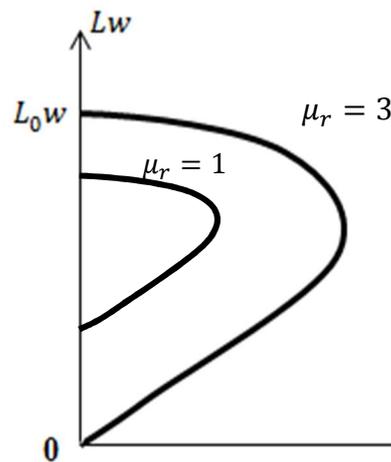


Figure I.13 : Si la perméabilité augmente, l'impédance montre une homothétie égale à μ_r

I.4.7.6. Influence de la fréquence du signal d'excitation

Par définition, l'impédance de la bobine seule dépend de la fréquence $Z_0 = R_0 + jL_0\omega$ avec $R_0 \ll L_0\omega$. Dans ces conditions, il faudrait en permanence modifier les échelles du diagramme d'impédance en fonction de la fréquence utilisé.

Comme le but du CND est de mettre en évidence des modifications en amplitude et phase de l'impédance résultante (bobine + matériau) dues aux seules propriétés physiques et géométriques du matériau, le diagramme d'impédance sera normalisé afin de le rendre indépendant des propriétés électriques de la bobine. Pour cela, ses axes seront réduits par rapport à la bobine seule dans l'air. Dans le cas d'un matériau non ferromagnétique, le diagramme d'impédance normalisé correspond à celui de la figure suivante :

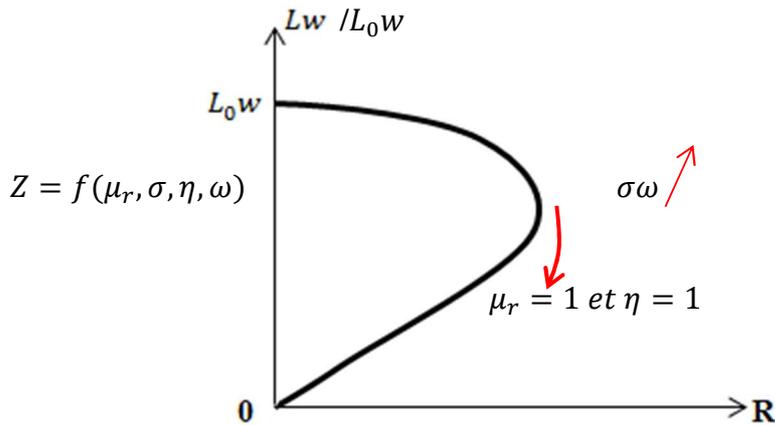


Figure I.14 : diagramme d'impédance normalisé (exemple d'un matériau non magnétique).

a) Avantages

- Haute sensibilité de détection des défauts, avec possibilité d'évaluer la profondeur ;
- Discrimination des différents types d'anomalies (dimensionnelles structural...);
- Possibilité de contrôle automatique et en continue de pièces longues et profilés (tubes bars rubans ...);
- Vitesse de défilement élevés, le capteur n'est pas nécessairement au contact de la pièce ;
- Mesure possible sous l'eau ;
- Mesure possible à très haute température (900°) ;
- Transportabilité ;
- Parfaitement adapté au contrôle de maintenance (tube de générateur vapeur, remontées mécaniques, ponts suspendus, moteur d'avion...);
- Sans impacte nuisible à l'environnement ;
- Compatible avec les exigences d'hygiènes et de sécurité ;

b) Inconvénients

- La profondeur d'inspection et dépend de la fréquence d'excitation ;
- La détection du défaut se fait d'une manière locale;
- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs ;
- La position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts ;
- La compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection ;

c) Domaine d'application [5]

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

- Matériaux ferromagnétiques ou paramagnétiques,
- Contrôles de filtrage (détection de métaux dans un environnement donné),
- Contrôles des tôles minces,
- Contrôles d'épaisseur de revêtement,
- Contrôles de traitements thermiques de surface,
- Matériaux composites comportant des fibres conductrices,
- Mesure d'épaisseur de matériaux amagnétiques;

I.4.7.7.Principes de détection des défauts

Le défaut, se traduit soit par l'absence de matière (air), ou par une anomalie non conductrice, il peut être situé à la surface de la pièce, au milieu ou à l'intérieur de la pièce.

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

➤ Défauts de surface

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

➤ Défauts internes

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler.

I.4.8.Capteur

Le capteur est une bobine ou un ensemble de bobines. Il sert à générer les courants de Foucault ainsi qu'à capter leurs effets. La grandeur mesurée est l'impédance ou une différence de potentiel représentant l'image des courants de Foucault. La forme du capteur, sa position relative au matériau, sa fonction et sa conception varient en fonction de son utilisation. Il peut être classé en fonction de 3 caractéristiques : [11].

- Type
- Fonction
- Mode de contrôle

I.4.8.1.Type du capteur

Du point de vue géométrique, on distingue trois types de capteurs :

- Bobine encerclante
- Sonde
- Palpeur

I.4.8.2.Capteur axial encerclant ou bobine encerclante [11]

Ce sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent la pièce à contrôler. Ils sont destinés au contrôle des produits longs ou des pièces au défilé. Ils sont les plus répandus dans le domaine industriel.

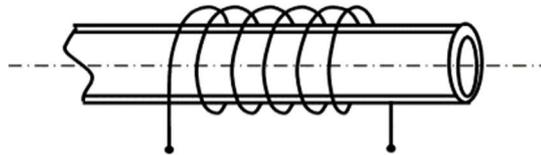


Figure I.15 : Bobine encerclante

I.4.8.3.Capteur interne ou sonde

C'est un capteur destiné à l'examen d'un produit par l'intérieur dont les enroulements de mesures entourent l'axe de translation.

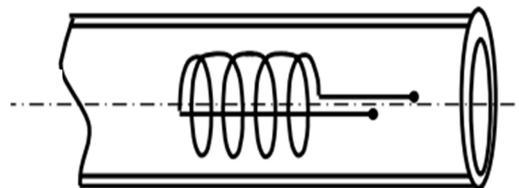


Figure I.16: Bobine interne glissante

Comme il existe aussi d'autres types dont se trouve Sonde interne tournante comme montre la **figure I.17**. Et Palpeur externe ou bobine ponctuelle, **figure I.18**.

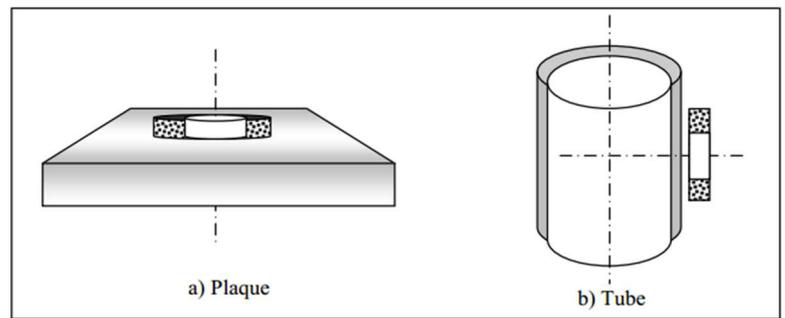
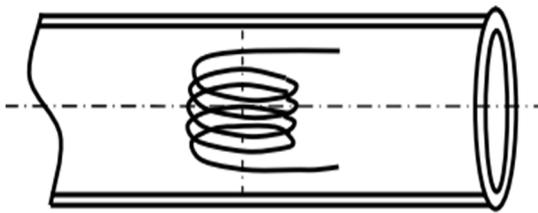


Figure I.17 : Sonde interne tournante

Figure I.18 : Palpeur externe ou bobine ponctuelle

I.4.8.4.Paramètres du capteur

Comme beaucoup de composants ou ensembles électroniques, il existe un certain nombre de paramètres électriques communs à tous les capteurs. Ils caractérisent les performances et donc leurs utilisations dans un environnement donné :

- Précision ;
- Sensibilité ;
- Étendue de mesure ;
- Linéarité ;
- Fidélité.

I.4.8.5.Domains d'utilisation des capteurs [4]

<i>MECANIQUE</i>	<i>ELECTRIQUE</i>	<i>CLIMATIQUE</i>	<i>DIVERS</i>
indication de présence	tension	température	rayonnement
déplacement linéaire	courant	humidité	luminosité
déplacement angulaire	puissance	vent	niveau acoustique
vitesse	fréquence	pluviométrie	célérité acoustique
accélération	champ électrique	ensoleillement	champ magnétique
force	charge	durée d'insolation	débit
pression	/	durée de pluie	couleur
couple	/	/	salinité

Tableau 1 Différents domaines d'application des capteurs

I.4.8.6. Fonctions du capteur [11]

Le capteur jouer le rôle de l'émetteur ou de récepteur ou les deux fonctions au même temps car le bobinage peut être induit ou inducteur

➤ **Les capteurs à double fonction**

Le capteur à double fonction assure deux fonctions au même temps il joue le rôle de l'émetteur et récepteur **figure I.19**.

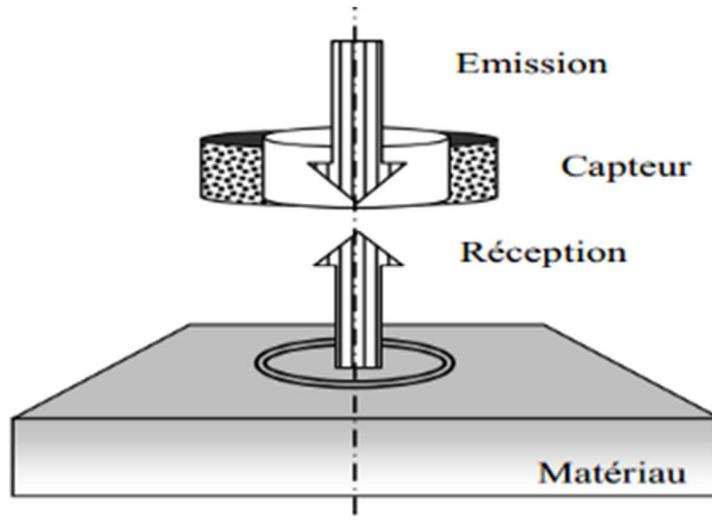


Figure I.19 : Capteur à double fonction

➤ **Les capteurs à fonctions séparées**

Ces derniers ont deux enroulements le premier est un émetteur l'autre est récepteur. On utilise ces types de capteurs dans le cas des grands défauts en taille au profond.

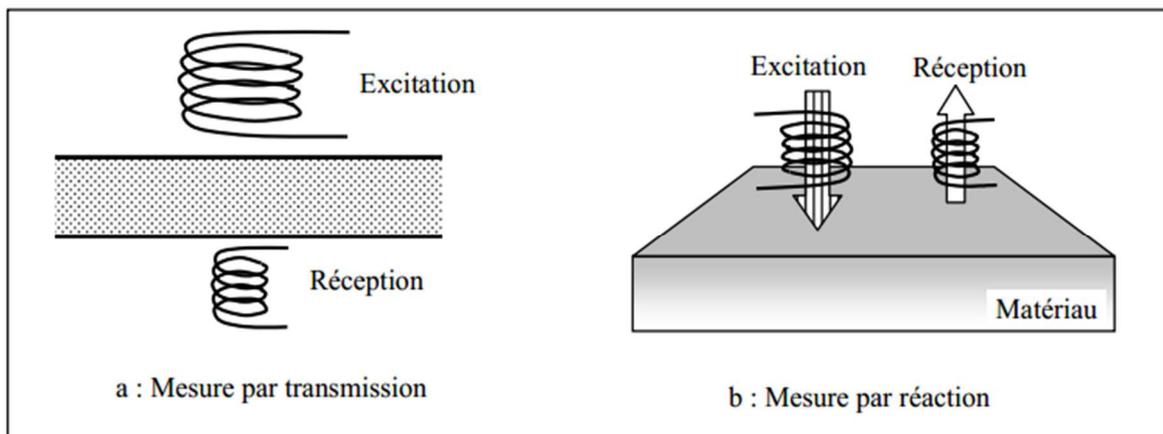


Figure I.20 : Capteur à fonction séparée

I.4.9. Mode de travail [7]

Il existe deux modes de travail :

➤ Mode absolu

Un capteur absolu destiné à mesurer la valeur effective des caractéristiques du produit contrôlé par rapport à une référence fixe. Il utilise un capteur à double fonction. Ce mode travail nous permet de mesurer la conductivité électrique et la perméabilité magnétique.

➤ Mode de contrôle compensé [11]

Pour s'affranchir des grandeurs perturbatrices, on réalise le mode absolu compensé. Dans ce mode de contrôle on utilise deux bobines.

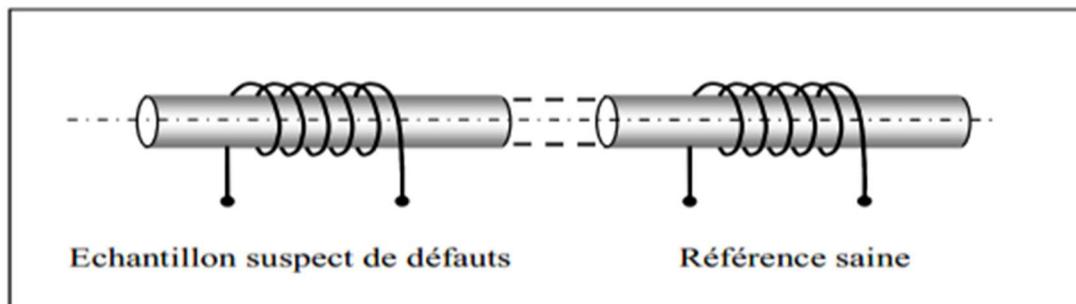


Figure I.21 : Mesure absolue compensée

➤ Mode de contrôle différentiel

Cette technique utilise deux capteurs absolus écartés montés en tête-bêche parcourue par le même courant de signe opposé. La mesure différentielle est équivalente à la comparaison permanente de deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins.

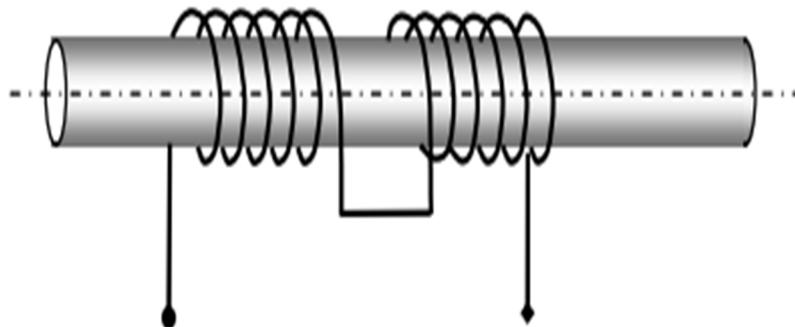


Figure I.22 : Mesure différentielle

I.4.10. Matériau à inspecter [11]

Au cours des ans, la technologie des capteurs et le traitement des données ont continuellement progressé et aujourd'hui la technique par courants de Foucault est reconnue comme étant rapide, simple et précise. C'est la raison pour laquelle elle est utilisée largement dans les industries de production et d'utilisation de produits métalliques pour la détection en surface ou en volume et la caractérisation physique des matériaux comme l'aluminium, l'acier inoxydable, le cuivre, le titane, le laiton, l'Inconel et même l'acier au carbone, le matériau à inspecter étant le siège des courants de Foucault.

I.4.10.1. Epaisseur de peau

Les courants de Foucault sont très sensibles à différents paramètres géométriques (la présence de défauts, la distance entre la bobine et la pièce, l'épaisseur de la pièce), électromagnétiques (la conductivité, la perméabilité) et thermiques. Le paramètre perturbateur est la température car elle modifie localement ou totalement la perméabilité ou la conductivité du matériau et donc l'impédance de la bobine réceptrice.

Quand on s'intéresse à une caractéristique électromagnétique ou géométrique, les autres sont par conséquent des paramètres perturbateurs. Cependant, si un contrôle cherche à mettre en évidence une caractéristique, il faut déterminer les paramètres de réglages optimaux (points de fonctionnement) et minimiser au maximum leurs variations. Par conséquent, la connaissance de l'influence de ces différents paramètres est nécessaire.

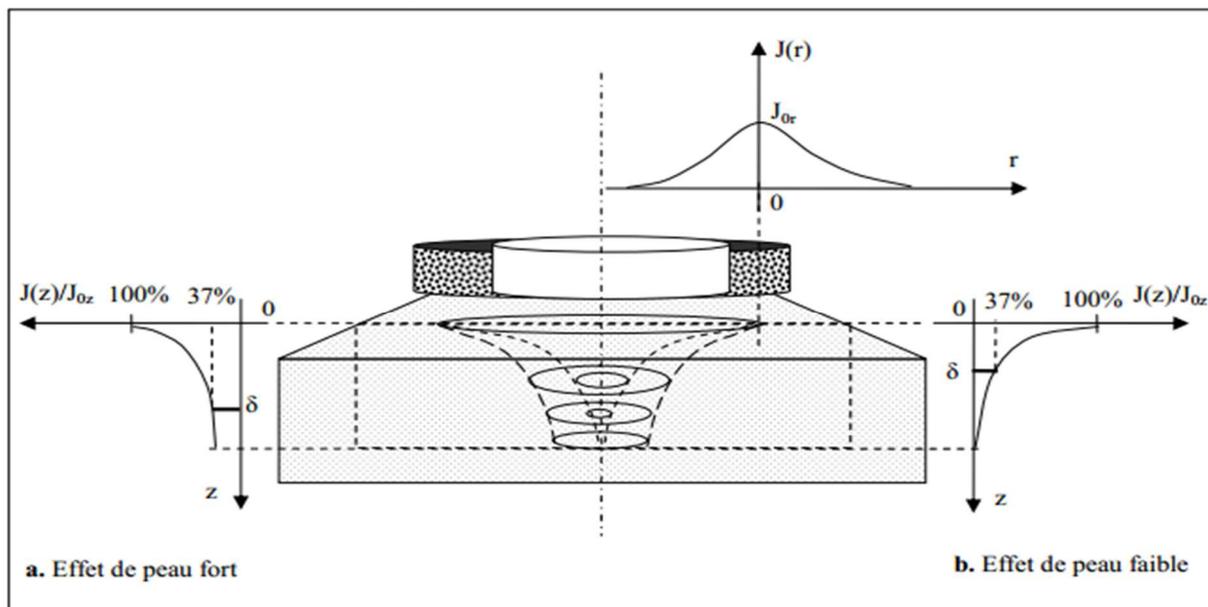


Figure I.23. Effet de l'épaisseur de peau [11]

La fréquence de travail, la conductivité et la perméabilité apparaissent dans l'épaisseur de peau électromagnétique telle que :

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

Ce phénomène engendre une décroissance exponentielle de la densité de courant de Foucault, soit:

$$J(Z) = J_0 e^{-Z/\delta} \quad (\text{I.2})$$

Où :

f : La fréquence ;

μ : La perméabilité magnétique ;

σ : La conductivité électrique ;

I.5.Conclusion

Dans ce chapitre on a expliqué les différentes techniques employées dans le contrôle non destructif et on s'est intéressé particulièrement au contrôle non destructif par courants de Foucault ainsi que les facteurs influant sur leur efficacité. Le prochain chapitre traitera les équations qui permettent de modéliser les phénomènes électromagnétiques.

CHAPITRE II

EQUATION DE MAXWELL

II.1. Introduction

Les **équations de Maxwell**, aussi appelées **équations de Maxwell-Lorentz**, sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent les postulats de base de l'électromagnétisme, avec l'expression de la force électromagnétique de Lorentz.

Ces équations traduisent sous forme locale différents théorèmes (Gauss, Ampère, Faraday) qui régissaient l'électromagnétisme avant que Maxwell ne les réunisse sous forme d'équations intégrales. Elles donnent ainsi un cadre mathématique précis au concept fondamental de champ introduit en physique par Faraday dans les années 1830 [19].

Dans ce chapitre, l'objectif est de trouver une équation différentielle à partir d'une combinaison entre les équations de Maxwell et les lois de continuité.

II.2. Équations de base de l'électromagnétisme

II.2.1. Historique

Vers 1865, Maxwell a réalisé une synthèse harmonieuse des diverses lois expérimentales découvertes par ses prédécesseurs (lois de l'électrostatique, du magnétisme, de l'induction...) Mais cette synthèse n'a été possible que parce que Maxwell a su dépasser les travaux de ses devanciers, en introduisant dans une équation un « chaînon manquant », appelé le courant de déplacement, dont la présence assure la cohérence de l'édifice unifié.

Maxwell a d'abord publié en 1865 sa théorie sous la forme de vingt équations à vingt inconnues, écrit à l'aide de quaternions. En 1873, dans l'ouvrage en deux volumes *A Treatise on Electricity and Magnetism* Maxwell a déjà réécrit sa théorie sous la forme de huit équations. Ce n'est que plus tard qu'Heaviside réécrivit ces équations sous la forme des quatre équations vectorielles aux dérivées partielles que l'on connaît maintenant.

II.2.2. Équations de Maxwell

Le fonctionnement de tout système électromagnétique est régi par les équations de Maxwell. En statique, on obtient pour les grandeurs électriques et magnétiques l'ensemble des

équations dans la forme différentielle suivante [12] :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbf{div} \vec{B} = 0 & \text{Équation de la conservation de flux} & \text{(II.01)} \\ \mathbf{ROT} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{Équation de Maxwell Faraday} & \text{(II.02)} \\ \mathbf{div} \vec{D} = \rho & \text{Équation de Maxwell – Gauss} & \text{(II.03)} \\ \mathbf{Rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & \text{Équation de Maxwell – Ampère} & \text{(II.04)} \end{array} \right. \quad \text{(II.A)}$$

Avec:

\vec{E} [V/m] : Champ électrique

\vec{H} [A/m] : Champ magnétique

\vec{D} [A.S/m] : Induction électrique

\vec{B} [T] : Induction magnétique

\vec{j} [A/m²] : Densité de courant de conduction

ρ [C/m³] : Densité volumique de charge

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

L'équation de Maxwell- Ampère nous permet de trouver une relation directe entre le champ électrique, le champ magnétique et les courants électriques.

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

Cependant, les deux premières équations définissent le lien qui existe entre les champs et leurs sources. Par contre, la troisième et la quatrième équation donnent respectivement la notion de conservation du champ magnétique et de la charge électrique.

II.2.3. Lois de comportement des milieux

Les grandeurs et les liaisons des cinq champs vectoriels précédents dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu où ils règnent. Ainsi, pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, on rajoute aux équations précédentes les lois de comportement de ce milieu :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.05})$$

Tel que :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{II.06})$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Perméabilité du vide.

μ_r : Perméabilité relative du milieu considéré.

Caractéristique diélectrique :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.07})$$

Tel que :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{II.08})$$

$\varepsilon [F/m]$: Permittivité électrique.

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = \frac{10^{-9}}{36\pi} [F/m] : \text{Permittivité électrique du vide.}$$

ε_r : Permittivité électrique relative du milieu considéré.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$: Vitesse de la lumière.

Et la loi d'ohm

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \sigma (\vec{V} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.09})$$

Où :

σ : Conductivité électrique.

\vec{V} : vitesse au point considéré [m/s] .

Le terme $\sigma (\vec{V} \wedge \vec{B})$ exprime le courant résultant du mouvement.

II.2.4. Condition de passage

Les équations précédentes sont valables en tout point d'un milieu continu. A la limite de séparation de deux milieux correspondants respectivement aux indices 1 et 2, il existe les conditions suivantes [13].

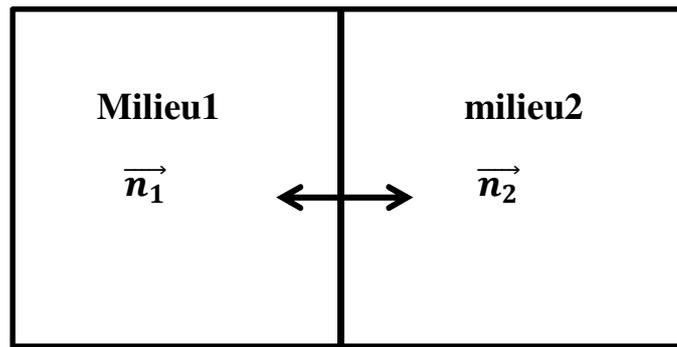


Figure II.01: Interface entre deux milieux différents

- Continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique E

$$\vec{E}_1 \wedge \vec{n} = \vec{E}_2 \wedge \vec{n} \quad (\text{II.10})$$

- Continuité de la composante normale du vecteur d'induction magnétique B

$$\vec{n} \cdot \vec{B}_1 = \vec{n} \cdot \vec{B}_2 \quad (\text{II.11})$$

- Discontinuité de composante tangentielle du vecteur champ magnétique H

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \times \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{II.12})$$

- Discontinuité de la composante normale du vecteur induction électrique D, due à la charge surfacique (q_s) :

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = q_s \quad (\text{II.13})$$

Où

n : est le vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux 1 et 2

J_s : La densité surfacique d'une nappe de courant entre les deux milieux.

L'ensemble des équations que nous venons de présenter, décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais dans la plupart des cas, nous ne pouvons pas les résoudre directement. Suivant la forme des dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables. Par conséquent, les équations se simplifient pour donner lieu à des modèles plus simples.

II.3. Hypothèse simplificatrice [14]

a) La perméabilité magnétique

Pour un milieu n'ayant pas de propriété magnétique (amagnétique) $\mu_r = 1$, sa perméabilité est assimilée à celle du vide on écrira donc $\mu = \mu_0$

b) le terme de transport $\sigma(\vec{V} \wedge \vec{B})$

Nous nous intéressons aux systèmes ayant des mouvements très long ou sans mouvements $\vec{V} \simeq 0$, et avec une induction magnétique \vec{B} , tel que $|E| \gg |(V \wedge B)|$.

Ce qui, par conséquent, autorise à négliger ce terme dans l'équation électromagnétique.

c) Les courants de déplacement et les densités de courant

La structure électromagnétique que nous étudions pour le cas axisymétrique est caractérisée par la même propriété que celle du vide $\epsilon_r = 1$, pour une fréquence utilisé au maximum de l'ordre de $f = 100 \text{ KHZ}$, et une conductivité d'ordre $\sigma = 10^6 (\Omega.m)^{-1}$, dans ces conditions les courants de déplacements sont négligés.

- La densité surfacique entre les deux milieux est nulle ($\vec{J}_s = 0$).
- La densité volumique de charge est considéré nulle ($\rho=0$).

d) Courants induits et courants imposés

Le terme J regroupe l'ensemble des densités de courants. Ces courants peuvent être des courants induits (dans la charge) ou imposés (dans l'inducteur). On peut, de manière toute à fait formelle, transformer l'équation (II-4) en :

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_s \quad (\text{II.14})$$

- Courant de déplacement : $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$ (Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires ARQS).

\vec{J}_s : Densité de courant dans l'inducteur (imposé) $[A/m^2]$.

\vec{J} : Densité de courant dans l'induit (imposé) $[A/m^2]$.

Cela signifie que sont supposées connues les densités de courants dans les enroulements inducteurs. Nous adaptons cette approche en réseau des simplifications qui en résultent.

Avec les hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{div} \vec{B} = 0 \\ \overrightarrow{ROT} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{D} = 0 \\ \overrightarrow{Rot} \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_s \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (II.15) \\ (II.16) \\ (II.17) \\ (II.18) \end{array} \quad (II.B)$$

Rappelons que :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \text{ dans l'induit.}$$

$$\vec{J}_s \text{ Imposé dans l'inducteur.}$$

II.4. Reformulation du problème à l'aide du potentiel vecteur

Tel que formuler plus haut, le système d'équations (II-B) contient beaucoup d'inconnues et se prête donc mal à une résolution numérique.

L'utilisation du potentiel magnétique vecteur (A) et du potentiel scalaire électrique (V) permet de « condenser » ce système et de réduire grandement le nombre d'inconnues. Ces méthodes sont maintenues bien connues et largement utilisées dans le domaine du calcul du champ électromagnétique [14].

L'équation (II-15) nous donne :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad \longrightarrow \quad \vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (II.19)$$

\vec{A} : Le potentiel vecteur.

L'équation (II-16) donne, après avoir remplacé \vec{B} par $\overrightarrow{rot} \vec{A}$:

$$\overrightarrow{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad \longrightarrow \quad \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{grad}(V) \quad (II.20)$$

V : potentiel scalaire électrique.

Ces potentiels ne sont pas uniques.

Il est aisi ensuite, en remplaçant J par σE dans l'équation (II-18) d'arriver à l'expression vectorielle condencée du système (II-B) :

$$\overrightarrow{rot} \left[\frac{1}{\mu_0} \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \right] + \sigma \cdot \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{grad}(V) \right] = \vec{J} \tag{II.21}$$

Pour pouvoir résoudre ce système, on rajoute une conduction de jauge qui est la jauge de coulomb :

$$div \vec{A} = 0 \tag{II.22}$$

Cette hypothèse de jauge naturellement vérifiée dans la configuration axisymétrique, assure l'unicité de \vec{A} fixant la valeur de V .

II.4.1. Formulation en coordonnées axisymétriques

Dans une configuration axisymétrique telle que représentée sur la figure II.2, la formulation à l'aide du potentiel vecteur offrent un double intérêt :

- Le système est à une seule inconnue.
- Cette inconnue ne possède qu'une seule composante.

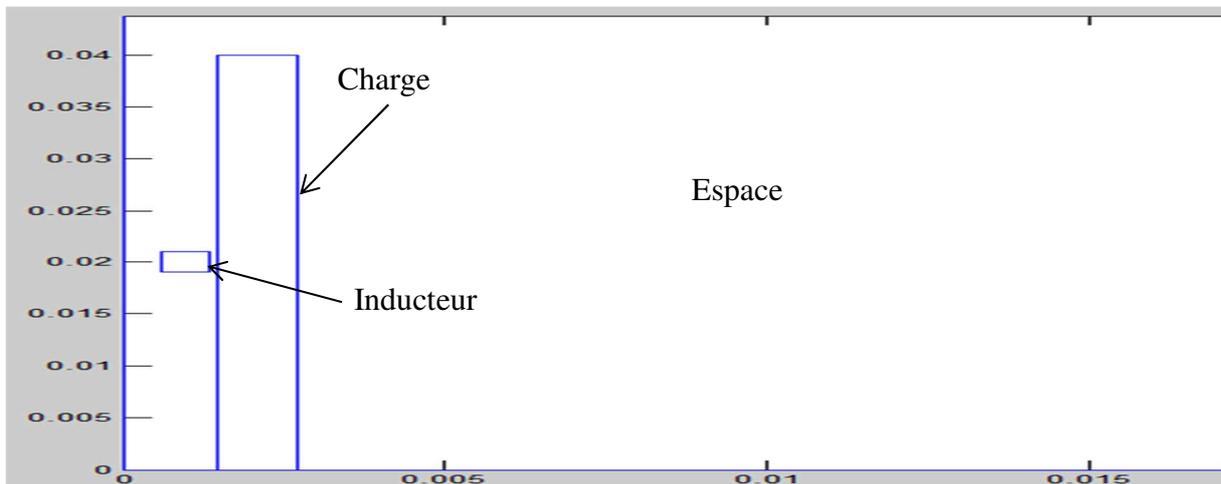


Figure II.02 : Modèle géométrique adapté

Les courant étant perpendiculaires au plan d'étude, les différentes grandeurs ont les composantes suivantes :

$$J \begin{bmatrix} 0 \\ J_\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E \begin{bmatrix} 0 \\ E_\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad A \begin{bmatrix} 0 \\ A_\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B \begin{bmatrix} B_r \\ 0 \\ B_z \end{bmatrix}, \quad H \begin{bmatrix} H_r \\ 0 \\ H_r \end{bmatrix}.$$

Comme A ne possède qu'une seule composante orthoradiale sa divergence est naturellement nulle.

L'équation électromagnétique se réduit donc à l'équation (II-21). En prenant la divergence de chaque membre, cette équation donne :

$$\begin{cases} \operatorname{div} \left[\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}(V) \right] = 0 \\ = \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\sigma) + \sigma \cdot \operatorname{div}[\overrightarrow{\operatorname{grad}}(V)] + \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\sigma) \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}(V) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Le fait que $\sigma = \sigma(r, z)$ implique :

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\sigma) = 0$$

l'équation (II-23) se réduit donc à :

$$\sigma \cdot \operatorname{div}[\overrightarrow{\operatorname{grad}}(V)] + \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\sigma) \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}(V) = 0 \quad (\text{II.24})$$

Pour que cette identité soit vérifiée quel que soit σ , la condition nécessaire et suffisante est que :

$$\overrightarrow{\operatorname{grad}}(V) = 0$$

Ce qui implique : $V = \text{constant}$.

La constante est déterminée classiquement en supposant le potentiel nul à l'infini donc :

$$V = 0.$$

L'équation électromagnétique est donc :

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}}[v \cdot \overrightarrow{\operatorname{rot}}(\vec{A})] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{j} \quad (\text{II.25})$$

$$\text{Où : } v = \frac{1}{\mu_0}$$

Sachant qu'en coordonnées cylindriques, les composantes de $\overrightarrow{\operatorname{rot}}(\vec{A})$ sont :

$$\begin{bmatrix} -\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \\ 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Ce qui est cité en (II-26) réduit la forme vectorielle (II-25) à la relation suivante :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial r A_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \sigma \frac{\partial A_\theta}{\partial t} = J_{S\theta} \quad (\text{II.27})$$

Si nous considérons le potentiel vecteur magnétique modifié A :

$$A = r A_\theta \quad (\text{II.28})$$

Comme inconnue du problème, et si on prend pour la commodité de l'écriture $J_{S\theta} = J_S$,

L'équation (II-27) devient :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial A}{\partial t} = J_S \quad (\text{II.29})$$

Les sources étant sinusoïdales, on peut écrire cette équation à l'aide des grandeurs complexes.

Pour la commodité de l'écriture, on notera, à partir de maintenant, simplement A et J les composantes orthoradiales complexes de A et J .

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} v \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \frac{\sigma}{r} j\omega A = J_S \quad (\text{II.30})$$

Où :

$$A = A_r + A_i ; \quad (\text{II.31})$$

A_r : Partie réelle

A_i : Partie imaginaire

II.4.2. Formulation bidimensionnelle dans un repère cartésien

Dans un système de coordonnées cartésiennes si le champ magnétique évolue dans le plan(x,y) , l'équation (II-25) devient :

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(v\frac{\partial A}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(v\frac{\partial A}{\partial y}\right) + \sigma\frac{\partial A}{\partial t} = J_S \quad (\text{II.32})$$

II.4.3. Conditions aux limites [15]

L'équation (II-25) avec les conditions aux limites permet la détermination du potentiel vecteur local \vec{A} dans son domaine de résolution. Généralement les conditions aux limites peuvent être de types suivant :

1) condition de Dirichlet, la valeur du potentiel vecteur est imposée à la surface du domaine de résolution Γ :

$$A|_{\Gamma} = A_0 \quad (\text{II.33})$$

A titre d'exemple, lorsque le problème possède une géométrie symétrique et les sources de courant sont disposées de manière antisymétrique (figure II-2), on a une condition naturelle de Dirichlet $A|_{\Gamma} = 0$ sur la symétrie.

2) Condition de Neumann, la dérivée du potentiel vecteur par rapport à la normale à la surface Γ est imposée :

$$\left.\frac{\partial A}{\partial n}\right|_{\Gamma} = A_n \quad (\text{II.34})$$

Cette condition est utilisée pour des problèmes qui possèdent une symétrie de la géométrie et de l'excitation de courant $\left(\left.\frac{\partial A}{\partial n}\right|_{\Gamma} = 0\right)$ sur la figure II. 3). Pour une interface avec un matériau de perméabilité infinie, on peut également utiliser cette condition.

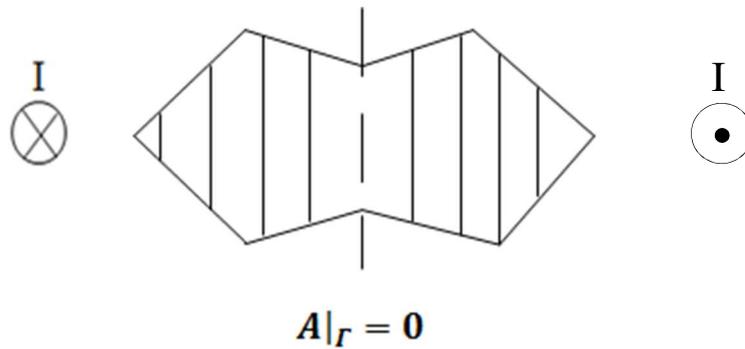


Figure II.03 : Condition aux limites nulle de Dirichlet pour les problèmes possédant une géométrie symétrique et une excitation antisymétrique

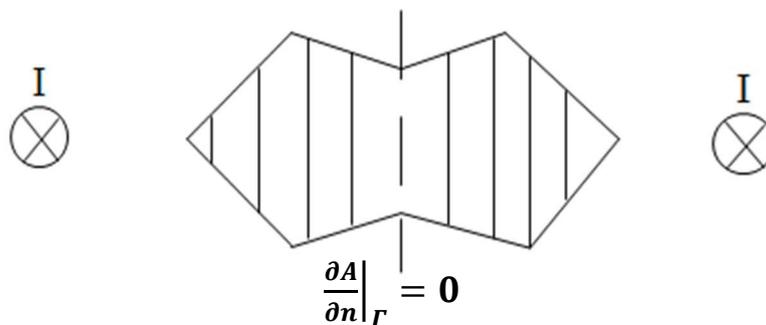


Figure II.04 : Condition aux limites nulle de Neumann pour les problèmes possédant une symétrie de la géométrie et de l'excitation

II.5. Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre, les équations de base de l'électromagnétisme régissant le modèle mathématique. Elles ont été adaptées pour le système cylindrique axisymétrique et pour le système bidimensionnel cartésien. La résolution de l'équation obtenue sera proposée dans le prochain chapitre sachant que le potentiel vecteur magnétique A est choisi comme la variable d'état.

CHAPITRE III

**METHODE DES ELEMENTS FINIS
ET APPLICATION**

III.1. Introduction

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. [16], [17], [18].

Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions.

III.2. Le concept fondamental de la méthode des éléments finis

L'idée fondamentale de la M.E.F. est approximée la quantité continue par un modèle discret.

Le modèle discret est construit comme suit :

- Un nombre fini de points est identifié dans le domaine. Ces points s'appellent les nœuds ;
- Le domaine est divisé à un ensemble des éléments. Ces éléments sont connectés par les nœuds ;
- L'ensemble de tous les éléments doit constituer approximation la forme originale ;
- A chaque élément, est associé un polynôme.

III.3. Etude de la méthode des éléments finis

Elle consiste à remplacer un domaine continu par un nombre de sous domaines où la fonction inconnue recherchée est approximée par des simples fonctions d'interpolation avec des coefficients à déterminer en fonction de l'espace. Le but est de transformer les équations aux dérivées partielles en une formulation intégrale, en éliminant la forme différentielle de l'équation pour faire apparaître un autre système d'équations algébriques après l'utilisation de la méthode des résidus pondérés ou la méthode variationnel. On se limitera, dans ce qui suit à la présentation de la méthode de projection de Galerkin.

III.3.1. Méthode de Galerkin

Cette méthode de traite directement les équations aux dérivées partielles (EDP) sans avoir à passer par un principe variationnel. Elle consiste à projeter l'EDP sur une base de fonctions Ψ_i telle que :

$$\int_{\Omega} EDP \cdot \Psi_i \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{III.01})$$

Ω : Domaine de résolution.

Ψ_i : Fonction de projection ou de pondération.

EDP : toute équation du type $\int u = f$.

Avec

$u(x, y)$: une fonction.

\int : Un opérateur différentiel.

Dans l'EDP, l'inconnue aura été auparavant approchée à l'aide d'une fonction polynomiale qu'on notera α_j telle que :

$$U = \sum \alpha_j \cdot U_j \quad (\text{III.02})$$

U : Inconnue.

U_j : Valeur de l'inconnue au nœud j de l'élément fini.

α_j : Fonctions d'interpolation au nœud j .

Pour le cas axisymétrique $\alpha_j = \alpha_j(r, z)$.

Pour le cas bidimensionnelle des un repère cartésien $\alpha_j = \alpha_j(x, y)$.

La méthode de Galerkin c'est un cas particulier dont les fonctions de projections et les fonctions d'interpolations sont identiques :

$$\alpha_j = \Psi_i \quad (\text{III.03})$$

On notera alors les fonctions d'interpolations et de projections respectivement α_j et α_i avec ($\alpha_i = \alpha_j$).

Nous utiliserons systématiquement cette forme de la méthode projective de Galerkin [19].

III.3.2. Conditions aux limites

Pour qu'un problème soit complètement défini, il faut déterminer la contribution des conditions aux limites sur les frontières Γ du domaine Ω . On distingue essentiellement deux types de conditions aux limites :

1. Dirichlet, ou conditions aux limites essentielles

$$A = 0, \text{ ou } A = A_0$$

2. Neumann, ou conditions aux limites naturelles

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0, \text{ Où } n \text{ est la normal à la frontière.}$$

III.5. Discrimination du domaine [16]

Pour un domaine unidimensionnel qui est en fait une ligne droite ou curviligne, les éléments sont souvent de petits segments interconnectés entre eux pour former tout le domaine. Pour un domaine bidimensionnel, les éléments sont constitués des triangles ou rectangles. Dans le cas de problèmes tridimensionnels, le domaine peut être subdivisé en éléments tétraédriques, prismatiques, hexaédriques. Ces éléments nécessitent une description complète de leurs nœuds.

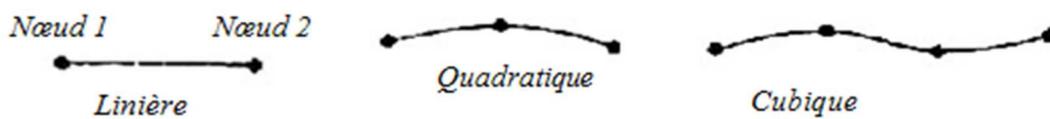


Figure III.01. Elément à une dimension

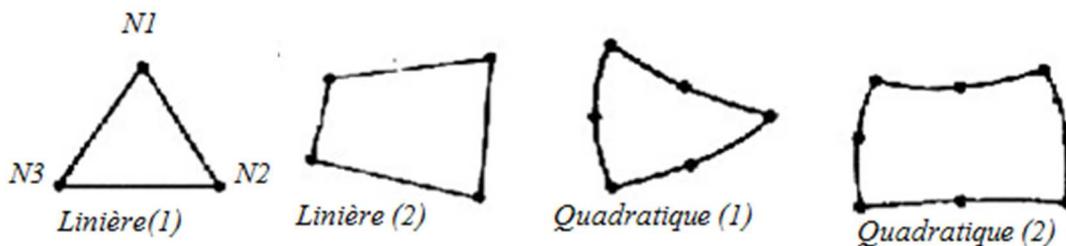


Figure III.02. Eléments finis bidimensionnels

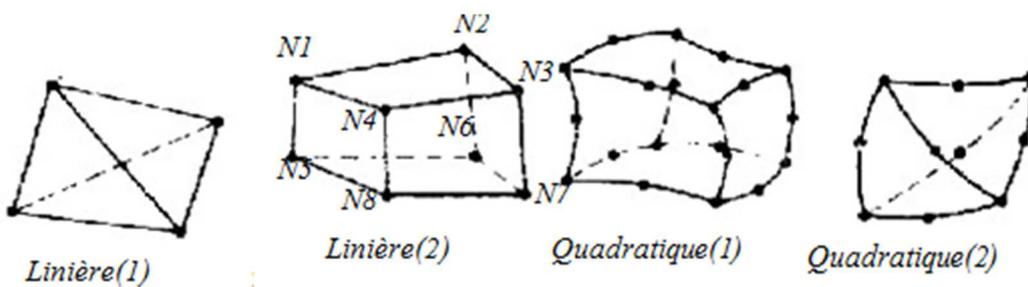


Figure III.03. Eléments finis tridimensionnels

Etant donné que le programme de simulation utilise le calculateur (MATLAB), il fait appel à l'élément triangulaire linéaire.

III.6. Fonction d'interpolation d'un triangle à trois nœuds [16]

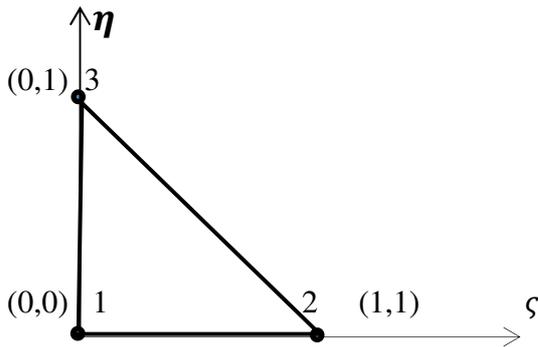


Figure III.04. Espace (η, ζ)

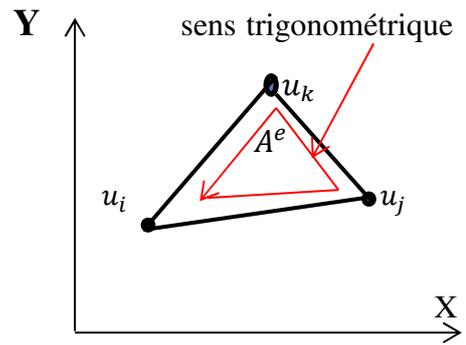


Figure III.05. Espace (x, y)

Figure III.04. Élément de référence ; Figure III.05. Élément réel

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de pascal, donné ci-dessous :

1	→	Ordre 0
$x \quad y$	→	Ordre 1
$x^2 \quad xy \quad y^2$	→	Ordre 2
$x^3 \quad x^2y \quad xy^2 \quad y^3$	→	Ordre 3

Figure III.06. Triangle de Pascal

Dans notre cas la fonction inconnue u à l'intérieur de chaque élément est approchée par le polynôme d'interpolation linéaire suivant :

$$u^e(x, y) = a^e + b^e x + c^e y \tag{III.04}$$

Dans la notation locale des nœuds on notera $i = 1, j = 2$ et $k = 3$. Les valeurs correspondantes de u du chaque élément et dans chaque nœud sont :

$$u_1^e = a^e + b^e x_1^e + c^e y_1^e \tag{III.05}$$

$$u_2^e = a^e + b^e x_2^e + c^e y_2^e \tag{III.06}$$

$$u_3^e = a^e + b^e x_3^e + c^e y_3^e \tag{III.07}$$

Où:

a^e, b^e et c^e Sont des coefficients constants à déterminer et (e) l'indice de l'élément.

x_j^e et y_j^e (j=1, 2,3) représentent les valeurs des coordonnées du $j^{ème}$ nœud dans le $e^{ème}$ élément. La résolution de ce système d'équations permet d'avoir les coefficients a^e, b^e et c^e , lesquels seront remplacés dans l'équation (III.04), l'équation (III.02) devient:

$$U^e(x, y) = \sum \alpha_j^e(x, y) \cdot U_j^e \quad (III.08)$$

Avec

$$\alpha_j^e(x, y) = \frac{1}{2.A^e} (a_j^e + b_j^e x + c_j^e y) \quad j=1, 2,3 \quad (III.09)$$

$$\begin{aligned} a_1^e &= x_2^e y_3^e - y_2^e x_3^e & b_1^e &= y_2^e - y_3^e & c_1^e &= x_3^e - x_2^e \\ a_2^e &= x_3^e y_1^e - y_3^e x_1^e & b_2^e &= y_3^e - y_1^e & c_2^e &= x_1^e - x_3^e \\ a_3^e &= x_1^e y_2^e - y_1^e x_2^e & b_3^e &= y_1^e - y_2^e & c_3^e &= x_2^e - x_1^e \end{aligned}$$

Et :

$$A^e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix} = \frac{1}{2} (b_1^e c_2^e - b_2^e c_1^e), \text{ est l'aire du triangle} \quad (III.10)$$

III.7. Formulation éléments finis de l'équation électromagnétique

III.7.1. Formulation faible

Cette forme est appelée aussi sous des noms divers, forme intégrale ou forme variationnelle.

Rappelons la formulation en coordonnées axisymétriques de l'équation électromagnétique :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J_S \quad (III.11)$$

A est la composante ortho radiale complexe du potentiel magnétique vecteur et J_S celle de la densité de courant imposé dans l'inducteur.

La méthode de Galerkin conduit à l'expression :

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\alpha_i}{r} \left[-\frac{\partial}{\partial r} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) + j\omega\sigma \frac{A}{r} - J \right] \right) d\Omega = 0 \quad (III.12)$$

Avec :

$$d\Omega = 2\pi dr dz$$

Ou encore :

$$-\int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) \right] d\Omega - \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right] d\Omega + \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} j\omega\sigma \frac{A}{r} \right] d\Omega - \int_{\Omega} \left[\frac{\alpha_i}{r} J \right] d\Omega = 0 \quad (III.13)$$

L'intégration par parties des termes comportant des dérivées d'ordre deux génère une forme plus simple. Cette forme comporte des intégrales de frontières qui permettent d'explicitier les conditions aux limites naturelles

$$\left\{ \int_{\Omega} \left[v \frac{\partial \alpha_i}{\partial r} \frac{\partial A}{\partial r} \right] \frac{dr dz}{r} + \int_{\Omega} \left[v \frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} \right] \frac{dr dz}{r} - \left(\int_{\Gamma} \left[v \frac{\partial A}{\partial r} \alpha_i \cos(n, r) \right] \frac{d\Gamma}{r} - \int_{\Gamma} v \frac{\partial A}{\partial z} \alpha_i \cos(n, z) \frac{d\Gamma}{r} \right) \right. \\ \left. + \int_{\Omega} j\omega \sigma \alpha_i A \frac{dr dz}{r} - \int_{\Omega} \alpha_i j \, dr dz = 0 \right. \quad (III.14)$$

$$\left\{ \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial r} \frac{\partial A}{\partial r} \frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} \right] \frac{dr dz}{r} - \left(\int_{\Gamma} \left[\frac{\partial A}{\partial r} \alpha_i \cos(n, r) \right] \frac{d\Gamma}{r} - \int_{\Gamma} v \left[\frac{\partial A}{\partial z} \alpha_i \cos(n, z) \right] \frac{d\Gamma}{r} \right) \right. \\ \left. + \int_{\Omega} j\omega \sigma \alpha_i A \frac{dr dz}{r} - \int_{\Omega} \alpha_i j \, dr dz = 0 \right. \quad (III.15)$$

$\cos(n, r)$ Et $\cos(n, z)$ sont les cosinus directeurs au point considéré de la frontière Γ du domaine de résolution

On peut écrire l'équation (III.11) sous la forme suivante :

$$- \int_{\Omega} [v \text{grad}(\alpha_i) \cdot \text{grad}(A)] \frac{dr dz}{r} - \int_{\Gamma} [(v \text{grad}(A) \cdot n) \alpha_i] \frac{d\Gamma}{r} + \int_{\Omega} [j\omega \sigma \alpha_i A] \frac{dr dz}{r} - \int_{\Omega} [\alpha_i j] \, dr dz = 0 \quad (III.16)$$

n : Vecteur unitaire normal au point considéré de la frontière.

III.8. Introduction des conditions aux limites

Le terme :

$$\int_{\Gamma} [(v \text{grad}(A) \cdot n) \alpha_i] \frac{d\Gamma}{r}$$

Exprime la condition aux limites naturelle de type Neumann sur la frontière Γ .

Dans le cas de conditions de type Dirichlet ($A = C^{te}$), ou de Neumann homogène, le terme sur la frontière s'annule.

III.9. Méthode de résolution

La discrétisation de A à l'aide de polynômes d'ordre 2 selon l'équation (III-2) :

$$A = \sum \alpha_j \cdot U_j$$

Conduit à l'écriture matricielle de l'équation

$$[j\omega[L] + [M]] \cdot [A] = [K_S] \quad (III.17)$$

Avec :

$$L_{ij} = \int_{\Omega} \sigma \alpha_i \alpha_j \frac{1}{r} \, dr dz = \frac{1}{r} \int_{\Omega} \sigma \alpha_i \alpha_j \, dr dz \quad (III.18)$$

$$M_{ij} \int_{\Omega} \text{grad}(\alpha_i) \cdot \text{grad}(\alpha_j) \frac{1}{r} dr dz = \frac{1}{r} \int_{\Omega} \text{grad}(\alpha_i) \cdot \text{grad}(\alpha_j) dr dz \quad (\text{III.19})$$

$$K_i = \int_{\Omega} \alpha_i J dr dz \quad (\text{III.20})$$

Où r : est le rayon dans l'élément.

$\{A\}$ Est le vecteur correspondant aux valeurs du potentiel magnétique modifié aux nœuds du maillage. C'est un complexe qui s'écrit comme suite :

$$A = A^{(r)} + jA^{(i)} \quad (\text{III.21})$$

Tel que :

$$j\omega[L] + [M]\{A^{(r)} + jA^{(i)}\} = \{K\} \quad (\text{III.22})$$

En supposant la densité de la charge d'espace constante à l'intérieur de chaque élément où elle est notée J^e , les équations précédentes peuvent être évaluées analytiquement en se basant sur la formule suivante [17] :

$$\iint_{\Omega^e} (\alpha_1^e)^l (\alpha_2^e)^m (\alpha_3^e)^n dx dy = 2A^e \frac{l!m!n!}{(l+m+n+2)!}, i, j = 1,2,3 \quad (\text{III.23})$$

Ce qui donne :

$$L_{i,j}^e = \frac{A^e}{12}, i, j = 1,2,3 \quad (\text{III.24})$$

$$M_{i,j}^e = \frac{1}{4A^e} (b_i^e b_j^e + c_i^e c_j^e), i, j = 1,2,3 \quad (\text{III.25})$$

$$K_i^e = \frac{A^e}{3} J^e, i, j = 1,2,3 \quad (\text{III.26})$$

III.10. Conclusion

L'objectif des méthodes numériques est de fournir une solution approchée du comportement réel d'un phénomène physique. Le rôle de la modélisation, est de simplifier le problème tout en conservant l'essentiel de la physique à l'origine du phénomène étudié. C'est pour cela qu'on a opté pour la méthode des éléments finis qui donne des résultats satisfaisants.

CHAPITRE IV

SIMULATION ET RESULTATS

IV.1.Introduction

Les dispositifs de contrôle non destructif par courant de Foucault des tubes peuvent se faire soit en utilisant un capteur différentiel ou un capteur absolu.

Dans notre type de control, la bobine d'excitation et la bobine de mesure sont identiques, le capteur est donc absolu de type sonde, ce capteur permet de détecter des anomalies dans des pièces à contrôler en mesurant l'impédance.

La Simulation a pour but de déterminer l'impédance à partir du potentiel vecteur A représentant la solution du modèle électromagnétique pour le cas sans défaut ou avec défaut. L'objectif est de voir l'influence de la conductivité et de la fréquence sur l'impédance Z du capteur pour le cas d'une charge conductrice axisymétrique, et dans le cas d'une structure bidimensionnelle dans un repère cartésien sachant que la charge à contrôler est de type composite. On va s'intéresser à l'étude de l'influence de l'épaisseur de la couche isolante sur l'impédance Z et poursuivre la topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique en présence de cette couche isolante.

Le modèle numérique développé s'appuie sur la méthode des éléments finis pour la résolution du problème électromagnétique sous environnement MATLAB.

IV.2. Calcul d'impédance

Notre objectif dans l'étude du contrôle non destructif par courants de Foucault est le calcul de l'impédance, en effet l'impédance est la variable de sortie d'un modèle d'inspection par courant de Foucault car il s'agit de la qualité expérimentale utilisée pour l'évaluation de l'intégrité des matériaux. Pour le cas du problème étudié. La tension induite V au borne d'une spire de l'inducteur est donnée par :

$$V = j\omega \int_l A dl \quad (\text{IV.01})$$

L'impédance Z peut s'écrire alors comme suit :

$$Z = \frac{j\omega N}{I} \int_l A dl \quad (\text{IV.02})$$

N : nombre de spire au niveau du capteur.

I : courant d'excitation imposé.

A : potentiel vecteur électromagnétique.

ω : pulsation propre.

IV.3. Application du CND par CF pour le cas d'une pièce conductrice

➤ **1^{er}** Cas sans défaut :

Il s'agit d'un capteur sonde à excitation courant plonge dans un tube qui a une paroi conductrice qui ne comporte pas de défaut

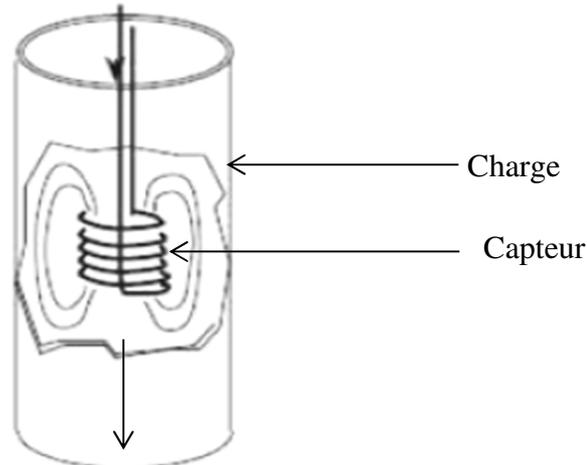


Figure.IV.01. la géométrie étudiée

a) Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du dispositif

➤ **Le capteur**

Nombre de spires : 70

Hauteur : $2 \cdot 10^{-3} m$

Largeur : $0.75 \cdot 10^{-3} m$

Conductivité électrique : $59.610^6 (\Omega m)^{-1}$

Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^{-7} (H/m)$

Le capteur est parcouru par un courant d'amplitude de $20 \cdot 10^{-3} A$

➤ **La charge**

Type : Alliage d'Aluminium ALcu4Mgsi (non magnétique)

Rayon intérieur : $9.8410^{-3} m$

Hauteur : $4010^{-3} m$

Epaisseur : $1.2710^{-3} m$

Conductivité électrique : $20 \cdot 10^6 (\Omega m)^{-1}$

Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^{-7} (H/M)$

➤ **L'air**

Conductivité électrique : $0(\Omega m)^{-1}$

Perméabilité magnétique : $4\pi 10^{-7}(H/M)$

b) Domaine d'étude axisymétrique

Vue la symétrie axial le domaine de resolution se reduit a la moitié du domaine le capteur et la pièce ci controler sont présenté dand la figure IV.2.

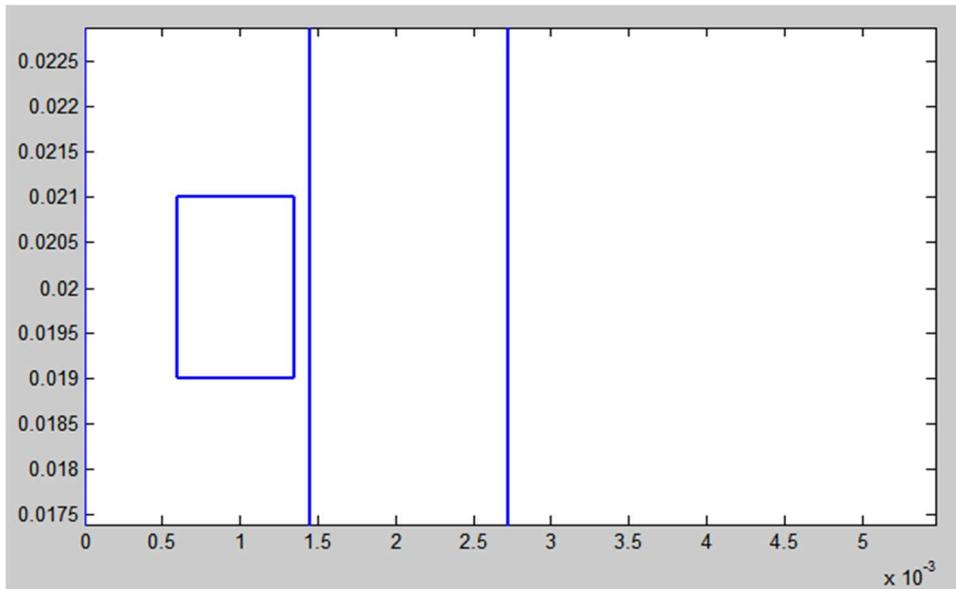


Figure IV.02. Géométrie du modèle par MEF

c) Maillage du domaine

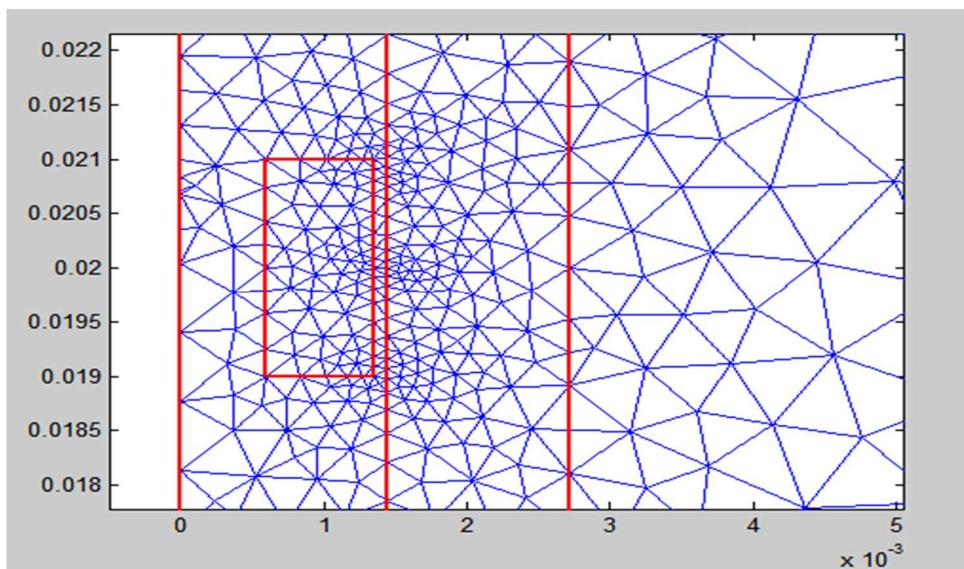


Figure IV.03. Maillage du modèle par MEF

d) distribution des Lignes du champ dans le domaine

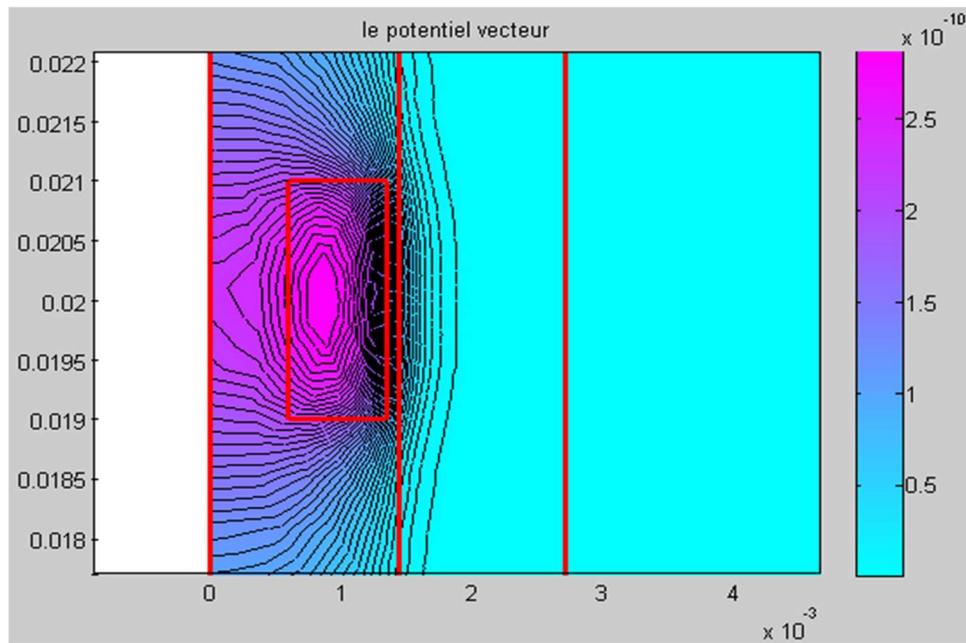


Figure IV.04. Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique

c) Résultats et interprétations

Pour valider les résultats des tests effectués par la méthode des éléments finis sur le dispositif avancé précédemment, les résultats numériques obtenus sont confrontés rapport à ceux calculés par la méthode des circuits couplés [7]. Nous obtenons les résultats des deux méthodes regroupés dans le tableau ci-dessous :

Fréquence standards		100KHz	240KHz	500KHz
MCC	R(Ω)	31.534	48.079	71.571
	X(Ω)	64.200	125.172	232.322
MEF	R(Ω)	20.959	34.042	50.816
	X(Ω)	68.559	144.78	278.06
$\Delta R(\Omega) \%$		33.53	29.19	28.99
$\Delta X(\Omega) \%$		6.78	15.66	19.68

Tab IV.01. Variation de la résistance et de l'inductance en fonction de la fréquence

Les résultats présentés dans le Tab IV.01, montrent que le modèle développé peut s'appliquer pour traiter un problème du CND par CF pour le cas d'une pièce conductrice.

➤ 2^{eme} Cas avec défaut :

a) Description de la simulation avec un défaut interne

Nous présentons, dans ce qui suit, les résultats de simulation, par la méthode des éléments finis, du contrôle non destructif d'un tube qui présente des défauts axisymétriques interne.

Pour une fréquence d'alimentation et d'un lift off fixe respectivement 500KHz et 0.1 mm, le capteur se place face au défaut pour les deux cas :

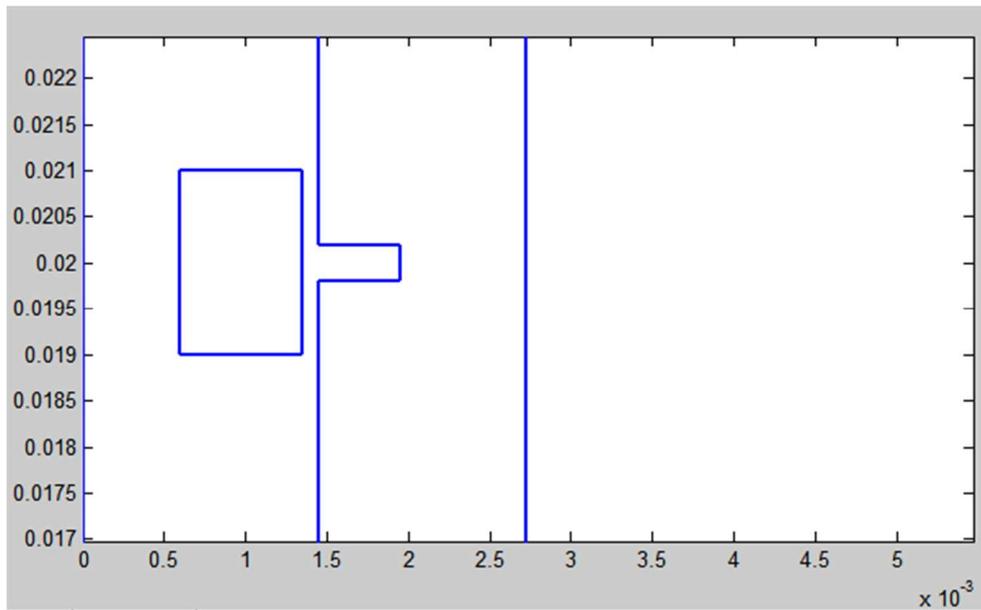


Figure IV.05. Géométrie du modèle avec défaut interne par la MEF

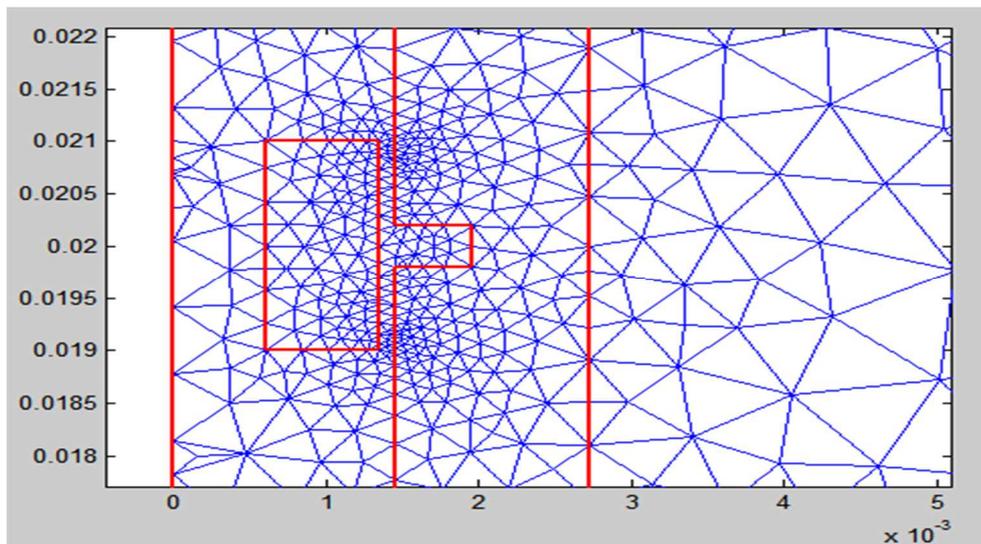


Figure IV.06. Maillage du domaine avec défaut interne par MEF

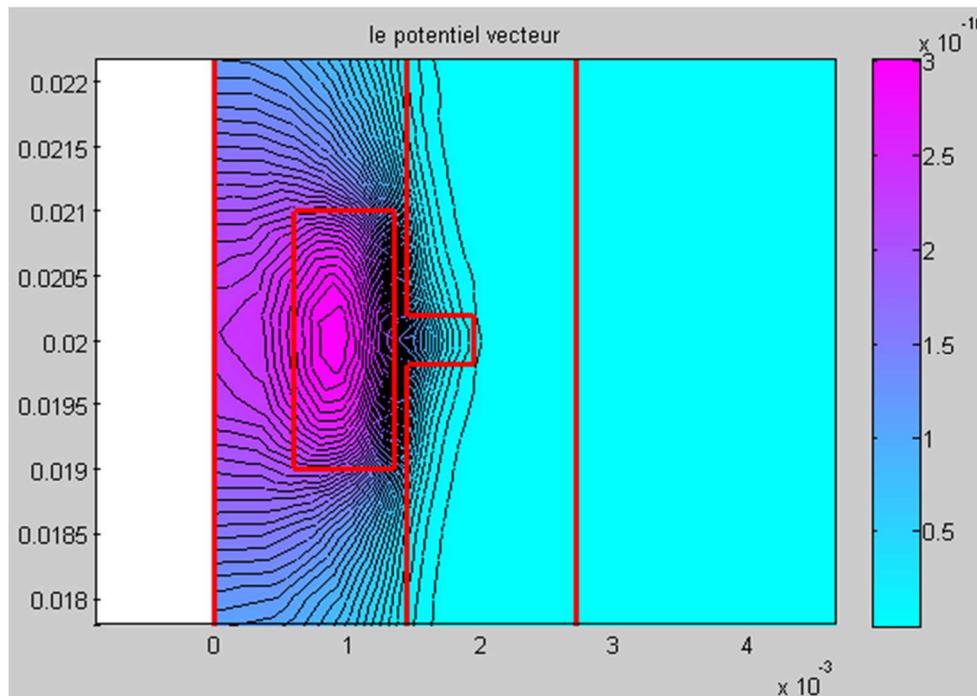


Figure IV.07. Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique avec défaut interne

Tableau des résultats :

$f=500\text{KHz}$, lift off=0.1 mm, $h_d = 0.3875\text{mm}$, variation de la profondeur du défaut interne P mm :

P (mm)	0.1	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.6
R(Ω)	50.867	51.682	52.496	53.006	53.509	53.861	54.11	54.116	53.987	53.94	53.835
X(Ω)	287.26	289.48	290.68	291.31	291.59	291.64	292.57	292.31	291.22	291.33	291.29
$\Delta R(\Omega)$	-0.100	-1.704	-3.36	-4.309	-5.299	-5.992	-6.482	-6.494	-6.240	-6.147	-5.941
$\Delta X(\Omega)$	-3.319	-4.107	-4.538	-4.765	-4.865	-4.883	-5.218	-5.124	-4.732	-4.772	-4.757

Tab IV.02. Variation de la résistance et de l'inductance en fonction de la profondeur p défaut interne

Traduire les résultats du tableau par des courbes :

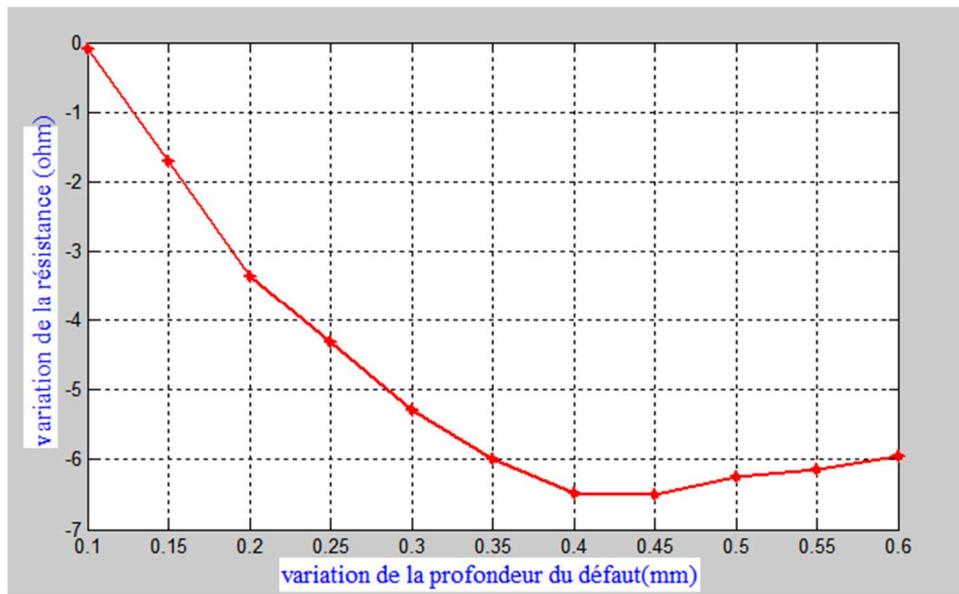


Figure IV.08. Variation de ΔR en fonction de la profondeur P du défaut

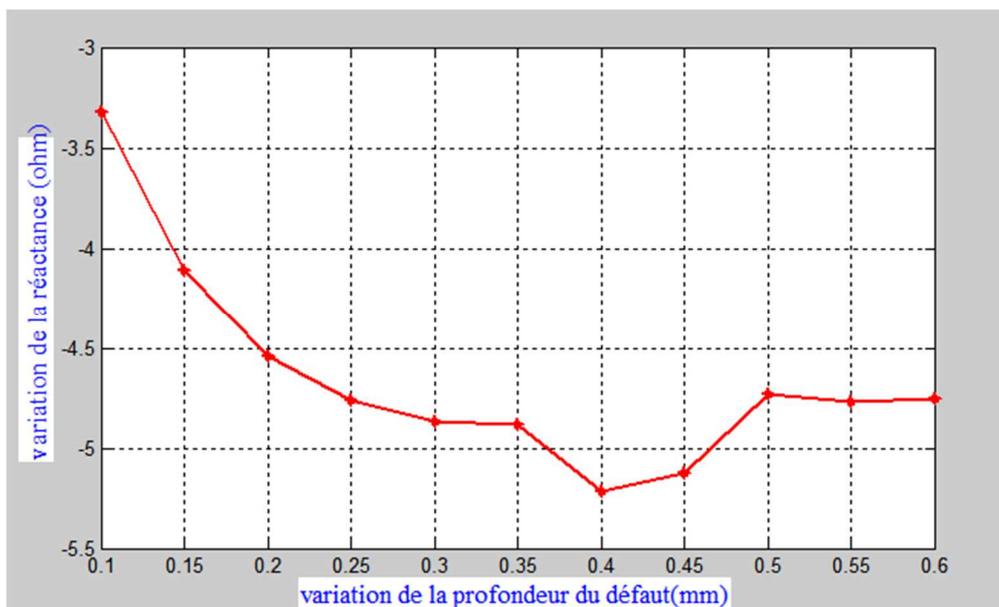


Figure IV.09. Variation de ΔX en fonction de la profondeur P du défaut

b) Commentaires et analyses

Les résultats des figures IV.08 et IV.09 montrent que la résistance et la réactance de la pièce avec défaut est plus grande que celles de la pièce sans défaut. Cette augmentation de l'impédance peut être expliquée par le fait que plus la profondeur du défaut augmente plus sa taille augmente, plus la trajectoire des courants induits est fortement altérée, et cela conduit à l'augmentation de la résistance, et le courant induit qui s'oppose à la cause qui lui a donné naissance diminue, ce qui provoque l'augmentation de la réactance et de la résistance qui sont inversement proportionnelles au courant.

La variation de la résistance et de la réactance sont irrégulières à partir de la profondeur 0.4 mm, ceci peut être expliqué par la fréquence imposée 500 KHz qui font que les courants induits sont concentrés sur la surface qui devient plus sensibles à la présence d'un défaut surfacique.

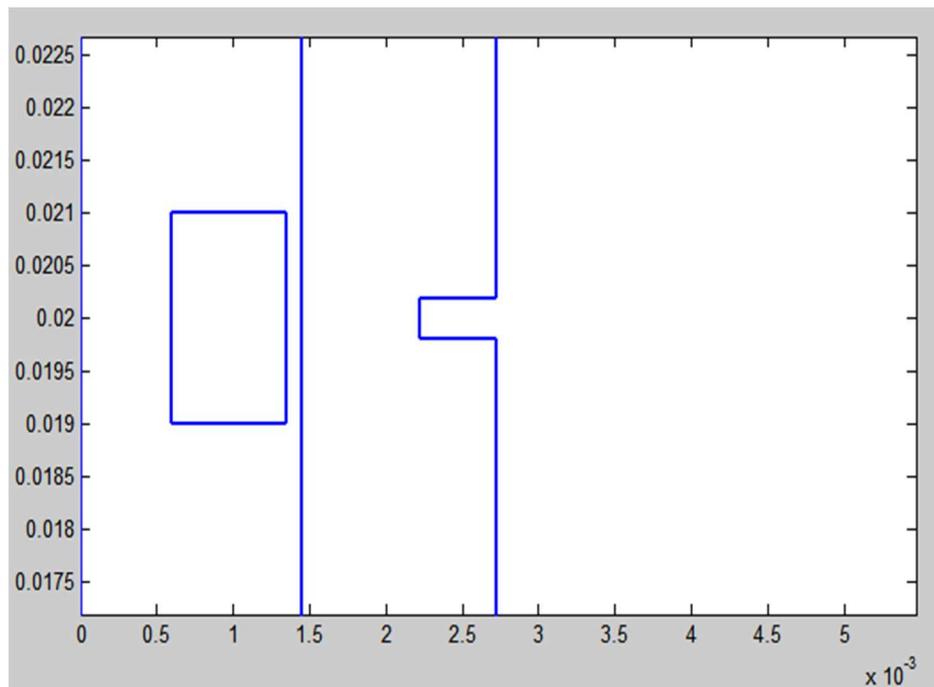
c) Description de la simulation avec un défaut externe

Figure IV.10. Géométrie du modèle avec défaut externe par la MEF

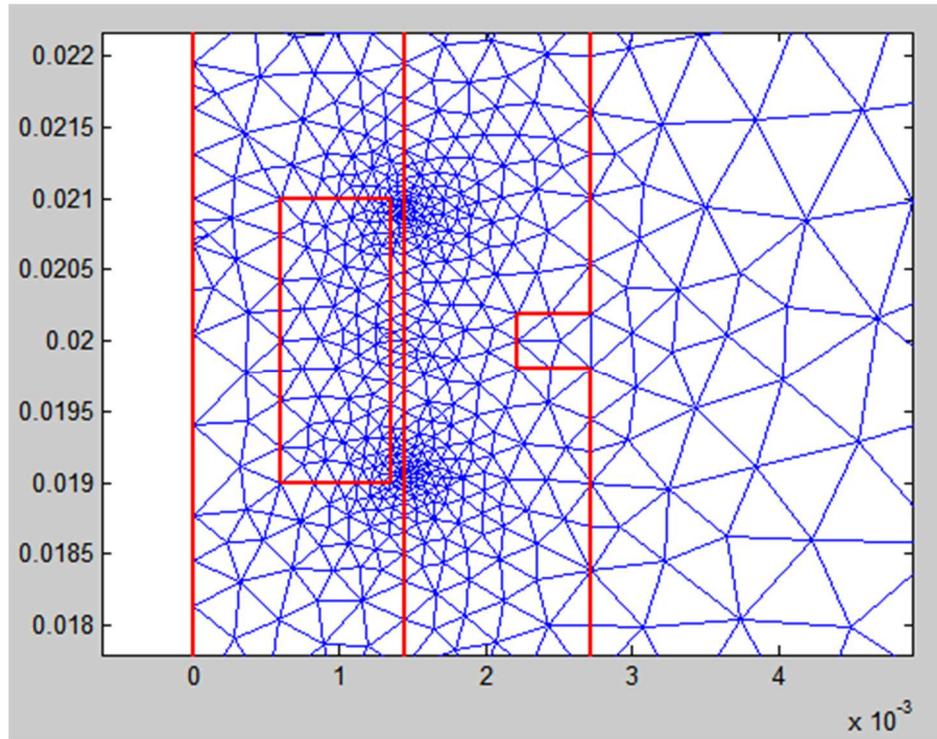


Figure IV.11. Maillage du domaine avec défaut externe par MEF

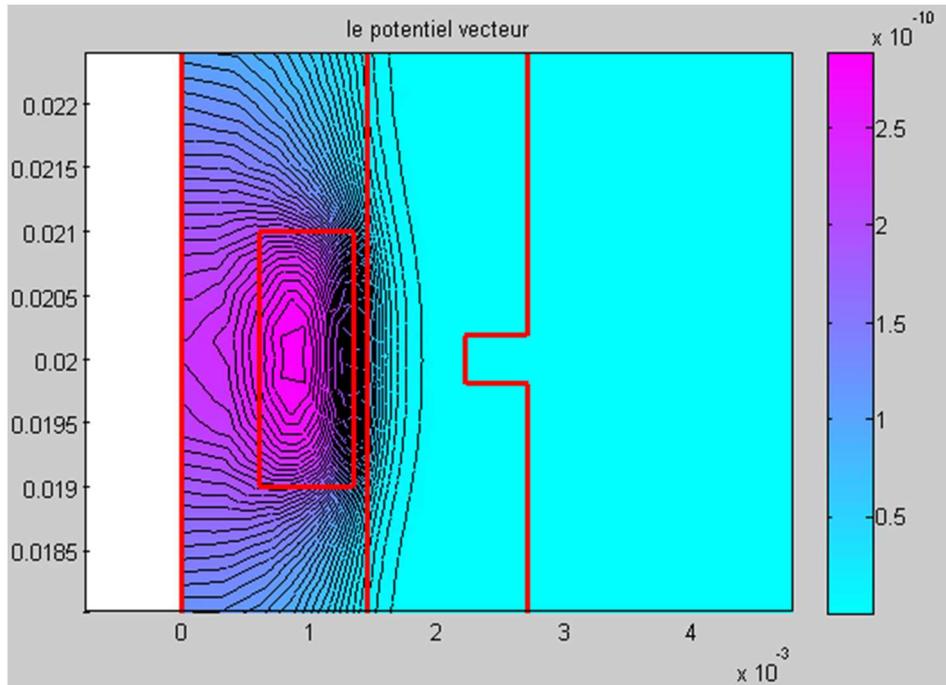


Figure IV.12. Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique avec défaut externe

Les résultats de la résistance et la réactance en fonction de la profondeur sont regroupés dans le tableau suivant :

$f=500\text{KHz}$, lift off=0.1 mm, $h_d = 0.3875\text{mm}$, variation de la profondeur du défaut externe P mm :

P (mm)	0.1	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.6
R(Ω)	50.41	50.428	50.342	50.444	50.552	50.451	50.147	50.09	50.26	50.246	50.702
X(Ω)	279.84	279.69	279.44	278.9	280.13	279.45	278.01	278.09	278.05	278.02	280.27
$\Delta R(\Omega)$	0.798	0.763	0.932	0.732	0.519	0.718	1.316	1.428	1.094	1.121	0.224
$\Delta X(\Omega)$	-0.640	-0.586	-0.496	-0.302	-0.744	-0.499	-0.014	-0.010	0.003	0.014	-0.794

Tab IV.03. Variation de la résistance et de l'inductance en fonction de la profondeur défaut externe

D'après le Tab IV.03, on remarque que la résistance augmente lorsque la profondeur P augmente. Par contre la réactance diminue moyennement avec la profondeur du défaut P. Ceci est en accord avec les résultats trouvés pour le cas d'un défaut interne.

d) Comparaisons des topologies des lignes du potentiel vecteur magnétique en fonction de la fréquence

Pour différentes fréquences d'alimentations standards du CND par courant de Foucault, on obtient les différentes distributions des lignes du champ :

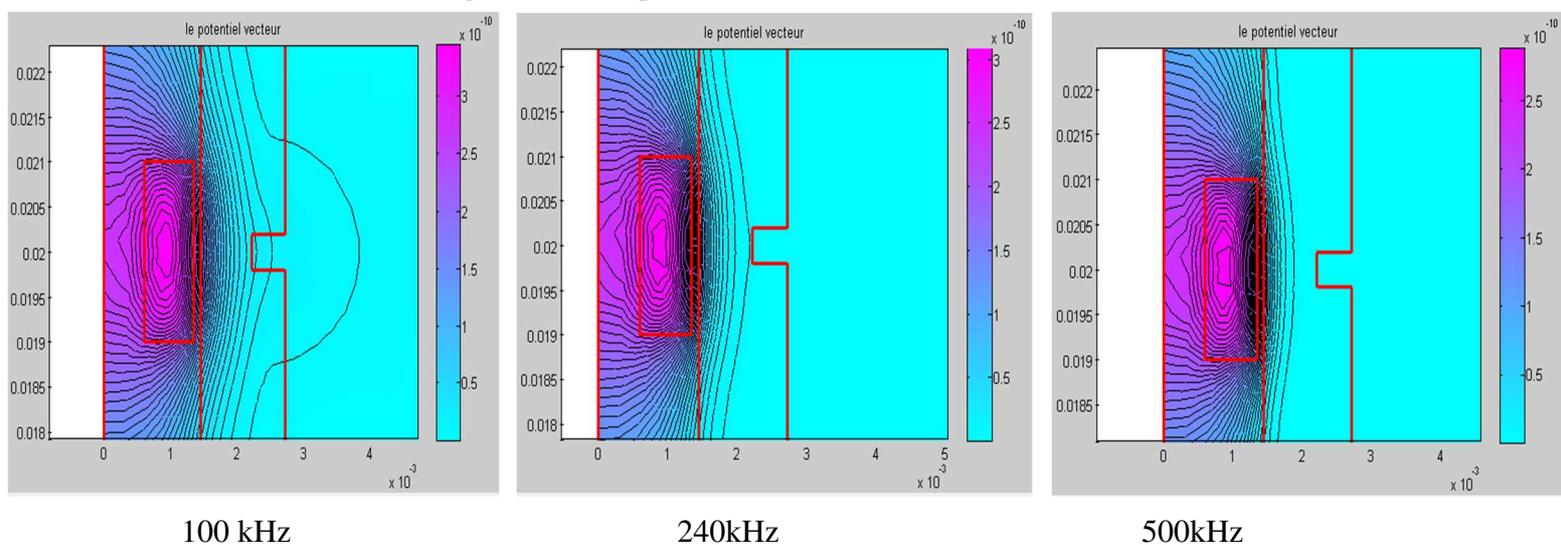


Figure IV.13. Variation des lignes du champ en fonction de la fréquence.

Sur la figure IV.13, on observe bien l'effet de la fréquence sur la profondeur de pénétration δ des lignes du champ magnétique en effet lorsque la fréquence augmente δ diminue.

e) Influence de la conductivité sur l'impédance

Le matériau Alliage d'Aluminium d'une conductivité de $20 \cdot 10^6 \text{ } (\Omega^{-1}m^{-1})$ est remplacé par l'Acier Inoxydable Austénitique ayant une conductivité de $1.41 \cdot 10^6 \text{ } (\Omega^{-1}m^{-1})$ et un Matériau X d'une conductivité de $10^{10} \text{ } (\Omega^{-1}m^{-1})$. On notera la variation d'impédance pour les fréquences standards du CND dans le tableau suivant :

La variation d'impédance pour les fréquences standards du CND dans le tableau suivant:

Fréquence KHz	100	240	500
Alliage d'Aluminium	$20.9592+68.5591i$	$34.042+144.78i$	$50.816+278.06i$
l'Acier Inoxydable	$70.666+115.41i$	$102.84+229.65i$	$158.34+418.94i$
Matériau X	$0.9028+45.4684i$	$1.0061+108.67i$	$1.0333+226.18i$

Tab IV.04. Variation de l'impédance Z de différents matériaux en fonction de la fréquence.

Ici l'impédance augmente considérablement avec la diminution de la conductivité. Pour le cas du matériau X ayant une conductivité d'une valeur assez grande, la valeur de la réactance reste presque constante mais la résistance tend vers zéro comme il est indiqué dans la **Figure I.11**.

IV.4. Application du CND pour le cas des pièces isolantes

Le modèle développé est destiné pour l'appliquer au d'une pièce en composite. Ce modèle est d'abord validé par une étude du contrôle appliquée pour le cas d'un défaut de forme apparaissant sur une tôle métallique en aluminium. Après une opération de formage de cette dernière sur une pièce en ferrite, un entrefer résulte entre ces deux pièces.

Un traitement par le contrôle non destructif par courants de Foucault peut nous renseigner sur ce défaut. Un capteur en cuivre de conductivité 19MSm^{-1} et comportant 45 spires est placé entre les deux pièces et se déplace selon la hauteur de l'entrefer. Le rayon intérieur est de 0.6mm et le rayon extérieur est de 9.95mm. Le courant d'excitation est de 20 mA sous une fréquence de 500 kHz.

Le système étudié est axisymétrique, ce qui réduit le domaine de résolution vers la moitié (figure IV.14). L'impédance vue par le capteur est calculée pour chaque pas de déplacement le long de l'entrefer.

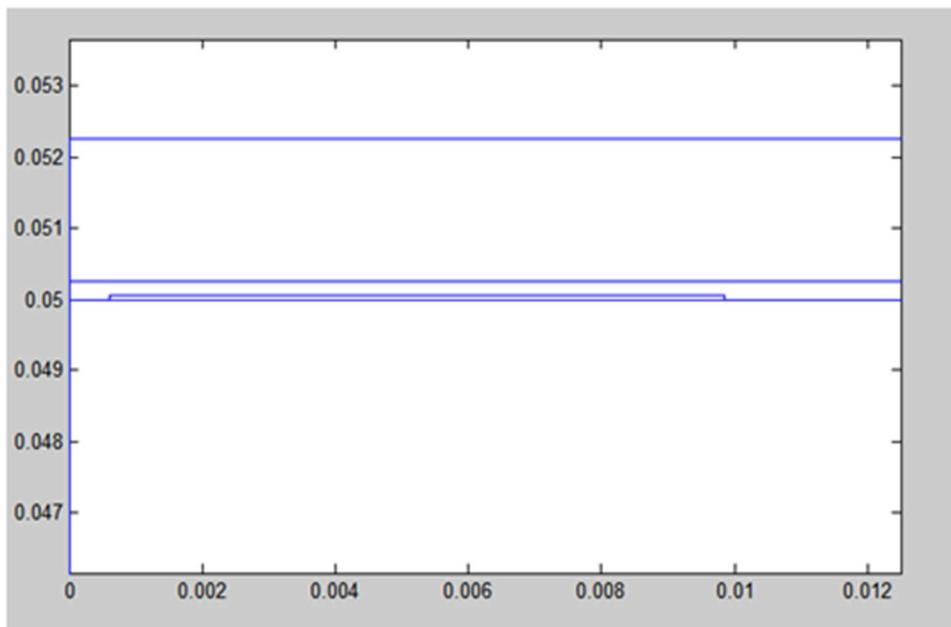


Figure IV.14. Géométrie du modèle par MEF

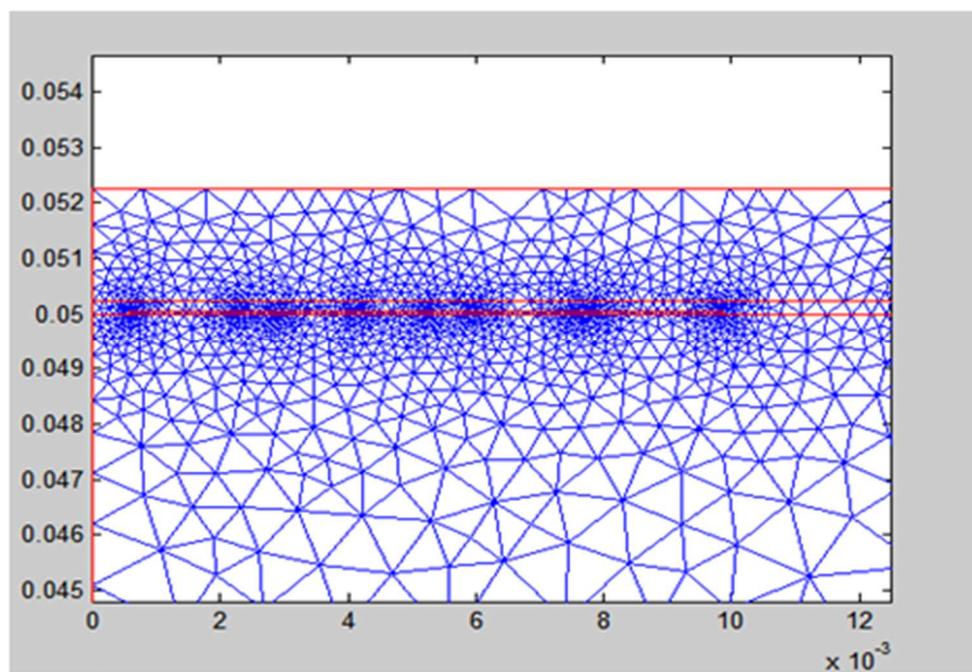


Figure IV.15. Maillage du domaine par MEF

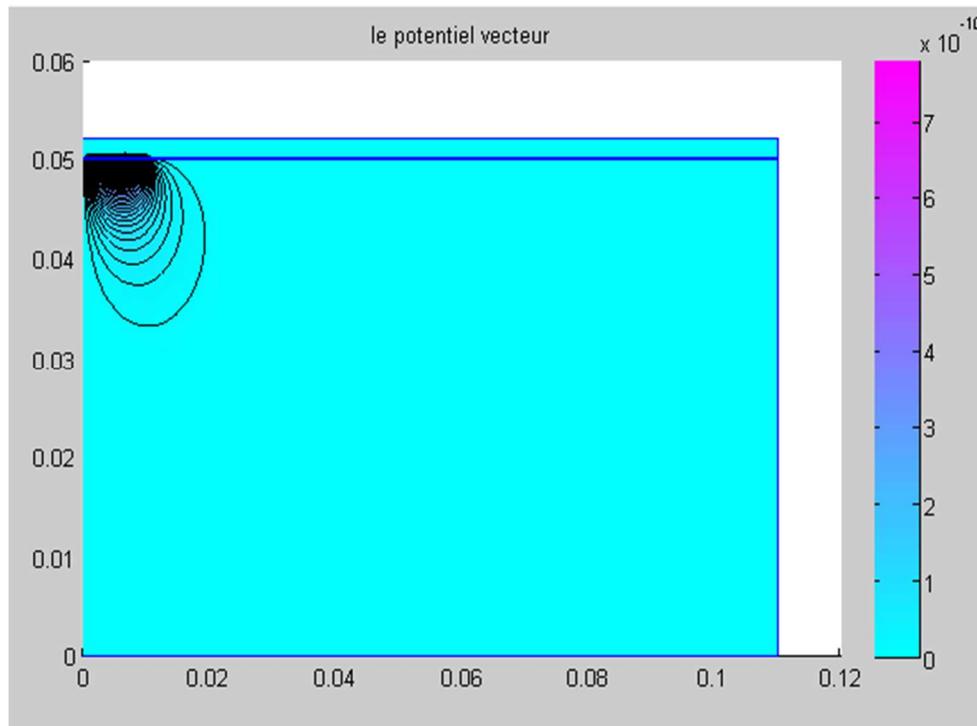


Figure IV.16. Distribution des lignes du potentiel vecteur magnétique A sur le domaine

Sur le tableau IV.05, est présentée la variation de l'impédance en fonction de l'entrefer dans le cas du modèle proposé et dans le cas de la simulation sous Matlab. En comparant entre les résultats, nous constatons une bonne corrélation entre les résultats obtenus et ceux de la simulation MESSINE, ce qui nous permet de valider notre modèle.

Entrefer (mm)	0.1mm	1mm	2mm	3mm
Z (Ω) sous Messine	1.897+5.107i	1.08+21.34i	0.624+31.73i	0.3767+37.87i
Z (Ω) du modèle	1.961+5.144i	1.20+21.22i	0.693+31.53i	0.41 +37.68i

Tab IV.05. Comparaison de l'impédance du modèle et Messine pour différents entrefers

L'impédance calculée dans le cas du modèle proposé, pour un déplacement du capteur le long de l'entrefer situé entre les deux pièces est montrée sur la **Figure IV.17.** Et la **Figure IV.18.**

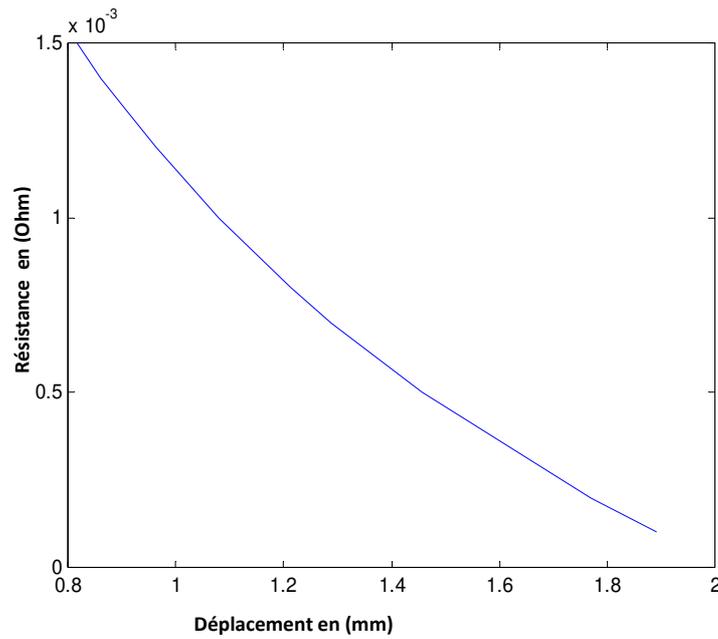


Figure IV.17. Résistance du capteur en fonction du déplacement

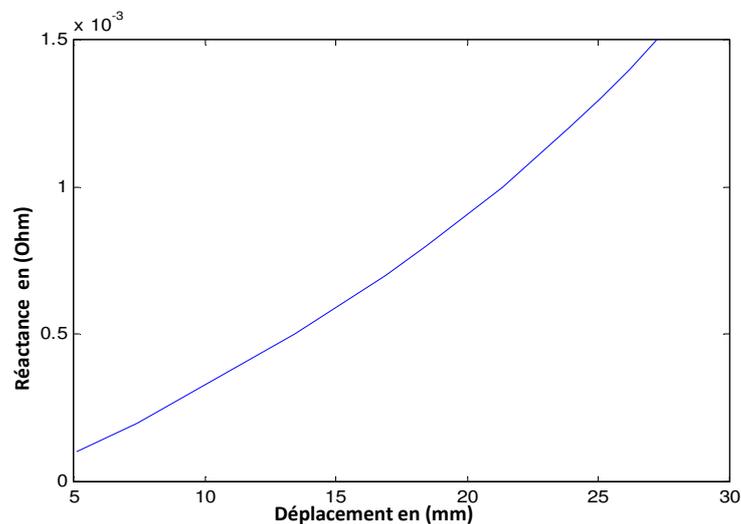


Figure IV.18. Réactance du capteur en fonction du déplacement

Les résultats des figures IV.17 et IV.18 expliquent que la diminution de la résistance est liée à la réduction de l'effet de Lenz provoqué par l'éloignement du capteur. Quant à l'augmentation de la réactance, celle-ci est conséquence de l'augmentation de la réaction propre à la bobine.

Comparons l'influence de la fréquence sur l'impédance Z à des résultats obtenus expérimentalement :

	Fréquence (HZ)	5,00E+05	5,00E+06	5,00E+07	5,00E+08
MEF	R(Ω)	1.8479	6.3220	15.864	20.233
	X(Ω)	7.4700	60.3426	559.02	5543.4
ME	R(Ω)	1.840	6.4714	16.512	21.242
	X(Ω)	7.43	60.5198	559.36	5543.5
	ΔR (Ω)	0.4293	1.9996	3.9244	4.7500
	ΔX (Ω)	0.5383	0.2927	0.06078	0.0018

Tab IV.06. Variation de la résistance et de l'inductance en fonction de la fréquence avec deux Méthodes MEF et ME.

D'après ce tableau, on peut dire que les résultats expérimentaux et ceux calculés selon le modèle développé sont en concordance.

IV.4.1. Description du Dispositif d'étude

Application pour le cas d'un matériau composite :

Le capteur est placé entre deux pièces, il est de rayon interne de 0.6 mm et un autre externe de 0.05 mm

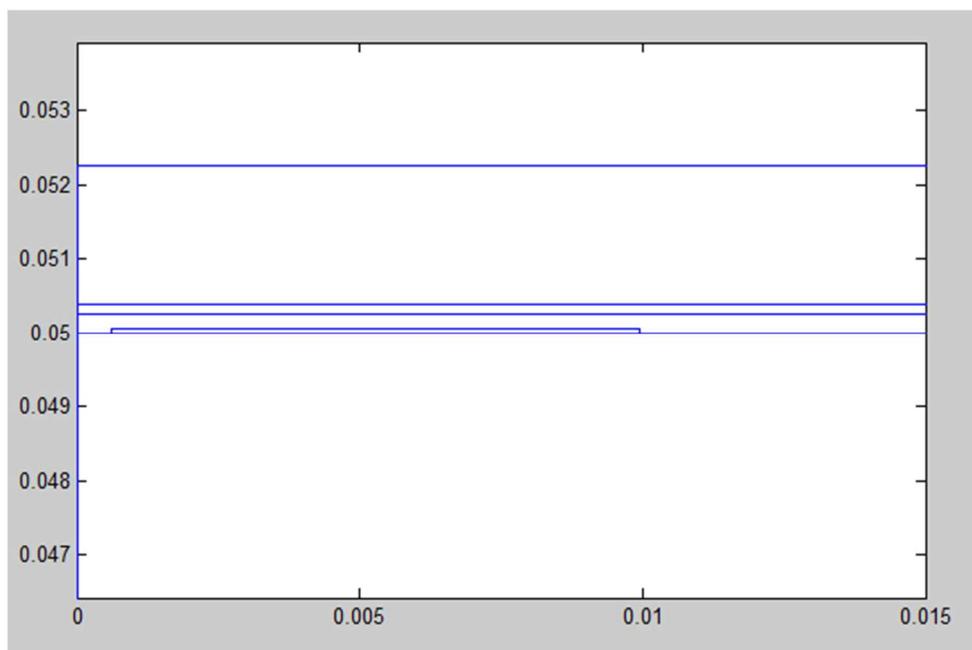


Figure IV.19. Géométrie du modèle composite par MEF

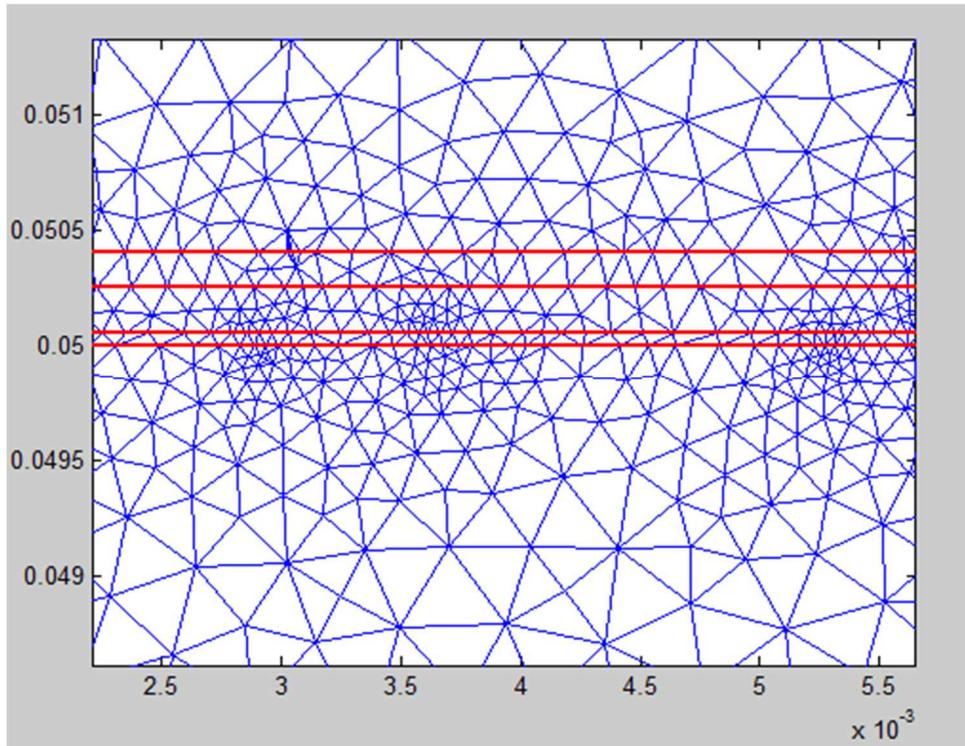


Figure IV.20. Maillage du domaine par MEF

Après la validation de notre programme, on a considéré le cas d'un dispositif composite qui comporte une seule couche isolante, pour un premier temps, on fixe la fréquence à 500 KHz et on varie l'épaisseur de la couche; pour un deuxième cas, on fixe l'épaisseur à 0.05 mm les résultats sont dressés respectivement ci-dessous:

e (mm)	0.02	0.04	0.05	0.08	0.1	0.15
R(Ω)	1.7571	1.7534	1.7364	1.7494	1.7481	1.6852
X(Ω)	7.8142	8.2271	8.4424	9.0111	9.3314	10.4365

Tab IV.07. Variation de la résistance et de l'inductance en fonction de la profondeur.

Fréquence (Hz)	5,00E+06	5,00E+07	5,00E+08	5,00E+09	5,00E+10
R(Ω)	6.1076	14.803	18.565	19.476	27.409
X(Ω)	71.3424	671.9	667.77	67170	650150

Tab IV.08. Variation de la résistance et de l'inductance en fonction de la fréquence

IV.4.2. Interprétation des résultats

Pour le cas de **Tab IV.07**. Et le cas de **Tab IV.08**. C'est le même phénomène qui se produit, la résistance diminue et la réactance augmente par rapport à celle calculée par MEF, cette variation se traduit par le fait que la couche isolante présente un écran devant le flux magnétique, c'est pourquoi la réactance augmente et la résistance diminue.

Distribution des lignes du champ :

➤ Pour le premier cas **Tab IV.07**.

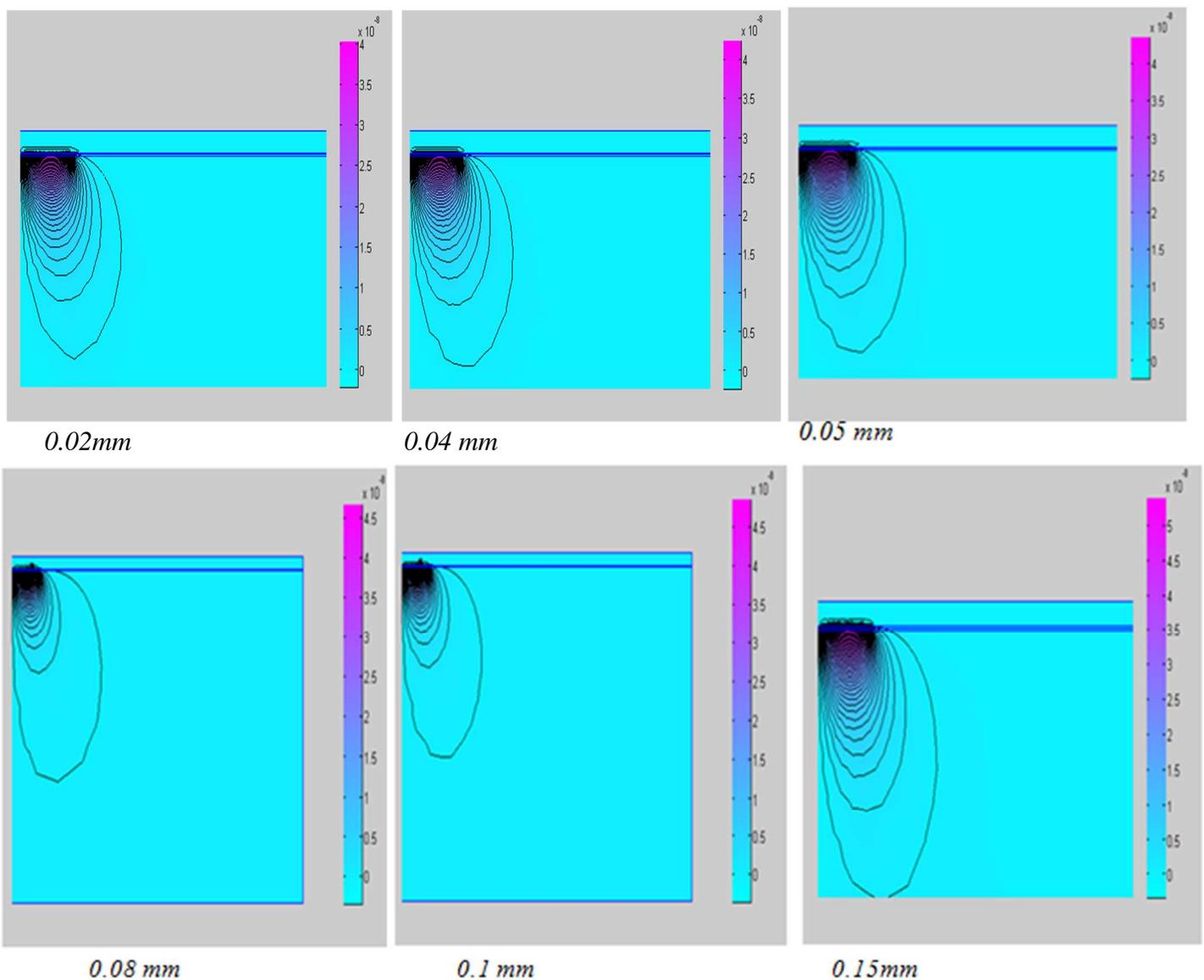


Figure IV.21. Topologie des lignes du potentiel vecteur magnétique en fonction de l'épaisseur d'isolant

IV.5. Conclusion

A travers les résultats obtenus, nous concluons, que la grandeur électromagnétique Z qui se compose de la partie réelle qui est la résistance R et d'une partie imaginaire constituant la réactance X , peut détecter ou signaler un défaut par la variation de ces deux composantes. Cette variation dépend de plusieurs paramètres comme la fréquence d'alimentation qui agit sur la profondeur de la pénétration, autrement dit l'effet de peau, et la valeur de la conductivité qui influence sur la résistance. Pour des valeurs élevées de la conductivité, la résistance tend vers zéro, et pour des faibles valeurs de celle-ci l'impédance Z augmente considérablement.

On peut constater que pour détecter un défaut externe on doit choisir des faibles fréquences pour le cas composite, on doit augmenter relativement l'échelle de la fréquence.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Avant d'aborder les objectifs de notre étude, nous avons jugé utile, à travers une recherche bibliographique, de rappeler et de synthétiser les éléments constituant les dispositifs du CND, et un rappel est consacré aux équations de Maxwell et à la méthode numérique utilisée.

Le phénomène moteur du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault est l'induction électromagnétique. La modélisation numérique de ce phénomène, qui régit par des équations aux dérivées partielles, elles sont formulées à l'aide de différentes variables d'état.

La méthode numérique utilisée et celle de la méthode des éléments finis, qui présente un avantage de fournir une solution approchée du comportement réel d'un phénomène physique.

L'objectif à atteindre à travers ce travail, c'est de voir les différents paramètres influents sur la variation de l'impédance Z calculer aux bornes du capteur à l'aide du potentiel vecteur A . Pour cela nous avons sélectionné, un capteur de type absolu à excitation courant. Pour la cible, elle peut être de type pancake ou cylindrique.

Dans le but de généraliser dans une géométrie cylindrique axisymétrique, nous avons, dans un premier temps, étudié pour un matériau conducteur l'influence de la variation de la profondeur d'un défaut interne et externe sur la résistance R et la réactance X et on n'a vu l'influence de la fréquence sur la pénétration des courants de Foucault, et pour un deuxième temps la variation de l'impédance par rapport à la conductivité de la pièce.

Dans le cas pancake axisymétrique aussi, nous avons, dans un premier temps, étudié pour un matériau conducteur la variation de l'impédance en fonction de l'entrefer et pour un deuxième temps on a présence une pièce en matériau composite, on a étudié l'influence de l'épaisseur de la couche insolente sur la variation de l'impédance et les lignes du potentiel vecteur magnétique.

En termes des perspectives, il pourrait être intéressant de développer des éléments finis 3D afin de modéliser des structures ayant des formes plus complexe.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Ala-Eddine Lakhdari « Etude et modélisation de capteurs en CND par courant de Foucault : application à la détection des fissures », thèse de magistère en génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra.2011.
- [2] Bernard Chalmond « Diagnostic et évaluation des systèmes de production : Contrôle Non-Destructif », Cachan 1999, révisé 2003.
- [3] Monsieur Yohan le Diraison « Imagerie à courants de Foucault pour l'évaluation Non-destructif de structures rivetées aéronautiques », Thèse de doctorat en électronique-électrotechnique-automatique de l'école normale supérieure de Cachan 2008.
- [4] Nabil Benhadda « Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault », Mémoire de Magistère En Electrotechnique, Ingénieur en Electrotechnique - Université de Batna. 2006
- [5] Karima Alitouch et Assia Haddar « Modélisation électromagnétique du contrôle non destructif par courant de Foucault à capteur équipé de noyon magnétique » PFE en électrotechnique.2006.
- [6] Ali Raid « Contrôle non destructif ressuage, magnétoscopie, radiographie, courant de Foucault et ultrason ».2017-2018.
- [7] Namir Yessad et Abdellah « Etude, par la méthode des éléments finis, du contrôle non destructif par courants de Foucault à capteur absolu des pièces conductrices linéaire », Mémoire master en machine électrique-promotion 2005.
- [8] M. J. Pelletier (snapa) « Contrôle non destructif du matériel tubulaire » , Edition technique. 27 rue Ginoux. 75737 paris cedex 15.1975.
- [9] Site internet, " courant de Foucault ", www.epsic.ch. Visité le 22/06/2018
- [10] Gilles Corneloup et Cécile Gueudré « Le contrôle non destructif et la contrôlabilité des matériaux et structures » Presses polytechnique et universitaires romandes.2016.
- [11] Mr. Bachir Maouche « Elaboration de modèles couplés basés sur la méthode des moments pour la modélisation de structures électromagnétiques - Application à l'étude du Contrôle Non Destructif par Induction », thèse doctorat en électrotechnique-Bejaia.2009.
- [12] Bidjan Haghi-Ashtiani « Méthodes d'assemblage rapide et de résolution itérative pour un solveur adaptatif en équations intégrales de frontières destiné à l'électromagnétisme », thèse doctorat en Génie Electrique, Électronique, Électrotechnique, Automatique, l'école doctorale de lion.1998.
- [13] Mme ZERGUINI SAKINA « Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault », thèse doctorat en science, Université de Constantine.

Bibliographie

- [14] M. Mohamed Rachid Mekideche « Contrôle à la modélisation numérique de torches à plasma d'induction », thèse doctorat en Génie électrique, Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur de Nantes, 1993.
- [15] M. Pan Qiugen « Contribution à la modélisation des phénomènes magnétothermiques dans les systèmes électromagnétique par la méthode des éléments finis », thèse doctorat en sciences physiques (électrotechnique), de l'université paris VI.
- [16] K. J. Binns, P. J. Lawrenson et C. W. Trowbrige « The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields », reprinted august 1994.
- [17] Gouri Dhatt, Gilbert Touzot « Une présentation de la méthode des éléments finis », Deuxième édition 1984.
- [18] O.C.Zienkiewicz, R.L.Taylor « The finite element method », sixième édition 2005.
- [19] Site internet, " équations de Maxwell ", <http://fr.m.wikipedia.org>. visité le 25/06/20018
- [20] Yann le Bihan « Conception et caractérisation d'un dispositif à courant de Foucault pour l'évaluation non destructive de l'épaisseur de paroi d'aubes de turbine creuses » thèse doctorat en Electronique-Electrotechnique-Automatique, école normal supérieure de Cachan, 2000.