

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département Génie Biomédicale



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en
Génie Biomédicale
Spécialité : Instrumentation Biomédicale

Présenté par :

- Ziane Kenza

**Modélisation d'un capteur absolue à courant de Foucault
pour la détection des défauts dans des matériaux
magnétiques.**

Soutenu publiquement, le 23/09/2024, devant le jury composé de :

Mr. MOUAS L'Hocine	MCB	UMMTO	Président
Mr. HOCINI Farid	MCB	UMMTO	Examinateur
Mr. MEZIANI Madjid	MCB	UMMTO	Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Je remercie d'abord le bon Dieu qui m'a donné la force, la patience, la volonté et la capacité suffisante pour achever ce travail.

Je désire également remercier chaleureusement mon promoteur **Mr MEZIANI. M**, maitre de conférences classe B à l'université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou (UMMTO), qui s'est montré disponible pour me guider avec des conseils et des commentaires rigoureux.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury qui ont eu l'amabilité d'apporter une appréciation sur ce travail et de participer au jury de soutenance.

Un hommage éternel à tous les enseignants qui m'ont encadré depuis mes premières années d'études jusqu'à aujourd'hui.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin tout au long de la réalisation de ce mémoire.

DEDICACES

Je dédie ce travail à...

A ma mère

La source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite, pour tous ses sacrifices et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

A mon père

Ma source inépuisable d'inspiration et de force. Ta sagesse et ton amour inconditionnel ont façonné chaque étape de mon parcours. Tes encouragements et ta confiance en moi ont été mes plus grands moteurs. Ton soutien et tout ce que tu as sacrifié et tout ce que tu as fait pour moi restera gravé dans mon cœur pour toujours.

A mon cher frère Ghiles.

A mes chères sœurs Kahina et Célia.

A mes chers amis

Pour leur soutien moral, leurs conseils et leur présence.

A toute ma famille.

A tout ce que je connais sans exceptions.

A tous ceux qui m'ont soutenu dans l'accomplissement de ce travail.

Enfin, à moi-même

Pour avoir relevé les défis et surmonté les obstacles avec détermination et persévérance.

Sommaire	
Remerciements	
Table des matières	
Liste des figures	
Introduction générale.....	1
 Chapitre I : Etat de L'art sur le contrôle non destructif (CND)	
I.1. Introduction	3
I.2. Historique	3
I.3. Généralités sur le contrôle non destructif	4
I.3.1. Principe de la détection d'un défaut	4
I.3.2. Différents défauts détectés en CND	4
I.3.3. Procédure de CND	5
I.4. Principales méthodes du CND	5
I.4.1. Examen visuel	6
I.4.2. Ressuage	6
I.4.3. Ultrasons	7
I.4.4. Magnétoscopie	8
I.4.5. Radiographie	8
I.4.6. Thermographie	9
I.4.7. Courant de Foucault	10
I.5. Différents types des capteurs inductif	15
I.5.1. Capteur absolu	15
I.5.2. Capteur double	16
I.5.3. Capteur différentiel	16
I.6. Dispositions des capteurs	17
I.6.1. Première dispositions : capteur encerclant	17
I.6.2. Deuxième disposition : capteurs internes	17
I.6.3. Troisième disposition : capteurs ponctuels	18
I.7. Mode d'excitation	18
I.7.1. Contrôle mono-fréquence	18
I.7.2. Contrôle multifréquence	19
I.7.3. Contrôle par courants de Foucault pulsés	19
I.8. Avantage du CND par courant de Foucault	19
I.9. Limites du CND par courant de Foucault	20
I.10. Conclusion	20

Chapitre II : Modélisation mathématique des phénomènes électromagnétiques

II.1.Introduction	21
II.2.Importance de la modélisation	21
II.3. Mise en équations	21
II.3.1. Equations de Maxwell	22
II.3.2. Lois constitutive	22
II.3.3. Condition aux limites	23
II.3.4. Condition de continuité	23
II.3.5. Condition de jauge	25
II.3.6. Equations électromagnétique 2D	25
II.4. Formulation magnétodynamique ($\vec{A} - V$)	26
II.4.1. Expression de l'équation magnétodynamique dans les régions constituant le dispositif	27
II.5. Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles	28
II.5.1. Méthode analytique	28
II.5.2. Méthode numériques	28
II.6.Technique de calcul d'impédance	30
II.6.1 Impédance à travers les énergies électromagnétiques	30
II.6.2 Impédance à travers la théorie des circuits électriques	31
II.6.3 Impédance à travers l'induction ou le flux magnétique	32
II.7.Conclusion.....	33

Chapitre III : Application et validation sur un capteur absolu à courant de Foucault

III.1.Introduction	35
III.2. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système	35
III.3. Organigramme de calcul	35
III.4. Domaine d'étude et conditions aux limites	37
III.5. Maillage de la structure	37
III.6. Résultats et discussions	38
III.6.1. Effet de la nature du matériau sur la sensibilité du capteur	38
III.6.2. Effet de la fréquence sur la sensibilité du capteur	40
III.6.3. Effet de Lift-Off sur la sensibilité du capteur	43
III.6.4. Effet du gap sur la sensibilité du capteur	44
III.6.5. Effet de courant d'excitation et le nombre de spires sur la sensibilité du capteur ...	45
III.6.6. Effet de la profondeur du défaut sur la sensibilité du capteur	46
III.7. Conclusion	47

Conclusion générale	48
---------------------------	----

Bibliographie

Chapitre I : Etat de L'art sur le contrôle non destructif (CND)

Fig. I.1	Schéma synoptique d'un système de CND	5
Fig I.2	Exemple de test visuel	6
Fig I.3	Les quatre étapes de la technique CND par ressuage	7
Fig I.4	Principe du contrôle ultrasons	7
Fig I.5	Principe de la magnétoscopie	8
Fig I.6	Principe du contrôle par radiographie	9
Fig I.7	Configuration expérimentale pour les approches passives (haut) et actives (bas)	9
Fig I.8	Schéma du principe de la technique CND par courants de Foucault	10
Fig I.9	Plan d'impédance normalisé	12
Fig I.10	Plan d'impédance montrant l'effet de la perméabilité sur la réactance	12
Fig I.11	Plan d'impédance pour un matériau ferromagnétique et non ferromagnétique	13
Fig I.12	Profondeur de pénétration standard et effective	14
Fig I.13	Répartition des courants de Foucault d'une pièce	15
Fig I.14	Capteur absolu	16
Fig I.15	Capteur double	16
Fig I.16	Capteur différentiel	17
Fig I.17	Capteur encerclant	17
Fig I.18	Capteur interne	18
Fig I.19	Capteur ponctuel	18

Chapitre II : Modélisation mathématique des phénomènes électromagnétiques

Fig II.1	Domaine d'étude d'un problème de CND-CF	21
Fig II.2	Conditions aux limites	23
Fig II.3	Conditions de passage	24
Fig II.4	Dispositif électromagnétique étudié	26

Chapitre III : Application et validation sur un capteur absolu à courant de Foucault

Fig.III.1	Organigramme de calcul	35
Fig.III.2	Domaine de résolution et conditions aux limites	36
Fig.III.3	Maillage éléments finis du domaine d'étude	36
Fig.III.4	Comportement des lignes du champ magnétique pour différents matériaux (acier ferromagnétique, acier inoxydable, amagnétique) (a, b, c)	38
Fig.III.5	Variation de module de l'induction magnétique B en fonction de la position du capteur pour les trois différents matériaux	38
Fig.III.6	Comportement des lignes du champ magnétique pour différentes valeurs de la fréquence (a, b, c, d, e)	40
Fig.III.7	Variation de l'induction magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la fréquence	41
Fig.III.8	L'induction magnétique en fonction de la position de capteur pour différentes valeurs du lift-off	42
Fig.III.9	Module de l'induction magnétique en fonction de déplacement de capteur pour différentes valeurs de gap	43

Fig.III.10 Module de l'induction magnétique en fonction de déplacement de capteur pour différentes valeurs de nombre de spires	44
Fig.III.11 Module de l'induction magnétique en fonction de déplacement de capteur pour différentes valeurs du courant d'excitation	44
Fig.III.12 Module de l'induction magnétique en fonction de déplacement de capteur pour différentes valeurs de la profondeur du défaut	45

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale

Introduction générale :

Les exigences en matière de qualité des produits et de sécurité deviennent de plus en plus contraignantes dans l'activité industrielle. Au niveau de la production, il faut dimensionner les pièces au plus juste tout en garantissant leur durée de vie. Durant l'exploitation du produit, le maintien en état de marche dans de bonnes conditions de sécurité nécessite une bonne connaissance de l'évolution de celui-ci. Cette connaissance permettra en particulier de programmer les opérations de maintenance, voire de réparations, en entravant le moins possible la production. De plus, en évitant l'apparition de défauts trop importants, la durée de vie du produit va augmenter. Ceci justifie l'importance croissante que prend le contrôle non destructif (CND) [1].

Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité. .), soit pour détecter la présence de défauts et les caractériser. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault.). Le choix d'une méthode dépend de divers facteurs tels que la composition des matériaux des pièces à contrôler, le type d'information recherchée (défaut en surface ou enfoui, etc.) et les conditions de mise en œuvre [1] [2].

Les méthodes électromagnétiques sont fréquemment utilisées pour le contrôle des pièces électriquement conductrices et/ou magnétiques. Par exemple, le contrôle de pièces de fonderie peut se faire par magnétoscopie. Les tubes peuvent être testés par courants de Foucault (CF), soit en cours de fabrication, soit lors des phases de maintenance [11].

La technique de contrôle non destructif par courant de Foucault (CND-CF) est à la fois simple à mettre en œuvre, grâce à la facilité de génération des courants de Foucault dans un matériau à l'aide d'une sonde, et complexe en termes de distribution optimale de ces courants pour maximiser la détection des défauts. Pour obtenir un signal de défaut optimal, une compréhension approfondie du phénomène physique sous-jacent est essentielle.

Etant donné que les courants de Foucault ne sont pas directement mesurables, ils doivent être déduits à partir de mesures sur d'autres grandeurs influencées par eux.

Dans ce contexte, les outils de simulation jouent un rôle croissant dans la conception et la démonstration des performances des systèmes de contrôle. La modélisation électromagnétique permet de simuler ces interactions et d'établir une structure de sonde adaptée à chaque problème spécifique. Cette approche permet de prédire les résultats de différentes options telles que la configuration géométrique ou le choix des matériaux tout en réduisant le besoin de prototype. La modélisation, notamment par la méthode des éléments finis (MEF), est devenue un acteur majeur dans la conception de sondes dans le domaine du CND-CF [4].

La représentation d'une configuration réelle de CND-CF n'est généralement pas réalisable analytiquement, ce qui souligne l'importance des méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis (MEF) pour aborder les problèmes électrotechniques.

Introduction générale

Cette étude est structurée en trois chapitres. Le premier chapitre traite des concepts généraux du contrôle non destructif (CND), mettant particulièrement en lumière la technique des courants de Foucault (CF) et offrant une description détaillée des divers capteurs CF disponibles. Le deuxième chapitre explore les fondements mathématiques des équations électromagnétiques pour la modélisation, en revenant sur les équations de Maxwell et en exposant les différentes formulations magnétostatiques et magnétodynamiques, tout en offrant un aperçu des méthodes analytiques et numériques. Le dernier chapitre se concentre sur l'application et la validation du modèle proposé, en se penchant sur la simulation du système par la méthode des éléments finis (MEF) et en fournissant une analyse des résultats obtenus.

Enfin, ce mémoire se conclut par une synthèse générale des principaux points abordés.

CHAPITRE I

« ÉTAT DE L'ART
SUR LE CONTRÔLE
NON DESTRUCTIF »

I.1. Introduction :

Le contrôle non destructif (CND), comme son nom l'indique, a pour objectif de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Il consiste à détecter et caractériser les différents défauts et imperfections qui menacent la sécurité de fonctionnement des systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques. La qualité étant devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle exigeante, cette étape du processus industriel vise à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées. Elle joue un rôle économique non négligeable, car elle permet une gestion optimisée de la maintenance. [2, 3]

Le contrôle non destructif (CND) est une procédure essentielle qui peut être réalisée pendant la fabrication ou la durée de vie d'une pièce. Pour qu'elle réponde de manière optimale à divers critères, plusieurs exigences doivent être satisfaites [4] au mieux les critères suivants :

- ✓ **la rapidité d'exécution:** Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts du travail de la main-d'œuvre ou des frais de fonctionnement de l'usine.
- ✓ **le coût:** Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- ✓ **la reproductibilité:** La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- ✓ **la fiabilité:** Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter.
- ✓ **la sensibilité :** La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et de la grandeur que l'on veut mesurer. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations de la grandeur que l'on veut mesurer sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.
- ✓ **la résolution :** La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite. [3]

I.2. Historique :

Le Contrôle Non Destructif constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la Physique. L'histoire du Contrôle Non Destructif commence avec celle de la physique Moderne à la fin du 19^{ème} siècle : découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la Piézo-électricité, etc. [8] Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des CND s'est manifestée ensuite vers les années 1960/1970 avec le

développement rapide de secteurs très demandeurs tels que l'industrie automobile, l'aéronautique civile et le génie des centrales électriques nucléaires. [2]

I.3. Généralités sur le contrôle non destructif :

I.3.1. Principe de la détection d'un défaut :

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée : [5]

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

I.3.2. Différents défauts détectés en CND :

Un défaut (ou une défectuosité) détecté dans une pièce correspond à la mise en évidence d'une hétérogénéité de matière, d'une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable à son bon fonctionnement. Cependant, il est courant de classer les défauts en deux grandes catégories en fonction de leur emplacement : les défauts de surface et les défauts internes. [6]

I.3.2.1. Les défauts surfaciques :

Ces défauts sont accessibles à l'observateur directement mais pas toujours visibles à l'œil nu, à cet effet on peut les classés en deux types distincts : [7]

- **Les défauts ponctuels :** correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologie, puisqu'il s'agit des criques, piqures, fissures, craquelures, généralement aptes a provoquer a terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple les fissures de fatigue.
- **Les défauts aspect :** c'est une variation de paramètres géométriques ou physique (rugosité, surépaisseur, tache diverses) qui est visibles et rend le produit inutilisable.

I.3.2.2. Les défauts internes :

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Dans les industries des métaux, il s'agit de criques internes, de porosités, de soufflures et diverses inclusions qui peuvent affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel n'est généralement pas pratique et donc on utilise l'un ou l'autre des grands procédés du CND tel

que la radiographie, le sondage ultrasons, ou encore des techniques mieux adaptées comme l'holographie, l'imagerie infrarouge, la neutronographie.

I. 3.3. Procédure de CND:

Le contrôle non destructif d'un objet implique bien plus que simplement détecter des défauts .En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectuée au préalable, mais il nécessite une procédure ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation, identification et la caractérisation des défauts, y compris leur taille et leur classement ainsi que la présentation visuelle et la décision concernant l'affectation de l'objet, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen. Ce sont des opérations d'étalonnage, de calibrage, de balayage de la sonde, de traitement des données qui permettent d'atteindre ces objectifs désormais dans des bonnes conditions, grâce à l'apport intensif de l'informatique en temps réel.

On peut représenter la mise en œuvre d'un Système CND suivant le synoptique de la figure (I.1). [7]

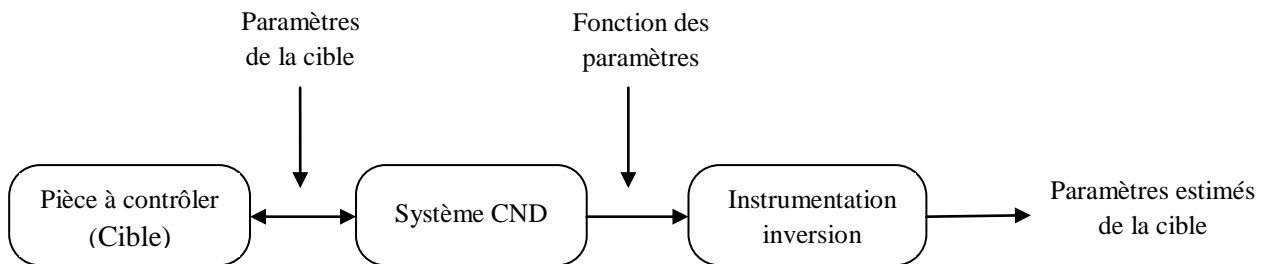


Fig. I.1 : Schéma synoptique d'un système de CND

I.4. Principales méthodes du CND :

Le contrôle non destructif (CND) est une technique d'inspection utilisée pour évaluer l'intégrité des matériaux, des composants ou des structures sans les endommager. La CND comprend certain nombre de techniques et chacune présente certains avantages et inconvénients.

Les méthodes de Contrôle les plus couramment employées peuvent être classées en fonction du type d'anomalie recherchée dans la pièce [5] :

- Examen visuel.
- Ressuage.
- Ultrasons.
- Magnétoscopie.
- Radiographie.
- La thermographie.
- Courant de Foucault.

I.4.1. Examen visuel :

Le contrôle visuel regroupe l'ensemble des techniques d'examens non destructifs qui utilisent le rayonnement électromagnétique dans le domaine de la lumière visible, c'est-à-dire dans la bande des longueurs d'onde comprises environ entre 400 à 700 nm. Il consiste à l'analyse des variations de réflectivité relative d'une pièce soumise à un éclairage pour mettre en évidence les défauts recherchés. L'utilisation d'instruments optiques tels que des loupes (Figure I.1 (a)), endoscopes ou systèmes télévisuels (Figure I.1 (b)), permet lorsque cela est nécessaire, d'obtenir une plus grande sensibilité que celle de l'œil humain nu ou d'accéder à des zones de géométries complexes ou contraignantes. Des aides à la caractérisation peuvent être fournies à l'opérateur, sous la forme de lignes laser.

Le contrôle visuel permet la détection de divers défauts débouchant en surface tel que les fissures, rayures, porosités, retassures, gouttes froides, lignes, criques, tapures, dépôts, traces de corrosion, dépôts, corps migrants, arrachement, etc. [9]



(a) Miroir d'inspection



(b) Système visuel

Figure I.2 : Exemple de test visuel. [5]**I.4.2. Ressuage :**

Cette méthode complète l'examen visuel en faisant apparaître des défauts de surface dans un contraste coloré ou fluorescent. Son principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes [11]. Le ressuage comporte quatre phases dont la 1^{ère} consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. Durant la deuxième phase un liquide coloré et/ou fluorescent, appelé « pénétrant », est ensuite appliqué sur la surface à contrôler. Il va s'infiltrer à l'intérieur des défauts (fissures de corrosion, porosités, piqûres, etc.), nécessitant une durée de pénétration avant l'étape suivante. L'excès de pénétrant est éliminé par un lavage suivi d'un séchage au cours de la troisième phase.[10] Pendant la quatrième phase la surface est alors recouverte d'une fine couche de "révélateur" qui absorbe le pénétrant contenu dans les anomalies et donne une tache colorée en surface plus large que l'anomalie, permettant ainsi de la localiser. On dit alors que le révélateur fait "ressuer" le pénétrant (Voire figure I.3). Ces indications sont alors visibles à l'œil nu. Dans certaines industries, on utilise un pénétrant fluorescent qui est révélé par un éclairage sous UV. [11]

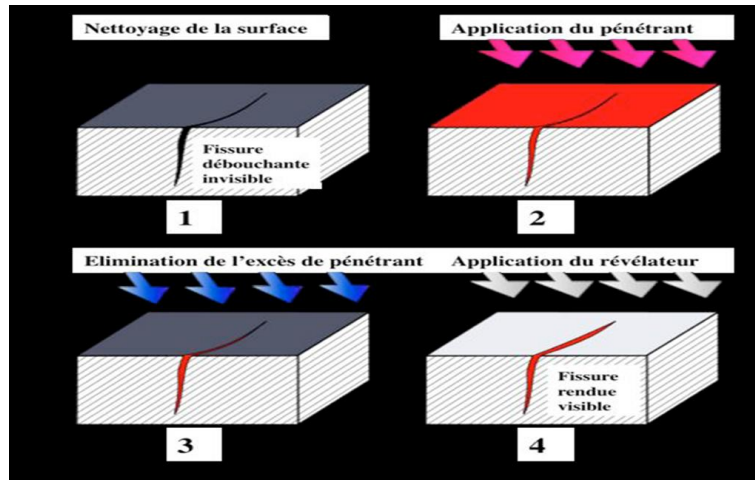
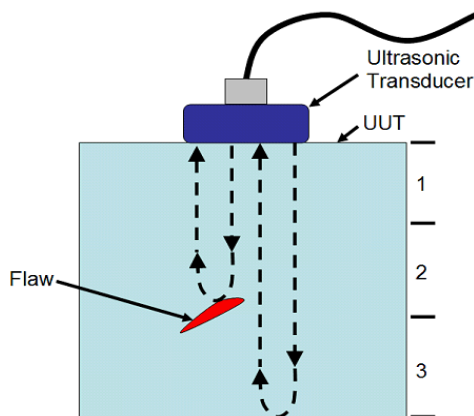


Figure I.3 : Les quatre étapes de la technique CND par ressuage. [10]

I.4.3. Ultrasons :

Le principe du contrôle par ultrasons consiste sur l'émission de propagation des ondes ultrasonore dans la pièce à contrôler puis à recueillir et analyser l'onde à l'issue de son interaction avec le matériau. A base de ce principe, il existe diverses techniques qui varient en fonction de mode de contrôle, ou de séparation des dispositifs d'émission et de réception, ainsi que le typedes ondes ultrasonores utilisées.

Les ultrasons sont émis au moyen de «transducteurs » qui est basé principalement sur l'effet piézoélectrique (Fig. 1.4.a). Les ondesonores reçues, par exemple : réflexion d'un défaut, sont reconvertis en impulsions électriquesqui peuvent être traitées et affichées à l'écran pour interprétation (Fig. 1.4.b). [5]



(a) Schéma de principe

(b) Réponse de l'examen d'écho de défaut

Figure I.4 : Principe du contrôle ultrasons. [5]

I.4.4. Magnétoscopie :

Le contrôle non destructif par magnétoscopie a pour objectif de détecter les défauts de surface ou sous-jacents. [12] Le contrôle par flux de fuite magnétique consiste à soumettre la pièce ou une partie de celle-ci à un champ magnétique constant. [13]

Une poudre magnétique est uniformément répartie par la suite sur la surface de la pièce et se répartit de façon homogène si la pièce est saine sinon hétérogène dans le cas contraire. Lors de la présence d'un défaut dans la pièce au voisinage de la surface, le champ magnétique est modifié localement et son intensité augmente en surface. Il crée alors une concentration de particules magnétiques qui indique la présence du défaut. [3] (Voire figure I.5)

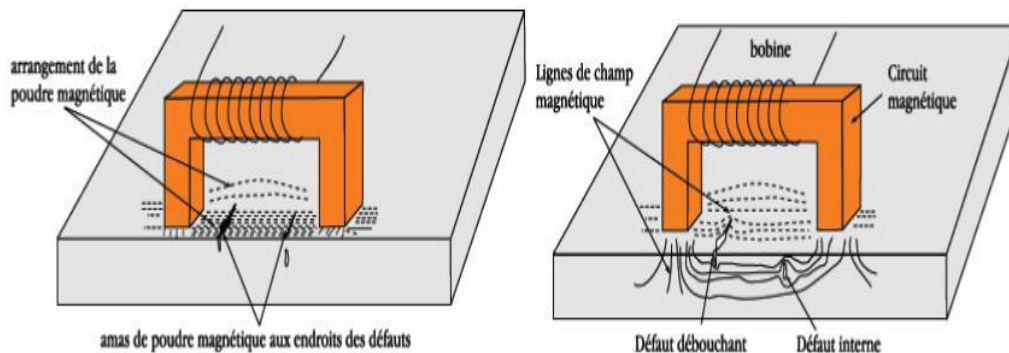
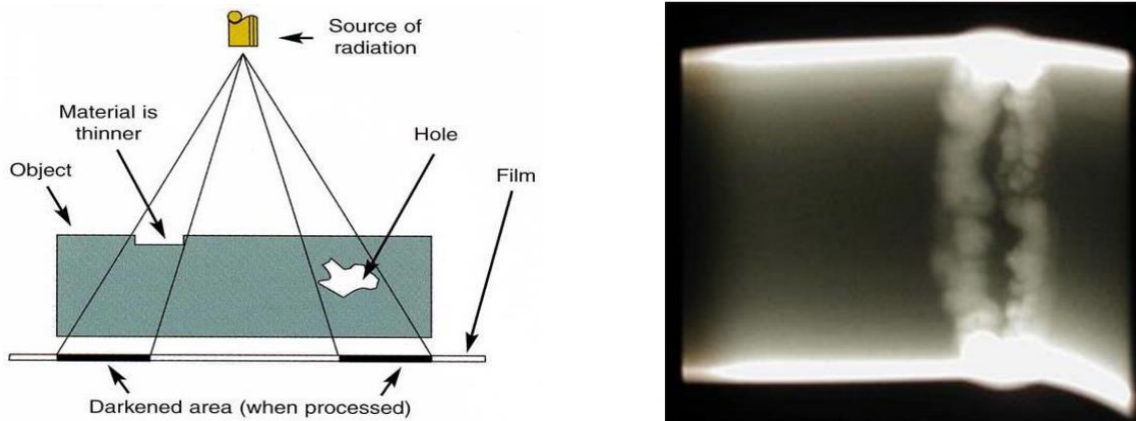


Figure I.5 : Principe de la magnétoscopie. [2]

Cette technique est particulièrement destinée que pour les matériaux ferromagnétiques. Cette technique est particulièrement efficace pour les défauts de surface de très petites dimensions, mais donne difficilement de bons résultats pour les défauts enfouis. [13]

I.4.5. Radiographie:

Elle repose sur le même principe que celui utilisé dans le domaine médical. Elle implique l'exposition de l'objet à tester à un rayonnement électromagnétique de très courtes longueurs d'ondes de sorte que le rayon traverse la pièce à inspecter comme le Rayon X pour les matériaux plus minces et le Rayon gamma (γ) pour les matériaux plus épais. Ce rayonnement traverse l'objet pour atteindre un support d'enregistrement de l'autre côté, qui peuvent être un film radiographique industriel ou l'un des nombreux types de détecteurs de rayonnement numériques. Quand le rayonnement traverse la pièce, il crée des zones plus sombres où plus de radiations ont traversé et des zones plus claires où moins de radiations ont pénétré. Dans le cas de la présence des vides ou des défauts dans la pièce, plus de rayonnement traverse la pièce ce qui provoque des zones sombre sur l'image radiographie. La radiographie à pour intérêt d'obtention de l'image bien définie de l'uniformité de matière d'une pièce et la détection des défauts contrastées, mais elle implique des couts ainsi les dangers des rayonnements ionisants imposant une réglementation et des consignes strictes et des mesures de sécurité appropriées. [4, 5]



(a) Schéma de la radiographie par film. (b) Film radiographiques d'une pièce défectueuse.

Figure I.6 : Principe du contrôle par radiographie. [5]

I.4.6. Thermographie :

La thermographie infrarouge (IR) ou simplement thermographie est une technique d'imagerie de contrôle non destructif (CND) qui permet de visualiser la chaleur motifs sur un objet ou une scène. Elle repose sur l'émission du rayonnement infrarouge par un objet lorsque la chaleur circule à travers, vers ou depuis cet objet pour mesurer ou cartographier les températures de surface. Le rayonnement infrarouge à une longueur d'onde supérieure à celle de la lumière visible, pour cela il peut être détecté à l'aide de la caméra infrarouge. La thermographie est utile pour détecter diverses anomalies telles que les dommages dus à la corrosion, les délaminages, les décollements, les vides, les inclusions et de nombreuses autres conditions néfastes. Ainsi elle contient plusieurs avantages significatifs comme l'absence de contact, facilement personnalisable en fonction des besoins et d'autant plus qu'elle n'est pas destructif. [5, 14]

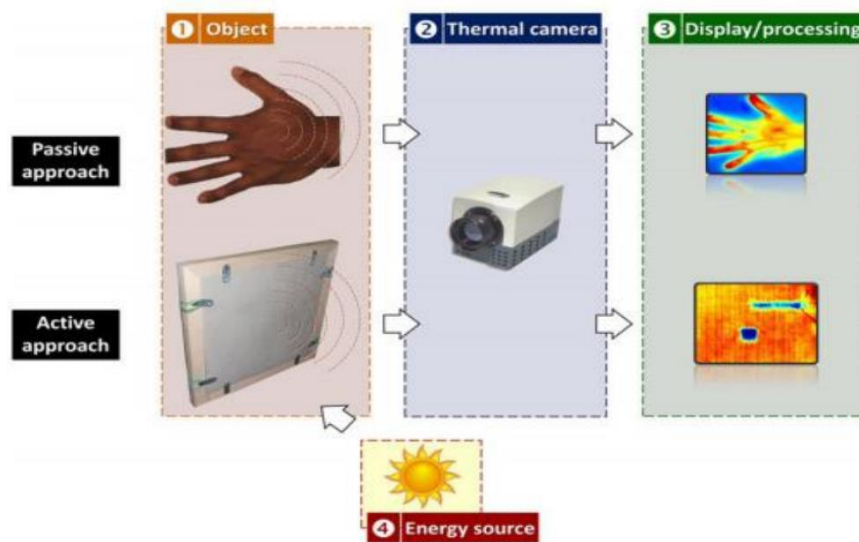


Figure I.7 : Configuration expérimentale pour les approches passives (haut) et actives (bas).

[5]

I.4.7. Courant de Foucault :**➤ Principe de fonctionnement :**

Le contrôle par courants de Foucault est une méthode de Contrôle Non Destructif(CND) fondée sur la circulation de courants induits dans un matériau conducteur [3]. La création des courants de Foucault est basée sur le phénomène de l'induction électromagnétique [5]. Par exemple un courant alternatif circule dans une bobine près d'une surface conductrice, ces courants eux-mêmes créent un champ magnétique alternatif dans son voisinage appelé courant primaire [15]. Ce champ à son tour crée des courants induits dans le matériau, dit courants de Foucault, ces derniers créent ainsi un autre champ magnétique dit secondaire.

L'impédance mesurée sur la bobine caractérisée par sa résistance et sa réactance, elle dépend de flux magnétique final et de la distribution des CF dans le matériau. En effet, le moindre changement dans la distribution des courants de Foucault dû à la variation locale des propriétés du matériau (résistivité et la perméabilité) et leur microstructure en présence des défauts impact la distribution des grandeurs électromagnétiques dans la pièce qu'on veut inspecter.

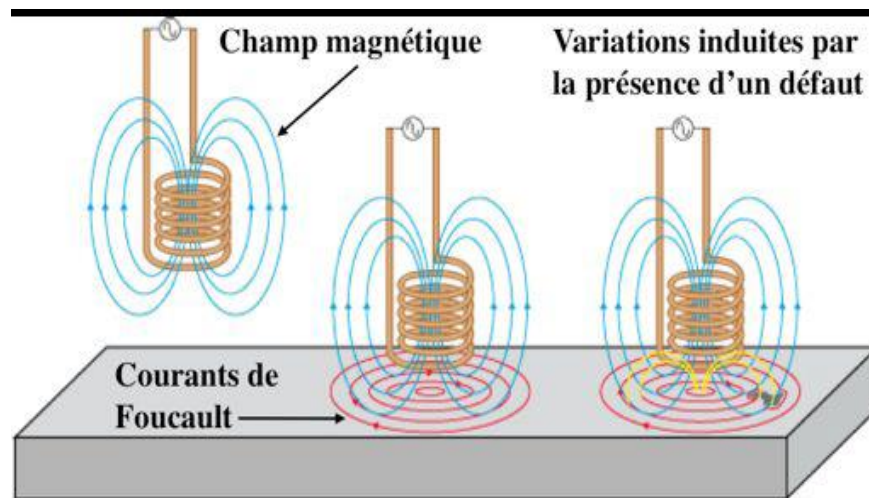


Figure I.8: Schéma du principe de la technique CND par courants de Foucault.

I.4.7.1. Induction électromagnétique :

L'induction électromagnétique est un résultat du mouvement d'un conducteur dans une région d'un champ magnétique existant créent ainsi un champ électromagnétique. Quand un courant alternatif alimente une bobine, il génère un champ magnétique variable concentré par des lignes de flux magnétiques au centre de la bobine. L'inspection par courant de Foucault est basée sur la loi d'induction électromagnétique de Faraday, montrée dans l'équation (I.1).

Qui démontre la variation dans le temps de la densité de flux d'induction magnétique, induit des courants dans un conducteur électrique [5].

Le signe négatif indique la direction de la f.e.m selon la loi de Lenz.

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (I.1)$$

e : est la force électromotrice induite, en volts (V).

ϕ : Le flux magnétique variable, en weber (Wb).

L'impédance de la bobine (Z), est une valeur complexe composée de la réactance inductive (X) en tant que partie imaginaire et de la résistance ohmique (R) des fils en tant que partie réelle.

L'équation (I.2) présente l'impédance Z en fonction de X et R .

$$|z| = \sqrt{(R)^2 + (L\omega)^2} \quad (\text{I.2})$$

X est lui-même une fonction de l'inductance (L) et de la pulsation (ω).

I.4.7. 2. Plan d'impédance complexe :

Lorsqu'une bobine interagit avec un matériau électriquement conducteur, un changement d'impédance de cette dernière se produit. En absence de la pièce à inspecter à proximité de la bobine, son impédance Z_0 est une valeur complexe comme le montre l'équation (I.3) : [16]

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (\text{I.3})$$

Où R_0 et jX_0 sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de Z_0 en $[\Omega]$. La composante $X_0 = 2\pi f L_0$ est proportionnelle à la fréquence et au coefficient d'induction L_0 . [5]

Dans le cas où la bobine s'approche de la pièce à inspecter, des courants induits se créent et le champ qu'ils génèrent va s'opposer au champ initial. L'impédance sera donnée par l'équation (I.4) : [16]

$$Z_c = R_c + jX_c \quad (\text{I.4})$$

Où R_c et jX_c sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de Z_c . Alors $X_c = 2\pi f L_c$ est proportionnelle à la fréquence et au coefficient d'induction L_c lorsqu'une éprouvette est proche de la bobine [5].

Pour éliminer les variations dues à la présence de la cible on procède couramment les valeurs normalisées R_c et X_c calculées selon les équations (I.5) et (I.6) :

$$R_{cn} = \frac{R_c - R_0}{X_0} \quad (\text{I.5})$$

$$X_{cn} = \frac{X_c}{X_0} \quad (\text{I.6})$$

A partir de ces paramètres, un diagramme d'impédance normalisé peut être représenté dans un plan complexe en fonction de $x = R_{cn}$ et de $y = X_{cn}$ comme la montre la Figure I.9) : [14]

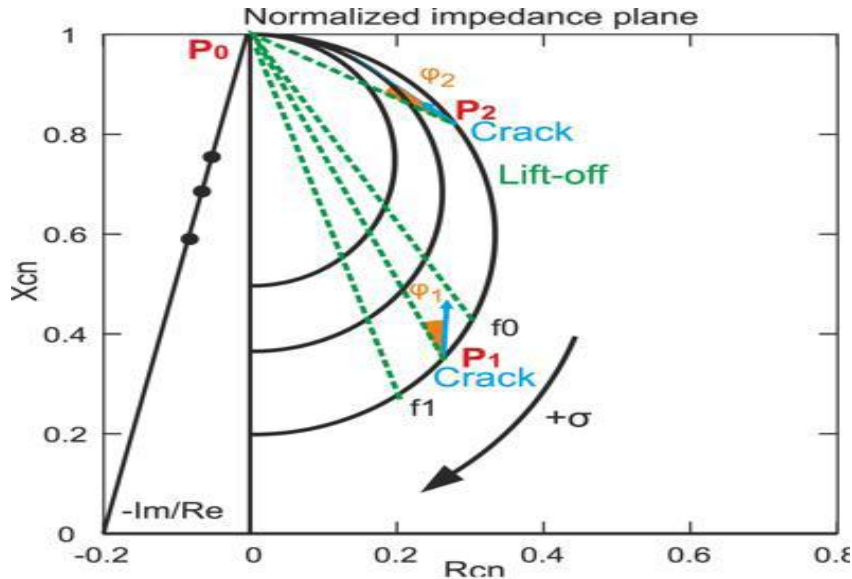


Figure I.9 : Plan d'impédance normalisé. [5]

La position du point d'impédance dans le plan peut s'affecter par de nombreuses variables notamment le décollage du matériau par rapport a la bobine (Lift-off). Cette position dépend du produit $\sigma\omega$ lorsque la conductivité est nul (cas des isolants) ou que la fréquence est nul (pas de variation de flux magnétique), la courbe passe par le point P_0 ($x=0, y=1$). C'est également le cas dans le vide. Cependant, lorsque l'une de ces deux paramètres tend vers l'infini, le flux du champ magnétique devient nul, car le champ magnétique secondaire s'oppose complètement au champ primaire, la courbe passe par la position ($x=0, y=0$), (figure I.9). Dans le cas des matériaux ferromagnétiques ou peu ferromagnétiques, l'induction magnétique n'est plus linéaire par rapport au champ magnétique détecter par la bobine, mais dépend également de la perméabilité magnétique relative du matériau μ_r . La position du point de la courbe est désormais liée au produit $\mu_r\sigma\omega$ (Fig. I.10). [5]

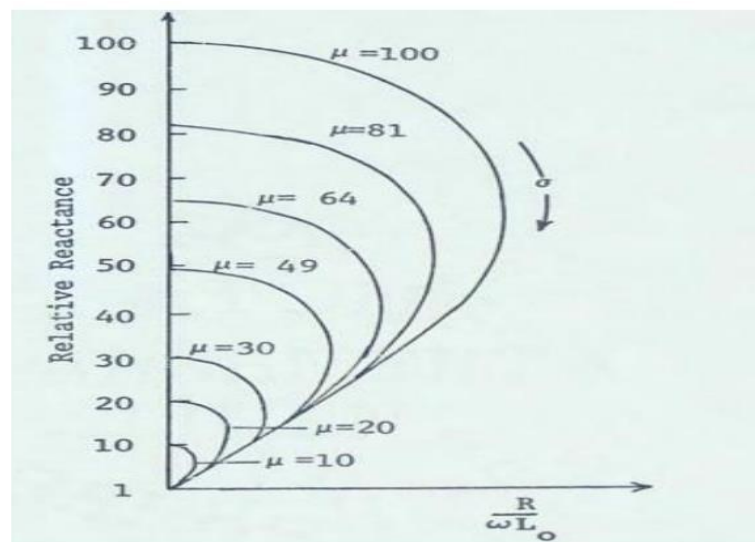


Figure I.10 : Plan d'impédance montrant l'effet de la perméabilité sur la réactance. [5]

Lorsqu'une sonde (bobine) est amenée de l'infini (Air point P_0) vers un matériau non magnétique, la courbe d'impédance passe de « l'air P_0 » vers une position spécifique dans le quatrième quadrant. Tandis que pour les matériaux magnétiques les courbes évoluent depuis le milieu air vers des différentes positions dans le premier quadrant (Figure I.11) :

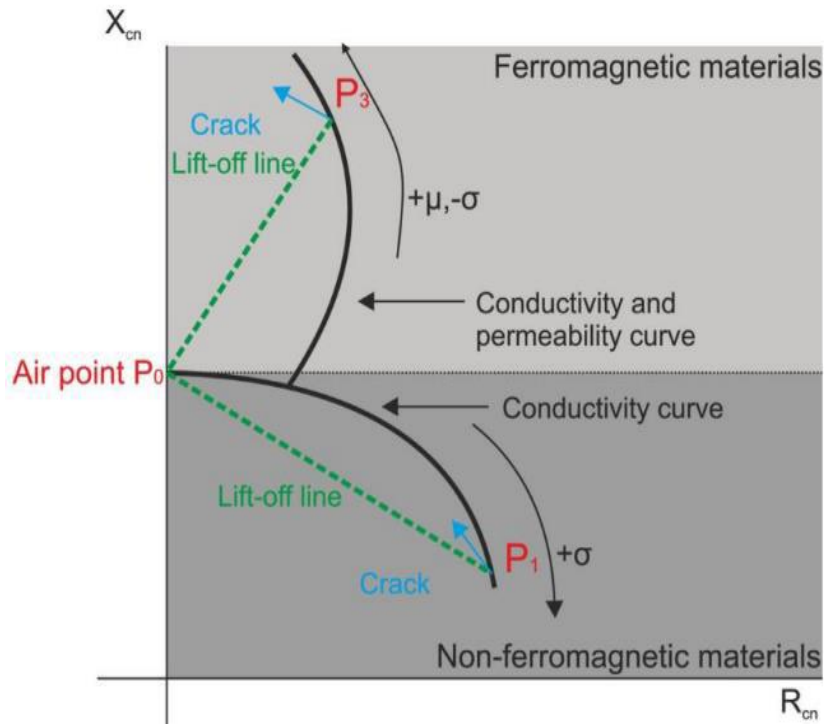


Figure I.11 : Plan d'impédance pour un matériau ferromagnétique et non ferromagnétique [5]

Lorsque le capteur s'approche d'un matériau ferromagnétique, tel que l'acier ou le fer pur, la réactance $X_{cn} > 1$ augmente au lieu de diminuer. Les matériaux ferromagnétiques, possédant une perméabilité magnétique supérieure à celle des matériaux non ferromagnétiques, concentrent le champ magnétique primaire généré par la bobine. Cette augmentation du champ magnétique primaire entraîne l'élimination du champ magnétique secondaire induit par les courants de Foucault. Le déplacement de point d'impédance va de P_0 vers P_3 et se situe dans le demi-plan d'impédance $X_{cn} > 1$, comme illustré sur la (Fig. I.11) [5].

1.4.7.2.1 Profondeur de pénétration :

La profondeur de pénétration des Courants de Foucault est limitée par la fréquence de test ainsi que par la perméabilité et la conductivité du matériau à tester. Pour déterminer cette limitation on utilise « la profondeur de pénétration standard » où les courants de Foucault sont égaux à $1/e$ soit environ (37%) de sa valeur de surface (Fig. I.12).

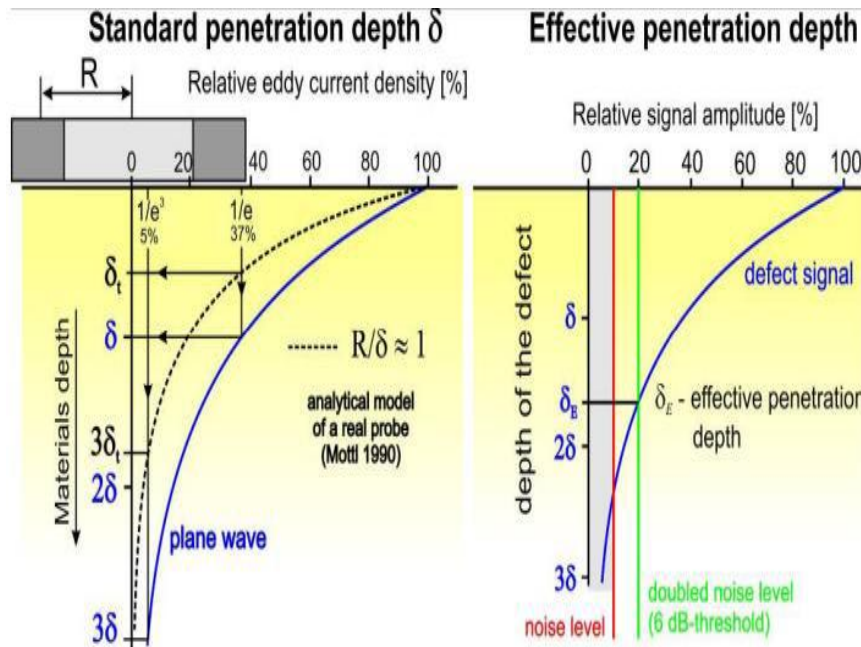


Figure I.12 : Profondeur de pénétration standard et effective [5].

La profondeur de pénétration standard représentée par δ en [m], est en relation avec la fréquence ($\omega = 2\pi f$), la conductivité σ [S m⁻¹] et la perméabilité magnétique μ [H m⁻¹] comme la montre l'équation (I.7), cette formule est obtenue en calculant la densité de courant, et en résolvant les équations de Maxwell pour les ondes électromagnétiques.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \tag{I.7}$$

A partir de cela, on peut voir que la profondeur de pénétration :

- Diminue avec une augmentation de la fréquence.
- Diminue avec une augmentation de la conductivité.
- Diminutions avec une augmentation de la perméabilité - cela peut être très important - la pénétration dans des matériaux ferreux à des fréquences pratiques est très faible.

I.4.7. 3. Epaisseur de peau:

L'effet de peau est un phénomène électromagnétique qui induit par une fréquence élevée, courant à tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs. Ce phénomène électromagnétique se manifeste dans tous les conducteurs traversés par des courants alternatifs. L'intensité des CF dans une cible composée du matériau conducteur est caractérisée par une conductivité électrique σ [S/m], et une perméabilité magnétique μ [H/m] qui diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle δ [m]. L'épaisseur de peau est définie par la relation suivante (1.8): [3]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\sigma\mu\pi}} \tag{I.8}$$

On excite un conducteur plan semi-infini par une nappe de courants extérieure au conducteur et parallèle au plan, on trouve pour le courant à l'intérieur du conducteur l'expression suivante (I.9) :

$$J(z) = J_s e^{-z\sqrt{\pi f \sigma u_0 u_r}} = J_s e^{(-z/\delta)} \quad (\text{I.9})$$

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

Z : La profondeur considérée à l'intérieur de la pièce [m],

f : La fréquence [Hz].

Nous pouvons constater que la densité de courant décroît de manière exponentielle dans la pièce, comme montré dans la figure (I.13).

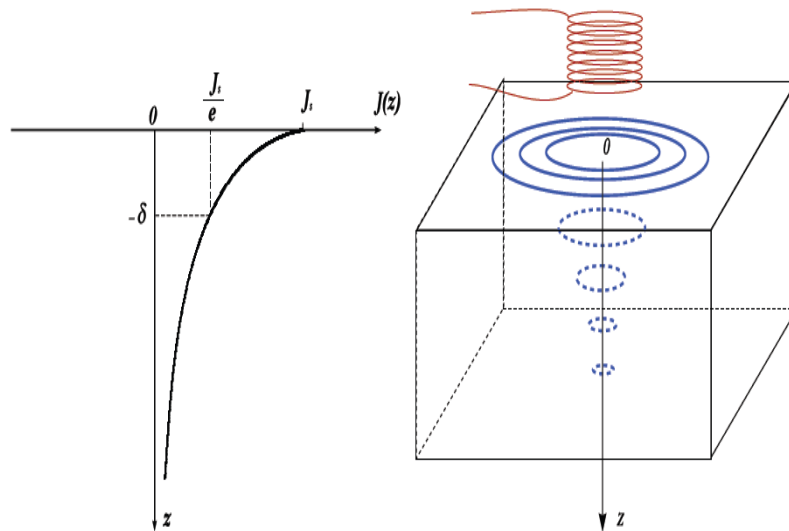


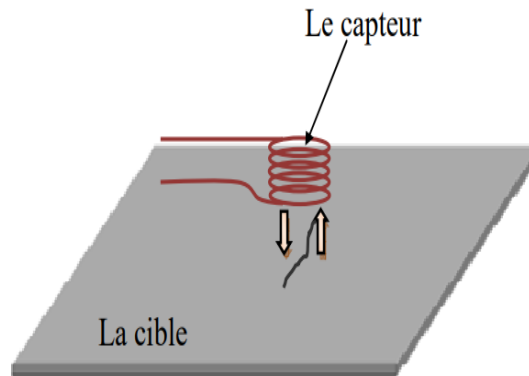
Figure I.13: répartition des courants de Foucault d'une pièce [3].

I.5. Différents types des capteurs inductif:

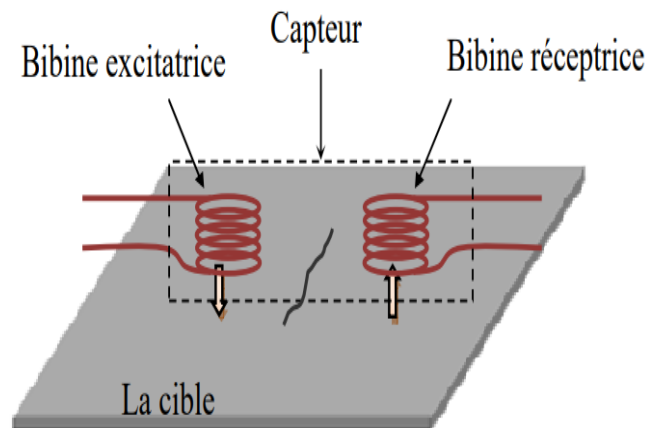
Il existe un grand nombre de façons pour mettre en œuvre le bobinage afin de réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les configurations de base des capteurs [7].

I.5.1. Capteur absolu :

Il s'agit d'un capteur à double fonction, composé d'une seule bobine émettrice réceptrice. Cette bobine crée un flux alternatif en raison du courant qui la parcourt et subit des variations d'impédance qui peuvent être détecté en mesurant très précisément son signal de sortie (Figure I.14) [17]. La figure (I.14) montre les signaux provenant d'un capteur absolu.

**Figure I.14** : Le capteur absolu.**I.5.2. Capteur double :**

Il s'agit d'un capteur à fonction séparée, constitué de deux bobines une excitatrice chargée de générer le flux et l'autre réceptrice pour recueillir ce flux. Ces deux bobines sont modelées dans un même boîtier pour éviter toute modification fortuite de leur mutuelle. Ce type de capteur est très utilisé pour les contrôles à basses fréquences ($f < 1\text{kHz}$) (Figure I.15) [7, 17].

**Figure I.15** : capteur double.**I.5.3. Capteur différentiel :**

Un capteur en mode différentiel est une sonde spécialement destinée pour détecter les variations locales des caractéristiques du produit examiné, en effectuant deux mesures simultanées dans des zones voisines puis en comparant la différence permanente de ces mesures. IL est généralement constitué de deux enroulements identiques, et l'écart d'impédance entre ces enroulements qui est mesuré (Figure I.16). Ce type de capteur est utilisé pour détecter les discontinuités lors de son déplacement le long d'une pièce tout en minimisant les perturbations induites par une variation d'épaisseur ou de conductivité [7, 16].

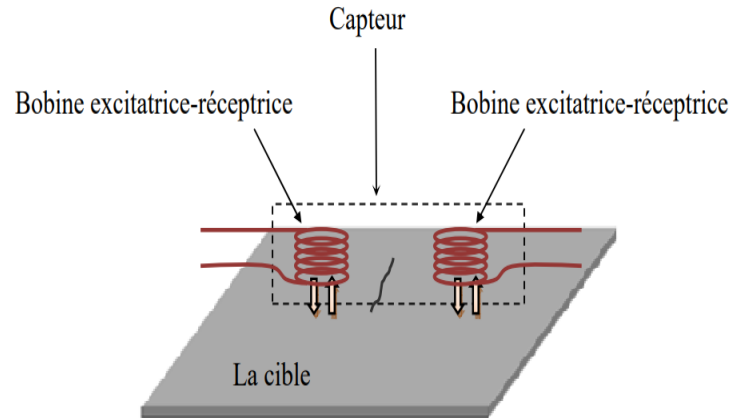


Figure I.16 : le capteur différentiel.

I.6. Dispositions des capteurs :

En pratique, on trouve essentiellement trois dispositions.

I.6.1. Première dispositions : capteur encerclant

Cette disposition est spécialement destinée pour le contrôle des produits longs de forme simple et de diamètre modeste comme les fils, barres et tubes (Figure I.17).

Les bobines sont immobilisées et protégées dans une pièce moulée dont le diamètre de l'intérieur doit être très peu supérieur à celui du produit, de manière à obtenir un coefficient de remplissage proche de l'unité plus possible. Cette condition est nécessaire pour garantir une sensibilité de détection meilleure sans avoir utiliser un taux d'amplification excessif, ce qui pourrait entraîner une dégradation du rapport signal/bruit [7].

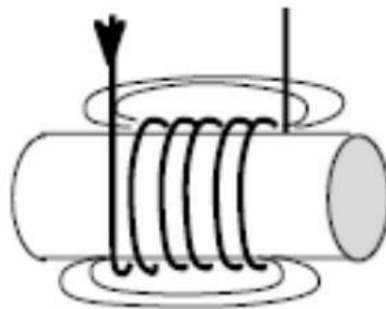
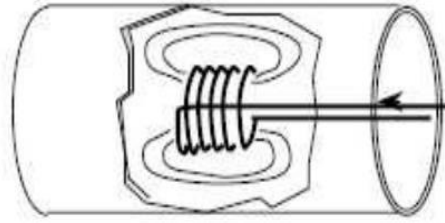


Figure I.17 : capteur encerclant.

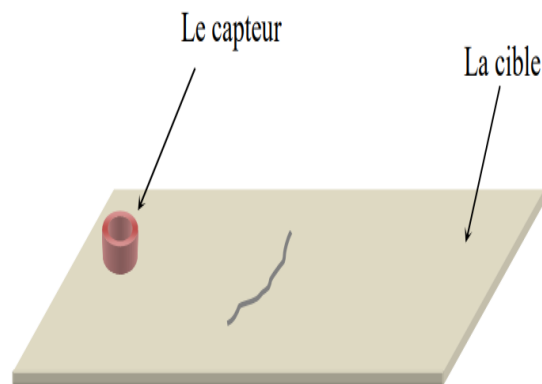
I.6.2. Deuxième disposition : capteurs internes

Ce capteur est spécialement utilisé pour contrôler l'intérieur des tubes, ou les bobines sont également moulées d'une manière concentrique par rapport à l'axe du produit (Figure I.18). Ce capteur est principalement employé pour contrôler de nombreux tubes de petit diamètre utilisés dans les changeurs de chaleurs ou les générateurs de vapeur dans l'industrie nucléaire [7].

**Figure I.18:** Capteur interne.

I.6.3. Troisième disposition : capteurs ponctuels

Cette configuration est adaptée aux explorations ponctuelles effectuées manuellement ou pour le balayage de grandes surfaces lors d'inspections automatisées (Figure I.19). Les sondes utilisées dans ce contexte se comportent d'un ou de plusieurs bobinages moulés, et sont généralement dotées d'un noyau en ferrite hautement perméable aux faibles champs alternatifs. Le rôle de ce noyau est d'éloigner les enroulements de la surface à inspecter, tout en gardant une sensibilité de détection élevée [7].

**Figure I.19 :** capteur ponctuel.

I.7. Mode d'excitation :

Pour réaliser la fonction d'émission, trois principales excitations sont possibles : l'excitation mono-fréquence, multifréquence ou bien pulsée [18].

I.7.1. Contrôle mono-fréquence :

Les courants de Foucault sont engendrés par une excitation sinusoïdale, à fréquence fixe choisie principalement par l'application visée et la sensibilité aux paramètres recherchés.

Cependant il est nécessaire de maintenir la fréquence dans une gamme raisonnable car une fréquence trop basse provoquerait des courants de Foucault de faible amplitude, et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits.

Dans le cas inverse, une fréquence trop élevée peut entraîner des perturbations capacitives à cause des capacités entre les spires de la sonde, provoquant des résonances et pouvant court-circuiter le circuit inductif de la sonde. Bien que cette méthode soit simple et parfois

suffisante, elle présente des limites dans les paramètres des grandeurs mesurables, généralement limité à deux telle que la partie réelle et imaginaire de l'impédance [11].

I.7.2. Contrôle multifréquence :

Le contrôle par courant de Foucault multifréquence est couramment utilisé pour l'inversion des données provenant par le capteur afin de déterminer diverse paramètres de matériau tel que la distance entre la sonde et la cible (lift-off), La conductivité électrique (σ), la perméabilité magnétique (μ), la détection des défauts ou l'épaisseur du matériau à contrôler. Pour résoudre un problème d'inversion de but d'identifier n paramètres de la cible, il est nécessaire d'au moins n observations de la sonde. Etant donné que le comportement de la sonde varie en fonction de la fréquence d'excitation, particulièrement entre les basses, moyennes et les hautes fréquences, les paramètres de la cible agissent d'une manière différente sur les mesures. La méthode multifréquence consiste à choisir sagement les fréquences d'excitation de la sonde pour recueillir les informations riches et complémentaires sur le matériau à inspecter. Cependant il est difficile, voire impossible d'obtenir une influence de chaque paramètres sur le signal de mesure à une seule fréquence. Le nombre de fréquences d'alimentation nécessaire est lié au nombre et à la nature des paramètres à identifier [11, 19].

I.7.3. Contrôle par courants de Foucault pulsés :

Cette méthode représente une alternative à l'excitation multifréquence. Elle consiste à diffuser un champ magnétique avec une bande fréquentielle large en excitant le capteur avec un signal impulsionnel. Ce mode de fonctionnement est appelé contrôle par CF pulsés. Cette méthode développée dans les années 1950 pour mesurer l'épaisseur des revêtements métalliques, a été adaptée pour détecter les défauts internes. Les signaux d'alimentation peuvent être de forme rectangulaire, triangulaire ou demi-sinusoïdale. Dans ce type de contrôle on utilise la variation temporelle des signaux en raison du spectre du signal d'excitation. Cette technique est plus riche d'information par rapport aux autres méthodes de contrôles. Cependant, le taux d'informations recueillies dans la pratique repose sur le traitement des signaux et les bruit difficile à filtrer en raison de large bande des signaux [18].

I.8. Avantage du CND par courant de Foucault :

- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement enfouis (quelques millimètres) dans tout matériau conducteur.
- Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplant. Ceci en facilite par conséquent l'utilisation. De même, aucune nuisance ou pollution n'est engendrée ni pour l'utilisateur ni pour l'environnement, contrairement, par exemple au ressuage, largement utilisé, qui nécessite l'application de produits chimiques nocifs.
- Transportabilité : le CND par CF ne nécessite pas de dispositif encombrant, et peut donc être effectué à des endroits difficilement accessibles moyennant un équipement portable. De même les contrôles à température élevées sont possibles [2].

I.9. Limites du CND par courant de Foucault :

- Il ne s'applique qu'à des matériaux électriquement conducteurs.
- Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur.
- L'interprétation des signaux est souvent complexe [2].

I.10. Conclusion :

Dans ce premier chapitre nous avons abordé l'état de l'art sur le contrôle non destructif (CND), en explorant ses objectifs, le principe de la détection des défauts, les types des défauts détectés, ainsi que la base de la procédure du CND. Nous avons également examiné en détail les différentes méthodes du CND telles que l'examen visuel, le ressuage, contrôle par ultrasons, la magnétoscopie, la thermographie, le courant de Foucault et la radiographie. Un intérêt particulièrement est assigné à l'utilisation de la méthode du contrôle non destructif par courant de Foucault (CND-CF) due à sa simplicité de sa mise en œuvre et son économie en termes d'espace mémoire. De plus, nous avons également étudié les différents capteurs inductifs employés dans cette méthode, ainsi que les divers modes d'excitations associés. Le prochain chapitre est consacré à la modélisation d'un capteur absolu à courant de Foucault en utilisant la méthode des éléments finis.

CHAPITRE II

«MODÉLISATION
MATHÉMATIQUE DES
PHÉNOMÈNES
ÉLECTROMAGNÉTIQUE »

II.1. Introduction :

Dans ce deuxième chapitre, nous aborderons la modélisation des systèmes physiques utilisés en contrôle non destructif par courant de Foucault (CND-CF). Dans le contexte du CND par CF, la compréhension des phénomènes physiques basé sur la résolution des équations électromagnétiques, notamment les équations de Maxwell, les lois de comportement des milieux et les conditions de champ appliquées à la frontière du domaine de résolution. Selon la complexité de la configuration, cette résolution peut être étudiée à l'aide de diverses approches, incluant des méthodes analytiques, numériques ou semi-analytiques. En outre, plusieurs expressions de l'impédance utilisées dans le domaine du CND-CF sont présentées, avec une attention particulière portée à l'induction magnétique.

II.2. L'importance de la modélisation :

La modélisation présente un intérêt majeur dans le domaine du contrôle non destructif par courant de Foucault (CND-CF). Elle permet non seulement de comprendre l'impact des actions sur un composant sans recourir à des expériences coûteuses ou risquées, mais aussi de développer des modèles mathématiques précis pour prédire les comportements des composants. En facilitant la conception des capteurs et en réduisant les coûts expérimentaux, la modélisation devient un outil indispensable pour optimiser les processus et garantir des résultats fiables [20].

II.3. Mise en équations :

Les problèmes liés au calcul des courants de Foucault peuvent être schématisés par un modèle type composé de l'air, du matériau conducteur et d'une source de courant (figure II.1). Ces trois objets forment le domaine de calcul Ω de frontière Γ .

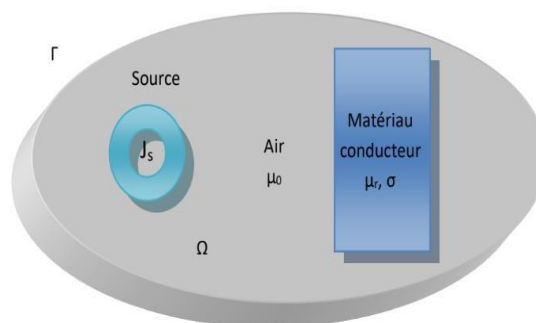


Figure II.1 : Domaine d'étude d'un problème de CND-CF.

Dans ce contexte d'étude, plusieurs paramètres sont essentiels pour définir le problème :

Ω : représente le domaine d'étude.

J_s : La densité de courant électrique dans la source.

Γ : désigne les frontières entourant ce domaine.

σ : représente la conductivité électrique.

μ_0 : est la perméabilité magnétique absolue du vide.

μ_r : est la perméabilité magnétique relative du matériau conducteur.

II.3.1. Equations de Maxwell :

Le contrôle non destructif par courants de Foucault dépend des principes fondamentaux décrits par les équations de Maxwell. Ces équations, sous forme d'un système d'équations aux dérivées partielles, établissent une relation entre les phénomènes magnétiques et électriques dans ce contexte. Les équations de Maxwell pertinentes sont les suivantes : [4]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{Loi de Maxwell Gauss (électrique)} \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de Maxwell Gauss (magnétique)} \quad (\text{II.2})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell Faraday (induction)} \quad (\text{II.3})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell Ampère} \quad (\text{II.4})$$

\vec{E} : représente le champ électrique en volts par mètre (V/m).

\vec{H} : est le champ magnétique en ampères par mètre (A/m).

\vec{D} : est l'induction électrique en coulombs par mètre carré (C/m²).

\vec{B} : est l'induction magnétique en teslas (T).

ρ : est la densité volumique de charges électriques en coulombs par mètre cube (C/m³).

\vec{J}_c : est la densité de courant de conduction en ampères par mètre carré (A/m²).

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: représente la densité de courant de déplacement.

II.3.2. Lois constitutive :

La conductivité électrique (σ), la perméabilité magnétique (μ) et la permittivité électrique (ϵ) sont des paramètres principaux qui installent des liens essentiels dans les équations de Maxwell grâce aux lois de comportement des matériaux ou lois constitutive. Ces relations sont formulées comme suites [4]:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} + \vec{B}_r \tag{II.5}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \tag{II.6}$$

$$\vec{D} = \varepsilon(\vec{E}) \tag{II.7}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

μ : représente la perméabilité magnétique en henrys par mètre (H/m).

μ_r : équivaut à $4\pi \cdot 10^{-7}$ et désigne la perméabilité magnétique du vide en henrys par mètre (H/m).

μ_r : indique la perméabilité magnétique relative du matériau considéré.

ε : représente la permittivité électrique en farads par mètre (F/m).

ε_0 : équivaut à $8,85 \cdot 10^{-12}$ et désigne la permittivité électrique du vide en farads par mètre (F/m).

ε_r : indique la permittivité relative du matériau considéré.

II.3.3. condition aux limites :

Le système composé des équations de Maxwell et les lois de comportement admet une infinité de solutions. Des conditions aux limites doivent être données sur la frontière du domaine d'étude afin d'assurer l'unicité de la solution [2].

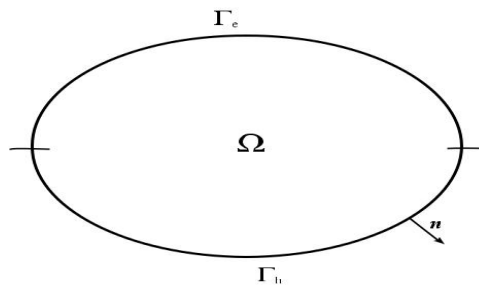


Figure II. 2 : condition à ces limites.

La frontière du domaine d'étude Ω est décomposée en deux régions complémentaires Γ_h et Γ_e telles que $\Gamma = \Gamma_h \cup \Gamma_e$ et $\Gamma_h \cap \Gamma_e = \emptyset$ (Figure II.3). Les conditions $\vec{n} \wedge \vec{E} = \vec{0}$ et $\vec{n} \wedge \vec{H} = \vec{0}$ sont respectivement imposées sur Γ_h et Γ_e .

II.3.4. condition de continuité :

Lors du passage des champs électromagnétique d'un milieu à un autre, les grandeurs de champs subissent des discontinuités aux interfaces, et ces champs ne sont pas continus. Tout fois il est envisageable d'établir des conditions de transition pour les champs entre deux milieu ayant des propriétés différentes.

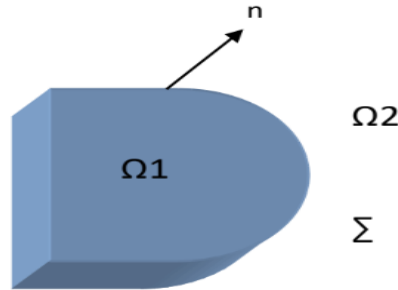


Figure II.3: condition de passage. [20]

En considérant deux milieux distincts, le Ω_1 et le Ω_2 , caractérisées par leurs propriétés physiques respective et séparés par une interface Σ (figure II.3), les conditions de continuité des champs à cette interface sont formulées comme suit :

- La discontinuité de la composante tangentielle de H est égale aux courants superficiels J_s .

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \times \vec{n} = J_s \tag{II.8}$$

- La continuité de la composante tangentielle de E.

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \times \vec{n} = 0 \tag{II.9}$$

- La continuité de la composante normale de B.

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{n} = 0 \tag{II.10}$$

- La discontinuité de la composante normale de D est égale aux charges superficielles ρ_s

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = \rho_s \tag{II.11}$$

Où :

ρ_s : Densité de charge électrique portée par la surface de séparation.

J_s : La densité surfacique de courant.

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

Les équations de (II.8)... (II.11) établissent que les composantes tangentielles (E et H) ainsi que les composants normaux (B et D) des champs électromagnétiques sont continues à travers l'interface Σ , démontrant ainsi la continuité de ces propriétés à cette interface.

Cependant, il convient de noter que la continuité de la composante tangentielle n'est maintenue que si la surface de séparation ne comporte pas de densité de courant surfacique J_s [20].

II.3.5. condition de jauge:

Les équations de Maxwell présentent des champs qui sont généralement exprimés soit à partir d'un gradient près (champ rotationnel), soit à partir du rotationnel près (champs à divergence), ce qui justifie l'utilisation des jauges dans certaines formulations pour garantir la singularité de la solution. Si nous considérons \vec{U} et \vec{W} comme deux champs de vecteurs, les conditions de jauges s'écrivent de manière générale comme suit [22] :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad \text{Jauge de coulomb} \quad (\text{II.12})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} + K \frac{\partial \vec{U}}{\partial x} = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz} \quad (\text{II.13})$$

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \quad \text{Jauge adapté pour les éléments d'arêtes} \quad (\text{II.14})$$

II.3.6. Equations électromagnétique 2D :

En combinant les équations de Maxwell, les relations du milieu, la loi d'Ohm et certaines lois fondamentales de la physique, on peut obtenir la représentation différentielle de la plupart des phénomènes électromagnétiques [5].

II.3.6.1. Hypothèse simplificatrice :

Dans notre analyse, nous avons pris en compte plusieurs hypothèses simplificatrices pour rendre les équations plus accessibles. Ces hypothèses incluent le fait que dans un milieu conducteur avec une conductivité σ de l'ordre de 10^{-6} [MS/m] et une permittivité ϵ_0 de l'ordre de $8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m], à des fréquences autour du MHz, nous pouvons considérer $\omega \epsilon_0 \ll \sigma$, ce qui équivaut à des courants de conducteur négligeables ($\partial D / \partial t = 0$). De plus, la densité volumique de charge ρ est supposée être nulle, et les paramètres σ , μ , et ϵ sont considérés comme linéaires, ne dépendant pas de la solution du système. Enfin, le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale [5].

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Flux magnétique} \quad (\text{II.15})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad \text{Maxwell-Gauss} \quad (\text{II.16})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Maxwell Faraday} \quad (\text{II.17})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad \text{Maxwell Ampere} \quad (\text{II.18})$$

II.3.6.2. Formulations utilisant le potentiel vecteur magnétique \vec{A} :

Pour les problèmes de symétrie de révolution, une formulation en potentiel vecteur magnétique est généralement utilisée. Nous cherchons l'équation électromagnétique 2D pour un système électromagnétique comportant un inducteur, un milieu induit et l'air environnant, comme illustré dans la (Figure II.4) : [5]

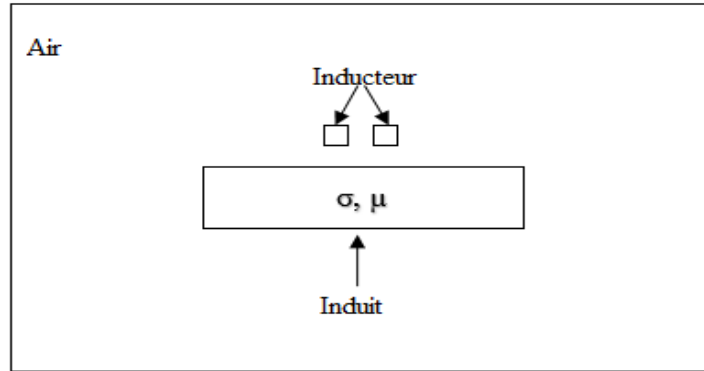


Figure II.4 : Dispositif électromagnétique étudié [5].

II.4. Formulation magnétodynamique (\vec{A} - V) :

Ce modèle de formulation dépend de l'utilisation du potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans tout le domaine, incluant à la fois les zones conductrices et non conductrices, tandis que le potentiel scalaire électrique est utilisé uniquement dans les régions conductrices [2].

D'après l'équation de la conservation de flux (II.2), l'induction magnétique \vec{B} dérive d'un potentiel magnétique \vec{A} tel que :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \tag{II.19}$$

Lorsque cette équation est remplacée dans (II.3), on obtient :

$$\vec{\nabla} \wedge \left[\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] = 0 \tag{II.20}$$

A partir de la relation précédente (II.19), nous pouvons définir un potentiel scalaire électrique V donné par la relation :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial x} - \vec{\nabla}V \tag{II.21}$$

La combinaison des équations (II.20) et (II.6) nous donne :

$$\vec{J} = \sigma \left[-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla}V \right] \tag{II.22}$$

Finalement, la formulation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique \vec{A} et en potentiel scalaire électrique s'écrit :

$$\vec{\nabla} \wedge \left[\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right] + \sigma \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right] = \vec{j} \quad (\text{II.23})$$

A cette équation s'ajoute la conservation de la densité de courant :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = \vec{\nabla} \cdot \left(-\sigma \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right] \right) = 0 \quad (\text{II.24})$$

Le potentiel vecteur magnétique étant défini à un gradient près ($\vec{A} = \vec{A}_0 + \vec{\nabla} V$), il est nécessaire d'utiliser une jauge pour garantir son unicité. La jauge de Coulomb, où $\vec{A} \cdot \vec{\nabla} = 0$ est la plus couramment utilisé à cet effet.

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

Cette jauge est introduite par pénalité en ajoutant le terme :

$$\vec{\nabla} \cdot \left[\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \right] \quad (\text{II.26})$$

Nous obtenons le système d'équations électromagnétiques symétrique à résoudre, dit formulation $\vec{A} - V$:

$$\vec{\nabla} \wedge \left[\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right] - \vec{\nabla} \cdot \left[\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \right] + \sigma \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right] = \vec{j} \quad (\text{II.27})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \left[\sigma \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} V \right] \right] = 0 \quad (\text{II.28})$$

II.4.1. Expression de l'équation magnétodynamique dans les régions constituant le dispositif :

Supposant une perméabilité magnétique constante pour toutes les régions du dispositif, l'équation (II.21) peut être exprimée comme suit : [2]

$$\vec{\nabla} \wedge \left[\vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right] + \sigma \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\sigma \mu \vec{\nabla} V \quad (\text{II.29})$$

$$\text{Avec : } \vec{j} = -\sigma \mu \vec{\nabla} V$$

En adaptant cette équations aux différentes régions du dispositif d'étude, nous sommes en mesure d'écrire :

a) l'air :

Les caractéristiques de l'air comprennent une conductivité électrique nulle et une perméabilité égale à celle du vide :

$$\vec{\nabla} \wedge \left[\vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right] = 0 \quad (\text{II.30})$$

b) Dans l'inducteur :

L'inducteur est fabriqué à partir de fils de cuivre fins alimentés par une source électrique :

$$\vec{\nabla} \wedge [\vec{\nabla} \wedge \vec{A}] = \vec{j} \quad (\text{II.31})$$

c) Dans la pièce :

La charge est un milieu passif sans source, ou des courants sont induits :

$$\vec{\nabla} \wedge [\vec{\nabla} \wedge \vec{A}] + \sigma \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.32})$$

En hypothèse harmonique (régime sinusoïdal), qui est notre cas (II.25) devient :

$$\vec{\nabla} \wedge [\vec{\nabla} \wedge \vec{A}] + j \sigma \mu \omega \vec{A} = 0 \quad (\text{II.33})$$

Avec : ω est la pulsation et $j^2 = -1$.

II.5. Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles :**II.5.1. Méthode analytique :**

Les premières approches reposaient sur des méthodes analytiques, principalement en utilisant des modèles unidimensionnels, supposant une charge axisymétrique ou allongé. Cependant, en raison de la complexité des configurations courantes en contrôle non destructif par courant de Foucault, l'obtention de solutions analytiques est souvent difficile voire impossible, et nécessite des ressources de calcul considérables. Ainsi, une alternative courante consiste à recourir à des méthodes numériques [23].

II.5.2. Méthode numériques :

Après avoir choisi un modèle mathématique approprié, ainsi que les conditions aux limites initiales associées, nous pouvons passer à sa résolution. Dans cette section, nous aborderons la résolution numérique des problèmes mathématiques décrites par les équations aux dérivées partielles (EDP). Les trois principales approches pour la résolution numérique des EDP sont les méthodes des différences finies (MDF), la méthode des volumes finis (MVF) et la méthode des éléments finis (MEF) en particulier, est largement préférée en raison de son efficacité dans le traitement de géométries complexes et de milieux non linéaires [5].

II.5.2.1. Méthode des différences finies :

La méthode numérique initialement utilisée consiste à discrétiser le domaine d'étude à l'aide d'une grille de points régulièrement espacés, puis à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs de différences entre les valeurs inconnues aux points voisins. Bien que cette approche soit facile à mettre en œuvre, elle présente des limitations, notamment en ce qui concerne son adaptation à des géométries complexe en raison de son maillage régulier [23].

II.5.2.2. Méthode des éléments de frontières :

La méthode plus généralement des équations intégrales remplace les équations aux dérivées partielles par des équations intégrales, utilisant des fonctions de green qui représentent la réponse à une source ponctuelle dans le contexte de la géométrie étudiée. Tout fois, cette méthode présente des limitations, particulièrement dans la détermination en fonction de green, restreignant son application aux géométries canoniques. De plus, elle est principalement adaptée aux cas où les courants de Foucault se développent sur une profondeur négligeable par rapport aux autres dimensions, ce qui correspond à des excitations à haute fréquence avec une profondeur de pénétration nulle [24].

II.5.2.3. Méthode des intégrales de volumes :

La méthode des intégrales de volumes repose sur la résolution des équations intégrales en utilisant des fonctions de Green adaptées à la géométrie spécifique étudiée. Cette approche permet de calculer les champs électrique et magnétique résultant de l'interaction entre un capteur et une cible en effectuant des convolutions entre les fonctions de Green et les sources électrique ou magnétique. Pour rendre ces équations exploitables numériquement, elles sont discrétisées à l'aide de la méthode des moments, supposant que les champs et les propriétés électromagnétique restent constants dans des cellules élémentaires cubiques. La résolution numérique se déroule ensuite par inversion itérative [23].

II.5.2.4. Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation largement utilisée, en particulier en mécanique des fluides. Elle a connu un essor remarquable, non seulement pour la modélisation des fluides, mais aussi pour d'autres domaines tels que le transfert thermique et l'électromagnétisme... etc. Cette méthode implique la subdivision du domaine d'étude en volumes élémentaires (tels que des tétraèdres, des hexaèdres, des prismes, etc.), chaque volume entourant un nœud. Les équations aux dérivées partielles du problème sont intégrées sur ces volumes élémentaires. Pour calculer ces intégrales, la fonction inconnue est représentée par une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans tout le domaine d'étude. Comparée à la méthode des éléments finis, la discrétisation par la méthode des volumes finis conduit à un système linéaire avec une matrice plus creuse. Cet avantage permet une convergence plus rapide des solveurs itératifs [7].

II.5.2.5. Méthode des éléments finis (MEF) :

La méthode des éléments finis est l'une des approches les plus adaptées pour la résolution numérique des équations aux dérivées partielles lorsque l'excitation se situe à basse ou moyenne fréquence, avec une profondeur de pénétration significative par rapport aux autres dimensions du système, cette méthode malgré son coût en mémoire et en temps d'exécution, elle présente des avantages tels que la robustesse et la précision.

La MEF consiste à discrétiser un problème continu en un problème discret équivalent. Cette discrétisation se déroule sur deux fronts.

D'une part, le domaine continu est subdivisé en sous-domaine de formes géométriques simple, appelés éléments finis, interconnectés par les point appelés nœuds. D'autre part, elle repose sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques, mais elle nécessite une formulation intégrale du problème, qui peut être réalisée selon deux approches différentes [5, 25].

- La méthode variation elle exige la connaissance au préalable de la fonctionnelle d'énergie du système a étudié, qui s'exprime par : [26]

$$F(A) = (L(A) - f) \quad (\text{II.34})$$

L : Operateur différentiel appliqué à la variable inconnue A et f une fonction source connue.

- La méthode des résidus pondérés, également connue sous le nom de méthode projective, vise à minimiser le résidu résultant de l'approximation de la fonction inconnue. Cette méthode est plus générale et ne nécessite pas de connaître au préalable la fonctionnelle d'énergie du système. Elle s'applique directement à la résolution des équations aux dérivées partielles souhaitées. L'équation à résoudre étant :

$$\int \Omega \alpha_i \cdot (L(A) - f) \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{II.35})$$

L'inconnue A du problème est approximée sur les éléments de maillage par la fonction d'interpolation α_j telle que : [26]

$$A_j^e = \sum_j \alpha_j \cdot A_j \quad (\text{II.36})$$

α_j : dépend des coordonnées des nœuds correspondant à chaque élément de maillage.

II.6. Technique de calcul d'impédance :

II.6.1. Impédance à travers les énergies électromagnétiques :

L'analyse du comportement électromagnétique de l'ensemble bobine-matériau à contrôler peut-être effectuée en utilisant une analogie électrique : un circuit contenant deux bobines couplées de manière inductive est équivalent à un circuit unique avec des paramètres rapportés à la bobine source. Selon cette équivalence, l'énergie magnétique du système (capteur-pièce) est identique à celle du circuit équivalent. De façon similaire, l'énergie dissipée par effet joule convient à cette même équivalence [27].

La résistance R vue par le capteur peut être évaluée à travers le calcul de la puissance perdue par effet Joule, soit :

$$P_j = \iiint v \frac{j^2}{\sigma} dv \quad (\text{II.37})$$

$$P_j = RI^2 \quad (\text{II.38})$$

D'où :

$$R = \frac{N^2}{S^2 j^2} P_j \quad (\text{II.39})$$

De même l'énergie magnétique emmagasinée nous permet de déduire l'inductance du système.

$$W_s = \frac{1}{2} \iiint \frac{B^2}{\mu} dv \quad (\text{II.40})$$

$$W_s = \frac{1}{2} L I^2 \quad (\text{II.41})$$

D'où :

$$L = \frac{N^2}{S^2 j^2} W_s \quad (\text{II.42})$$

Pour nos calculs d'impédance, nous avons opté pour cette méthode qui permet de déterminer rapidement et simplement la résistance et l'inductance (réactance) d'une bobine, même en présence de matériaux réactifs. Cependant, il est important de noter que cette méthode ne s'applique qu'aux capteurs à double fonction, c'est-à-dire à ceux qui agissent à la fois comme émetteurs et récepteurs.

II.6.2 Impédance à travers la théorie des circuits électrique :

La théorie des circuits s'appuie sur les équations de Maxwell, notamment les équations (II.1) et (II.4), qui généralisent les principes fondamentaux. L'équation (II.1) illustre la continuité électrique, équivalente à la loi des nœuds en théorie des circuits. Par ailleurs, l'équation (II.4) de Maxwell Ampère généralise la deuxième loi de Kirchhoff, correspondant à la loi des mailles. Cette équation, exprimée en fonction du potentiel vecteur magnétique et du potentiel scalaire électrique, est donnée par l'équation (II.43). Lorsqu'elle est reformulée en fonction du champ électrique et exprimée en notation complexe, elle revêt une autre forme : [28]

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} - \vec{\nabla}A \quad (\text{II.43})$$

Après avoir intégré le long du contour d'une spire élémentaire, cette équation se transforme :

$$-\int_C \vec{\nabla}A d\vec{l} = \int_C \vec{E} d\vec{l} + j\omega \int_C \vec{A} d\vec{l} = 0 \quad (\text{II.44})$$

Cette équation démontre que la somme des tensions le long d'un contour ou d'une maille est égale à zéro. Cela implique que la tension appliquée aux bornes d'un circuit est égale à la somme des chutes de tension résistive et inductive le long de ce circuit.

Notant que u est la tension appliquée à ce contour, soit :

$$u = -\int_C \vec{\nabla}A d\vec{l} \quad (\text{II.45})$$

Ainsi l'équation (II.44) devient :

$$u = \int_C \vec{E} d\vec{l} + j\omega \int_C \vec{A} d\vec{l} = 0 \quad (\text{II.46})$$

La combinaison de différentes équations aboutit à l'expression de la tension totale en fonction des champs.

$$\mu = \frac{1}{\Omega} [\iint \Omega (\int c \vec{E} d\vec{l}) d\Omega + j \frac{\omega}{\Omega} (\int c \vec{A} d\vec{l}) d\Omega] \quad (\text{II.47})$$

Faisant intervenir le courant total traversant la section du contour, l'impédance n'est autre que :

$$Z = \frac{\mu}{I} = \frac{N \mu}{\Omega I} = R + jX \quad (\text{II.48})$$

$$Z = \frac{\mu}{\Omega I} [\iint \Omega (\int c \vec{E} d\vec{l}) d\Omega + j \omega (\int c \vec{A} d\vec{l}) d\Omega] \quad (\text{II.49})$$

En présence d'un matériau influençant la bobine, le potentiel vecteur magnétique n'est plus strictement réel et se compose à la fois d'une partie réelle et d'une partie imaginaire. Il peut être exprimé sous forme complexe de la manière suivante :

$$\vec{A} = A e^{-i\omega t} = \text{Re}(\vec{A}) - j \text{Im}(\vec{A}) \quad (\text{II.50})$$

En injectant cette forme complexe du potentiel (II.50) dans l'expression de la tension totale (II.47), cette dernière devient :

$$\mu = \iint \Omega (\int c \vec{E} d\vec{l}) d\Omega - \omega \iint \Omega \text{Im}(\int c \vec{A} d\vec{l}) d\Omega + j \omega \iint \Omega \text{Re}(\int c \vec{A} d\vec{l}) d\Omega \quad (\text{II.51})$$

Appliquant la relation (II.48) de l'impédance en fonction de la tension et du courant, nous arrivons à la forme générale de l'impédance.

$$R = \frac{1}{I} \iint \Omega (\int c \vec{E} d\vec{l}) d\Omega - \frac{\omega}{I} \iint \Omega \text{Im}(\int c \vec{A} d\vec{l}) d\Omega \quad (\text{II.52})$$

$$X = j \frac{\omega}{I} \iint \Omega \text{Re}(\int c \vec{A} d\vec{l}) d\Omega \quad (\text{II.53})$$

Ces expressions des paramètres de l'impédance s'appliquent que ce soit à une bobine seule ou en présence d'un matériau.

II.6.3. Impédance à travers l'induction ou le flux magnétique :

Dans une configuration à double fonction ou à fonctions séparées, le calcul de l'impédance du bobinage peut être réalisé en appliquant une méthode générale qui repose sur le calcul du flux de l'induction magnétique [29, 30].

En partant de l'équation de Maxwell-Faraday et en appliquant le théorème de Stokes après avoir intégré sur la surface enveloppée par le contour de la bobine [31], nous parvenons à obtenir :

$$\int c \vec{E} d\vec{l} = j \omega \iint s \vec{B} d\vec{S} \quad (\text{II.54})$$

Pour obtenir la tension aux bornes de la bobine, nous agrégeons les tensions élémentaires de chaque spire. Ainsi, l'équation (II.54) appliquée à l'ensemble des spires constituant la bobine se simplifie comme suit :

$$\iint_{\Omega} (\int c \vec{E} d\vec{l}) d\Omega - j\omega \iint_{\Omega} (\iint S \vec{B} d\vec{S} d\vec{l}) d\Omega = -j\omega \iint_{\Omega} \Phi d\Omega \quad (\text{II.55})$$

Sachant que l'impédance électrique peut être évaluée à partir de :

$$Z = R + jX = \frac{1}{I} \iint_{\Omega} (\int c \vec{E} d\vec{l}) d\Omega \quad (\text{II.56})$$

Et en introduisant la forme complexe du flux magnétique, la combinaison des équations (II.55) et (II.56) donne :

$$Z = \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \text{Im}(\Phi) d\Omega - j \iint_{\Omega} \text{Re}(\Phi) d\Omega \quad (\text{II.57})$$

Les paramètres de l'impédance sont alors :

$$R = \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} \text{Im}(\Phi) d\Omega \quad (\text{II.58})$$

$$X = -j \iint_{\Omega} \text{Re}(\Phi) d\Omega \quad (\text{II.59})$$

Ou :

$$R = \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} (\iint S \text{Im}(\vec{B} d\vec{S})) d\Omega \quad (\text{II.60})$$

$$X = -j \frac{\omega}{I} \iint_{\Omega} (\iint S \text{Re}(\vec{B} d\vec{S})) d\Omega \quad (\text{II.61})$$

L'expression de l'impédance ainsi formulée est applicable à la fois aux capteurs à double fonction et à ceux à fonctions séparées. En incorporant le potentiel vecteur magnétique, les équations (II.60) et (II.61) se présentent de la manière suivante :

$$\text{Re}(Z) = \frac{N^2}{jS^2} \omega \iint s \ 2. \pi. r. \text{Im}(A) dS \quad (\text{II.62})$$

$$\text{Im}(Z) = \frac{N^2}{jS^2} \omega \iint s \ 2. \pi. r. \text{Re}(A) dS \quad (\text{II.63})$$

Avec : r : Rayon de la bobine.

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équations de Maxwell et les lois de comportement des milieux permettant de modéliser les phénomènes électromagnétiques sous forme d'équations aux dérivées partielles. Pour résoudre ces équations, nous avons exploré différentes méthodes, notamment analytiques, numériques et semi-analytiques, en nous concentrant sur leur application dans le domaine du CND. Nous avons particulièrement utilisé la méthode des éléments finis, qui se révèle adaptée à la résolution des équations aux dérivées partielles, en raison de sa capacité à gérer les non-linéarités complexes et à s'adapter à des géométries complexes. De plus, nous avons présenté diverses expressions de l'impédance dans le contexte du CND-CF, avec un accent particulier sur l'induction magnétique.

CHAPITRE III

« APPLICATION ET VALIDATION SUR
UN CAPTEUR ABSOLUE À COURANT
DE FOUCAULT »

III.1.Introduction :

Dans ce chapitre, notre objectif principal est d'évaluer la sensibilité d'un modèle d'un capteur absolu à courant de Foucault à détecter d'éventuels défauts sur une pièce métallique présentant une surface géométrique plane. A cet effet, nous avons analysé la variation de l'induction magnétique en fonction du déplacement du capteur, en prenant en compte plusieurs paramètres essentiels : la nature des matériaux, la fréquence d'alimentation, le gap, la lift-off, la profondeur du défaut, le nombre de spires, ainsi que le courant d'excitation du capteur.

III.2. Caractéristiques géométriques et électromagnétiques du système :

Les dimensions géométriques et propriétés physique du dispositif d'étude sont décrites comme suit :

- **Le capteur :**

- Nombre de spires : 140
- Longueur : 0,8 mm
- Conductivité électrique : 55,9 MS/m
- Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^{-7}$
- Courant injecté : 0,8 mA
- le pas de déplacement du capteur : 0.1 mm

- **La charge :**

- Longueur : 100 mm
- Epaisseur : 5 mm
- Conductivité électrique : 1,69 MS/m (Acier inoxydable ferromagnétique (AISI430))
- Perméabilité magnétique relative : 110 (Acier inoxydable ferromagnétique (AISI430))
- Conductivité électrique : 7,48 MS/m (Acier ferromagnétique (AISI S235 JR))
- Perméabilité magnétique relative : 178 (Acier ferromagnétique (AISI S235 JR))
- Conductivité électrique : 6.135 MS/m (matériau amagnétique)
- Perméabilité magnétique relative : 1 (matériau amagnétique)

- **L'air :**

- Conductivité électrique : 0 MS/m
- Perméabilité magnétique : $4\pi \cdot 10^{-7}$

- **Le défaut :**

- Longueur : 2 mm
- Epaisseur : 1mm

III.3. Organigramme de calcul :

Le schéma ci-dessous présente un résumé des différentes étapes réalisées par le programme de calcul éléments finis :

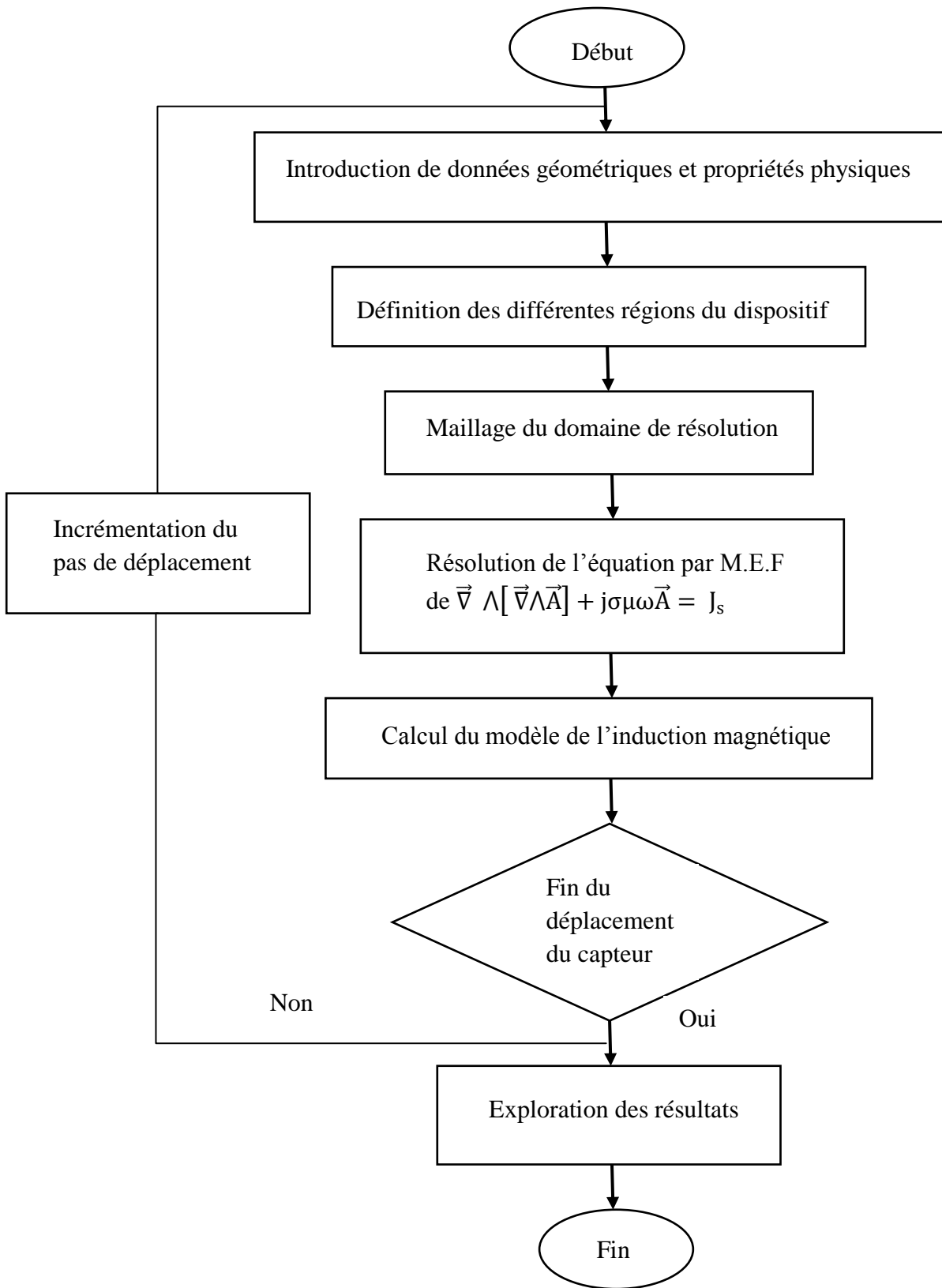


Figure III.1 : Organigramme de calcul.

III.4. Domaine d'étude et conditions aux limites :

Le dispositif d'étude est un capteur absolu inductif avec deux bobines, placé au-dessus d'une pièce plane présentant un défaut, utilisé pour l'inspection de la pièce. Les conditions aux limites sont de type Dirichlet, comme illustré sur la figure suivante :

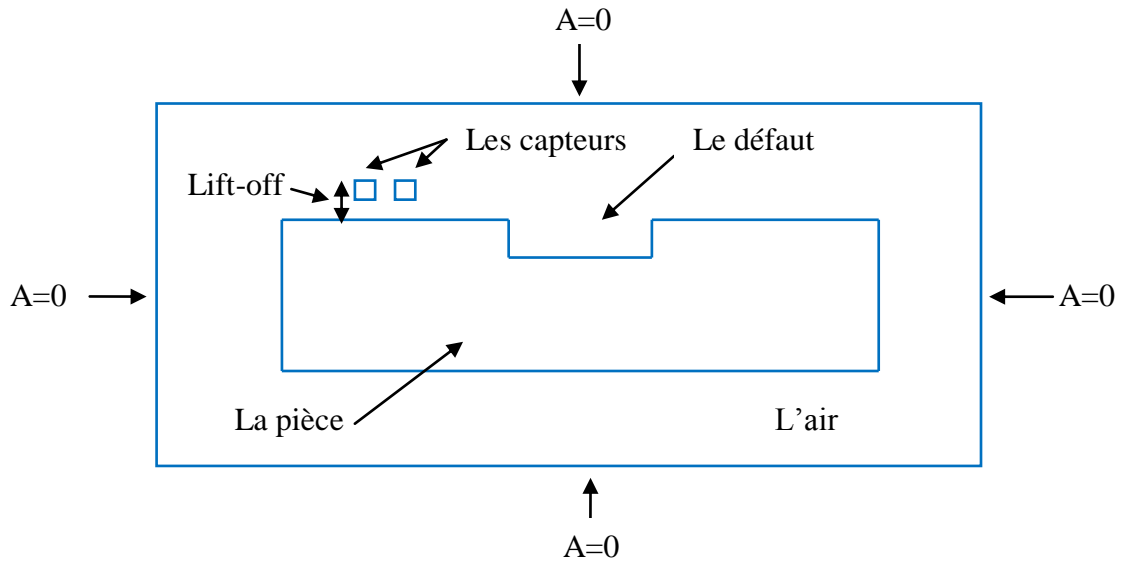


Figure III.2: Domaine de résolution et conditions aux limites.

III.5. Maillage de la structure :

Le maillage de la structure étudiée, représenté dans la (Figure III.3), est constitué de 22180 nœuds et de 43720 éléments triangulaires.

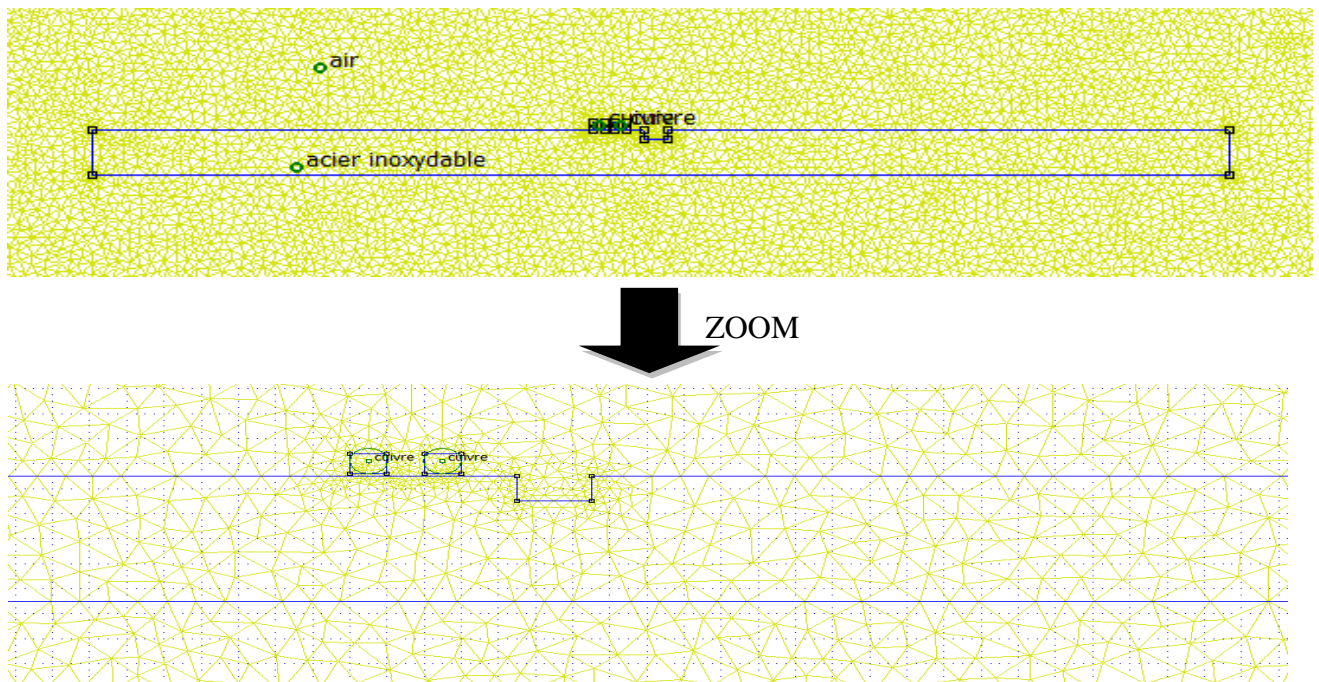


Figure III.3: Maillage éléments finis du domaine d'étude.

III.6. Résultats et discussions :

Les résultats de simulation qui sont présentés dans cette section, ont été obtenus en déplaçant le capteur sur le long de la surface extérieure de la pièce avec un pas de 0.1mm.

L'analyse inclut également les variations des paramètres géométriques et physiques tant du capteur que de la pièce présentant un défaut. La profondeur standard de pénétration, notée δ en [m], est déterminée par :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (\text{III.1})$$

- La fréquence ($\omega = 2\pi f$)
- La conductivité σ [S/m]
- La perméabilité magnétique μ [H/m]

III.6.1. Effet de la nature du matériau sur la sensibilité du capteur :

Dans cette section, nous mettons l'accent sur l'analyse de plusieurs matériaux présentant différentes caractéristiques électriques et magnétiques. À cet effet, nous avons sélectionné deux matériaux magnétiques et un matériau amagnétique.

-Acier inoxydable ferromagnétique avec une conductivité électrique $\sigma=1,69$ MS/m et une perméabilité magnétique relative=110.

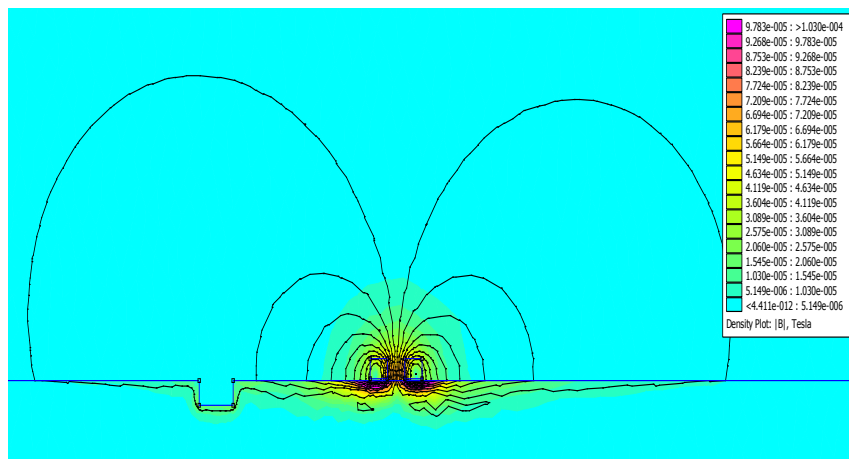
-Acier ferromagnétique avec une conductivité électrique $\sigma=7,48$ MS/m et une perméabilité magnétique relative= 178.

-Un matériau amagnétique avec une conductivité électrique $\sigma=6.135$ MS/m et une perméabilité magnétique relative=1.

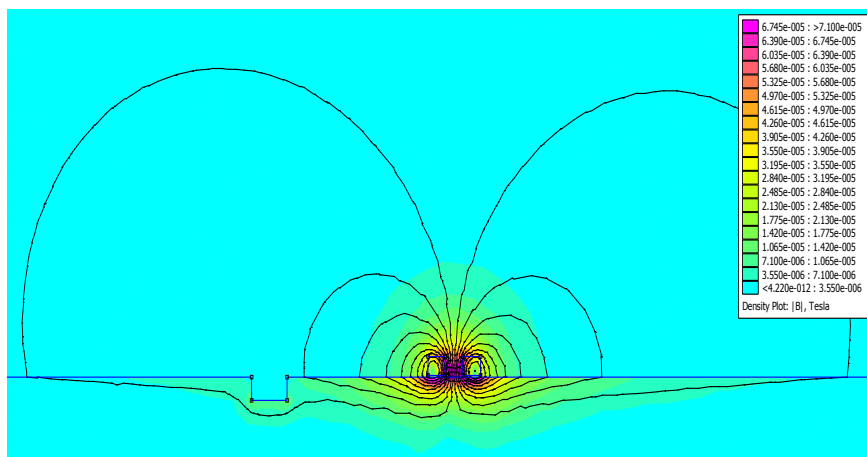
Avec une fréquence=1kHz

Le pas=0.5mm et le nombre du déplacement $n=30$

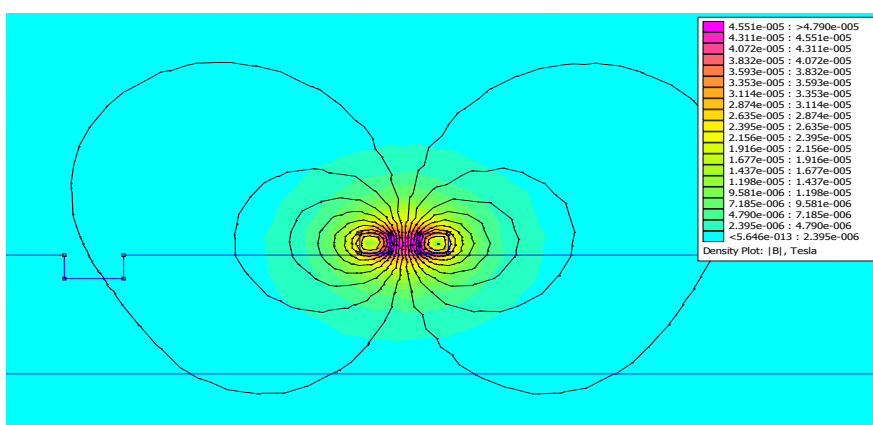
La répartition du champ magnétique de chaque matériau est illustré dans les figures (III.4 (a, b, c)), montrant la variation des lignes de champ en fonction du déplacement du capteur pour différents matériaux.



a) acier ferromagnétique



b) acier inoxydable



c) Amagnétique

Figure III.4 : Comportement des lignes du champ magnétique pour différents matériaux (acier ferromagnétique, acier inoxydable, amagnétique) (a, b, c).

La figure (III.5), illustre la variation du module d'induction magnétique B pour différents matériaux (acier ferromagnétique, acier inoxydable, amagnétique).

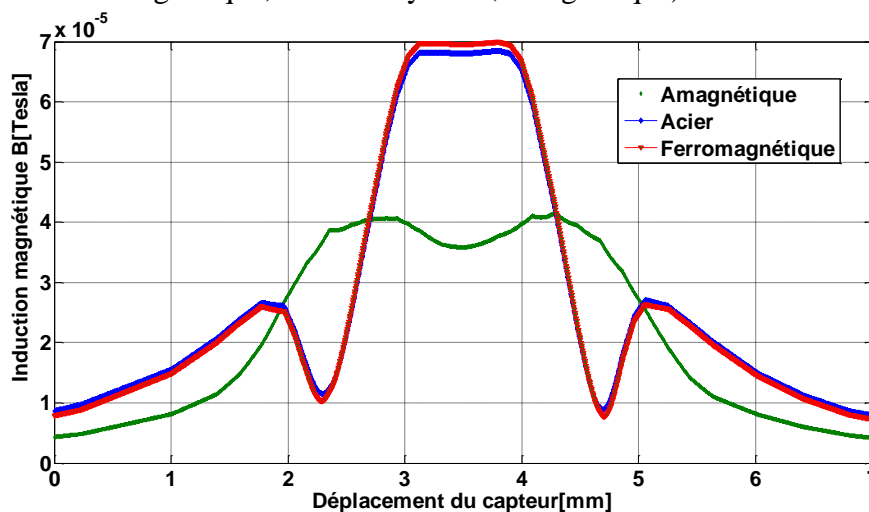


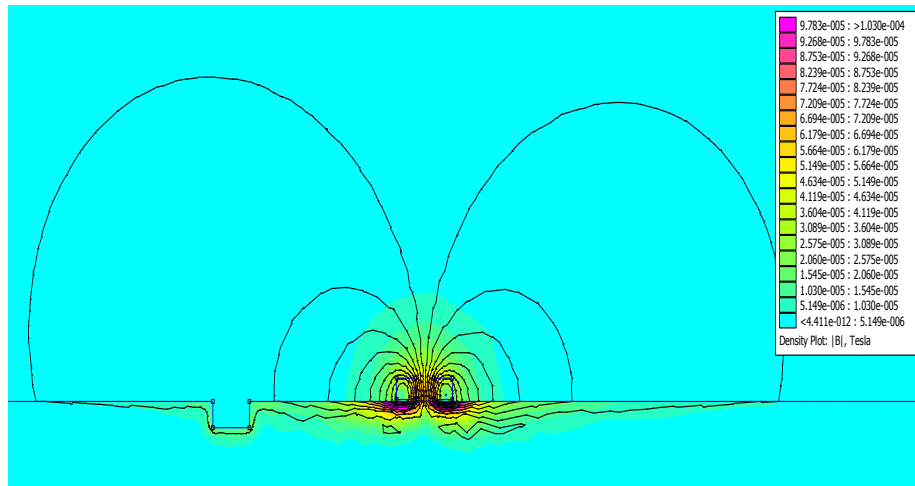
Figure III.5: Variation de module de l'induction magnétique B en fonction de la position du capteur pour les trois différents matériaux.

Selon la figure (III.5), le module de l'induction magnétique $|\vec{B}|$ varie en fonction de la conductivité et de la perméabilité magnétique des matériaux. Cela indique que la sensibilité du capteur pour détecter les défauts sur une pièce magnétique est proportionnelle à ces propriétés. En particulier, le matériau acier ferromagnétique semble influencer d'avantage la sensibilité du capteur en raison de sa haute perméabilité magnétique et sa conductivité élevée.

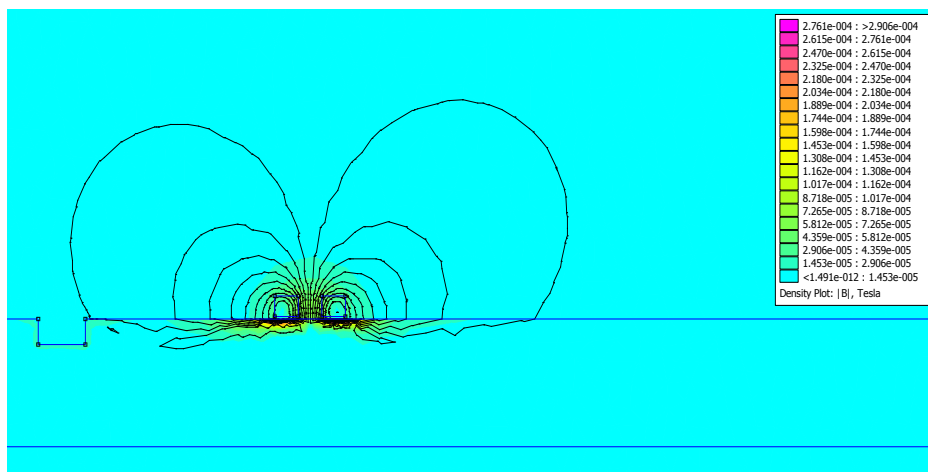
III.6.2. Effet de la fréquence sur la sensibilité du capteur :

Pour étudier l'impact de la fréquence sur la détection des défauts, nous avons utilisé différentes fréquences : 1 kHz, 10 kHz, 30 kHz, 50 kHz et 100 kHz. Etant donné que nous avons identifié dans la première partie que l'acier ferromagnétique était le matériau le plus efficace, nous avons choisi de poursuivre l'analyse avec ce matériau. Le pas de déplacement était de 0.5 mm et le nombre total de déplacement était n=30.

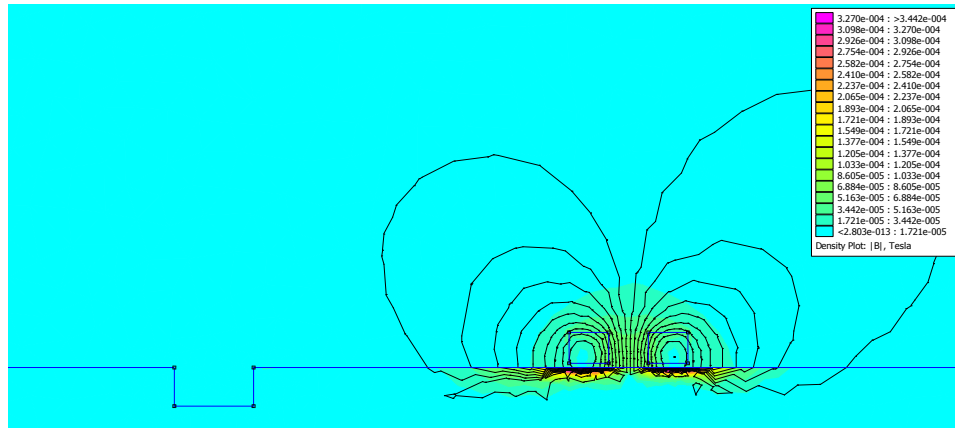
Les figures (III.6 (a, b, c, d, e)) illustrent la distribution des lignes du champ magnétique en présence d'un défaut de 2 mm sur la surface de la structure à étudier.



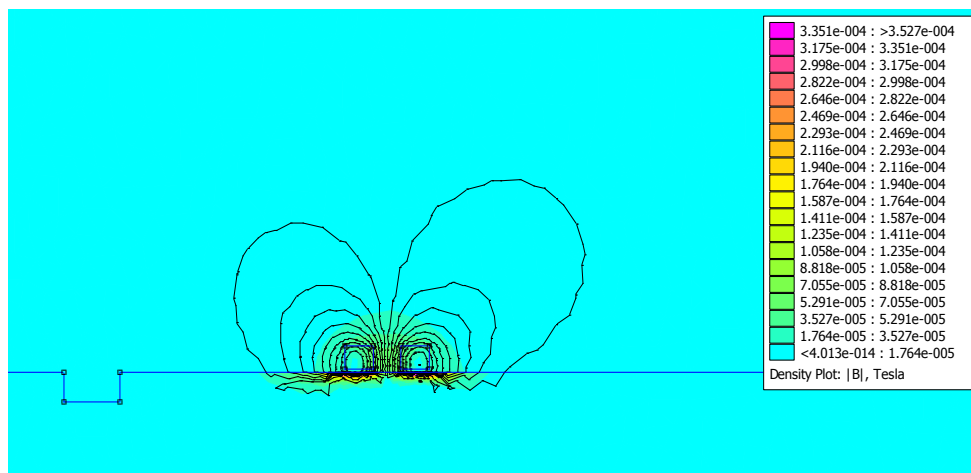
a) fr=1 kHz



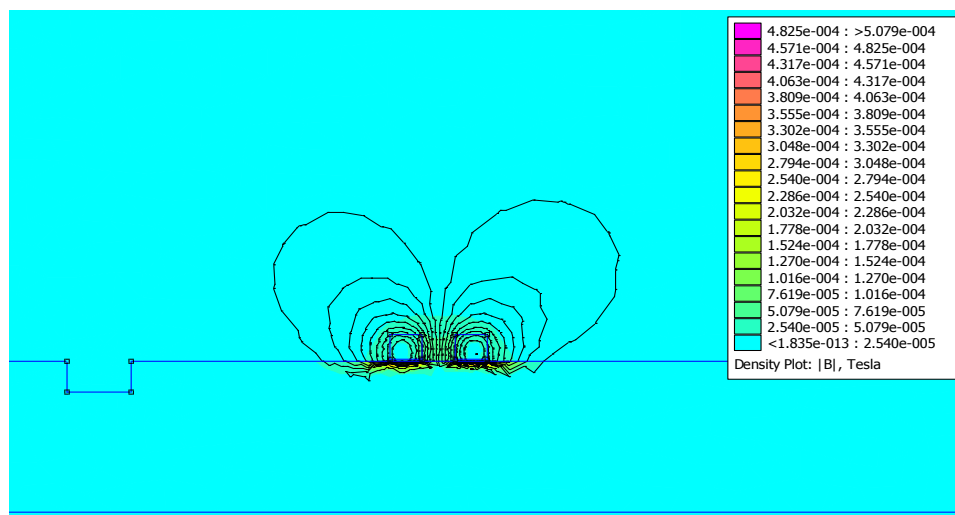
b) fr=10 kHz



c) fr=30 kHz



d) fr=50 kHz



e) fr=100 kHz

Figure III.6 : Distributions des lignes du champ magnétique pour différentes valeurs de la fréquence.

Les figures (III.6 (a, b, c, d et e)) illustrent que les lignes de champ se concentrent autour du défaut et pénètrent plus profondément dans la pièce à la fréquence de 1 kHz, qui est la fréquence minimale utilisée.

La figure (III.7) illustre les résultats des simulations pour une perméabilité magnétique relative de la pièce de ($\mu_r=178$) et une conductivité électrique de 7.48 MS/m, avec un lift-off de 0.1 mm. Elle présente la variation de l'induction magnétique (B) en fonction de la position du capteur pour différentes fréquences (1 kHz, 10 kHz, 30 kHz, 50 kHz, 100 kHz).

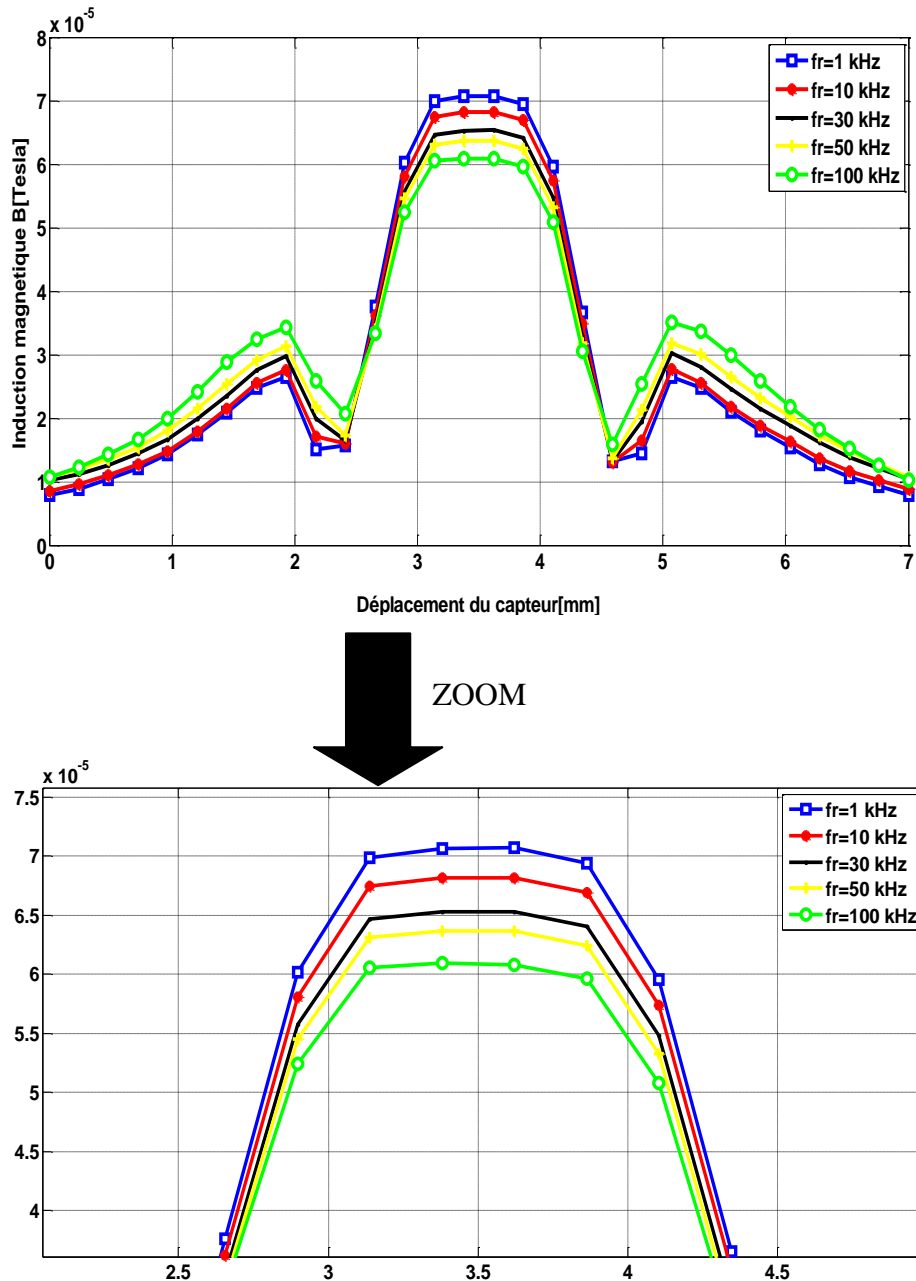


Figure III.7: Variation de l'induction magnétique en fonction de la position du capteur pour différentes valeurs de la fréquence.

D'après la figure (III.7), nous avons constaté que la variation de l'induction magnétique est inversement proportionnelle à la fréquence. L'observation graphique révèle que le capteur est plus sensible à la détection des défauts à des fréquences plus basses, notamment à 1 kHz.

III.6. 3. Effet de Lift-Off sur la sensibilité du capteur :

Dans cette section, nous avons étudié l'impact du lift-off, c'est-à-dire la distance entre le capteur et la pièce, sur la détection des défauts. Nous avons testé plusieurs valeurs de lift-off : 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm et 2 mm, tout en maintenant une fréquence de 1 kHz.

La figure (III.8) représente le module de l'induction magnétique en fonction de la position de capteur pour différentes valeurs de lift off (0.1mm, 0.5mm, 1mm, 1.5mm et 2mm).

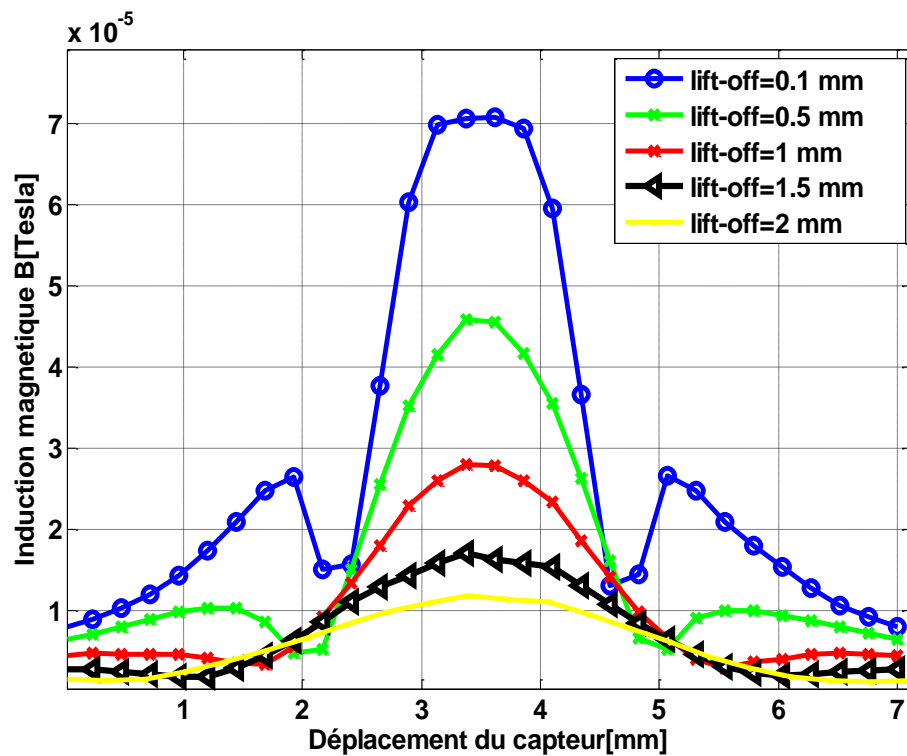


Figure III.8: Variation de l'induction magnétique en fonction de la position de capteur pour différentes valeurs du lift-off.

La figure (III.8) montre que l'amplitude de l'induction magnétique B diminue à mesure que le lift-off augmente, ce qui rend le défaut moins visible pour le capteur lorsque la distance entre le capteur et la pièce augmente. Cela indique que la sensibilité du capteur à détecter la présence d'un défaut diminue avec l'augmentation de cette distance.

III.6.4. Effet du gap sur la sensibilité du capteur :

Pour explorer l'impact de la distance entre les deux bobines du capteur sur la détection des défauts, nous avons utilisé différentes valeurs du gap : 1 mm, 1.5 mm, 2mm et 2.5 mm.

La courbe d'induction magnétique en fonction du déplacement du capteur pour ces différentes valeurs de gap (figure III.9), avec une fréquence de 1 kHz et un lift-off de 0.1 mm, montre que l'induction magnétique diminue lorsque la distance entre les deux bobines du capteur (le gap) augmente. Cela révèle une relation inverse entre l'induction magnétique et le gap : plus la distance entre les deux bobines du capteur est grande, moins le capteur est sensible à détecter les défauts.

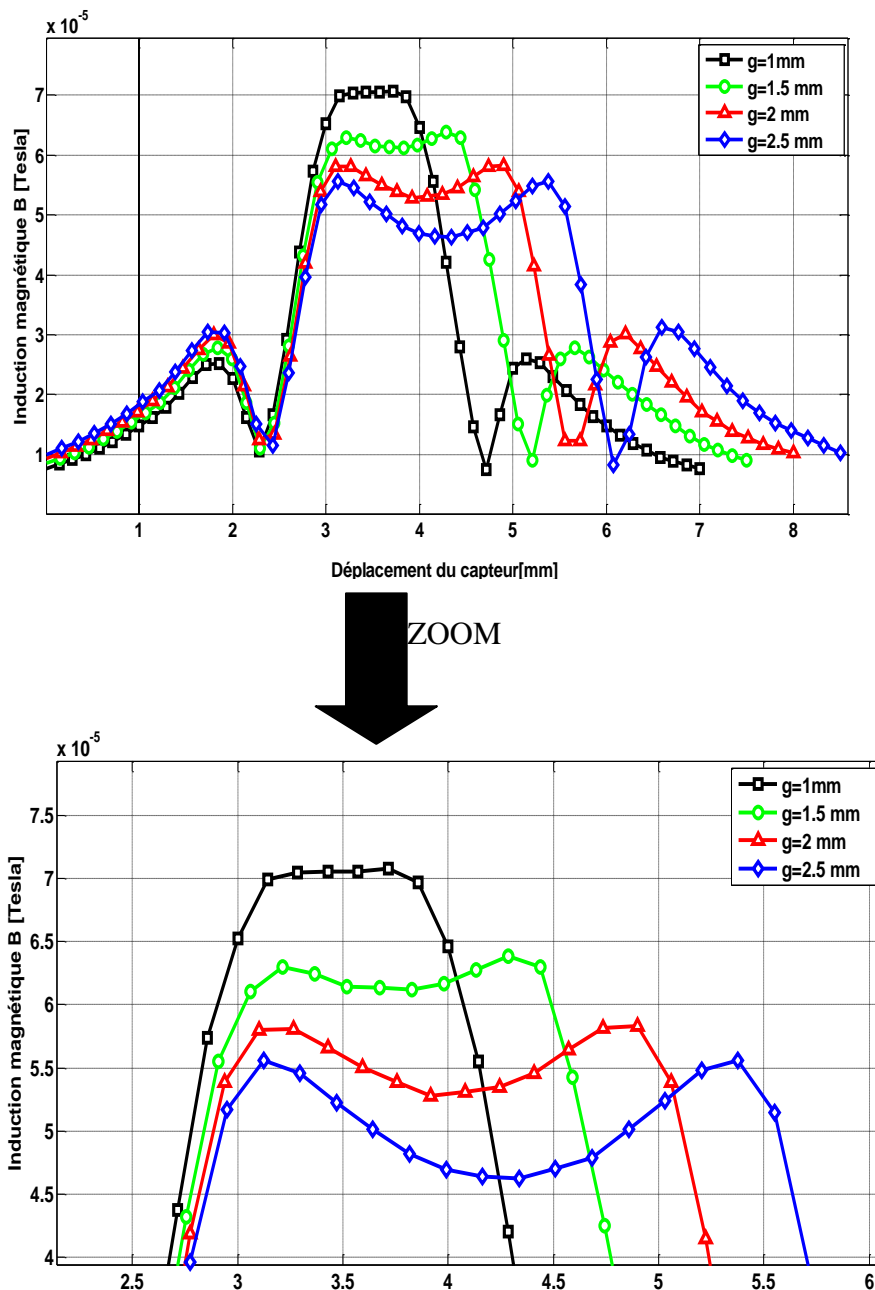


Figure III.9 : Module de l'induction magnétique en fonction de la position de capteur pour différentes valeurs du gap.

III.6.5. Effet de courant d'excitation et le nombre de spires sur la sensibilité du capteur :

Les figures (III.10) et (III.11) montrent la variation du module de l'induction magnétique en fonction du déplacement du capteur pour différentes combinaisons de courant d'excitation (0.8 mA, 1 mA, 1.2 mA, 1.4 mA) et de nombre de spires (80, 100, 120, 140 spires). Ces variations sont observées à une fréquence de 1 kHz et avec un lift-off de 0.1 mm.

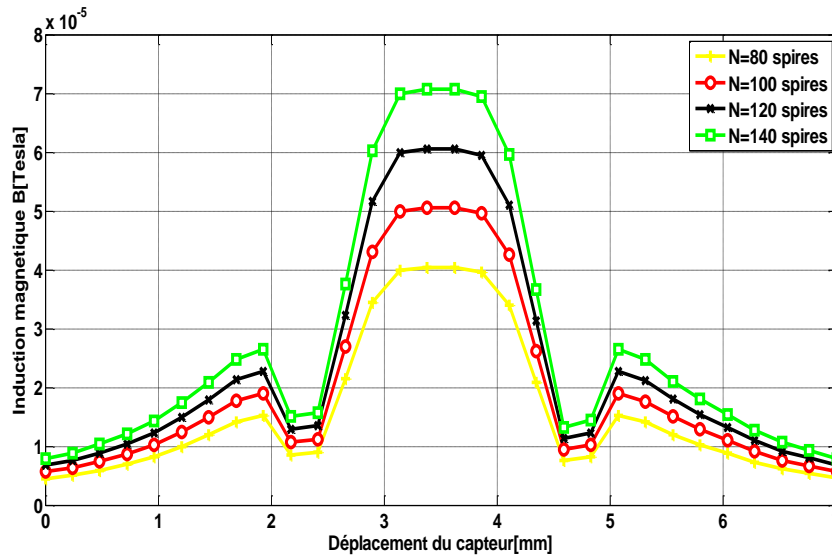


Figure III.10 : Module de l'induction magnétique en fonction de déplacement de capteur pour différentes valeurs de nombre de spires.

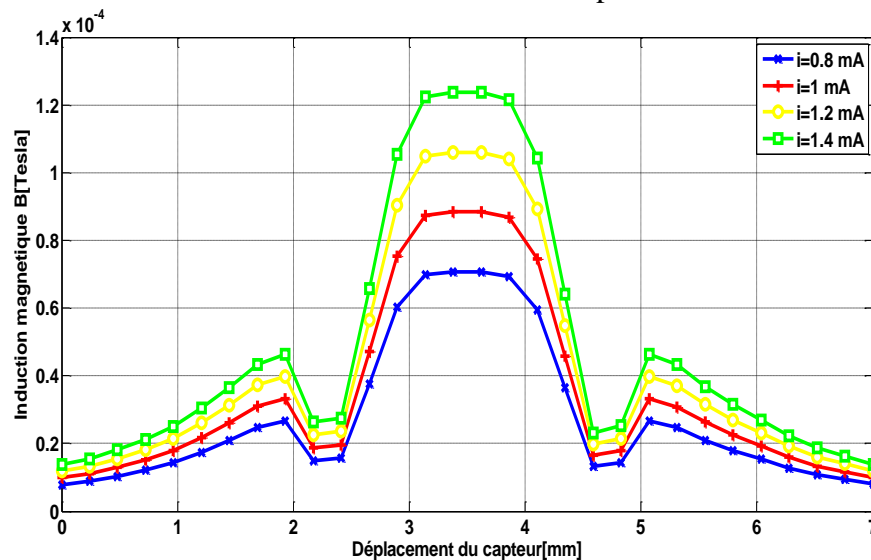


Figure III.11 : Module de l'induction magnétique en fonction de déplacement de capteur pour différentes valeurs du courant d'excitation.

Les figures (III.10) et (III.11) montrent que le module de l'induction magnétique augmente avec l'augmentation du courant d'excitation et du nombre de spires. En d'autres termes, une augmentation du nombre de spires et du courant d'excitation rend le capteur plus sensible à la détection des défauts.

III.6.6. Effet de la profondeur du défaut sur la sensibilité du capteur :

Dans cette section, nous analyserons l'impact de la profondeur du défaut sur sa détection des défauts. À cet effet, nous avons étudié différentes valeurs de profondeur du défaut : 1 mm, 2 mm et 4 mm.

La figure (III.12) montre la variation de module de l'induction magnétique en fonction de déplacement de capteur pour différentes valeurs la profondeur du défaut, avec une fréquence de 1 kHz et lift-off de 0.1mm.

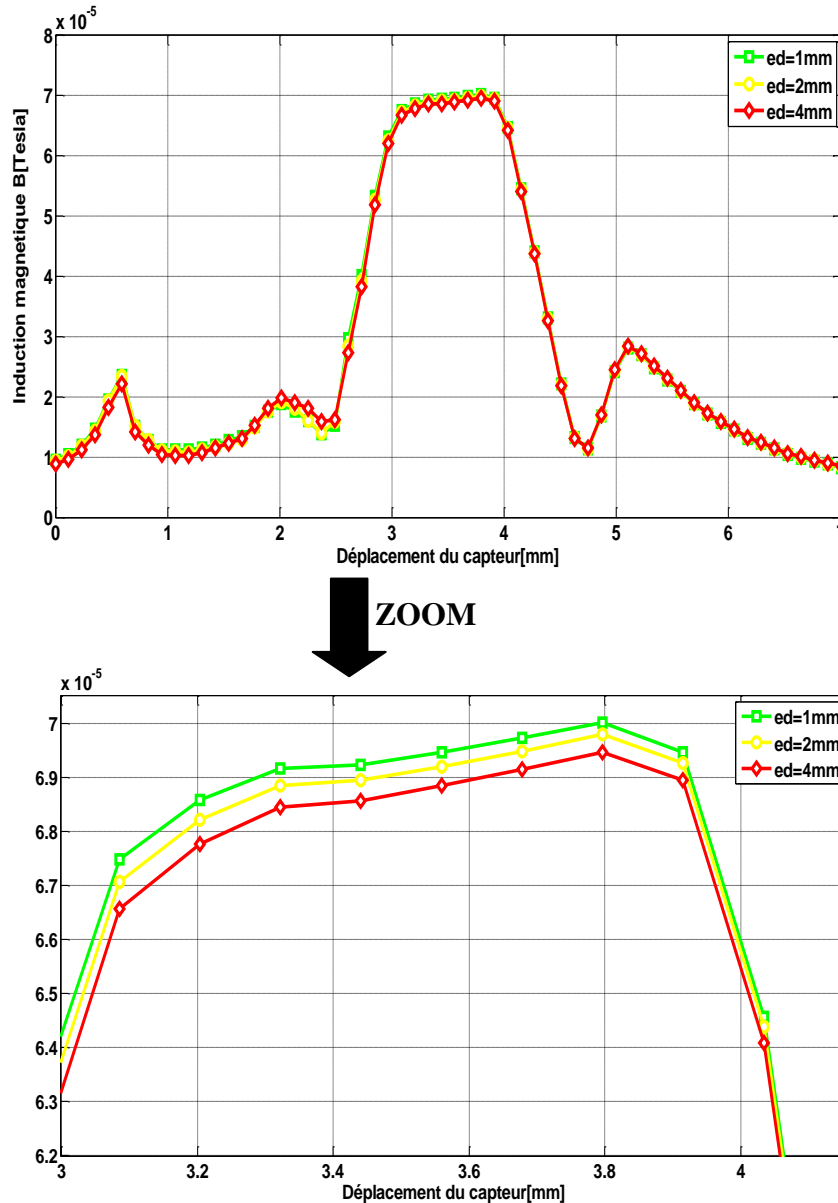


Figure III.12 : Module de l'induction magnétique en fonction de déplacement de capteur pour différentes valeurs de la profondeur du défaut.

La figure (III.12) indique que l'amplitude de l'induction magnétique (B) augmente à mesure que la profondeur du défaut diminue, illustrant une relation inversement proportionnelle entre l'induction magnétique et la profondeur du défaut. Cela suggère que la sensibilité du capteur est plus élevée pour détecter les défauts peu profonds.

III.7. Conclusion :

Les résultats principaux de notre investigation indiquent que l'induction magnétique augmente avec la perméabilité et la conductivité du matériau, ce qui favorise les matériaux ferromagnétiques. Cependant, à des fréquences élevées, l'induction magnétique diminue, diminuant ainsi la sensibilité du capteur à détecter le défaut. De plus, nous avons constaté qu'un lift-off plus important réduit l'amplitude de l'induction magnétique, diminuant ainsi la sensibilité du capteur à détecter la présence de défaut. Par ailleurs, le gap, qui correspond à la distance entre les bobines du capteur, le nombre de spires, et le courant d'excitation influencent l'intensité de l'induction magnétique. En effet, l'augmentation du gap diminue l'intensité de l'induction magnétique, tandis qu'un nombre élevé de spires et un courant d'excitation plus fort l'augmentent, améliorant ainsi la sensibilité du capteur. Enfin, une plus grande profondeur de défaut réduit l'amplitude de l'induction magnétique, ce qui affecte la capacité à détecter des défauts profonds.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons modélisé numériquement le comportement électromagnétique d'un capteur absolu à courant de Foucault, dans le but de détecter les défauts de surface externes sur des pièces conductrices, qu'elles soient magnétiques ou non. L'analyse de la sensibilité du capteur à détecter la présence d'un défaut est obtenue en termes de la variation de l'induction magnétique. Ce modèle numérique de diagnostic a été implémenté sous environnement FEMM-LAB basé sur la méthode des éléments finis.

Pour évaluer la performance du ce capteur à courant de Foucault à détecter des défauts de surface sur des pièces conductrices, nous avons examiné plusieurs paramètres, notamment la nature des matériaux sur la sensibilité du capteur, la fréquence d'alimentation, le lift-off, le nombre de spires, le courant d'excitation du capteur et le gap ainsi que la profondeur du défaut.

Nos résultats d'investigations mettent en évidence l'influence significative de la conductivité et la perméabilité magnétique du matériau sur cette variation, montrant que les valeurs élevées améliorent les performances du système. Par ailleurs, la fréquence influence sur le comportement des lignes du champ magnétique et varie d'une manière inversement proportionnelle à la variation de l'induction magnétique pour les défauts à différentes profondeurs. Nous avons également constaté qu'un lift-off élevé réduit l'amplitude de l'induction magnétique, diminuant ainsi la sensibilité du capteur à détecter la présence de défaut.

Par ailleurs, le gap, qui correspond à la distance entre les deux bobines du capteur, le nombre de spires, et le courant d'excitation influencent l'intensité de l'induction magnétique. En effet, l'augmentation du gap réduit l'intensité de l'induction magnétique, tandis qu'un nombre élevé de spires et un courant d'excitation plus fort augmentent l'induction magnétique améliorant ainsi la sensibilité du capteur à la détection des défauts. Enfin, une plus grande profondeur de défaut réduit l'amplitude de l'induction magnétique ce qui affecte la capacité à détecter les défauts profonds.

En conclusion, notre étude a prouvé l'efficacité du modèle de calcul par éléments finis que nous avons conçu. L'induction magnétique fournit des données précieuses sur les propriétés électromagnétiques et l'état des pièces examinées, faisant de cet outil une solution prometteuse pour détecter les défauts de surface sur les pièces conductrices.

- [1] F. THOLLON, “Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques.”, Thèse de Doctorat, Spécialité génie électrique, l'école de Doctorale “Lyon des sciences pour l'ingénieur électronique, électrotechnique, automatique”, école centrale de Lyon, 1995. Français.
- [2] M. HAMEL, “Etude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive.”, Thèse de Doctorat, Spécialité électrotechnique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018.
- [3] M. ZAIDI, M. MAOUCHE, “Développement d'une interface pour capteur CND à courants de Foucault.”, Mémoire de Master, Spécialité entraînements électriques, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [4] F. MESSAD, S. AMROUNI, “Application d'une technique de diagnostic non destructive basée sur les Courants de Foucault.”, Mémoire de Master, Spécialité Machines électriques, université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2023.
- [5] H. MEHADDENE, “ Etude Du Contrôle Et De L'évaluation Non-Destructifs Dans Les Milieux Magnétiques.”, Thèse De Doctorat 3eme Cycle LMD, Spécialité Modélisation Et Conception Des Systèmes Electromagnétiques, Université De Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2019.
- [6] A. KHELFAOUI, A. BELADJAL, “Utilisation des ultrasons pour détecter les défauts internes des produits.”, Mémoire de Master, Spécialité Maintenance industrielle, université de Ouargla, 2023.
- [7] A. LAKHDARI, “Etude et Modélisation de capteur en CND par courant de Foucault: Application a la détection des fissures.”, Mémoire de Magister, Spécialité Electricité industrielle, Université Mohamed Khider – Biskra, 2011.
- [8] N. ZEMOURI, “Etude et Réalisation d'un Système Multi capteurs destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs.”, Mémoire de Magister, Spécialité Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,2016.
- [9] COFREND, “cofrend - Les essais non destructifs.” [Online]. Available: https://www.cofrend.com/jcms/mdc_110743/fr/les-essais-non-destructif.cid=mhe_5012. [Accessed: 07- Mar- 2019].
- [10] A. LELEUX, “ Contrôle non destructif de composites par ondes ultrasonores guidées, générées et détectées par multiélément.”, Thèse de Doctorat Spécialité : mécanique et ingénierie, L'école de Doctorale “ Des sciences physiques et de l'ingénieur ”, Université Bordeaux 1, 2012.
- [11] Y. CHOUA, “ Application de la méthode des éléments finis pour la Modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault.”, Thèse de Doctorat, Spécialité : physique, L'école de Doctorale “Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes”, Université Paris Sud -Paris II, 2009.

- [12] M. CHERFAOUI, “ Essais non destructif ”, Tech. L’ingénieur, no. Ref : TIP675WEB-“Contrôle non destructif” ,2006.
- [13] C. RAVAT, “ Conception de multi capteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif .” , Thèse de Doctorat, Spécialité : physique, École Doctorale “ Sciences et Technologies de l’Information des Télécommunications et des Systèmes” L’UNIVERSITÉ PARIS-SUD 11, 2008. Français.
- [14] C. IBARRA-CASTANEDO, J R. TARPANI, X P V. MALDAGUE, “Nondestructive testing with thermography” Eur. J. Phys. Vol. 34, no. 6, 2013.
- [15] J. DUMONT-FILLON, “Contrôle non destructif (CND).” , technique de l’ingénieur R1400, pp. (1-42) ,1996.
- [16] M. KHEBBAB, “Contribution a l’étude du CND par Courants de Foucault de matériaux hétérogènes faiblement conducteurs à base d’éléments finis.” , Thèse de Doctorat, Spécialité: Électrotechnique, UNIVERSITÉ DE CONSTANTINE 1, 2016.
- [17] A. BERKACHE, “Modélisation de structure CND par la méthode des éléments finis stochastique.” , Mémoire de Master, Spécialité génie électrique, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2015.
- [18] A. MAKHLOUF, A. ZOBIRI, “ Etude et réalisation d’un dispositif de détection de défauts par courants de Foucault.” , Mémoire de Master, Spécialité Maintenance industrielle, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2021.
- [19] L. OUKHELLOU, “ Paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif. Application à la reconnaissance des défauts de rails par courants de Foucault. ” , Thèse de Doctorat, Spécialité Traitement du signal et de l’image, l’Université Paris sud XI Orsay, 1997. Français.
- [20] H. ZAIDI, “ Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples.” , Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, 2012.
- [21] CH. ZORNI, “ Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l’expérience au modèle d’interaction.” , Thèse de Doctorat, Spécialité Physique, École Doctorale “ Sciences et Technologies de l’Information des Télécommunications et des Systèmes” , Université Paris-Sud11, 2012.
- [22] L. BAKAI, A. LAYACHI, “ contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Muni d’un Alésage).” , Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf- M’sila, 2018.
- [23] P.D. SADIKU, N.MATTHEW, “ Numerical techniques in electromagnetic.” , press CRC, New York, 2001.

Référence bibliographique :

- [24] P. BECKSTEIN, V. GALINDO, V. VUKAEVIA, “Efficient solution of 3d electromagnetic eddy-current problems within the finite volume framework of open foam.”, *Journal of Computational Physics*, vol: 344, pp 623 – 646, 2017.
- [25] M. MEZIANI, “ contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance.”, Mémoire de magister, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 18/12/2011.
- [26] J. C.ALDWIN, J. S. KNOPP, “Crack characterization method with invariance to noise features for eddy current inspection of fast erner sites.”, *Journal of Non-destructive Evaluation*, vol: 25, no: 4, pp 165–181, 2006.
- [27] G. KLEIN, J. MORELLI, T.W. KRAUSE, “Analytical model of the eddy current response of a drive-receive coil system inside two concentric.”, *Tubesndt and E International*, vol : 96, pp : 18 – 25, 2018.
- [28] P.LORRAIN, D. R. CORSON, F.LORRAIN, “Electromagnetic fields and waves.”, Freeman, 1988.
- [29] T.O. KIM, G.S. LEE, H. Y. KIM, J.H. AHN, “Modeling of eddy current sensor using geometric and electromagnetic data.”, *Journal of mechanical science and technology*, vol : 21 (3), pp : 465–475, 2007.
- [30] E. DURAND, “Magnétostatique.”, Université de Paris -VI, 1969.
- [31] Z. SONG, T. YAMADA, H. SHITARA, and Y. TAKEMURA, “Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing.”, vol. 2011, no. December, pp. 546–550, 2011.

Résumé :

L'objectif de notre travail est de retranscrire le comportement électromagnétique d'un capteur absolu à courant de Foucault en utilisant un modèle numérique développé sous l'environnement MATLAB-FEMM. Afin d'évaluer la sensibilité du capteur à détecter des défauts sur la surface de la pièce à inspecter, nous avons pris en considération différents paramètres, à savoir: la nature des matériaux, la fréquence d'alimentation, le lift-off, le gap, la profondeur du défaut, le nombre de spire ainsi le courant d'excitation du capteur. Nous avons observé que la variation du modèle de l'induction magnétique entre la pièce à examiner et le capteur inductif fournissent des informations sur les caractéristiques et l'état de santé de la pièce, influencés par la profondeur de pénétration des courant de Foucault. En outre, nos résultats d'investigations valident l'efficacité de la méthode des éléments finis, confirmant ainsi qu'elle constitue une approche fiable pour le contrôle des pièces magnétique.

Mots Clé :

Contrôle Non destructif, Matériaux magnétiques, Courants de Foucault, Capteur absolu à courant de Foucault, Méthode des éléments finis, Champ magnétique.

Abstract:

The objective of our work is to transcribe the electromagnetic behavior of an absolute eddy current sensor using a digital model developed in the MATLAB-FEMM environment. In order to evaluate the sensitivity of the sensor to detect defects on the surface of the part to be inspected, we took into consideration different parameters, namely: the nature of the materials, the power frequency, the lift-off, the gap, the depth of the fault, the number of turns and the excitation current of the sensor. We observed that the variation of the magnetic induction model between the part to be examined and the inductive sensor provides information on the characteristics and state of health of the part, influenced by the depth of penetration of the eddy current. Furthermore, our investigation results validate the effectiveness of the finite element method, thus confirming that it constitutes a reliable approach for the control of magnetic parts.

Keywords:

Non-destructive testing, Magnetic materials, Eddy currents, Absolute eddy current sensor, Finite element method, Magnetic field.