

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. Mira de Béjaïa



Faculté de Technologie
Département de Génie électrique

Mémoire fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

En Électromécanique,

Spécialité Maintenance Industrielle

Thème

Etude d'un capteur différentiel appliquée au CND par courant de Foucault d'une pièce amagnétique sous Comsol

Présenté par :

AMZAL Sadek & OUDJIT Hicham

Soutenu le 29 /06 /2025

Devant le jury composé de :

Président	Mr.LAGGOUNE Redouane	MAA	U.A.M.Beaïa
Rapporteur	M.ZERGUINI Sakina	MCA	U.A.M.Beaïa
Rapporteur	Mr .KASDI Ahmed	MCA	U.A.M.Beaïa
Examinateur	Mr.MAOUCHE Bachir	MAA	U.A.M.Beaïa

Année Universitaire : 2024-2025



Déclaration sur l'honneur

Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020(*)

Fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : **Sadek**

Prénom : **AMZAL**

Matricule : **191933008640**

Spécialité et/ou Option : **Maintenance Industrielle**

Département : **Génie électrique**

Faculté : **Technologie**

Année universitaire : **2024/2025**

Et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master

Intitulé: Etude thermo-énergétique d'un échangeur de chaleur à plaques.

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le 09/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) *Lu et approuvé*

.....

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur

Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020(*)

Fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : **Hicham**

Prénom : **OUDJIT**

Matricule : **171733014328**

Spécialité et/ou Option : **Maintenance Industrielle**

Département : **Génie électrique**

Faculté : **Technologie**

Année universitaire : **2024/2025**

Et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : **Master**

Intitulé: Etude thermo-énergétique d'un échangeur de chaleur à plaques.

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le 09/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) *Lu et approuvé*

.....

Remerciements

Avant tout, je remercie dieu tout puissant qui nous donne de la foi, du courage et de patience afin d'accomplir ce modeste travail.

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à notre promoteur **Mme. ZEGUINI Sakina** pour son encadrement.*


Je tiens également à remercier l'ensemble de membres de jury qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail.

Un remerciement très spécial pour :

Pour leur encouragement, aide et ses conseils tout au long de ce mémoire.

*Sans oublier **Mr. KASDI Ahmed** pour leurs temps, encouragement et soutien*

Je remercie tous les enseignants qui ont contribué à ma formation sans exception



Dédicaces

A moi-même pour avoir osé rêver et préserver avec passion

A mes parents, et mes cinq frères ainsi à mes trois sœurs, mes fondations solides et ma lumière

A mes amis, en particulier mes camarades, mon refuge de soutien et d'encouragement

A mon binôme, partenaire de cette aventure vers notre réussite



Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents, ma force et ma plus belle source d'inspiration.

A moi-même, pour avoir cru en mes rêves, à ma famille, à mes chers amis

A mon binôme, avec qui j'ai partagé chaque effort de cette belle aventure



Sommaire

Remerciements**Dédicaces****Sommaire**

Abréviations, Notations et Symboles

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale..... **1**

Chapitre I**Généralité sur le contrôle non destructif par CF**

I.1. Introduction	4
I.2. Principe du contrôle par courant de Foucault	5
I.3. Domaine d'application du CND par courant de Foucault	6
I.4. Les différents partie de CND-CF	6
I.4.1. Schéma de synoptique du dispositif.....	6
I.5. Les différents capteurs de dispositifs CND-CF	7
I.5.1. Types de capteurs	7
I.5.1.1. Capteur axial encerclant où bobine encerclant	7
I.5.1.2. Capteur axial interne ou sonde	8
I.5.1.3. Sonde interne tournante	8
I.5.1.4. Palpeur externe ou bobine ponctuelle.....	9
I.5.2. Fonctions du capteur.....	9
I.5.2.1. Les capteurs à double fonction	9
I.5.2.2. Les capteurs à fonctions séparées	10
I.5.3. Mode de contrôle.....	11
I.5.3.1. Mode de contrôle absolu.....	11
I.5.3.2. Mode de contrôle compensé	11
I.5.3.3. Mode de contrôle différentiel.....	12
I.5.3.3.1. Fonctionnement et principe du capteur différentiel à bobines internes	13
I.5.3.3.2. Applications et avantages	13
I.6. Matériaux à inspecter	14
I.6.1. Epaisseur de peau	14
I.6.2. Caractéristiques électromagnétiques du matériau à contrôler.....	15
I.6.3. Caractéristiques géométriques du matériau à contrôler	16
I.6.4. Défauts	17

I.7. Eléments perturbateurs	18
I.7.1. Visualisation.....	19
I.7.1.1. Grandeurs mesurées	19
I.7.1.2. Impédance normalisée.....	19
I.8. Conclusion.....	20

Chapitre II

Capteur et modélisation pour le CND par CF

II.1. Introduction.....	23
II.2. Principe des capteurs inductifs.....	23
II.3. Equations régissant le phénomène EM	24
II.3.1.1. Equation de maxwell.....	24
II.3.2. Lois constitutives du milieu	25
II.3.3. Phénomènes hypothèses simplificatrices	26
II.3.4. Conditions de limite de passage.....	26
II.4. Formulation en potentiel vecteur A-V	27
II.5. Formulation dans le cas axisymétrique.....	29
II.6. Conditions aux limites	31
II.6.1. Les conditions de type Dirichlet	31
II.6.2. Les conditions de type Neumann	31
II.7. Calcule de l'impédance du capteur.....	32
II.8. Conclusion	33

Chapitre III

Programmation, Simulation et supervision

III.1. Introduction	35
III.2. Présentation de l'interface utilisateur de COMSOL 5.4.....	36
III.3. Application à la détection par capteur absolu en mouvement des configurations cylindrique	37
III.3.1. Présentation du dispositif et description du modèle géométrique	37
III.3.2. Présentation géométrique de la pièce cylindrique	38
III.3.3. Variation d'impédance.....	39
III.3.4. Signature de défauts par les paramètres de l'impédance	41
III.4. Norme de l'induction magnétique	42
III.5. Application à la détection par capteur différentiel en mouvement des configurations cylindrique	45

III.5.1. Présentation du dispositif et description du modèle géométrique	45
III.5.2. Modèle géométrique et maillage.....	46
III.6. Les variations des paramètres de l'impédance.....	47
III.7. Visualisation de l'induction de champ magnétique B.....	48
III.8. Conclusion	49
Conclusion Générale	51
Références bibliographiques.....	53

Abréviations, Notations et Symboles

Abréviations

CND : Contrôle Non Destructif

CF : Courants de Foucault

CND-CF : Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault

MEF : Méthode des Éléments Finis

2D : Deux Dimensions

Notations et Symboles

Js : Densité de courant électrique dans la source

Γ : Frontières qui enveloppent le domaine d'étude

σ : Conductivité électrique [S/m]

μ₀ : Perméabilité magnétique du vide ($\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m)

μ: Perméabilité magnétique absolue [H/m]

μr : Perméabilité magnétique relative du milieu [H/m]

ε₀: Permittivité électrique du vide ($\epsilon_0=8,85\times10^{-12}$ F/m)

ε : Permittivité électrique absolue [F/m]

εr : Permittivité électrique relative du milieu [F/m]

\vec{B} : Induction magnétique[T]

\vec{E} : Champ électrique [V/m]

\vec{H} : Champ magnétique[A/m]

\vec{D} : Induction électrique[C/m²]

\vec{J} : Densité de courant [A/m²]

\vec{J}_{int} : La densité de courant induit.

\vec{J}_{ext} : La densité de courant d'excitation.

σ : conductivité diélectrique [S.m⁻¹]

ρs : Densité de charge électrique portée par une surface

σE : Courant de conduction résultant du champ électrique

\mathbf{n} : Vecteur normal à l'interface entre deux milieux

\mathbf{K} : Densité de courant portée par la surface de séparation

\mathbf{V} : Potentiel scalaire électrique

\mathbf{T} : La densité de flux magnétique

\mathbf{PJ} : Les pertes Joule.

\mathbf{R} : Résistance.

\mathbf{X} : Réactance

\mathbf{I} : Courant d'excitation par courant la bobine

\mathbf{J} : Densité des courants induits sans défaut

\mathbf{E} : champ électrique en présence de la fissure

\vec{A} : Potentiel vecteur magnétique en présence du défaut

Liste des tableaux

Tableau III.1: Impédances caractéristiques obtenues par COMSOL 5.4	39
Tableau III.2: Impédances caractéristiques obtenues par B. Maouche.....	40
Tableau III.3: Comparaison des impédances à 100 kHz entre les résultats obtenus par B. Maouche et les résultats obtenus par COMSOL 5.4	40

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma de principe du contrôle non destructif par courants de Foucault	6
Figure I.2 : Schéma synoptique de la chaîne de contrôle	7
Figure I.3 : Bobine encerclant	8
Figure I.4 : Bobine interne glissante	8
Figure I.5 : Capteur interne tournant	8
Figure I.6 : Sonde ou bobine ponctuelle	9
Figure I.7 : Capteur à double fonction	9
Figure I.8 : Capteur à fonction séparée	10
Figure I.9 : Figuration utilisée pour champ lointain	11
Figure I.10 : Mesure absolue compensée	12
Figure I.11 : Mesure différentielle	12
Figure I.12 : (a) Bobine encerclant différentielle à double fonction. (b) Bobine de type crêpe différentielle à double fonction; (c) Signal prouvent- de la sonde à bobine différentielle à double fonction	13
Figure I.13 : Effet de peau électromagnétique	14
Figure I.14 : Configuration axisymétrique multi couches	15
Figure I.15 : Définition des paramètres géométriques	16
Figure I.16 : Pièce présentant un défaut cylindrique	18
Figure II.1 : Capteur Magnétique ou [CM]	24
Figure II.2 : Capteur à courant de Foucault ou [CCF]	24
Figure II.3 : Modèle d'un système CND-CF axisymétrique	29
Figure II.4 : Condition aux limites nulle de Dirichlet pour les cas possédant une symétrie de la géométrie et une excitation antisymétrique	31
Figure II.5 : Condition aux limites nulle de Neumann pour les cas possédant une symétrie de la géométrie ainsi que de l'excitation	32
Figure III.1 : Interface utilisateur de COMSOL 5.4	36
Figure III.2 : Structure géométrique du dispositif de contrôle à capteur absolu en mouvement	37
Figure III.3 : Configuration axisymétrique 2D simulée avec défaut externe centré	38
Figure III.4 : Maillage du modèle axisymétrique 2D avec défaut externe centré	38
Figure III.5 : Configuration axisymétrique 2D simulée avec défaut interne centré	38
Figure III.6 : Maillage de modèle asymétrique 2D avec défaut interne centré	38

Figure III.7 : Variation des paramètres de l'impédance en fonction du déplacement pour un défaut interne à 100kHz.....	42
Figure III.8 : Variation des paramètres de l'impédance en fonction du déplacement pour un défaut externe à 100 et 240 kHz.....	42
Figure III.9 : Lignes de champ et induction magnétique à la position du Capteur interne	44
Figure III.10 : Lignes de champ et induction magnétique à la position du Capteur externe	44
Figure III.11 : Structure géométrique du dispositif à capteur différentiel	45
Figure III.12 : Configuration axisymétrique 2D simulée avec un défaut interne centré.....	46
Figure III.13 : Configuration axisymétrique 2D simulée avec un défaut externe centré	46
Figure III.14 : Maillage du domaine d'étude (Défaut interne)	46
Figure III.15 : Maillage du domaine d'étude (Défaut externe)	46
Figure III.16 : Variation de l'impédance en fonction du déplacement de deux bobines pour un défaut interne à 240KHz	47
Figure III.17 : Variation de l'impédance en fonction du déplacement de deux bobines pour un défaut externe à 240 et 100 KHz	48
Figure III.18 : Lignes de champ et norme de la densité de flux magnétique à la position du capteur interne.....	48
Figure III.19 : Lignes de champ et norme de la densité de flux magnétique à la position du capteur externe.....	49

Introduction Générale

La problématique du Contrôle Non Destructif (CND) est cruciale pour garantir la sécurité des systèmes industriels et la protection des personnes. Cette technique permet de détecter les défauts et hétérogénéités dans les matériaux sans les altérer, réduisant ainsi les coûts et les risques liés à la destruction des pièces. Dans des secteurs sensibles comme le nucléaire ou l'aéronautique, où des composants critiques sont soumis à des conditions extrêmes, le CND contribue à optimiser les cycles de maintenance et s'inscrit dans une logique de développement durable. En évaluant avec précision l'état d'intégrité des structures, il permet de prolonger leur durée de vie tout en maintenant un haut niveau de fiabilité.

Le CND a atteint une grande maturité grâce aux progrès des logiciels de simulation numérique, qui répondent aux exigences croissantes en matière de précision et de performance. Ces outils sont aujourd'hui indispensables dans les domaines industriels exigeants tels que la métallurgie, l'aéronautique ou le nucléaire, où la caractérisation fine des propriétés physico-géométriques des matériaux est essentielle.

Parmi les méthodes les plus répandues examen visuel, ressusage, magnétoscopie, radiographie, ultrasons le choix dépend de nombreux paramètres : nature du matériau, type d'information recherchée, environnement de contrôle, contraintes économiques. Ce travail s'intéresse plus particulièrement à la méthode des courants de Foucault (CF), adaptée à l'inspection des matériaux conducteurs.

Les courants de Foucault sont induits lorsqu'un conducteur est soumis à un champ magnétique variable. Leur distribution dans le matériau dépend des propriétés physiques de celui-ci, de la géométrie, et de la fréquence d'excitation. Bien qu'ils ne soient pas mesurables directement, leur présence peut être déduite à partir des effets qu'ils induisent, notamment les variations d'impédance ou de champ magnétique dans les capteurs.

Cette méthode permet de détecter efficacement divers types de défauts, qu'ils soient géométriques (fissures, criques) ou électromagnétiques (inclusions, corrosion), fournissant ainsi des informations précieuses sur l'état de santé du matériau. Elle présente en outre plusieurs avantages : une mise en œuvre simple, une robustesse en milieu industriel, et un coût modéré par rapport à d'autres techniques.

La simulation numérique joue un rôle de plus en plus central dans la conception et l'optimisation des dispositifs de CND. Elle permet de modéliser l'interaction entre la sonde

(source des courants de Foucault) et la pièce à inspecter, facilitant ainsi la conception de capteurs adaptés à des applications spécifiques. Cette modélisation repose sur les équations de Maxwell, complétées par les relations constitutives, les conditions aux limites et de continuité. Leur résolution est assurée par la méthode des éléments finis (MEF), parfaitement adaptée à la gestion de structures complexes. Le mouvement du capteur le long de la pièce est pris en compte via une approche basée sur l'affectation dynamique de propriétés.

Dans un souci de clarté et de cohérence scientifique, ce mémoire est structuré en trois parties : Le premier chapitre présente les généralités sur le CND et les principales méthodes utilisées, avec un accent particulier sur la technique des courants de Foucault.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation théorique du dispositif de contrôle. Il introduit les équations fondamentales, les conditions aux limites et les principes électromagnétiques sous-jacents.

Le troisième chapitre aborde la modélisation et la simulation numérique, sous COMSOL Multi-physiques, d'une pièce cylindrique présentant des défauts internes et externes. Deux configurations sont étudiées : d'abord avec une bobine d'excitation unique, puis avec un capteur différentiel à deux bobines. L'objectif est de comparer les performances de détection selon les géométries, les matériaux et la nature des défauts

Chapitre I

*Généralité sur le contrôle non
destructif par CF*

I.1. Introduction

Le Contrôle Non Destructif « CND » est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de structures ou d'un matériau, sans les dégrader, en vue d'établir un diagnostic. Au cours d'une production, les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défaut. En cours d'utilisation, sous l'effet des contraintes extérieures ou du vieillissement, les défauts apparaissent. Dans les deux cas, l'application des techniques de CND sont nécessaires. Souvent, on débute, à la casse et de façon empirique, par la détermination de la taille de défaut acceptable et ensuite pouvoir les détecter, sans casser la pièce. En règle générale, l'application de ces techniques de contrôle est réalisée dans tous les secteurs produisant des pièces à coût de production élevé et en quantité faible (nucléaire, pétrochimique...) Et des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (nucléaire, canalisation de gaz...).

Les tests de CND sont pour la plupart fondés sur l'observation d'un phénomène physique perturbé par la présence d'une anomalie ou d'une hétérogénéité. On distingue diverses techniques [1] [2] [3] dont principalement :

- Les ultrasons,
- Les rayons X ou Gamma,
- L'émission acoustique,
- Le ressuage ou la thermographie infrarouge,
- La magnétoscopie,
- Les courants de Foucault.

Leur principe, leur domaine d'utilisation et leur exploitation sont très différentes l'une de l'autre. Le choix de l'une d'entre elles dans une application est basé par la nécessité que les propriétés de la pièce à contrôler soient compatibles avec le phénomène physique mis en jeu.

Pour les matériaux conducteurs de l'électricité, le choix est évident ; c'est les courants de Foucault. Le contrôle non destructif par courants de Foucault [2] [3] [4] est une méthode d'inspection des pièces métalliques sans contact. La technique des courants de Foucault se différencie des autres procédés de CND :

- Le caractère abstrait des phénomènes électromagnétiques.
- La difficulté d'interprétation des résultats.
- La complexité des modèles théoriques pour intégrer les paramètres expérimentaux.

- La difficulté de réalisation des défauts artificiels représentatifs des défauts naturels.

Le CND-CF est actuellement en forte exploitation. Les considérations de sûreté des centrales nucléaires de production d'électricité ont fortement évolué dans les dix dernières années. De même on a intérêt à surveiller la fiabilité des pièces composant les installations aérospatiales. C'est une méthode importante et largement répandue.

Comme d'autres méthodes non destructives, les essais par courants de Foucault ne se limitent pas à la détection des défauts mais aussi ils permettent la mesure des propriétés électromagnétiques, géométriques et la détection des discontinuités des pièces conductrices.

Les essais par courants de Foucault fournissent des mesures presque instantanées. Par conséquent, ils peuvent opérer d'une manière continue et simultanée avec le fonctionnement d'une installation. Ils sont employés dans des chaînes pour examiner des barres en mouvement, des tubes qui acheminent des gaz toxiques, des tôles, l'état des soudures, etc.

I.2. Principe du contrôle par courant de Foucault

Toute charge électrique soumise à un champ électromagnétique subit une force appelée force de Lorentz. Cette force entraîne les charges libres du conducteur et crée ainsi des courants électriques, appelés courants de Foucault ou courants induits. Plus la conductivité électrique du matériau est élevée, plus les manifestations de ces phénomènes ont importantes. Les courants ainsi générés vont à leur tour agir sur leur environnement.

Lenz a énoncé :

Les courants induits, par un champ électromagnétique variable dans le temps et/ ou dans l'espace au sein d'un matériau conducteur, tendent à s'opposer à la cause qui leur a donné naissance.

Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable, alternatif, génère de tels courants, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifiant l'impédance de cette bobine. C'est l'étude de cette variation d'impédance ou de la variation de la tension induite dans une seconde bobine qui fournira les éléments nécessaires d'un contrôle. En effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des conditions d'excitations (paramètres électriques et géométriques du bobinage), mais aussi des caractéristiques physiques et géométriques de la cible. On conçoit dès lorsqu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de

Foucault, puisse engendrer une variation d'impédance ou de tension décelable au niveau de la bobine d'excitation ou d'autres bobines réceptrices (figure I.1).

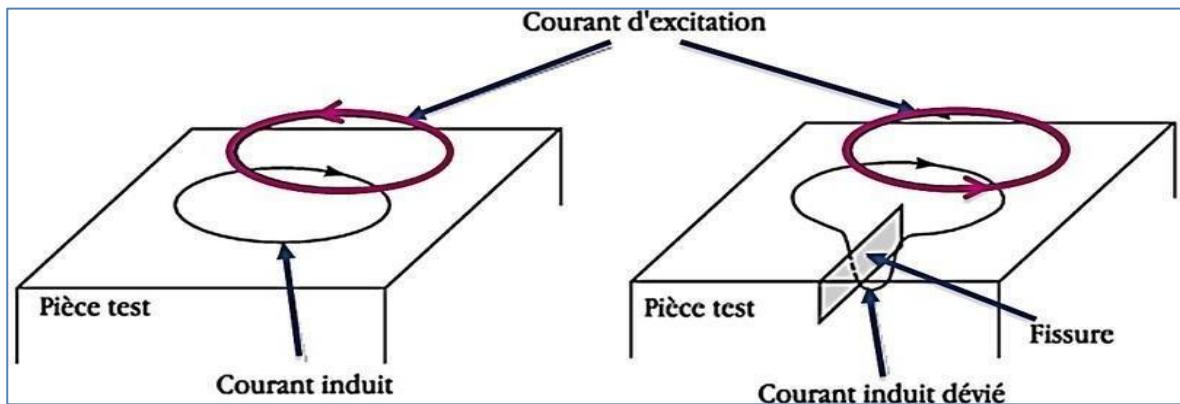


Figure I.1 : Schéma de principe du contrôle non destructif par courants de Foucault

I.3. Domaine d'application du CND par courant de Foucault

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

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

I.4. Les différents parties de CND-CF

I.4.1. Schéma de synoptique du dispositif

La chaîne de contrôle non destructif par courant de Foucault comprend essentiellement un générateur alimentant le capteur, le capteur lui-même, le produit à contrôler dont éventuellement la présence de défauts et enfin le système d'observation qui visualise une grandeur dérivée des courants de Foucault. Les paragraphes suivants décrivent chaque élément de cette installation.

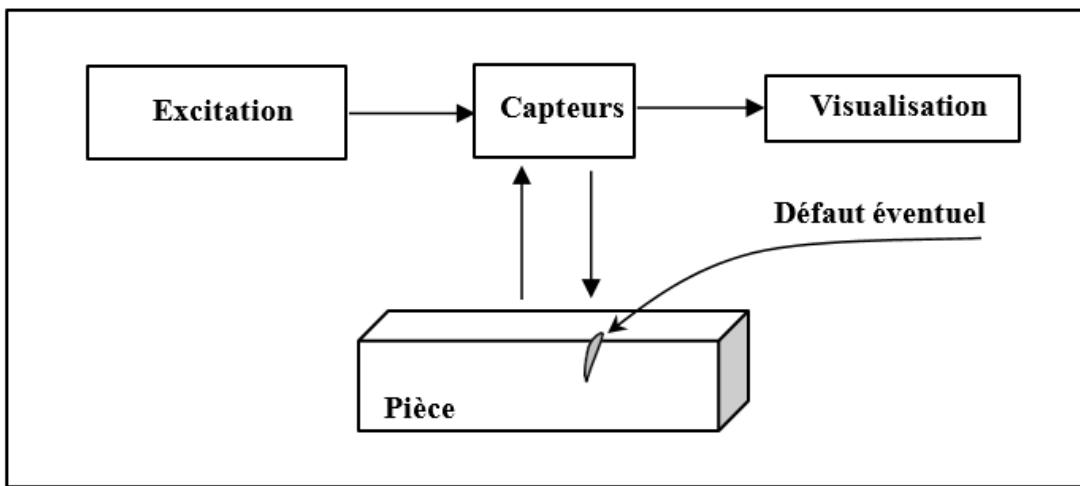


Figure I.2 : Schéma synoptique de la chaîne de contrôle

I.5. Les différents capteurs de dispositifs CND-CF

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 trois caractéristiques :

- Type
- Fonction
- Mode de contrôle

I.5.1. Types de capteurs

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

- Bobine en cerclant
- Sonde
- Palpeur

I.5.1.1. Capteur axial encerclant où bobine encerclant

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 (Tubes, barres...). Ils sont les plus répandus dans le domaine industriel.

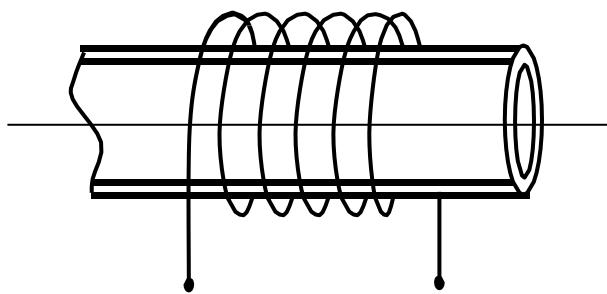


Figure I.3 : Bobine encerclant

I.5.1.2. Capteur axial 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. Ils sont utilisés pour contrôler les produits creux (tubes). Ces capteurs opèrent soit avec noyau ferromagnétique ou sans noyau.

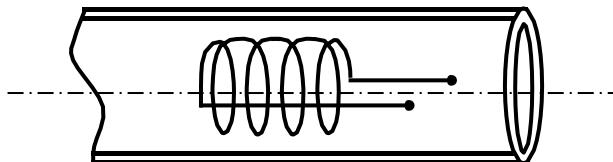


Figure I.4 : Bobine interne glissante

I.5.1.3. Sonde interne tournante

Ce capteur est constitué d'un inducteur tournant autour de l'axe de translation. Le champ magnétique axial de la bobine est perpendiculaire à l'axe de translation.

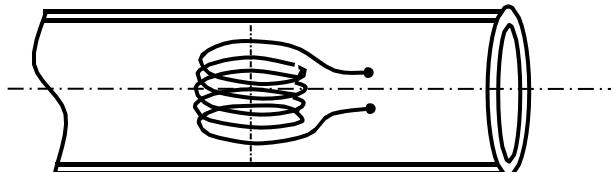


Figure I.5 : Capteur interne tournant

I.5.1.4. Palpeur externe ou bobine ponctuelle

Le palpeur est un capteur destiné à l'examen local d'un produit à partir de sa surface sur laquelle il peut se déplacer avec 2 degrés de liberté. Ce palpeur est constitué d'une bobine dont l'axe du bobinage est perpendiculaire à la pièce à contrôler. Il possède une zone d'action réduite et permet une inspection locale de la pièce même dans des régions d'accès réputé difficile pour les autres capteurs. Dans certains cas de contrôle, on adjoint un noyau ferromagnétique pour canaliser le champ magnétique.

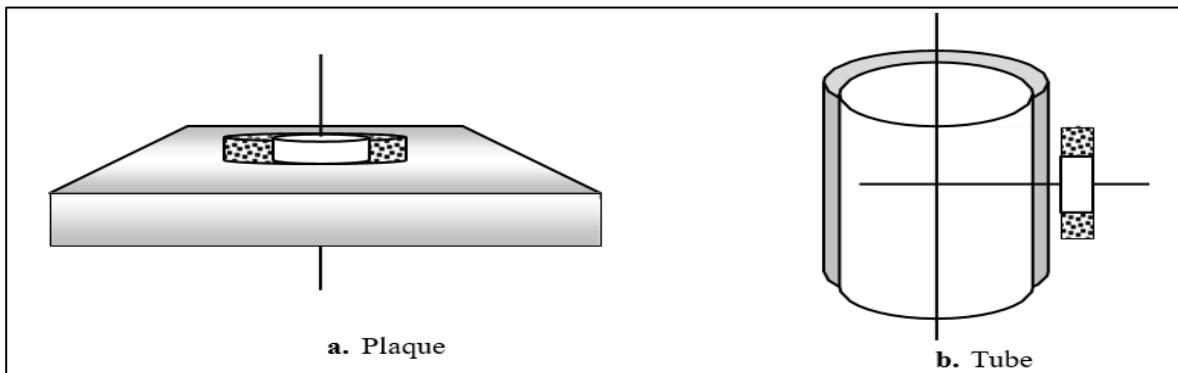


Figure I.6 : Sonde ou bobine ponctuelle

I.5.2. Fonctions du capteur

Le fait qu'un bobinage peut être inducteur ou induit donne la possibilité au capteur de jouer le rôle de l'émetteur ou de récepteur ou les deux fonctions simultanées.

I.5.2.1. Les capteurs à double fonction

C'est le cas dans lequel les fonctions d'excitation et de réceptions ont assurées par la ou les mêmes (s) bobines (Figure I.7).

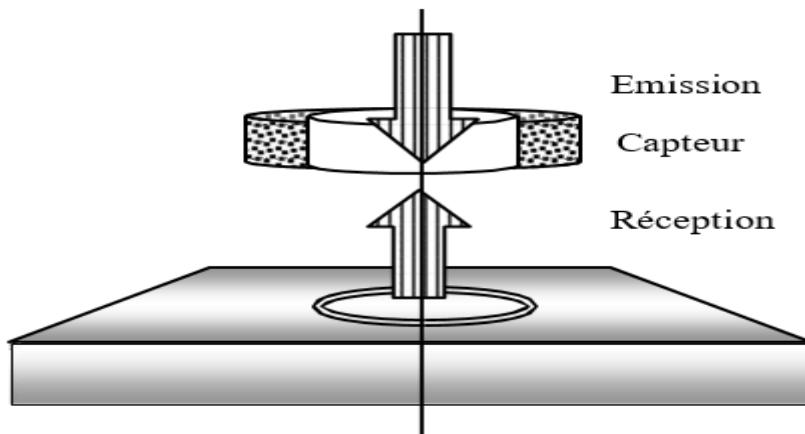


Figure I.7 : Capteur à double fonction

L'extraction des informations se fait par la mesure de l'impédance équivalente ou de la variation de l'impédance due à la présence du matériau au voisinage du capteur ou due à la présence d'un défaut dans ce matériau. Ce type de capteur favorise la mesure de grandeurs à évolution lentes tels que l'épaisseur de revêtement, l'entrefer (lift-off) et la conductivité.

I.5.2.2. Les capteurs à fonctions séparées

Ces capteurs possèdent un enroulement dédié à l'excitation et un autre à la mesure. Cette conception est souvent utilisée pour la détection de défaut de grande taille ou profond.

Le principe de la détection sur la traversée du champ d'une zone à une autre. La détection de ce genre de défaut nécessite l'augmentation des dimensions de la bobine d'excitation. Cette augmentation de la taille du capteur se fait au détriment de sa résolutions partielle lors de la réception.

C'est alors qu'on associe la réception à une autre bobine de taille souvent plus petite que celle de l'émetteur. Les enroulements peuvent être alors enchevêtrés (Figure I.8.a) ou séparés comme dans le cas de mesures par transmission (Figure I.8.b).

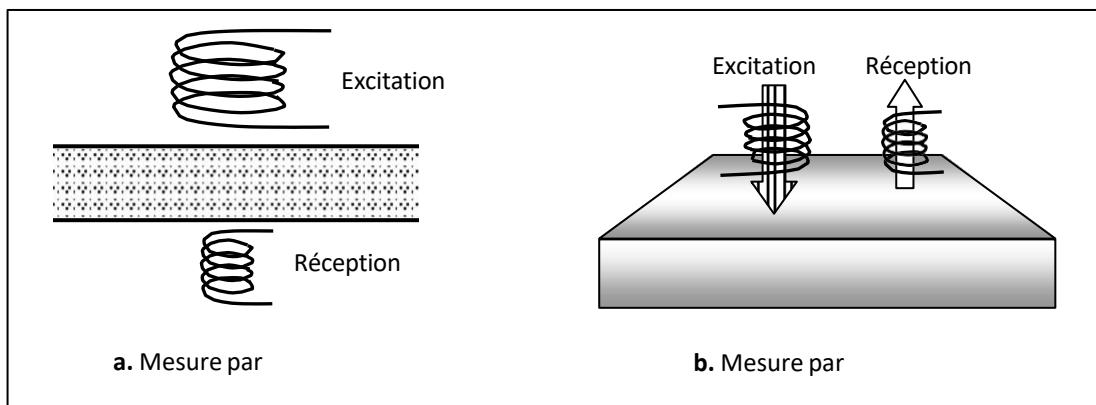


Figure I.8 : Capteur à fonction séparée.

Une des variantes de la technique de capteur à fonction séparée est le champ lointain. Les bobines de détections sont séparées par une distance qui équivaut à deux ou trois fois le diamètre du tube.

Les bobines de réception perçoivent les lignes de flux qui traversent deux fois le mur du tube (Figure I.9). Le champ lointain est sensible tant aux indications internes qu'externes, tandis que le décalage de phase est directement proportionnel à la perte de paroi.

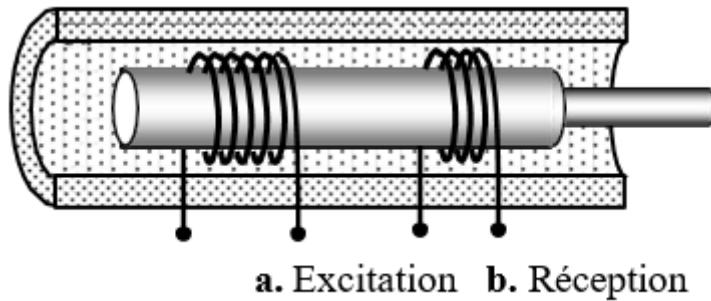


Figure I.9 : Figuration utilisée pour champ lointain

I.5.3. Mode de contrôle

En fonction de l'intensité du champ, qui dépend des caractéristiques électromagnétiques de la pièce à identifier ou à contrôler et des perturbations éventuelles, on compte trois modes de mesure :

- Mode de contrôle absolu
- Mode de contrôle compensé
- Mode de contrôle différentiel

I.5.3.1. Mode de contrôle absolu

Ce type de capteur est sensible à tous les paramètres géométriques et électromagnétiques de l'environnement. Typiquement le récepteur est constitué d'un seul élément. Avant le contrôle d'une pièce un étalonnage peut être effectué sur une pièce de référence.

I.5.3.2. Mode de contrôle compensé

Ce type de capteur est éliminé les signaux parasites en comparant le mesuré avec un signal de référence pris sur une zone saine. Cette méthode neutralise les variations dues à la température ou à la conductivité, isolant ainsi uniquement les défauts. Idéal pour les inspections précises en environnement variable.

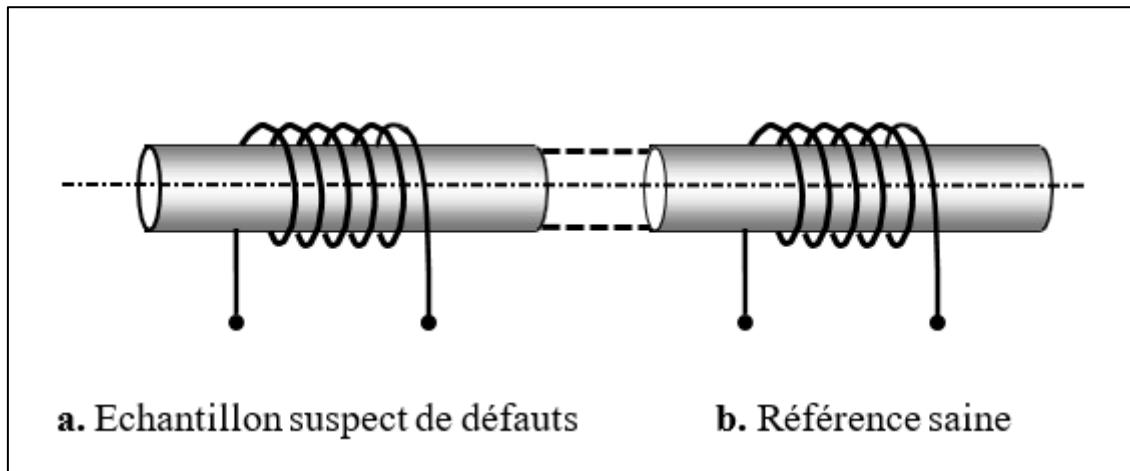


Figure I.10 : Mesure absolue compensée

I.5.3.3. Mode de contrôle différentiel

Cette technique utilise deux capteurs absolus écartés, montés en tête-bêche parcourus par le même courant mais de signe opposé comme le montre la figure I.11.

La mesure différentielle est équivalente à la comparaison permanente de deux mesures effectuées simultanément en deux emplacements voisins. Dans le cas de pièce saine, l'impédance du capteur différentiel est nulle. La réponse est sensible seulement aux variations brusques de la géométrie de la pièce à contrôler. La figure I.12 présente un montage différentiel pour le contrôle d'un tube.

Cette méthode est essentiellement utilisée en contrôle de santé [16] [19] [20] [21]. Elle permet de mettre en évidence des défauts métallurgiques (anisotropie) et les variations dimensionnelles brutales telles que des fissures. Les défauts ponctuels sont bien détectés.

L'avantage de ce mode de mesure réside dans la suppression de tout signal dû à des variations lentes telles que les variations dimensionnelles ou les fluctuations de température ou de conductivité.

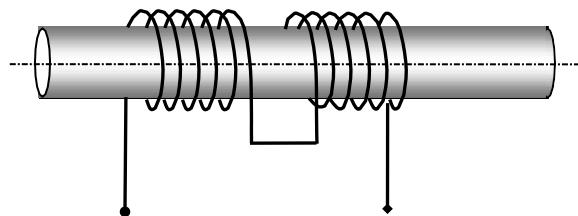


Figure I.11 : Mesure différentielle

I.5.3.3.1. Fonctionnement et principe du capteur différentiel à bobines internes

Le capteur différentiel à deux bobines internes est conçu pour détecter les défauts dans les tubes conducteurs. Les deux bobines, couplées magnétiquement et connectées en opposition de phase, génèrent un champ magnétique alternatif qui interagit avec la paroi du tube. Toute anomalie (fissure, corrosion, variation d'épaisseur) modifie localement la conductivité ou la perméabilité magnétique, perturbant le couplage entre les bobines et produisant un signal différentiel ($V_1 - V_2$). Ce système offre une grande précision et reproductibilité, notamment dans les environnements industriels exigeants comme les centrales nucléaires et les pipelines.

I.5.3.3.2. Applications et avantages

Ce capteur est largement utilisé en contrôle non destructif (CND) pour inspecter l'intégrité des tubes sans contact. Il permet de détecter des microfissures inférieures à 0,1 mm dans l'acier inoxydable, tout en résistant aux perturbations ambiantes (température, vibrations). Sa configuration à bobines séparées améliore la résolution spatiale, permettant d'identifier des défauts de moins de 50 μm , même en conditions sévères. Employé dans l'industrie pétrochimique et les centrales thermiques, il optimise la maintenance préventive en surveillant en temps réel l'érosion et les microfissures.

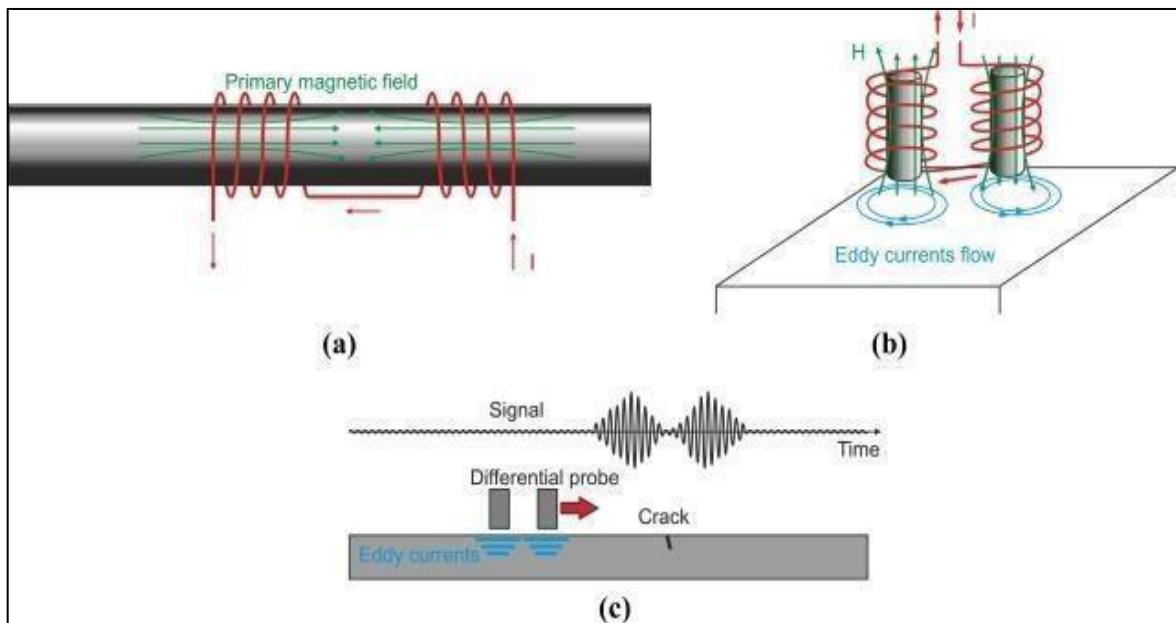


Figure I.12 : (a) Bobine encerclante différentielle à double fonction. (b) Bobine de type crêpe différentielle à double fonction; (c) Signal prouvent- de la sonde à bobine différentielle à double fonction

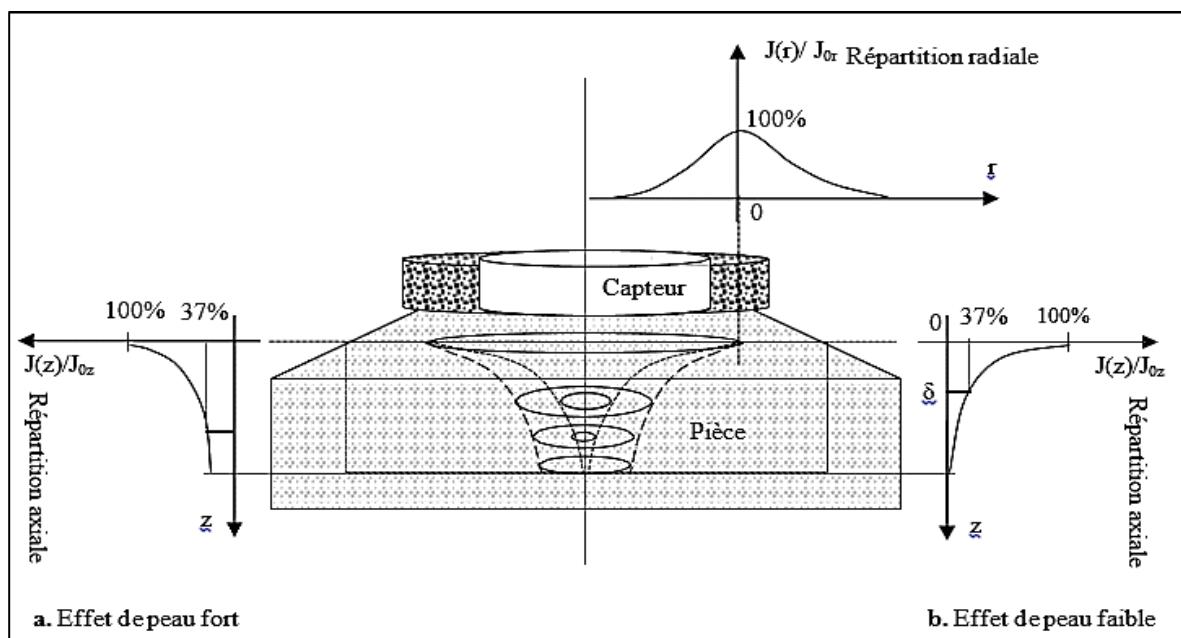
I.6. Matériaux à inspecter

Au cours des ans, la technologie des capteurs et le traitement des données ont continu tellement 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 l’évaluation non destructive des caractéristiques physiques 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.6.1. 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 conséquents 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.



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

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

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

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

L'analyse globale des caractéristiques à travers l'épaisseur de peau électromagnétique est réalisée

L'analyse globale des caractéristiques à travers l'épaisseur de peau électromagnétique est réalisée en [6] [34] en utilisant le modèle développé en [5]. Cette analyse consiste à comparer la profondeur de pénétration standard avec la profondeur de pénétration réelle en fonction du rayon moyen de la bobine du capteur.

I.6.2. Caractéristiques électromagnétiques du matériau à contrôler

Les faibles variations de la composition chimique d'un matériau (exemple de l'acier) influent sur l'amplitude et la phase du signal. Ces variations de composition agissent surtout sur la dureté qui, à son tour, par l'intermédiaire de la conductivité et de la perméabilité [34], modifie l'amplitude du signal fondamental et de ses harmoniques [7].

L'induction magnétique est directement proportionnelle à la perméabilité d'un matériau.

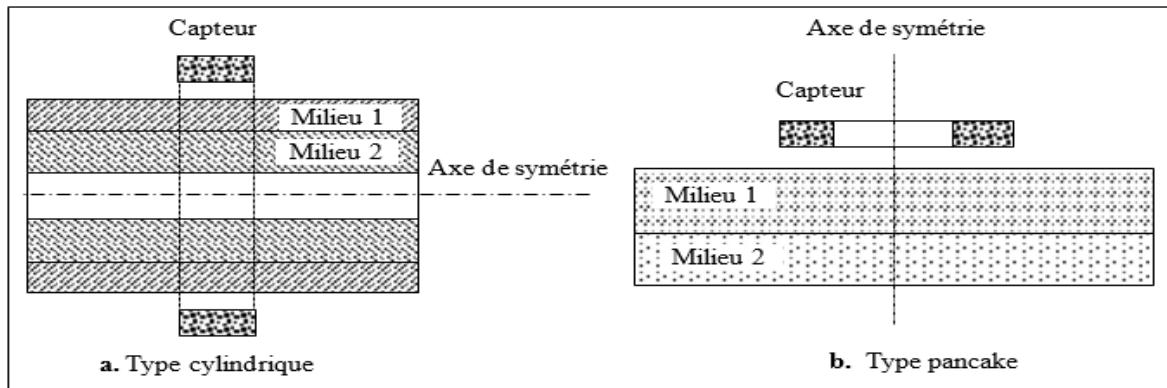


Figure I.14 : Configuration axisymétrique multi couches

Si la conductivité et la perméabilité sont considérées comme étant des éléments perturbateurs dans la détection des défauts et dans l'évaluation non destructive des caractéristiques géométriques, il n'en est pas de même quand on s'intéresse à leurs évaluations.

C'est l'évaluation non destructive des caractéristiques électromagnétiques des matériaux. Dans cette application, plusieurs travaux ont été réalisés [14] [9] [11] [12] [10] [13] [8]. Entre autres, l'identification des différents matériaux dans une pièce en multi couche (Figure I.15) [15] [16].

I.6.3. Caractéristiques géométriques du matériau à contrôler

Pour réaliser le contrôle complet d'une pièce, il faut déplacer, à une vitesse qui peut atteindre quelques mètres par seconde, la bobine à la surface de celle-ci et déceler les variations d'impédance qui traduisent la présence d'une anomalie à l'intérieur de la pièce (coefficient de remplissage) et engendre ainsi des fluctuations d'impédance dites lift-off (Figure I.16).

Ces fluctuations peuvent prendre une amplitude telle qu'elles masqueront des indications sur les caractéristiques des défauts.

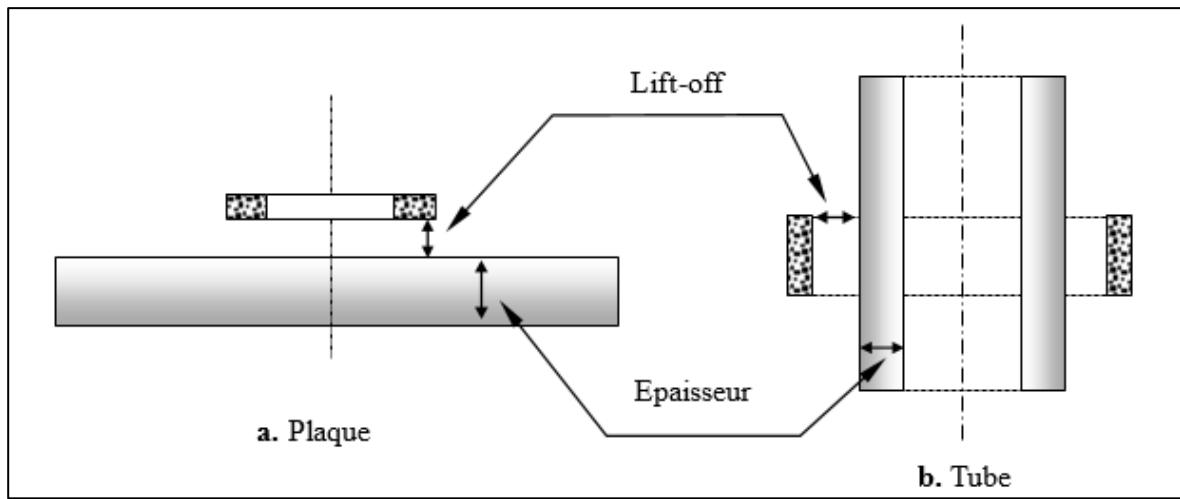


Figure I.15 : Définition des paramètres géométriques

Une des utilisations de la technique du contrôle par courants de Foucault est l'évaluation dimensionnelle des couches constitutives de la pièce [3] [13] [31] [32] [33] [34].

Cela revient à mesurer l'épaisseur des différentes couches isolante et conductrice. La détection dimensionnelle des couches isolantes, du point de vu électromagnétique, est équivalente à la mesure de l'entrefer entre le capteur et la partie conductrice. C'est le lift-off. Dans ce cas, ce paramètre n'est plus perturbateur.

Dans le cadre de l'optimisation des capteurs, d'autres travaux ont été réalisés à cet effet. Comme exemple, en [7], les auteurs étudient la variation d'impédance en fonction de la hauteur et de l'épaisseur du capteur.

I.6.4. Défauts

Les défauts (trous, fissures, rayures,...) tendent de modifier le parcours des courants de Foucault dans le matériau. On peut donc considérer qu'un défaut non-conducteur (inclusion, trou...) provoque la même variation d'impédance qu'une variation de conductivité. De même, un défaut en surface peut être assimilé à une variation du coefficient de remplissage. La forme et la position des défauts relativement au matériau imposent des modèles géométriques bidimensionnel ou tridimensionnel.

Dans le cas d'étude bidimensionnelle qui nous intéresse, les défauts peuvent avoir une vue axisymétrique ou longitudinale. La figure I.17 montre un défaut cylindrique sur une plaque qui peut être traitée par un modèle axisymétrique [14] [17] [18] avec un capteur absolu ponctuel. Cette mesure a pour principal défaut de ne permettre une évaluation d'impédance qu'en un seul point. Le modèle n'est valable que si l'axe du défaut coïncide avec celui du capteur. Si ce type de défaut se présente dans une pièce cylindrique, il ne peut être traité par un modèle axisymétrique sauf si on associe, au modèle mathématique, les transformations conformes [19], sinon il s'agit d'une vue tridimensionnelle [20]. Un autre type de défaut axisymétrique est celui montré en coupe sur la figure I.16. Ce type de défaut, rarement rencontré en pratique, peut être détecté par un capteur absolu ou différentiel fixe ou en déplacement [14] [21] [22]. Les défauts axisymétriques peuvent avoir d'autres formes tout en restant axisymétrique. Un des exemples est montré sur les figures I.17 et I.18 et dont la forme est sphérique [17].

Plusieurs autres types de défauts sont traités. On trouve : des fissures de longueur infinie dont la vue est bidimensionnelle [23], des fissures de longueur finie [24], des défauts ponctuels de formes quel conques sur une surface cylindrique [25] [26], des défauts sous forme de couches [27], une fissure parallélépipédique [28, [29] ou elliptique [30] [31], etc...

L'objectif de la recherche de défauts, est lié à son identification et sa caractérisation à partir des signaux mesurés. Les dispositifs de contrôle utilisant les techniques présentées précédemment, permettent d'obtenir des signaux suffisamment riches en informations. Un traitement numérique adapté, à base d'un calcul direct et inverse permet de remonter aux différentes informations d'identification. L'utilisateur de CND doit choisir la fréquence qui détectera le défaut avec la sensibilité et la fiabilité les plus élevées, tout en gardant dans l'esprit que dans les applications de caractérisation des matériaux, le défaut est un élément perturbateur.

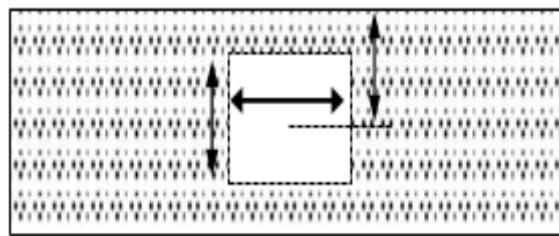


Figure I.16 : Pièce présentant un défaut cylindrique

I.7. Eléments perturbateurs

Dans tous les traitements de problèmes à plusieurs variables, quand on s'intéresse à une grandeur, les autres des paramètres doivent être maîtrisés. Dans les descriptions précédentes nous avons précisé, pour chaque nature de détection, les perturbations qui peuvent surgir lors de la pratique du contrôle. Pour la maîtrise des paramètres, on conçoit généralement des capteurs spécifiques (capteur différentiel) et des excitations en multi fréquences (double et triple fréquence) [3].

Dans le domaine de contrôle et d'évaluation non destructifs par courant de Foucault, la température est le seul élément purement perturbateur. La perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau varient avec la température [34]. Toute variation thermique devient très gênante pour les appareils qui assurent une mesure absolue tels que ceux destinés à des mesures d'épaisseur ou de détection d'anomalies.

La température peut également varier en raison du courant d'excitation (effet joules) ou de l'environnement (différence de température entre la référence et les pièces à mesurer). Pour neutraliser cette perturbation, on utilise généralement des bobines de compensation, les thermistances ou les thermocouples. Cependant, cette compensation ne présente de l'intérêt que dans la mesure absolue.

I.7.1. Visualisation

I.7.1.1. Grandeurs mesurées

En régime sinusoïdal, si V est la tension complexe appliquée à la bobine et I le courant qui la parcourt, l'impédance complexe du capteur est définie par la relation suivante :

$$\underline{Z} = \frac{\underline{V}}{\underline{I}} \quad (\text{I.3})$$

L'une des grandeurs, tension ou courant, étant fixée et connue, la mesure de l'impédance passe par la mesure de la deuxième grandeur, et selon qu'il s'agit d'une excitation en courant ou en tension.

Dans le cas où la source d'excitation serait un générateur de tension de valeur efficace V , la grandeur mesurée est le courant électrique complexe I_{mes} .

L'impédance est :

$$\underline{Z}_{mes} = \frac{\underline{V}}{I_{mes}} \quad (\text{I.4})$$

Dans le cas contraire où la source d'excitation est un générateur de courant de valeur efficace I , la grandeur mesurée est la tension complexe V_{mes} .

L'impédance est :

$$\underline{Z}_{mes} = \frac{V_{mes}}{I} \quad (\text{I.5})$$

Souvent les bobines du capteur ont un grand nombre de spires et sont optimisées de manière à réduire les pertes électriques. Si la bobine est idéale, on parle de bobine purement inductive [34]. Par conséquent, le courant qui la traverse est de valeur efficace constante, on parle alors de générateur de courant et c'est souvent le cas.

I.7.1.2. Impédance normalisée

L'inspection des matériaux consiste à mesurer les variations d'impédance de la bobine. En général, on utilise une méthode comparative, dont l'objet est de mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine en présence de la pièce à inspecter et l'impédance Z_0 de la bobine pour une pièce de référence [34]. En absence du matériau à contrôler, l'impédance complexe Z_0 du capteur est :

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0 \quad (I.6)$$

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

$$\underline{Z} = R + jX \quad (I.7)$$

R est la composante résistive qui englobe les pertes internes du bobinage d'excitation et les pertes par courants de Foucault dues à la pénétration du champ dans le matériau. X est la composante inductive qui représente la réactance du bobinage d'excitation, liée à la topologie des lignes de champ magnétique émises par le capteur.

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

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z} - R_0}{X_0} = R_n + jX_n \quad (I.8)$$

$$\begin{cases} R_n = \frac{R - R_0}{X_0} & (a) \\ X_n = \frac{X}{X_0} & (b) \end{cases} \quad (I.9)$$

R_n et X_n sont respectivement la résistance et la réactance normalisées du capteur.

I.8. Conclusion

Le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault constitue une méthode essentielle pour l'inspection des matériaux conducteurs, alliant précision et préservation de l'intégrité des pièces. Fondé sur l'induction électromagnétique, il permet de détecter des défauts subtils (fissures, corrosion, variations d'épaisseur) en analysant les perturbations des courants induits et les variations d'impédance des capteurs. Les capteurs, sous formes variées (encerclant, internes, palpeurs), et les modes de contrôle (absolu, différentiel) offrent une adaptabilité aux géométries complexes et aux environnements industriels exigeants.

Cependant, cette technique demeure sensible aux éléments perturbateurs (température, rugosité) et limitée par l'effet de peau, nécessitant des modèles théoriques robustes et des algorithmes de traitement avancés. Ses applications stratégiques en aéronautique, nucléaire ou pétrochimiques ou lignent son rôle clé dans la maintenance préventive et la sécurité des infrastructures.

Les perspectives d'innovation, incluant l'intégration de l'IA et le développement de capteurs intelligents, renforcent sa fiabilité et son adoption dans l'industrie 4.0, où rapidité, durabilité et optimisation des coûts sont primordiales.

Chapitre II
Capteur et modélisation pour le
CND par CF

II.1. Introduction

Le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault repose sur des principes fondamentaux de l'électromagnétisme, dont la maîtrise est essentielle pour développer des modèles mathématiques précis. Ces modèles permettent non seulement de simuler des fonctionnements complexes, mais aussi d'optimiser la conception des capteurs, afin d'améliorer leur efficacité et de réduire les limitations couramment rencontrées dans les applications industrielles, [4,5].

Ce chapitre est consacré pour la représentation des équations de Maxwell, qui régissent les phénomènes électromagnétiques du système, ainsi que l'équation de la magnétodynamique en régime quasi stationnaire, formulée à l'aide du potentiel vecteur magnétique et du potentiel électrique scalaire $\vec{A} - \vec{V}$.

Enfin, la résolution de ces équations, qui forment un système d'équations aux dérivées partielles, est abordée à travers des méthodes numériques, notamment la méthode des éléments finis, offrant ainsi une approche robuste pour la modélisation et l'analyse des phénomènes complexes en CND.

II.2. Principe des capteurs inductifs

Un capteur inductif est principalement constitué d'un circuit magnétique ouvert de grande perméabilité μ , sur lequel sont bobinés un ou plusieurs enroulements parcourus par un courant alternatif. L'approche d'une cible conductrice et/ou magnétique dans les abords l'entrefer-du circuit modifie la répartition des lignes de champ et se traduit par une variation de réluctance et de pertes électromagnétiques dues à la pénétration du champ à l'intérieur de la cible [6], [24].

Lorsque la cible est conductrice, le champ incident induit des courants de surface, dénommés **courants de Foucault**, qui à leur tour génèrent un champ magnétique opposant au champ exciteur. On parle dans ce cas de "Capteurs à courants de Foucault" (CCF).

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

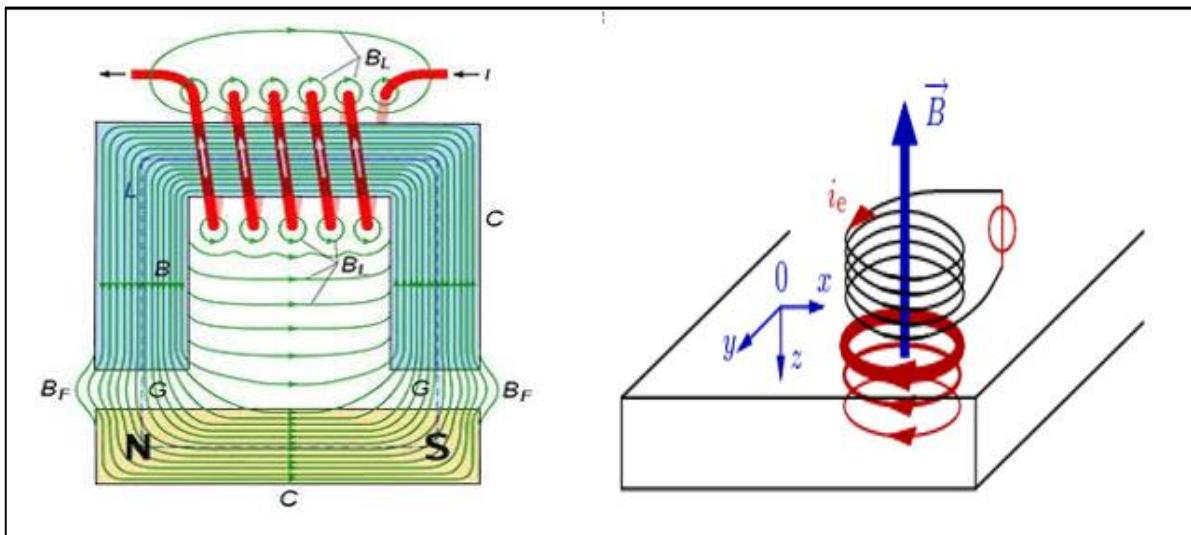


Figure II.1 : Capteur Magnétique ou [CM]

Figure II.2 : Capteur à courant de Foucault ou [CCF]

II.3. Equations régissant le phénomène EM

Il existe deux familles de formulations pour la résolution des équations de Maxwell. L'une repose sur le calcul du champ électrique et l'autre sur le calcul du champ magnétique. Dans notre cas, on opte pour la représentation par champ magnétique

II.3.1. Equation de maxwell

Tous les phénomènes d'électromagnétisme variables dans le temps et dans l'espace dans les dispositifs électrotechniques sont régis par les quatre équations de Maxwell suivantes, [14] [15] :

Loi de Maxwell-Faraday (induction)

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

Loi de Maxwell Gauss (électrique) :

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho \quad (\text{II.2})$$

Loi de Maxwell Ampère :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

Loi de Maxwell Gauss (magnétique) :

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = \mathbf{0} \quad (II.4)$$

\vec{E} [V/m] et \vec{H} [A/m] : Champ électrique et magnétique.

\vec{D} [A. s /m] Et \vec{B} [T] : Induction électrique et magnétique.

\vec{J} : [A/m²] Et ρ [C/m³] : Densité du courant et charge volumique.

Tel que :

$$\vec{J} = \vec{J}_{ext} + \vec{J}_{ind} \quad (II.5)$$

Avec :

- \vec{J}_{ind} : La densité de courant induit.
- \vec{J}_{ext} : La densité de courant d'excitation.

II.3.2. Lois constitutives du milieu

Ces équations sont liées entre elles par les lois constitutives qui traduisent les propriétés électriques et magnétiques du milieu considéré sont, [14] [15] [17] :

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad (II.6)$$

- μ [H/m] : Permeabilité magnétique.
- $\mu^0 = 4\pi 10^{-7}$ [H/m] : Permeabilité magnétique du vide.
- μ_r : Permeabilité magnétique relative du milieu.

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \end{cases} \quad (II.7)$$

- ϵ [F/m] : Permittivité diélectrique
- $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ [F/m] : Constante diélectrique du vide
- ϵ_r : permittivité électrique relative de milieu d'après la loi d'Ohm

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \vec{E} \quad (II.8)$$

- σ [S.m⁻¹] : conductivité diélectrique.

II.3.3. Phénomènes hypothèses simplificatrices

Suivant les dispositifs que l'on étudie certains phénomènes deviennent négligeables (régimes quasi-stationnaires), ce qui va nous donner des équations découplées plus simples à résoudre, ajouté aussi que certaines hypothèses simplificatrices sont introduites, dans notre cas d'étude nous allons considérer que, [14] [15] [16] :

Dans un milieu conducteur σ est de l'ordre de 10^6 S.m⁻¹, et ϵ_0 de l'ordre de $8.85 \cdot 10^{-32}$ F/m jusqu'à des fréquences qui avoisinent les MHZ nous avons $\omega \cdot \epsilon \ll \sigma$ ce qui nous permet d'avoir :

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \mathbf{0} \quad (II.9)$$

La densité de charge est considérée comme nulle ($\rho=0$) Les paramètres σ , μ , ϵ sont considérés linéaires, donc ils ne dépendent pas de la solution du système. Le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale.

Toutes ces hypothèses considérées, le système d'équation devient, [12] [14] [16] :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II.10)$$

$$\overrightarrow{\text{div}}(\vec{D}) = \mathbf{0} \quad (II.11)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{J}_{ext} + \vec{J}_{ind} \quad (II.12)$$

$$\overrightarrow{\text{div}}(\vec{B}) = \mathbf{0} \quad (II.13)$$

II.3.4. Conditions de limite de passage

Les conditions de limite de passage définissent le comportement des champs électromagnétiques à l'interface entre deux milieux de propriétés physiques différentes (perméabilité magnétique, permittivité, conductivité, etc.). Ces conditions sont déduites directement des équations de Maxwell et sont essentielles pour garantir la continuité physique et mathématique des champs lors de la modélisation numérique, notamment par la

méthode des éléments finis. À une surface de séparation entre deux milieux, les équations de passage suivantes s'appliquent :

La composante normale de l'induction magnétique \vec{B} est continue :

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (II.14)$$

La composante tangentielle du champ électrique \vec{E} également continue en l'absence de variation brusque du potentiel :

$$\vec{n} \cdot (\vec{E}^2 - \vec{E}^1) = 0 \quad (II.15)$$

La composante normale du déplacement électrique \vec{D} peut présenter une discontinuité liée à une charge de surface ρs :

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho s \quad (II.16)$$

Enfin, la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} peut subir une discontinuité si une densité de courant surfacique \vec{K} est présente :

$$\vec{n} \cdot (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K} \quad (II.17)$$

Dans le cas particulier de la méthode des éléments finis basée sur le **potentiel vecteur magnétique \vec{A}** , la continuité de ce potentiel à l'interface permet de garantir automatiquement la continuité de la composante normale de \vec{B} , puisque :

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (II.18)$$

Ces conditions de limite jouent un rôle fondamental dans l'implémentation des modèles numériques et assurent la fidélité de la simulation aux lois fondamentales de l'électromagnétisme.

II.4. Formulation en potentiel vecteur A-V

Cependant du fait des fortes discontinuités de certaines variables aux interfaces entre deux régions de propriété différentes, la résolution directe des équations de Maxwell est délicate. Pour faciliter la résolution, ces équations sont transformées en équations de potentiels. Ceci conduit à la définition des formulations duales en potentiels combinés. La

formulation la plus connue est la formulation en \vec{A} -V (\vec{A} : potentiel vecteur magnétique ; V : potentiel scalaire électrique)

Cette formulation utilise le potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique V uniquement dans les régions conductrices [9].

L'utilisation du potentiel magnétique vecteur (A) et du potentiel scalaire électrique (V) permet de simplifier et de réduire le nombre d'inconnues.

D'après l'équation (II.13) on peut déduire

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

Donc :

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

On a aussi les équations (II.6),(II.8) et (II.12) on obtient

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\mathbf{rot}}(\vec{B}) &= \mu(\vec{J}_{exi} + \vec{J}_{ind}) \Rightarrow \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\mathbf{rot}}(\vec{B}) - \vec{J}_{ind} = \vec{J}_{exi} \Rightarrow \overrightarrow{\mathbf{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \vec{B}\right) - \sigma \vec{E} = \vec{J}_{exi} \\ &\Rightarrow \overrightarrow{\mathbf{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\mathbf{rot}}(\vec{A})\right) - \sigma \vec{E} = \vec{J}_{exi} \Rightarrow \overrightarrow{\mathbf{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\mathbf{rot}}(\vec{A})\right) + \sigma \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\mathbf{grad}}(V)\right] = \vec{J}_{exi} \end{aligned} \quad (II.21)$$

Pour avoir une solution unique de A on doit imposer une condition de jauge tel que la jauge de Coulomb :

$$\begin{cases} \overrightarrow{\mathbf{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\mathbf{rot}}(\vec{A})\right) + \sigma \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\mathbf{grad}}(V)\right] = \vec{J}_{exi} \\ \mathbf{div}(\vec{A}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (II.2)$$

II.5. Formulation dans le cas axisymétrique

Dans une configuration axisymétrique telle que représenté par la figure II. la formulation à l'aide du potentiel vecteur présente deux intérêts importants. Le premier intérêt, le système se réduit à une seule inconnue qui est le potentiel vecteur magnétique. Le deuxième intérêt est que A a une seule composante, en effet le courant est circulaire, donc il a une seule composante et elle est suivant l'axe θ .

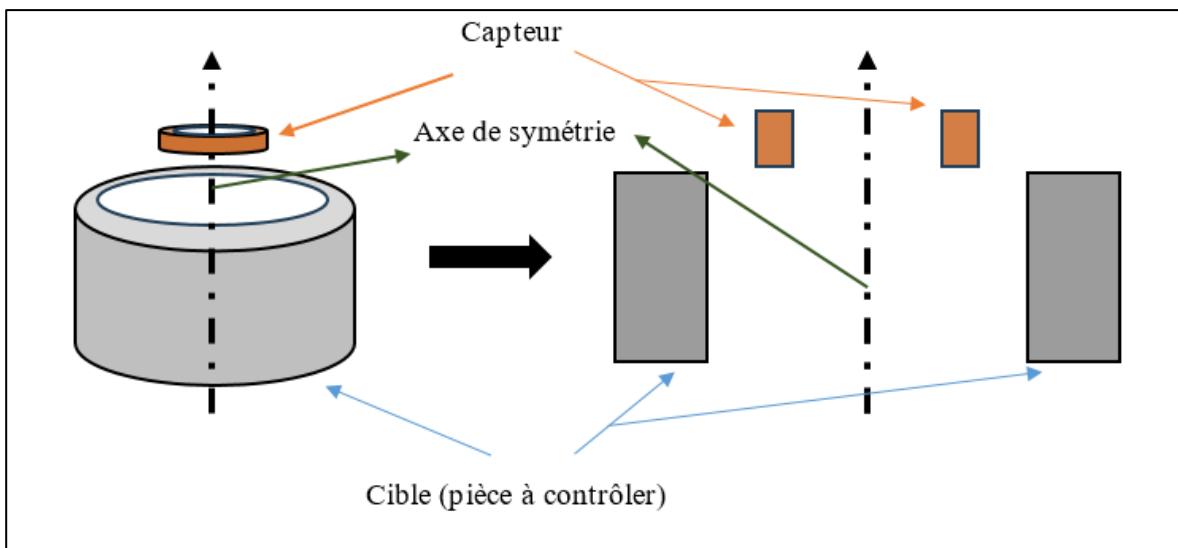


Figure II.3 : Modèle d'un système CND-CF axisymétrique

On donne les composantes de toutes les variables comme suivant :

$$\vec{J} \begin{bmatrix} 0 \\ J_\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{E} \begin{bmatrix} 0 \\ E_\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{A} \begin{bmatrix} 0 \\ A_\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{B} \begin{bmatrix} B_r \\ 0 \\ B_z \end{bmatrix} \text{ donc } \vec{H} \begin{bmatrix} H_r \\ 0 \\ H_z \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

Le potentiel vecteur magnétique A ne possède qu'une seule composante ortho radiale (suivant θ), on déduit que :

$$\mathbf{div}(A) = \mathbf{0}; \text{ Ce qui impose automatiquement l'unicité de la solution} \quad (II.24)$$

D'autre part, d'après les équations (II.20) et (II.11), on peut obtenir l'équation suivante :

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

$$\mathbf{div}(\vec{D}) = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{div}(\vec{E}) = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{div}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{grad}(V)\right) = \mathbf{0} \quad (II.25)$$

$$\mathbf{div}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial \mathbf{t}}\right) + \mathbf{div}(\overrightarrow{grad}(V)) = \mathbf{0}$$

Mais d'après l'équation (II.24) :

$$\mathbf{div}(\mathbf{A}) = \mathbf{0} ; \text{ donc } \mathbf{div}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial \mathbf{t}}\right) = \mathbf{0} ; \text{ alors } \mathbf{div}(\overrightarrow{grad}(V)) = \mathbf{0} \Rightarrow \overrightarrow{grad}(V) = \mathbf{0} \quad (II.26)$$

En injectant l'équation (II.26) dans l'équation (II.22), on obtient l'équation électromagnétique suivante

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) + \boldsymbol{\sigma} \frac{\partial \vec{A}}{\partial \mathbf{t}} = \vec{J}_{exi} \quad (II.27)$$

En cylindriques le rotationnel s'écrit :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \\ \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \left(\frac{\partial r A_\theta}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right) \end{bmatrix} \Rightarrow \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) = \begin{bmatrix} -\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \\ 0 \\ \frac{1}{r} \left(\frac{\partial r A_\theta}{\partial r} \right) \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

Nous pouvons réécrire l'équation (II.27), en y introduisant l'équation (II.28)

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu r} \frac{\partial r A_\theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \boldsymbol{\sigma} \frac{\partial \vec{A}}{\partial \mathbf{t}} = J_{s\theta} \quad (II.29)$$

On pose $A = rA_\theta$ et $J_{s\theta} = J_s$. l'équation (II.29) devient :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \frac{\boldsymbol{\sigma}}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial \mathbf{t}} = J_s \quad (II.30)$$

Les sources sont sinusoïdales, nous pouvons réécrire l'équation (II.30) à l'aide des grandeurs complexes :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \frac{\boldsymbol{\sigma}}{r} j\omega A = J_s \quad (II.31)$$

Pour la commodité de l'écriture, on a noté \mathbf{A} et \mathbf{J}_s les composantes ortho radiales complexes de \mathbf{A} et \mathbf{J}_s .

II.6. Conditions aux limites

L'équation (II.31), en y introduisant les conditions aux limites permet de déterminer les valeurs du potentiel vecteur local \vec{A} dans son domaine de résolution. En générale, les conditions aux limites dans les systèmes de CND-CF peuvent être de deux types [1]:

II.6.1. Les conditions de type Dirichlet

La valeur du potentiel vecteur est imposée à la surface du domaine de résolution Γ

$$AI_{\Gamma} = A_0 \quad (II.32)$$

On peut citer à titre d'exemple, le cas possédant une géométrie symétrique et les sources de courant qui sont disposées de manière antisymétrique (Figure numero....). Nous avons une condition de Dirichlet $AI_{\Gamma} = 0$ sur l'axe de symétrie.

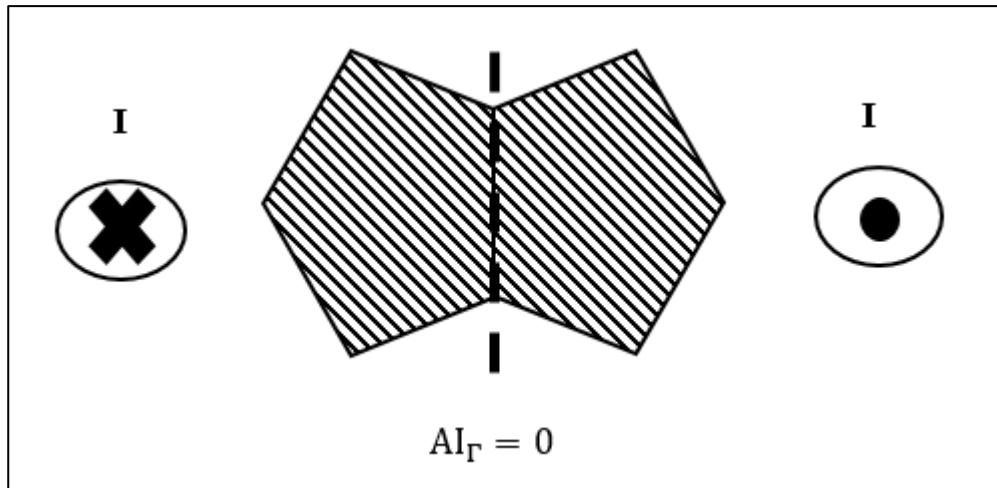


Figure II.4 : Condition aux limites nulle de Dirichlet pour les cas possédant une symétrie de la géométrie et une excitation antisymétrique

II.6.2. Les conditions de type Neumann

La dérivée du potentiel vecteur par rapport à la normale à la surface est imposée

$$\frac{\partial A}{\partial n} I_{\Gamma} = A_n \quad (II.33)$$

La condition de Neumann est introduite dans les cas possédant une symétrie de la géométrie et les sources de (Figure II.4). Nous avons une condition de Neumann

$$\frac{\partial A}{\partial n} I_{\Gamma} = 0 \quad (II.34)$$

Sur l'axe de symétrie. Nous pouvons imposer cette condition pour une interface avec un matériau de perméabilité infinie.

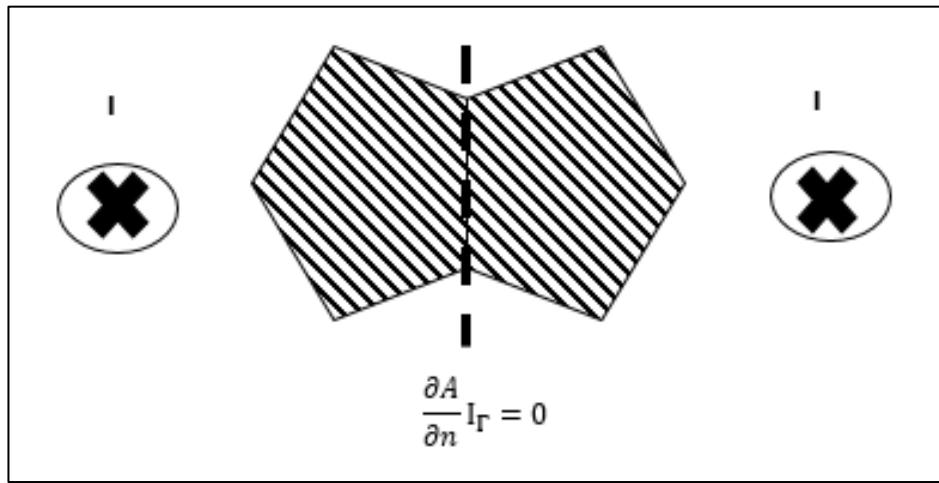


Figure II.5 : Condition aux limites nulle de Neumann pour les cas possédant une symétrie de la géométrie ainsi que de l'excitation

II.7. Calcule de l'impédance du capteur

La résolution de l'équation (II.31) permet d'évaluer le champ magnétique produit dans la bobine. L'impédance de la bobine du capteur peut être déterminée à partir de l'énergie magnétique. En sachant que la tension induite dans une spire de capteur est donnée par :

$$V = j\omega \int A \, dl \quad (\text{II.35})$$

Où :

V : tension induite par le champ magnétique,

ω : pulsation (rad/s),

A : potentiel vecteur électromagnétique,

dl : élément infinitésimal de longueur le long de la spire

Et comme, l'impédance complexe s'écrit sous forme :

$$Z = R + jX \quad (\text{II.36})$$

En comparant avec l'expression précédente, on remarque que

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{J\omega N}{I} \int A \, dL \quad (II.37)$$

N : nombre de spires.

I : courant d'excitation imposé.

A : potentiel vecteur électromagnétique.

ω : pulsation propre.

II.8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les équations de base de l'électromagnétisme régissant le modèle mathématique du système CND-CF. elles ont été adaptées pour les systèmes cylindriques axisymétriques. La résolution de l'équation obtenue sera exposée dans le prochain chapitre en prenant le potentiel vecteur magnétique A comme la variable d'état pour évaluer l'impédance du capteur.

Chapitre III

Programmation, Simulation et

supervision

III.1. Introduction

La méthode des éléments finis est mise en œuvre dans le logiciel COMSOL Multiphasiques. Ce dernier constitue un outil puissant de conception et de modélisation, dont l'avantage principal réside dans sa grande flexibilité : il n'est pas limité à un domaine d'application spécifique. Il propose une large bibliothèque de modèles permettant de simuler divers phénomènes physiques à l'aide d'équations aux dérivées partielles (EDP), y compris les équations de Maxwell.

Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé COMSOL Multi-physiques pour simuler un processus de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) appliqué à une pièce cylindrique conductrice. L'étude a porté sur la détection de défauts situés à deux emplacements distincts : en surface (défaut externe) et à l'intérieur de la pièce (défaut interne). Ces simulations ont été réalisées selon deux configurations : d'abord avec une seule bobine d'excitation, puis avec deux bobines têtes bêches afin d'étudier leur efficacité et leur sensibilité à la détection des défauts.

Les outils numériques de simulation d'aujourd'hui sont devenus très performants grâce, d'une part, aux avancées technologiques des machines (vitesse d'exécution, mémoire allouée), et d'autre part, aux développements de modèles numériques de plus en plus adaptés aux problèmes rencontrés. Ces outils sont généralement intégrés à des plates-formes de simulation telles que flux 2D ou 3D.

Pour notre cas, nous avons choisi COMSOL Multi-physiques 5.4, en raison de sa caractéristique principale : il est multidisciplinaire et permet d'aborder efficacement des phénomènes couplés, ce qui est essentiel pour modéliser des interactions électromagnétiques complexes telles que celles du CND- CF.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu la formulation magnétodynamique utilisée pour élaborer notre modèle CND-CF 2D en mode absolu puis en mode différentiel. Elle est basée sur le potentiel vecteur magnétique. Nous mettrons en évidence l'impact du défaut sur le signal de l'impédance Capteur-Pièce. Ensuite, nous étudierons l'effet de plusieurs paramètres influents sur la réponse du capteur.

III.2. Présentation de l'interface utilisateur de COMSOL 5.4

L'environnement de travail de COMSOL 5.4 utilisé dans le cadre de nos simulations se structure autour de quatre zones fonctionnelles principales. Le panneau latéral gauche, intitulé "Modèle", sert de centre de contrôle pour l'ensemble des paramètres de simulation. Il comprend notamment les modules de définition géométrique, de spécification des propriétés matérielles, de configuration physique, de génération du maillage, ainsi que les paramètres d'étude et de visualisation des résultats.

La colonne adjacente à droite propose une interface contextuelle dynamique qui s'adapte aux éléments sélectionnés dans le panneau principal. Cette zone interactive permet de préciser les caractéristiques géométriques, les conditions aux limites et les propriétés physiques propres à chaque composant du modèle. La partie supérieure droite de l'interface est occupée par la fenêtre de visualisation graphique, spécialement configurée pour nos travaux en axisymétrique. Cette fenêtre intègre des outils de navigation adaptés (zoom, déplacement) et des fonctions de sélection spécifiques aux problèmes axisymétrique (sélection de domaines, de contours). La zone inférieure de l'interface, quant à elle, affiche en temps réel les messages système, l'avancement des calculs, l'historique des opérations et les résultats numériques obtenus [1].

Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 5.4 sont présentés sur la figure ci-dessous (III.1) :

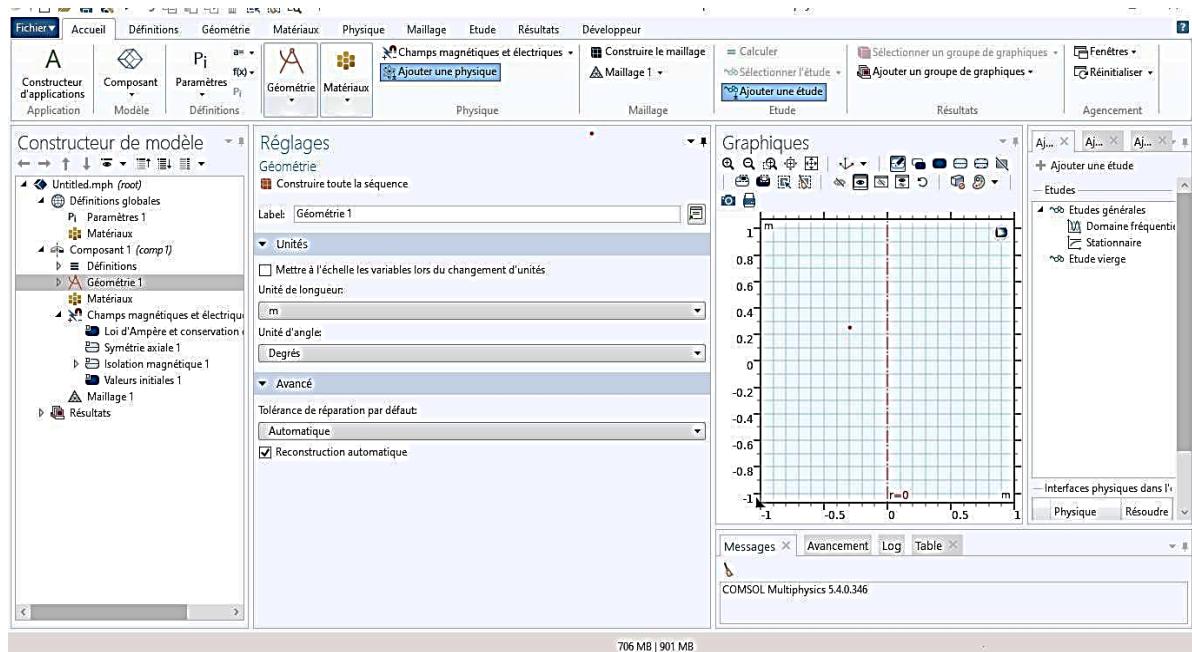


Figure III.1 : Interface utilisateur de COMSOL 5.4

III.3. Application à la détection par capteur absolu en mouvement des configurations cylindrique

III.3.1. Présentation du dispositif et description du modèle géométrique

Le dispositif étudié, illustré à la figure III.2 est composé d'un tube conducteur présentant un rayon interne de 9,84 mm, une épaisseur de 1,27 mm, une longueur de 50 mm, et une conductivité électrique de 1 MS/m. À l'intérieur de ce tube se déplace une sonde en cuivre, d'une conductivité de 59,6 MS/m, composée de 70 spires [34], ayant un rayon intérieur de 7,75 mm, une épaisseur de 0,75 mm et une longueur axiale de 2 mm. Cette sonde est conçue pour glisser axialement afin de détecter d'éventuels défauts situés soit sur la surface interne, soit sur la surface externe du tube.

Le logiciel de simulation utilisé a permis d'établir un modèle de la géométrie du dispositif très précis. Il a généré des images géométriques réalistes ainsi que le maillage détaillé du domaine étudié, ce qui a facilité l'analyse numérique du phénomène. Les simulations ont été réalisées pour trois fréquences standards en contrôle non destructif par courants de Foucault : 100 kHz, 240 kHz et 500 kHz.

Grâce à la symétrie de révolution du système, le domaine de calcul a été réduit à une moitié du dispositif, comme montré à la figure III.3. Le défaut simulé est axisymétrique, de 1 mm de longueur et atteignant 20 % de l'épaisseur du tube. Il est placé au centre longitudinal du tube. Le capteur effectue un balayage le long de l'axe, depuis une position où aucun défaut n'est détecté, jusqu'à une position symétrique par rapport à celle du défaut, afin de minimiser les effets de bord liés aux extrémités. À chaque position du capteur, les grandeurs physiques suivantes sont calculées : l'impédance absolue et l'impédance différentielle, ainsi que le vecteur potentiel magnétique généré.

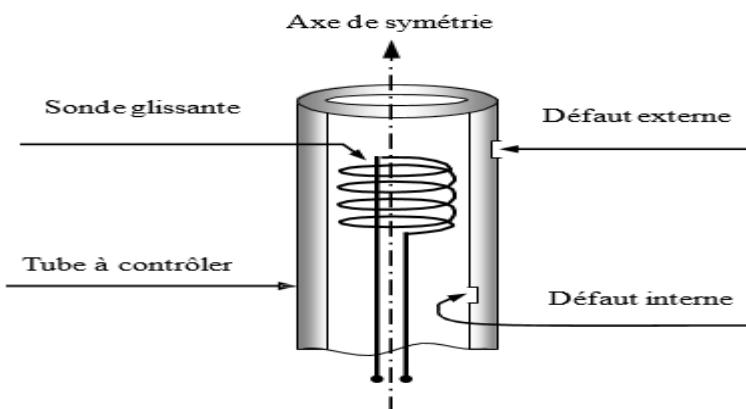


Figure III.2 : Structure géométrique du dispositif de contrôle à capteur absolu en mouvement

III.3.2. Présentation géométrique de la pièce cylindrique

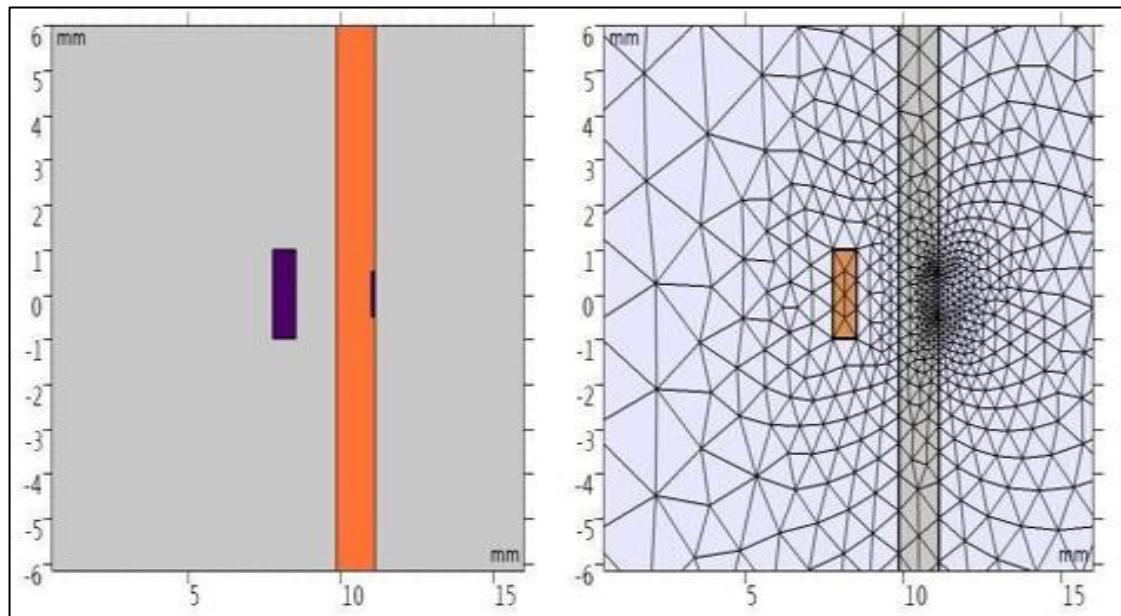


Figure III.3 : Configuration axisymétrique 2D simulée avec défaut externe centré

Figure III.4 : Maillage du modèle axisymétrique 2D avec défaut externe centré

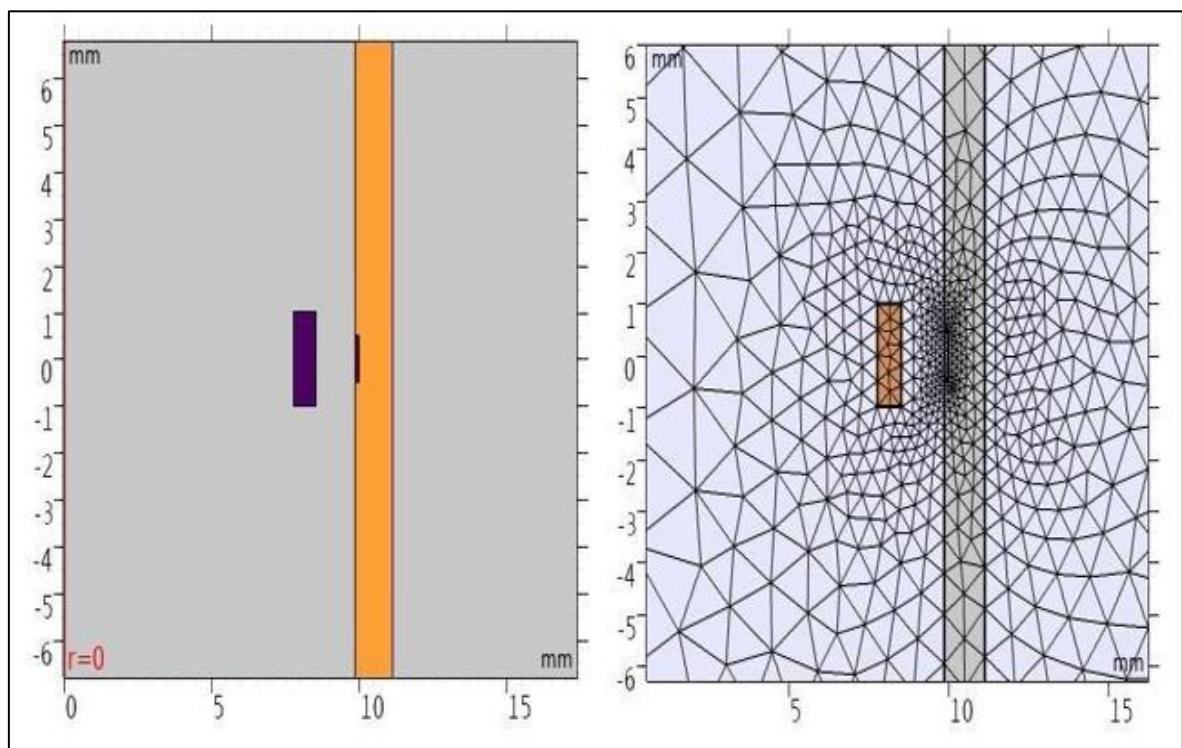


Figure III.5 : Configuration axisymétrique 2D simulée avec défaut externe centré

Figure III.6 : Maillage de modèle asymétrique 2D avec défaut interne centré

III.3.3. Variation d'impédance

Le tableau III.1 rassemble les différentes formes d'impédance utilisables pour l'analyse en contrôle non destructif par courants de Foucault aux fréquences standard. On y trouve notamment l'impédance propre Z_0 de la bobine à vide, l'impédance Z_1 mesurée lorsque le capteur interagit avec le tube sain décrit précédemment, L'impédance différentielle ΔZ_{10} , obtenue par soustraction entre Z_1 et Z_0 . Ces grandeurs sont complétées par leurs équivalents en présence de défaut : ΔZ_{21} pour l'impédance différentielle.

L'impédance normalisée joue un rôle clé dans la caractérisation des défauts car elle isole leur signature électromagnétique spécifique. Son calcul repose sur deux principes fondamentaux : la soustraction de la résistance à vide de la résistance globale, puis la comparaison du résultat à la réactance propre du capteur. Cette méthodologie permet d'évaluer précisément le rapport entre résistance et réactance ainsi que l'évolution relative de la réactance entre états. Lorsqu'on passe de la détection de matériau à celle de défauts, la référence devient l'impédance du système sain, et les variations sont quantifiées en pourcentage pour une interprétation standardisée.

Tableau III.1: Impédances caractéristiques obtenues par COMSOL 5.4

Fréquences : f (kHz)	100	240	500
Impédance sans pièce : Z_0 (Ω)	2.779+83.856i	2.779+201.041i	2.779+418.764i
Impédance avec pièce sans défaut : Z_1 (Ω)	11.737+60.673i	15.713+137.333i	21.751+279.116i
$\Delta Z_{10} = Z_1 - Z_0$ (Ω)	8.178-23.243i	12.147-63.745i	18.144-139.619i
Impédance avec défaut : Z_2 (Ω)	11.671+61.022i	15.551+138.182i	21.254+281.071i
$\Delta Z_{21} = Z_2 - Z_1$ (Ω)	-0.066+0.349i	-0.162+0.849i	-0.497+1.955i

Tableau III.2: Impédances caractéristiques obtenues par B. Maouche [34]

Fréquences : f (kHz)	100	240	500
Impédance sans pièce : $Z_0(\Omega)$	3.558+83.575i	3.558+200.580i	3.558+417.876i
Impédance avec pièce sans défaut : $Z_s(\Omega)$	12.427+60.613i	16.313+137.296i	22.145+279.145i
$\Delta Z_s = Z_s - Z_0$	8.868-22.962i	12.754-63.285i	18.587-138.730i
Impédance avec défaut : $Z_d(\Omega)$	12.331+61.142i	16.119+138.542i	21.536+281.992i
$\Delta Z_d = Z_s - Z_d(\Omega)$	-0.096+0.529i	-0.194+1.246i	-0.610+2.846i

Tableau III.3: Comparaison des impédances à 100 kHz entre les résultats obtenus par B.

Maouche [34] et les résultats obtenus par COMSOL 5.4

Fréquences : f (kHz)	Résultats obtenus sous Comsol	Les résultats de B. Maouche [34]
Impédance sans pièce : $Z_0(\Omega)$	2.779+83.856i	3.558+83.575i
Impédance avec pièce sans défaut : $Z_1(\Omega)$	11.737+60.673i	12.427+60.613i
$\Delta Z_{10} = Z_1 - Z_0(\Omega)$	8.178-23.243i	8.868-22.962i
Impédance avec défaut : $Z_2(\Omega)$	11.671+61.022i	12.331+61.142i
$\Delta Z_{21} = Z_2 - Z_1(\Omega)$	-0.066+0.349i	-0.096+0.529i

Une analyse comparative a été menée à la fréquence de 100 kHz afin d'évaluer la précision et la fiabilité du dispositif utilisé pour la caractérisation des défauts par courants de Foucault. Bien qu'aucune donnée réelle ne soit disponible, les résultats de simulation obtenus sous COMSOL ont été comparés à ceux rapportés par M. Maouche [34] pour validation.

L'impédance obtenue sans pièce (Z_0) est de $2.779 + 83.856i \Omega$, une valeur très proche de celle rapportée par M. Maouche ($3.558 + 83.575i \Omega$). L'écart observé sur la partie réelle

reste modeste (environ 0.779Ω), tandis que la partie imaginaire présente une concordance quasi parfaite, traduisant une bonne reproductibilité.

Avec la pièce sans défaut (Z_1), une nouvelle convergence est constatée : les valeurs obtenues (11.737

$+ 60.678i \Omega$) sont très similaires à celles de la référence ($12.427 + 60.613i \Omega$). Cette faible variation confirme la bonne maîtrise des paramètres géométriques et électromagnétiques du système. La différence d'impédance $\Delta Z_{10} = Z_1 - Z_0$ donne $8.178 - 23.178i \Omega$ dans ce travail, contre $8.868 - 22.962i \Omega$ selon M. Maouche, ce qui traduit une cohérence dans les tendances physiques observées.

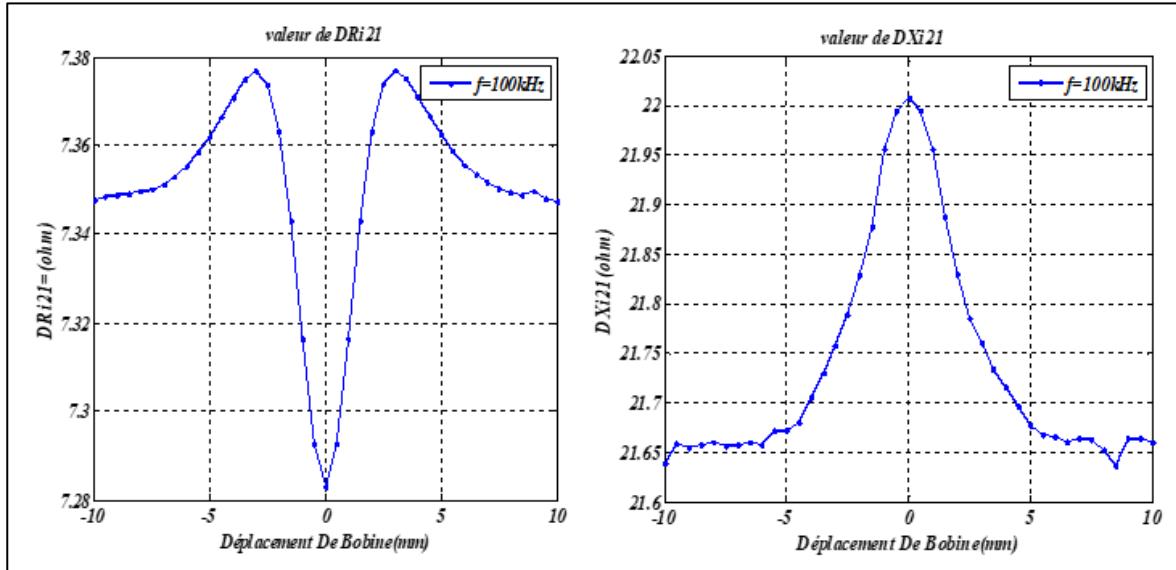
En présence d'un défaut, l'impédance obtenue (Z_2) atteint $11.671 + 61.032i \Omega$, très proche encore une fois de la valeur de référence ($12.331 + 61.142i \Omega$). La variation induite par le défaut, $\Delta Z_{21} = Z_2 - Z_1$, est de $-0.066 + 0.349i \Omega$ (travail actuel) contre $-0.096 + 0.529i \Omega$ (référence), ce qui montre que la sensibilité du système est suffisante pour détecter de faibles anomalies dans le matériau. Bien que le capteur utilisé soit de type absolu, l'approche par comparaison d'impédance entre états (vide, sain, défectueux) permet d'isoler efficacement la contribution électromagnétique du défaut.

En conclusion, les écarts observés entre les résultats de simulation (COMSOL) et les données de référence demeurent faibles, tant en valeur absolue qu'en tendance. Cela confirme à la fois la fiabilité des simulations numériques et la pertinence de la méthodologie d'analyse différentielle pour la détection de défauts par courants de Foucault.

III.3.4. Signature de défauts par les paramètres de l'impédance

À la fréquence de 100 kHz de la figure III.7 (défaut interne) et la figure III.8 (défaut externe) d'une fréquence 100 et 240 KHz mettent en évidence des signatures électromagnétiques distinctes lors du déplacement du capteur le long du tube. Ces représentations illustrent les variations de la résistance, de la réactance, du module et de la phase. On observe que pour les défauts internes, les changements de réactance surpassent nettement les variations de résistance, tandis que pour les défauts externes, la tendance inverse se manifeste avec une dominance marquée des fluctuations de résistance. Cette opposition reflète la nature différente de l'interaction physique : les défauts profonds perturbent principalement le stockage d'énergie magnétique (réactance), alors que les défauts de surface affectent davantage la dissipation énergétique (résistance). La

comparaison de ces composantes offre ainsi un indicateur fiable pour identifier la



localisation des anomalies sans recours à des méthodes complémentaires.

Figure III.7 : Variation des paramètres de l'impédance en fonction du déplacement pour un défaut interne à 100kHz.

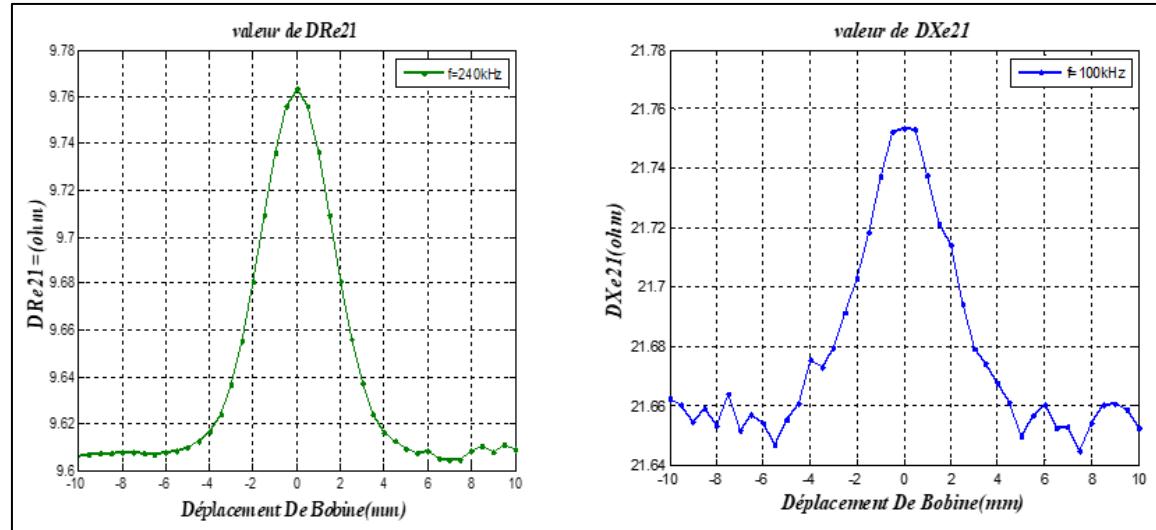


Figure III.8 : Variation des paramètres de l'impédance en fonction du déplacement pour un défaut externe à 100 et 240 kHz.

III.4. Norme de l'induction magnétique

Une tension d'excitation de 1 V est appliquée aux bornes du capteur, en présence de la charge. Cette sollicitation électrique induit une distribution du la densité de champ magnétique, comprenant des composantes active, dont la configuration spatiale dépend directement de la géométrie du dispositif et des propriétés électromagnétiques des matériaux.

À la fréquence de 100 kHz, la distribution de la densité de flux magnétique B permet de visualiser deux types de défauts présents dans la structure étudiée : un défaut interne, localisé au centre du matériau, et un défaut externe, positionné en périphérie, près de la surface. Ces défauts apparaissent distinctement sur les figures III.9 et III.10 sous forme de perturbations localisées des lignes iso-valeurs du champ magnétique. Le défaut interne se manifeste par une déformation concentrée et symétrique des lignes de champ dans la zone centrale, tandis que le défaut externe provoque une déviation du flux magnétique dans la région périphérique. Dans les deux cas, les anomalies induisent une augmentation locale de l'intensité du champ, avec des valeurs de densité atteignant environ 18×10^{-3} T. Ces variations traduisent une interaction entre le champ électromagnétique et les hétérogénéités présentes, et démontrent l'intérêt de cette approche pour la détection non destructive de défauts, qu'ils soient en profondeur ou en surface du matériau.

Une tension d'excitation de 1 V est appliquée aux bornes du capteur, ce qui engendre une distribution de la densité de flux magnétique, comprenant des composantes actives, dont la configuration spatiale dépend directement de la géométrie du dispositif et des propriétés électromagnétiques des matériaux.

À la fréquence de 100 kHz, la distribution de la densité de flux magnétique B permet de visualiser deux types de défauts présents dans la structure étudiée : un défaut interne, localisé au centre du matériau, et un défaut externe, positionné en périphérie, près de la surface. Ces défauts apparaissent distinctement sur les figures III.8 et III.9 sous forme de perturbations localisées des lignes de champ de l'induction magnétique.

Le défaut interne se manifeste par une déformation concentrée et symétrique des lignes de champ dans la zone centrale, tandis que le défaut externe provoque une déviation du flux magnétique dans la région périphérique. Dans les deux cas, les anomalies induisent une augmentation locale de l'intensité du champ, avec des valeurs de densité atteignant environ 18×10^{-3} T. Ces variations traduisent une interaction entre le champ électromagnétique et les hétérogénéités présentes, et démontrent l'intérêt de cette approche pour la détection non destructive de défauts, qu'ils soient en profondeur ou en surface du matériau.

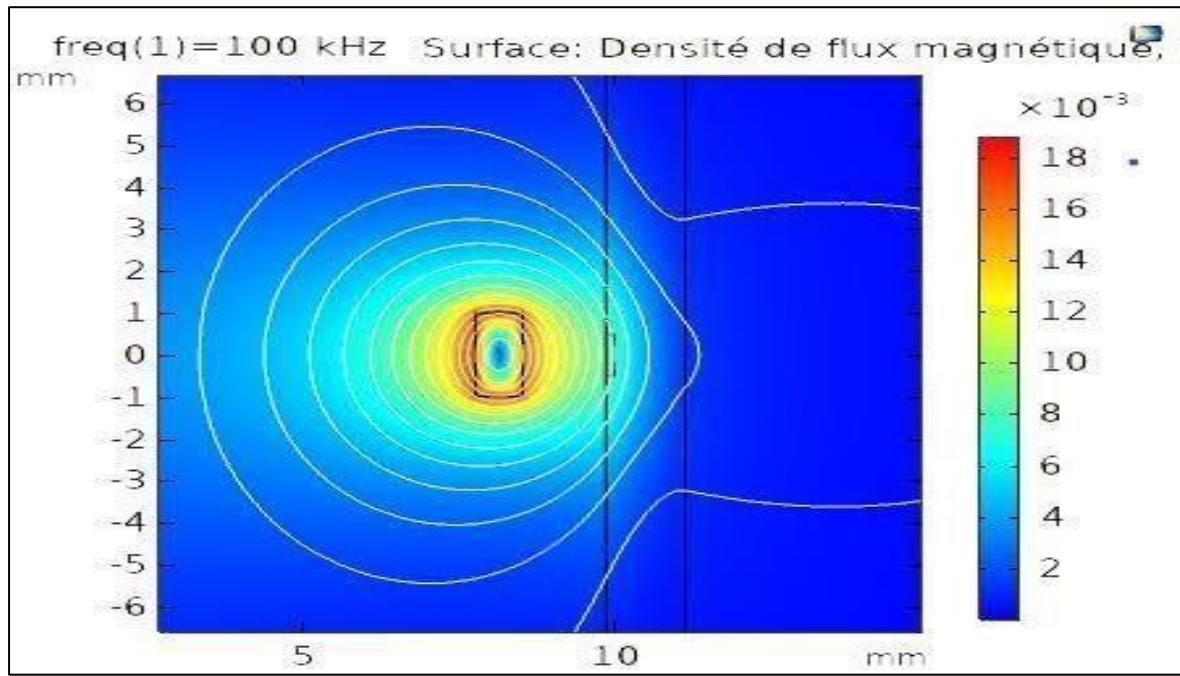


Figure III.9 : Lignes de champ et induction magnétique à la position du Capteur interne

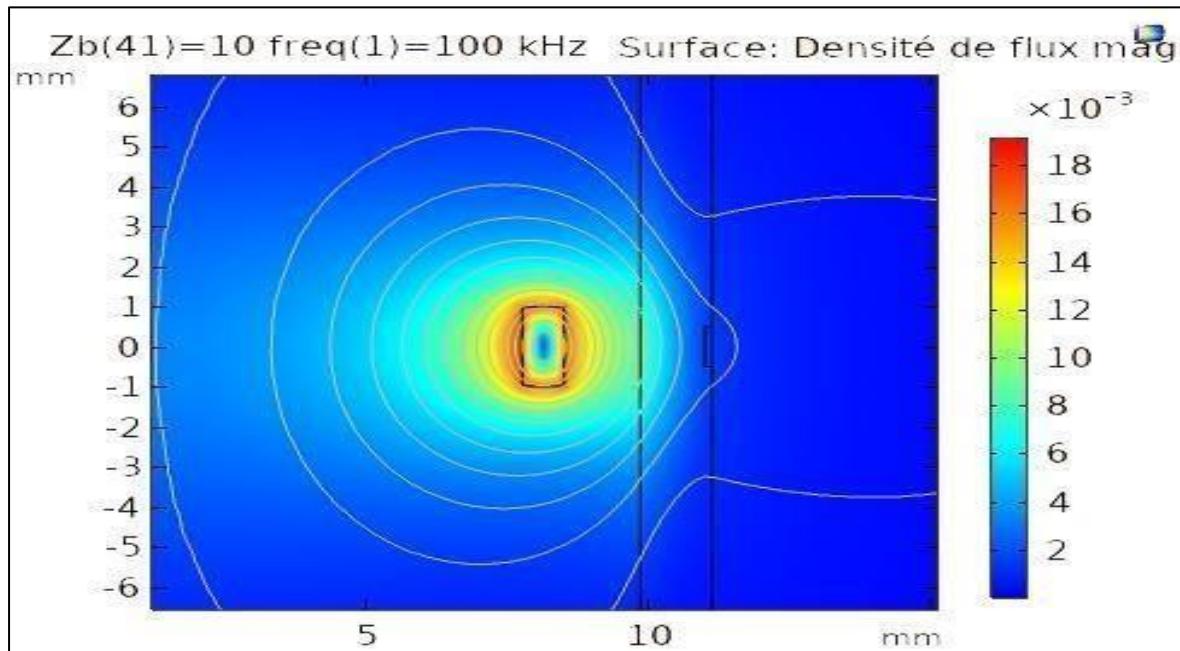


Figure III.10 : Lignes de champ et induction magnétique à la position du Capteur externe

III.5. Application à la détection par capteur différentiel en mouvement des configurations cylindrique

III.5.1. Présentation du dispositif et description du modèle géométrique

Le dispositif représenté à la figure III.11 est constitué d'un tube conducteur présentant une épaisseur de 1,27 mm, un rayon intérieur de 9,84 mm et une longueur de 50 mm. La pièce à examiner est inspectée à l'aide d'un capteur différentiel, sous forme d'une sonde glissante insérée à l'intérieur du tube. Ce capteur est fabriqué en cuivre, dont la conductivité électrique est de $59,6 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$. Il est composé de deux bobines identiques, chacune formée de 70 spires. Les dimensions de chaque bobine sont les suivantes : une hauteur axiale de 2 mm, un rayon intérieur de 7,75 mm et une largeur radiale de 0,75 mm. L'écartement axial entre les deux bobines est de 0,5 mm.

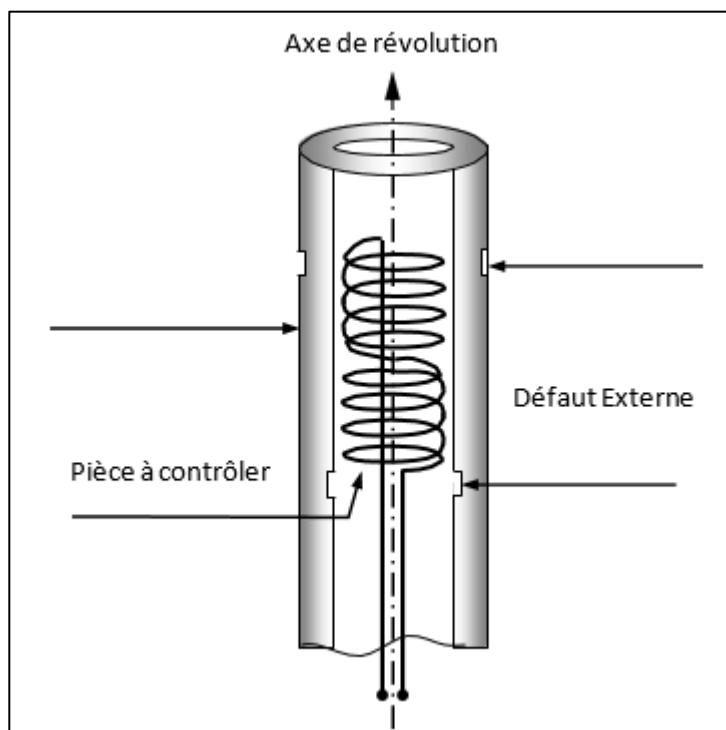


Figure III.11 : Structure géométrique du dispositif à capteur différentiel

III.5.2. Modèle géométrique et maillage

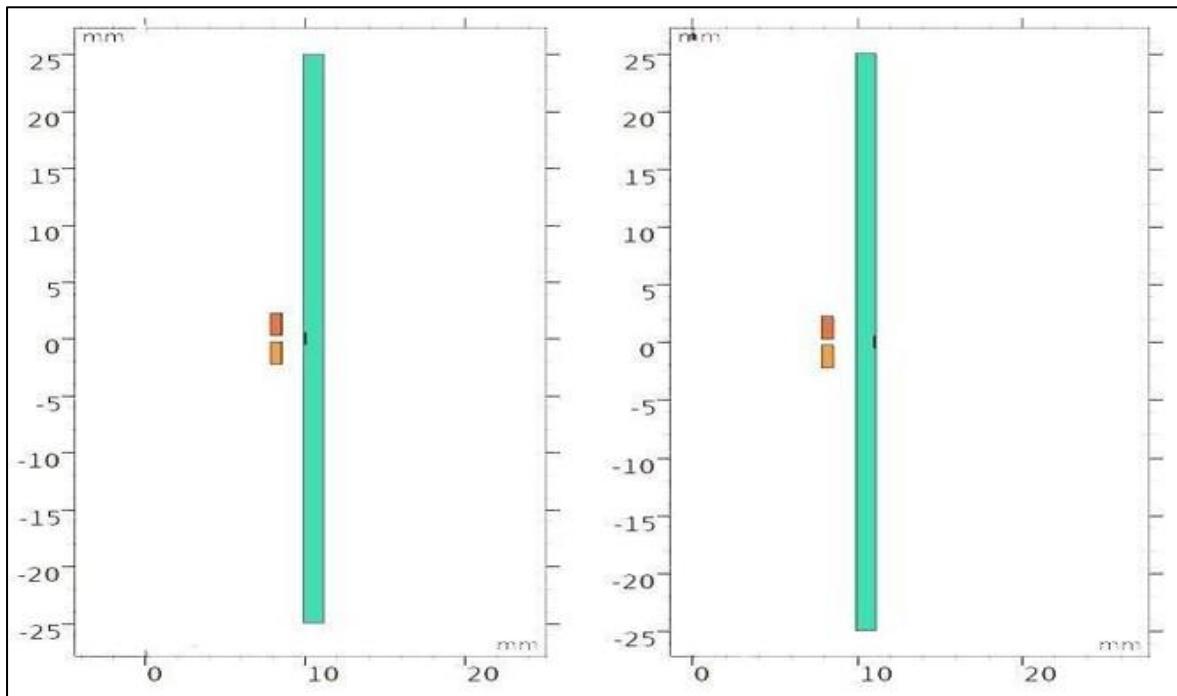


Figure III.12 : Configuration axisymétrique 2D simulée avec un défaut interne centré

Figure III.13 : Configuration axisymétrique 2D simulée avec un défaut externe centré

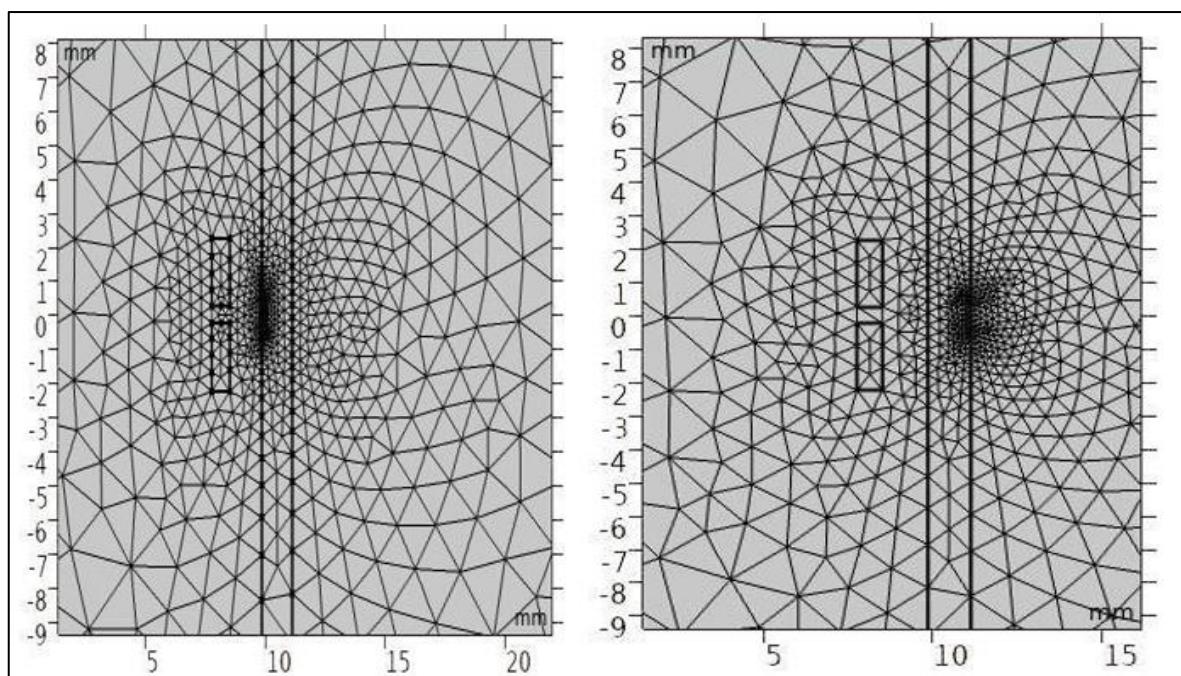


Figure III.14 : Maillage du domaine d'étude (Défaut interne)

Figure III.15 : Maillage du domaine d'étude (Défaut externe)

III.6. Les variations des paramètres de l'impédance

L'analyse suivante concerne la variation de la résistance et de la réactance en présence d'un défaut, à une fréquence de 240 kHz. Les défauts étudiés sont internes et externes, de 20 % de profondeur et de 1 mm de longueur. Les résultats présentés dans les figures III.16 et III.17 montrent l'évolution de ces deux paramètres en fonction du déplacement du capteur le long du tube.

Lorsque le capteur se trouve dans une zone saine, c'est-à-dire en l'absence de défaut en face de lui, la variation de la résistance et de la réactance est nulle. Cette stabilité traduit l'équilibre du champ magnétique généré par les deux bobines, qui reçoivent une réponse identique du matériau.

À l'approche du défaut, une augmentation progressive de la variation de la résistance et de la réactance est observée. Cette perturbation est due à l'asymétrie introduite lorsque l'une des bobines commence à interagir avec la zone défectueuse, tandis que l'autre reste au-dessus d'une zone saine. Cette situation engendre une dissymétrie du champ électromagnétique, conduisant à une variation différentiée du signal.

Lorsque le capteur est positionné exactement en face du défaut, les deux bobines se retrouvent à égale distance du centre du défaut. Dans ce cas, leur réponse devient à nouveau symétrique, ce qui explique la disparition de la variation différentielle de la résistance et de la réactance à cette position centrale.

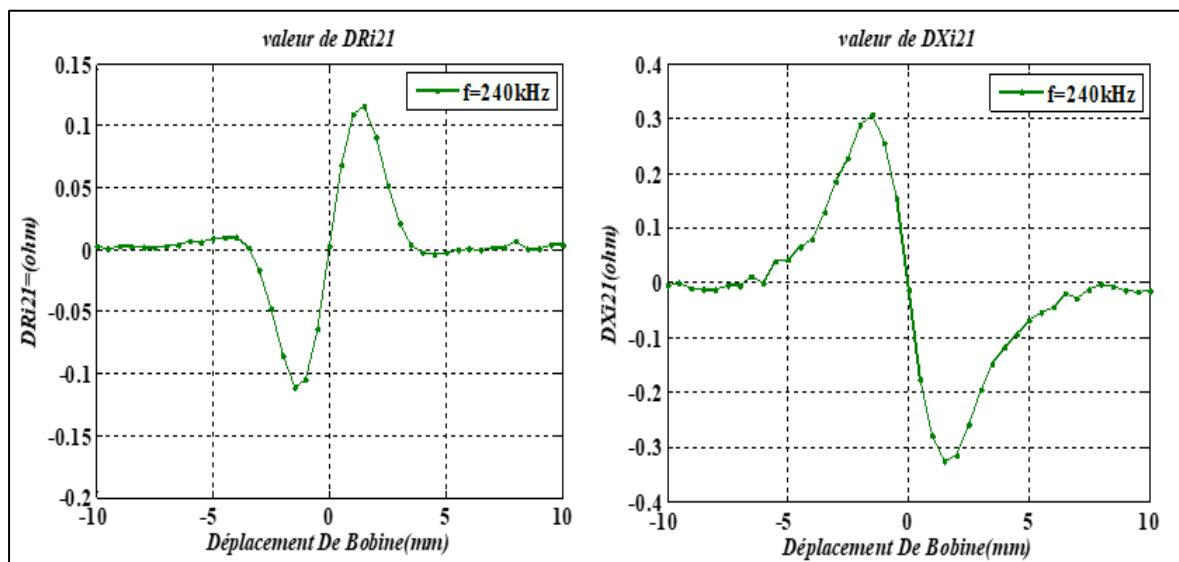


Figure III.16 : Variation de l'impédance en fonction du déplacement de deux bobines pour un défaut interne à 240KHz

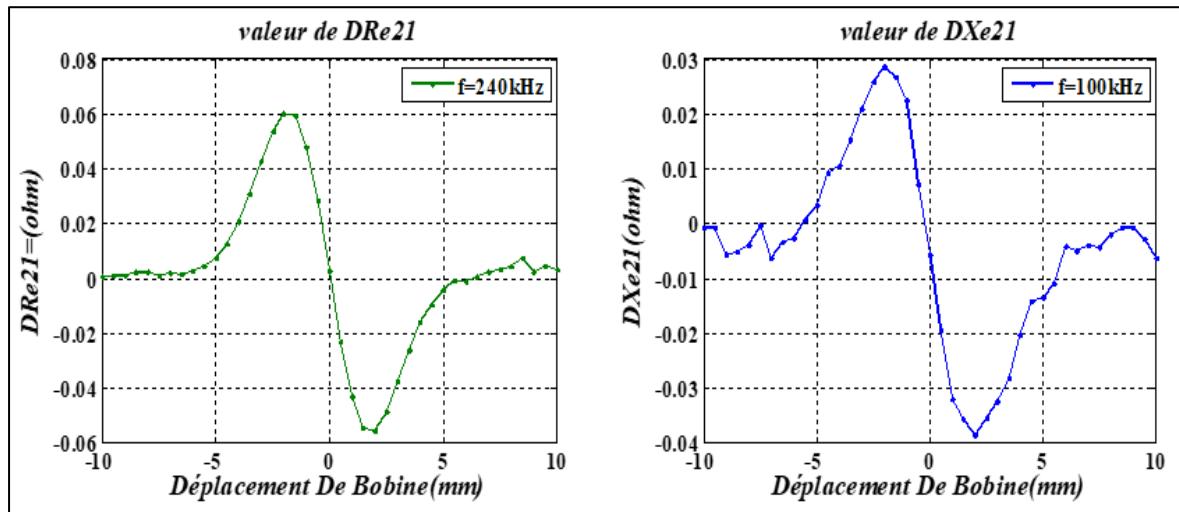


Figure III.17 : Variation de l'impédance en fonction du déplacement de deux bobines pour un défaut externe à 240 et 100 KHz

III.7. Visualisation de l'induction de champ magnétique B

La Figure III.17 visualise les lignes de norme de la densité de flux magnétique pour un défaut interne à 100 kHz. On observe une perturbation concentrée et symétrique des lignes de champ au centre du tube, avec une intensité locale atteignant 18 mT. Cette déformation caractéristique explique la sensibilité accrue de la réactance pour les défauts profonds.

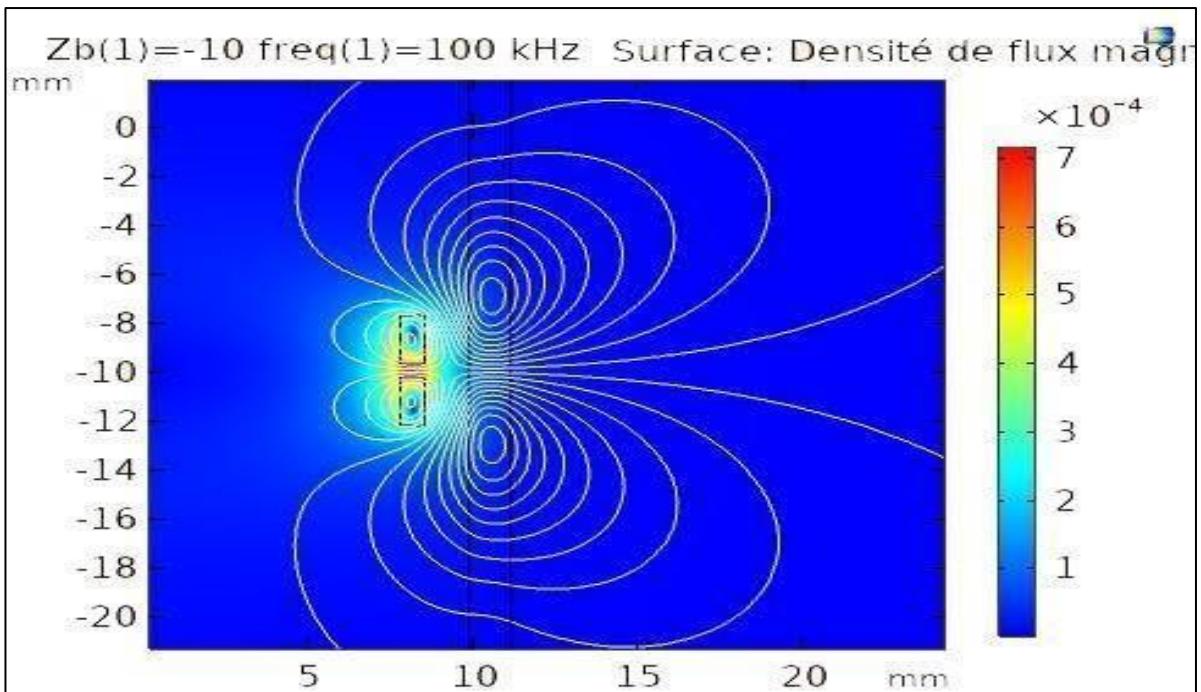


Figure III.18 : Lignes de champ et norme de la densité de flux magnétique à la position du capteur interne

La Figure III.18 montre la distribution pour un défaut externe à 100 kHz. La perturbation est clairement localisée en périphérie, provoquant une déviation marquée des lignes de champ près de la surface. Cette concentration périphérique du flux magnétique corrobore la dominance des variations de résistance observées dans les signatures d'impédance.

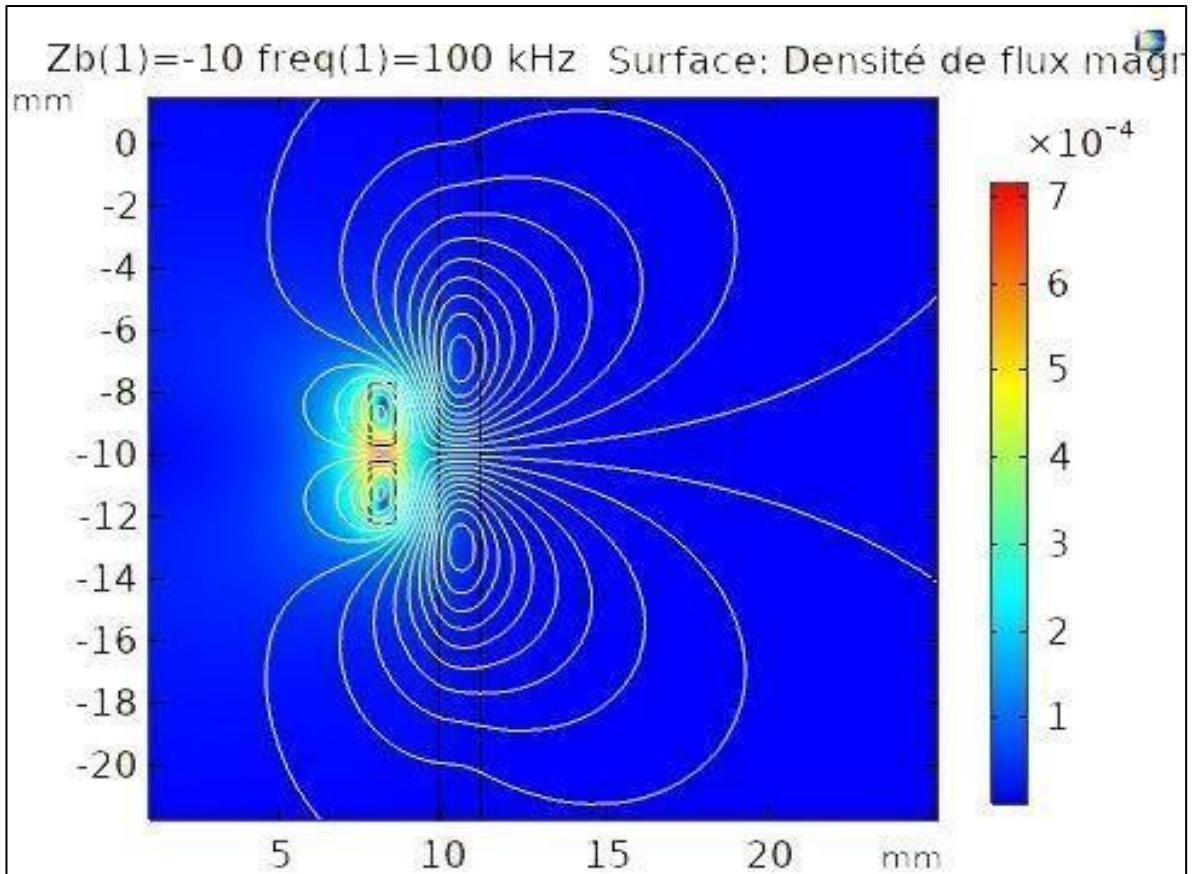


Figure III.19 : Lignes de champ et norme de la densité de flux magnétique à la position du capteur externe

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une modélisation approfondie du contrôle non destructif par courants de Foucault en nous appuyant sur la plateforme COMSOL Multiphasiques, exploitant la méthode des éléments finis. Ce travail a permis de mettre en place un modèle numérique efficace pour l'analyse de la détection de défauts, en particulier pour une pièce cylindrique conductrice soumise à des sollicitations électromagnétiques à différentes fréquences.

La première partie a porté sur la configuration d'un capteur absolu, où les résultats simulés ont été confrontés à ceux d'une référence bibliographique (travaux de M. Maouche).

L'étude comparative a démontré une excellente concordance, validant ainsi la précision du modèle et la fiabilité des paramètres physiques et géométriques intégrés. Les variations d'impédance obtenues à travers différents états (vide, sain, défectueux) ont confirmé la sensibilité de l'approche à identifier la nature et la position des défauts. En particulier, l'analyse des composantes de l'impédance (résistance et réactance) a mis en évidence des signatures électromagnétiques distinctes selon que le défaut est interne ou externe, ce qui constitue un critère pertinent de discrimination.

L'examen des distributions la densité de flux magnétique B a permis de visualiser les perturbations localisées induites par les défauts, montrant l'efficacité du modèle pour détecter aussi bien les anomalies de surface que celles situées en profondeur. Ces observations sont cruciales pour affiner le diagnostic des matériaux contrôlés.

Enfin, le modèle a été généralisé à d'autres configurations axisymétriques, avec l'intégration de capteurs différentiels. Cette extension rend le dispositif plus robuste aux perturbations environnementales et améliore la capacité de détection. Elle confirme également l'adaptabilité de la modélisation numérique aux différentes géométries et types de capteurs employés en CND par courants de Foucault.

Ainsi, ce chapitre démontre non seulement la pertinence de l'approche par éléments finis via COMSOL Multi-physiques, mais aussi son potentiel en tant qu'outil d'analyse et d'optimisation pour des systèmes de détection avancés dans le domaine du contrôle non destructif.

Conclusion Générale

Le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF) est une méthode largement utilisée pour l'inspection de matériaux conducteurs, en raison de sa simplicité, de son faible coût et de son caractère non polluant. Elle permet la détection de défauts sans altérer l'intégrité de la pièce, contribuant ainsi à la sécurité et à la fiabilité des composants industriels.

Dans cette étude, nous avons appliqué la méthode des courants de Foucault à une pièce cylindrique conductrice, en modélisant les défauts comme des zones non conductrices, qu'ils soient internes ou externes. L'approche repose sur les équations de Maxwell, traduites en équation aux dérivées partielles et résolues numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis dans le logiciel COMSOL Multiphysics.

Les simulations ont été réalisées en 2D, avec un lift-off constant, tandis que la bobine de détection se déplaçait selon l'axe Z. Deux configurations expérimentales ont été étudiées:

- Une première configuration avec une seule bobine,
- Une seconde avec deux bobines, afin de comparer les performances en termes de sensibilité et de détection.

L'analyse de l'impédance de couplage a permis de :

- Déetecter efficacement la présence de défauts dans la pièce ;
- Distinguer entre défauts externes et défauts internes ;
- Mettre en évidence l'effet de la fréquence, de la géométrie (largeur, hauteur) et de la position du défaut (verticale et horizontale) sur le signal mesuré ;
- Comparer les résultats obtenus avec une et deux bobines, et évaluer l'apport de la configuration double en termes de précision et de détection.

En conclusion, cette étude démontre l'efficacité de la méthode CF pour la détection de divers types de défauts dans des structures cylindriques. Elle montre également l'intérêt de la configuration à deux bobines, qui offre un potentiel d'amélioration de la sensibilité du système de détection. L'utilisation de la simulation numérique s'est révélée être un outil puissant pour optimiser les paramètres du dispositif et mieux comprendre le comportement électromagnétique du système.

Références bibliographiques

- [1] J. DUMONT-FILLON « Contrôle non destructif (CND) », Technique de l'ingénieur, Réf. R1400, 1996
- [2] J. Blitz, “Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing”, Adam Hilger, Bristol, UK, 1991.
- [3] J. Dumont-Fillon, « Contrôle non destructif ». Technique de l'ingénieur. Traité, Mesure et contrôle, 1992.
- [4] P.L. Vuillermoz, « Les courants de Foucault, Principes, mesure et contrôle », AFNOR, 1994.
- [5] C.V. Dodd, W.E. Deeds, “Analytical Solutions to Eddy-Current Probe-Coil Problems”, Journal of Applied Physics, Vol. 39, number 6, May 1968, pp. 2829-2838.
- [6] Z. Mottl, “The Quantitative Relations Between True and Standard Depth of Penetration for Aid Cored Probe Coils in Eddy Current Testing”, NDT Int. 23, no. 1, Feb. 1990, pp . 11-18.
- [7] F.T. Skopal, F. Tobias, P. Ivanov, “Some Problems fo Eddy Current Testing with Air-Cored Probe Coils”, NDT Int . 21, no. 3, June 1988, pp. 159-166.
- [8] E. Uzal, J.H. Rose, “The Impedance of Eddy-Current Probes above Layered Metals whose conductivity and Permeability vary Continuously”, IEEE Transaction on Magnetics, Vol.29, No .2, 1993, pp. 1869-1873.
- [9] M.Q Lê, D. Placko, « Nouvelle Structure de Capteur à Courants de Foucault et Algorithme Associé pour la mesure des propriétés électrique et magnétique d'un métal » Journal de Physique III, Vol .5, n°6, 1995, pp.807-824.
- [10] J.C. Bour, E. Zubiri, P. Vasseur, A. Billmat, « Etude de la répartition des courants pulsés dans une configuration de contrôle non destructif », J. Phys. III, Janvier 96, pp. 7-22.
- [11] J.C. Moulder, E. Uzalet J. H.Rose «Thickness and conductivity of layers from eddy current measurements ». Rev. Sci. Instru. 63, 6 june 1992.
- [12] A. Sethuraman, J .H. Rose, “Rapid Inversion of Eddy Current Data for Conductivity

and Thickness of Metal Coatings”, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 14, No. 1, 1995, pp.39-46.

[13] M.Q Lê, D. Placko, « Nouvelle Structure de Capteur à Courants de Foucault et Algorithme Associé pour la mesure des propriétés électrique et magnétique d'un métal » Journal de Physique III, Vol .5, n°6, 1995, pp.807-824.

[14] B. Maouche, M. Feliachi, N. Khenfer, «A half-analytical formulation for the impedance variation in axisymmetrical modelling of eddy current non destructive testing». EuropeanPhysical Journal AppliedPhysics, Vol. 33, February 2006, pp. 59-67.

[15] J.W. Luquaire, W.E. Deeds, C.V. Dodd, “Alternating Current Distribution Between Planar Conductors”, Journal of Applied Physics, Vol. 41, No. 10, September 1970, pp. 3983-3991.

[16] C. C. Cheng, C.V. Dodd, W.E. Deeds, “General Analysis of Probe Coils Near Stratified Conductors”, International Journal of Nondestructive Testing, Vol. 3, 1971, pp. 109-130.

[17] Rémy LA, « Modélisation phénoménologique des signaux courants de Foucault en vue de l'évaluation non destructive des caractéristiques des défauts des tubes de générateurs de vapeur

». Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne, CEA\Saclay, France, février 1997.

[18] G. Berthiau, B. de Barmon, "MESSINE, An Eddy Current Parametric Model for flaw characterization", Review of Progress in Quantitative Non Destructive Evaluation, Vol. 18A, pp.501-508, Plenum Press, New York, 1999.

[19] A. Diche, “Développement de modèles analytiques pour l'étude des capteurs à courants de Foucault”. Thèse de Magister en électrotechnique. Université de M. Mammeri de Tizi-Ouzou, 2002.

[20] T. p. Theodoulidis, S. K. Burke, «Theoretical and experimental of current Induction in a conducting cylinder », Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VIII) Vol.24 T. Sollier and at. (Eds) (IOS Press, 2004), pp.11-18.

- [21] B. Maouche, M. Feliachi, N. Khenfer, « Modélisation semi analytique du contrôle non destructif par courants de Foucault à capteur absolu ». 3rd Conference on Electrical Engineering, “CEE’04”, 04-06 Batna, October 2004, pp 149-152.
- [22] B. Maouche, M. Feliachi, DJ. Slimani, «Electromagnetic coupled circuits modelling of non destructive testing with differential sensor». The 9th International Workshop on Electromagnetic Non-destructive Evaluation, “ENDE’03”, Saclay, May 15-16, 2003, France.
- [23] O. Baltzersen, “Model-based inversion of plate thickness and lift-off from eddy current probe coil measurements”, Materials Evaluation, Vol .51, No.1, Jan. 1993, pp . 72-76.
- [24] M.L. Burrows, « Theory of Eddy Current Flaw Detection », Ph.D. dissertation, The University of Michigan, 1964.
- [25] T. p. Theodoulidis, S. K. Burke, «Theoretical and experimental of current Induction in a conducting cylinder », Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VIII) Vol.24 T. Sollier and at. (Eds) (IOS Press, 2004), pp.11-18.
- [26] R. Spal, A.H. Kahn, “Eddy Currents in a Conducting Cylinder with a Crack”, Journal of Applied Physics, Vol .50, No.10, October 1979, pp.6135-6138.
- [27] R. Satveli, J .C. Moulder, B. Wang, J.H. Rose, “Impedance of a Coil Near an Imperfectly Layered Metal Structure”, Journal of Applied Physics, Vol. 79, N°. 6, 15 March 1996, pp.2811- 2821.
- [28] B .A. Auld, F.G. Muennemann, D.K. Winslow, “Eddy Current Probe Response to Open and Closed Surface Flaws”, Journal of Nondestructive Evaluation Vol. 2, No. 1, 1981, pp. 1-21.
- [29] F. Muennemann, S. Ayter, B.A. Auld, “Computation of Eddy Current Signals and Quantitative Inversion with Realistic Probe Models”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Vol. 3, Plenum Press, New York, 1984, pp. 621-632.
- [30] B.A. Auld, S.R. Jefferies, J. C. Moulder, J. C. Gerlitz, “Semi-Elliptical Surface Flaw EC Interaction and Inversion: Theory”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol . 5A, Plenum Press, New York, 1986, pp. 383-393.

- [31] B. A. Auld, S. R. Jefferies, J. C. Moulder, “Eddy-Current Signal Analysis and Inversion for Semielliptical Surface Cracks”, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol . 7, June 1988, pp. 79-94.
- [32] L. Oukhellou. « Paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif. Application à la reconnaissance des défauts de rails par courant de Foucault ». Thèse de docteur en science, Orsay, paris XI, 04 juillet 1997.
- [33] Udpa, L., &Udpa, S. S. (1990). Eddy CurrentDefectCharacterizationUsing Neural Networks. IEEE Transactions on Magnetics, 26(2), 555-558.
- [34] Maouche, B. (2007). Élaboration de modèles par les grandeurs électromagnétiques couplées : application au contrôle et à l'évaluation non destructif par courant de Foucault (Thèse de doctorat en sciences, Université de Sétif).
- [35] A. Abdou, « Contrôle non Destructif (CND), Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif à Courant de Foucault, », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Batna, 2018.
- [36] Adib, Safer Omar, « Etude et Modélisation de Capteur à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND) », Mémoire master en génie électrique Université de M'sila, 2014.
- [37]] Helifa, Bachir, « Contribution à La Simulation du Cnd par Courants de Foucault en vue de la Caracterisation des Fissures Debouchantes. », . Thèse de Doctorat, université de NANTES école doctorale, Nantes 2012.
- [38] Abbassi, A., Bouchala, T., Abdou, A., & Abdelhadi, B, « Eddy current characterization of 3D crack by analyzing probe signal and using a fast algorithm search », Russian Journal of Nondestructive Testing, 2020.
- [39] Salvatore Baglio, Senior Member, IEEE, Salvatore Castorina, and Nicolò Savalli, « Integrated Inductive Sensors for the Detection », IEEE SENSORS JOURNAL Barcelona : Volume. 5, Issue 3., 2005.
- [40] HOANG, Dung, « Détermination simultanée de la résistivité et l'épaisseur des tôles métalliques et d'alliages non magnétiques par méthode électromagnétique sans contact », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de LYON : 2002.

- [41] Georges Asch, « Les capteurs en instrumentation industrielle », Paris : Maison d'édition DUNOD, 1982.
- [42] DUMONT-FILLON, Jacques, « Contrôle non destructif (CND) », Techniques de l'ingénieur (R 1400 1), 1996.
- [43] ZAIDI, Houda, «Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples», Thèse de Doctorat, Université paris-sud, 2012..

Etude d'un capteur différentiel appliquée au CND par courant de Foucault d'une pièce amagnétique sous Comsol

Résumé

Cette étude explore le comportement d'un capteur différentiel utilisé dans le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault, appliquée à une pièce ayant des propriétés magnétiques. Grâce à une simulation numérique sous COMSOL Multiphysics, l'objectif est d'évaluer la sensibilité et la précision du capteur face à différentes configurations de défauts internes.

Les résultats obtenus mettent en évidence la capacité du capteur différentiel à réduire les interférences liées au bruit magnétique, tout en augmentant la sélectivité de détection. Cette approche permet une meilleure fiabilité dans l'identification des défauts, et démontre son potentiel pour les inspections industrielles de haute exigence.

Mots-clés : Capteur différentiel, courants de Foucault, CND, COMSOL, simulation, matériau magnétique.

Abstract

This study investigates the performance of a differential sensor used in non-destructive testing (NDT) with eddy currents, applied to a component with magnetic properties. By using COMSOL Multiphysics, numerical simulations are carried out to evaluate the sensor's sensitivity and accuracy in detecting various internal defects.

The results highlight the sensor's effectiveness in minimizing magnetic noise while enhancing detection selectivity. This method provides improved reliability in flaw identification, proving its potential for demanding industrial inspection scenarios.

Keywords: Differential sensor, eddy currents, NDT, COMSOL, simulation, magnetic material.

الملخص

تتناول هذه الدراسة تحليل أداء محس تفاضلي يُستخدم في الاختبار غير الإتلافي (CND) باستخدام تيارات فوكو، لتقدير قطعة ذات خصائص مغناطيسية. وقد تم اعتماد برنامج (COMSOL Multiphysics) لإجراء محاكاة رقمية تهدف إلى قياس دقة وحساسية المحس في رصد العيوب الداخلية المختلفة. أظهرت النتائج قدرة المحس على تقليل التشویش الناتج عن الخلفية المغناطيسية، وتحسين دقة الكشف. وتبيّن هذه المنهجية فعاليتها في تحقيق موثوقية أكبر في عمليات التفتيش الصناعي، خاصة في المجالات التي تتطلب مستوى عالٍ من الدقة والأمان.

الكلمات المفتاحية: محس تفاضلي، تيارات فوكو، التقييم غير الإتلافي، (COMSOL)، المحاكاة، مادة

مغناطيسية.