

**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 de Génie Biomédical**



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

**Présenté par :**

- TOUABI SIHEM
- YENNEK LINA

**Inspection des défauts internes et externes à l'aide d'un capteur différentiel à courants de Foucault**

Soutenu publiquement, le 18 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

Dr. BOUSSOUM Ouiza	MCB	UMMTO	<b>Présidente</b>
Dr. BOURKACHE Noureddine	MCB	UMMTO	<b>Examineur</b>
Dr. MEZIANI Madjid	MCB	UMMTO	<b>Promoteur</b>

**Année Universitaire : 2024-2025**

# Remerciements

*Avant tout, nous tenons à remercier Dieu Tout puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage nécessaire pour mener à bien ce travail.*

*Nous désirons également remercier notre promoteur Mr MEZIANI.M, maitre de conférences classe B à l'université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou (UMMTO), pour sa disponibilité, ses conseils précieux, sa rigueur scientifique et son accompagnement tout au long de ce mémoire. Son soutien nous a été d'une grande aide à chaque étape de ce travail.*

*Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour leurs remarques constructives.*

*Nous n'oublions pas nos familles, en particulier nos parents, pour leur amour, leur soutien moral constant et leur encouragement qui nous ont toujours poussés à donner le meilleur de nous-mêmes.*

*Enfin, un grand merci à nos amis et camarades de promotion pour leur bonne humeur et les moments partagés tout au long de ce parcours.*

# *DEDICACES*

*Je dédie ce travail, avant tout, à mes chers parents, pour leur amour infini, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.*

*A mes sœurs et mon frère, pour leur présence et leurs encouragements.*

*A mes grands-parents, pour leur sagesse et leurs prières.*

*Et à mes amies Lyna, Nawal, Sihem, Célia, pour leur amitié précieuse et leur soutien dans les bons comme dans les moments difficiles.*

*Une pensée toute particulièrement à mes petits loulous, Aksel et Ayden, mes neveux adorés, dont la venue remplit ma vie de joie et de tendresse.*

*Merci vous tous.*

*Lina*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents pour votre confiance m'a donné la force d'avancer, vos valeurs m'ont guidé, et votre tendresse m'a toujours réconforté.*

*A mon cher frère Azim.*

*A mes chères sœurs Lydia et Mélissa.*

*A mes chers amis Pour leur soutien moral, leurs conseils et leur présence.*

*A tout ceux qui me sont cher(es) et qui m'aiment.*

*Sihem*

# Table des matières

Introduction générale

## **Chapitre I : Généralité et définitions**

I.1. Introduction .....	01
I.2. Généralités sur le Contrôle Non Destructif .....	01
I.2.1. Principe.....	01
I.2.2. Les différents défauts détectés en CND .....	02
I.2.2.1. Les défauts de surface.....	02
I.2.2.2. Les défauts internes .....	02
I.2.3. Procédure de CND .....	03
I.2.4. Les stades de contrôle .....	03
I.3. Généralité sur les pipelines .....	04
I.3.1. Type de pipeline .....	05
I.3.2. Importance de L'inspection des pipelines .....	05
I.4. Techniques du contrôle non destructif .....	05
I.4.1. Examen visuel.....	06
I.4.2. Ressuage.....	06
I.4.3. Magnétoscopie .....	07
I.4.4. Radiographie .....	08
I.4.5. La thermographie .....	09
I.4.6. Ultrasons.....	09
I.4.7. Courant de Foucault .....	10
I.4.7.1. Type de courant de Foucault .....	11
I.5. Critères pour sélectionner un capteur.....	12
I.6. Différents types des capteurs inductifs .....	12
I.6.1. Capteur de types absolu .....	12
I.6.2. Capteur double .....	12
I.6.3. Capteur multiple .....	13
I.6.4. Capteur différentiel .....	13
I.7. Principe des capteurs inductifs.....	14
I.8. Disposition des capteurs .....	14

# Table des matières

I.8.1. Première disposition : capteur encerclant.....	15
I.8.2. Deuxième disposition : capteurs internes.....	15
I.8.3. Troisième disposition : capteurs ponctuels .....	15
I.9. Avantage du CND par courant de Foucault .....	16
I.10. Conclusion .....	16

## **Chapitre II : Modélisation par la méthode de circuit couplé**

II.1.Introduction .....	17
II.2. Importance de la modélisation .....	17
II.3. Equation de base de l'électromagnétisme .....	17
II.3.1. Equations de Maxwells .....	17
II.3.2. Lois de comportement des matériaux .....	18
II.3.3. La loi d'Ohm .....	18
II.3.4. Relation de passage.....	18
II.3.5. Conditions de Jauge .....	19
II.4. Hypothèses simplificatrice .....	20
II.5. Modèles électromagnétique.....	20
II.5.1. Modèle magnétostatique .....	20
II.5.2. Modèle magnétodynamique .....	20
II.6. choix de la variable d'états .....	21
II.7. Formulation en termes de potentiel vecteur .....	21
II.8. Méthode de résolutions .....	22
II.8.1. Méthodes analytiques .....	22
II.8.2. Méthodes numériques .....	23
II.8.3. Méthodes semi analytique.....	23
II.8.3.1. Principe de la méthode des circuits couplés .....	23
II.8.3.2. Formulation intégrale des équations .....	24
II.8.3.3. Equation intégrale du capteur en présence d'une structure à contrôler.....	25
II.8.3.4. Discrétisation de l'équation du capteur en présence de la pièce .....	25
II.8.3.5. Système d'équations représentant la structure à contrôler .....	26

# Table des matières

II.8.3.6. Impédance du capteur en présence d'une pièce métallique.....	27
II.9. Conclusion .....	29

## **Chapitre III : Application et validation**

III.1. Introduction .....	30
III.2. Propriétés physique et paramètre géométriques .....	31
III.3. Discrétisation du domaine d'étude .....	31
III.4. Résultats et discussions .....	32
III.5. Comparaison entre un défaut interne et externe .....	32
III.6. Influence de la fréquence sur la sensibilité du capteur .....	34
III.6.1. Défaut interne .....	34
III.6.2. Défaut externe .....	36
III.7. Influence de la conductivité sur la sensibilité du capteur .....	37
III.7.1. Défaut interne .....	37
III.7.2. Défaut externe .....	39
III.8. La différence entre un défaut interne et externe .....	41
III.9. Conclusion .....	42

Conclusion générale .....

## **Bibliographie**

## Liste des abréviations :

CND Contrôle Non Destructif

IR Infrarouge

CF Courant de Foucault

CEP Courant de Foucault pulsés

EDP Equation aux Dérivées partielles

MDF Méthodes des différences finis

MVF Méthode des Volumes Finis

FEM Méthode Des éléments Finis

D : Induction électrique

$\rho$  : Densité de charge volumique [ $C/m^3$ ]

E : Champ électrique [ $V/m$ ]

B Champ magnétique [ $A/m$ ]

$J_C$  : Densité de courant de conduction [ $A/m^2$ ]

t : Le temps [s]

B : Induction magnétique [T]

$\mathcal{E}$  : Perméabilité électrique absolue [ $F/m$ ]

$\mu$  : Perméabilité magnétique absolue [ $H/m$ ]

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique à vide

$\sigma$  : Conductivité électrique

$\vec{B}_r$  : Induction magnétique [Tesla]

$\vec{J}_s$  : Densité de courant source [ $A/m^2$ ]

A : Potentiel magnétique

V : potentiel électrique scalaire

$G_{SS}$  : Gain statique

$\omega$  : Pulsation angulaire

$\varepsilon$  : Permittivité électrique

$r, z$  : Cordonnée cylindrique

$j$  : Imaginaire complexe

$\Omega$  : Domaine d'étude

$X$  : Réactance électrique

$Z$  : Impédance

$\Delta Z$  : Variation de l'impédance

# *Introduction générale*

# Introduction générale

---

## Introduction générale :

Dans un contexte industriel où les exigences en matière de qualité et de sécurité ne cessent de s'intensifier, il devient essentiel d'optimiser la conception des pièces tout en assurant leur fiabilité et leur durabilité. La compréhension précise de l'état des équipements en service permet de garantir leur bon fonctionnement, de planifier efficacement les opérations de maintenance, de limiter les arrêts de production et de prévenir les défaillances majeures. A ce titre, le contrôle non destructif (CND) s'impose comme un outil pour assurer la qualité, la sécurité et la longévité des systèmes industriels.

Les techniques de contrôle non destructif (CND) sont essentielles pour garantir la qualité et la sécurité des produits industriels. Elles permettent soit d'évaluer des caractéristiques physiques du produit (comme l'épaisseur ou la conductivité), soit de détecter des défauts potentiellement dangereux. On parle d'évaluation non destructive (END) lorsqu'il s'agit de mesurer des propriétés, et de contrôle non destructif (CND) lorsqu'on recherche des défauts pouvant compromettre l'intégrité du produit. [1]

La simulation joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la fiabilité des contrôles, car elle permet une maîtrise précise des paramètres mis en œuvre lors des inspections. Toutefois, l'enjeu ne se limite pas à renforcer la capacité des méthodes de contrôle à détecter les défauts il s'agit également de pouvoir les caractériser de manière précise. Cela permet aux spécialistes d'évaluer leur niveau de criticité et de prendre les décisions appropriées en matière de maintenance ou de rejet des pièces. [2]

Le contrôle non destructif par courants de Foucault repose sur la modélisation du phénomène à partir des équations de Maxwell. Dans ce travail, l'approche retenue privilégie une méthode de résolution semi-analytique, jugée plus adaptée que les méthodes entièrement numériques telles que les éléments finis ou les différences finies. [2]

Plus précisément, il s'agit de développer et de résoudre un modèle asymétrique appliqué à un système de capteurs en interaction avec une pièce conductrice. Pour cela, la méthode des circuits électriques couplés est utilisée. Cette approche consiste à discrétiser uniquement les milieux conducteurs en sous-domaines élémentaires, ce qui permet de simplifier le calcul tout en conservant une bonne précision de modélisation.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

# Introduction générale

---

Le premier chapitre explique ce qu'est le contrôle non destructif (CND), son utilisation, les types de défauts qu'il permet de détecter, et ainsi que les principes physiques sur lesquels il repose. Il présente aussi les principales techniques de CND utilisées dans l'industrie. Et nous avons présenté les notions de base liées aux pipelines.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation électromagnétique appliquée aux problèmes de contrôle non destructif. Il commence par un rappel des équations de Maxwell, base fondamentale de l'électromagnétisme, puis présente les formulations magnétostatique et magnétodynamique issues de ces équations. Les différentes approches de résolution, qu'elles soient analytique ou numérique, y sont également abordées. Une attention particulière est portée à la méthode des circuits couplés, utilisée pour modéliser les interactions entre capteurs et matériaux conducteurs. Enfin, le chapitre décrit le processus de discrétisation des enroulements, étape essentielle pour la mise en œuvre pratique de cette méthode.

Le dernier chapitre est dédié à l'application et à la validation, représentant les différentes simulations du système capteur différentiel à courant de Foucault-charge (pipeline). Un intérêt particulier est assigné à l'application de la méthode des circuits couplés, suivie d'une analyse détaillée des résultats obtenus.

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

# **Chapitre I**

*Généralités et définitions*

## I.1. Introduction

Comme son nom l'indique, le contrôle non destructif (CND) vise à évaluer l'état des composants industriels sans compromettre leur utilisation future par les inspections correspondantes. Cela concerne l'identification et la description des divers défauts et anomalies qui compromettent la sécurité opérationnelle des systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques. Avec la qualité qui est devenue une exigence essentielle, pour les entreprises face à la concurrence mondiale et aux clients de plus en plus exigeants, cette phase du processus industriel vise assurer la sécurité d'utilisation des pièces vérifiées. Elle a une importance économique indéniable, dans la mesure où elle favorise une gestion efficace de la maintenance. [2]

L'inspection non destructive (CND) est une technique essentielle qui peut être réalisée pendant le processus de fabrication ou durant la phase d'exploitation d'un élément. Pour qu'elle soit optimale sous différents aspects, plusieurs critères doivent idéalement être respectés. Ces critères font partie des exigences suivantes :

- ✓ La vitesse d'exécution : le contrôle doit être effectué rapidement afin de ne pas pénaliser en termes d'immobilisation physique de chaque élément, ni en termes de coûts liés à la main d'œuvre ou aux dépenses supplémentaires.
- ✓ Le coût : sur les pièces complexes, le contrôle qualité représente un coût significatif qui doit être réduit autant que possible.
- ✓ La fiabilité : Le dispositif de contrôle doit adhérer à ces spécifications et par exemple, repérer toutes les anomalies qu'il est censé être capable de détecter.
- ✓ La sensibilité : la sensibilité représente le rapport entre la variation du signal mesuré et la variation de la grandeur physique à détecter. Plus cette sensibilité est élevée, plus le capteur est capable de détecter de faibles variations, telles que la présence de défauts de très petites dimensions.
- ✓ La résolution : La résolution correspond à la plus petite variation du signal que le système peut détecter, ce qui détermine, par exemple, la taille minimale du défaut détectable. On parle alors de pouvoir de résolution : plus ce dernier est élevé, plus le capteur peut identifier des défauts de très faible dimension. [3]

## I.2. Généralités sur le Contrôle Non Destructif :

### I.2.1. Principe :

Toutes les méthodes et processus de CND capables de fournir des renseignements sur l'état d'une pièce ou d'une structure sans engendrer de modifications nuisibles à leur utilisation future. Bien que le concept de santé mette en évidence un lien avec les activités d'examen contribuant au diagnostic médical, telles que la radiologie ou l'échographie, il définit clairement leur but qui est de révéler toutes les anomalies susceptible de compromettre la disponibilité, la sûreté d'utilisation et/ou, de manière plus générale, la conformité d'un produit à son usage prévu.

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

- 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. [4]

### I.2.2. Les différents défauts détectés en CND :

Un défaut identifié dans une pièce, c'est physiquement, mettre en lumière une variation de matière, un changement local de propriété physique ou chimique nuisible à son utilisation appropriée. Cela dit, on a tendance à ranger les défauts en deux grandes catégories basées sur leur localisation : les défauts internes et les défauts de surface (externe). Les divers défauts identifiés lors du contrôle non destructif. [4]

#### I.2.2.1. Les défauts de surface :

Ces défauts peuvent être directement observés par l'observateur, mais ils ne sont pas toujours perceptibles à l'œil nu. Par conséquent, on peut les catégoriser en deux types différents : [3]

- Les défauts ponctuels : ils sont les problèmes les plus nuisibles d'un point de vue technologique. Ils incluent des anomalies telles que les criques, piqures, fissures et craquelures, qui peuvent éventuellement entraîner la défaillance du composant en déclenchant, par exemple, des fissures de fatigue.

- Les défauts aspects : il s'agit d'une variation des caractéristiques géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) qui est perceptible et rend le produit non fonctionnel.

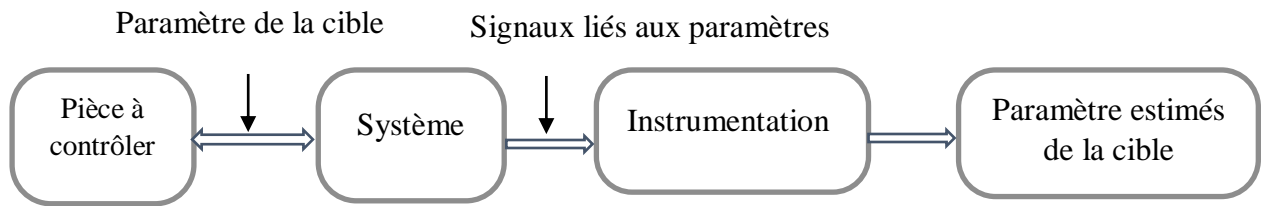
### **I.2.2.2 Les défauts internes :**

Ces hétérogénéités présentent des variations de types, de formes et d'échelles très diverses, situées à l'intérieur du volume du corps à examiner. Ils ont une classification très détaillée et propre à chaque secteur d'activité technologique et industrielle. Dans le secteur des métaux, il sera question de défauts internes, de porosités, de soufflures et d'inclusions variées qui pourraient compromettre la qualité des pièces moulées, forgées, laminées et soudées. Dans certains cas, il pourrait simplement s'agir de la présence d'un objet étranger à l'intérieur d'une enceinte ou d'un produit emballé. Dans ce contexte, l'examen visuel est généralement omis, et on recourt donc à l'une ou l'autre des méthodes principales de CND telles que la radiographie, le balayage ultrasonore, ou encore des techniques plus appropriées pour certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge et la neutronographie. [4]

### **I.2.3. Procédure de CND :**

La vérification non destructive d'un objet ne se limite généralement pas à l'identification de possibles anomalies. Effectivement, bien que la sélection du processus, de la technique et de l'équipement ait été faite au préalable, il est nécessaire d'envisager toute une démarche ayant pour buts : la fiabilité de l'inspection, la reproductibilité, la localisation des anomalies, leur identification et caractérisation notamment par leur dimension, le classement et présentation visuelle, la prise de décision sur l'attribution de l'objet et enfin l'archivage des résultats ainsi que des conditions d'examen.

C'est opérations d'étalonnage, de calibrage, de balayage du capteur et de traitement des données nous permettent désormais d'atteindre ces objectifs dans des conditions optimales. Grace à l'utilisation intensive de l'informatique en temps réel, nous sommes en mesure de représenter la mise en œuvre d'un système CND selon le synoptique illustré dans la figure (I.1).



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

L'objectif est défini par une série de paramètres que nous tenterons d'évaluer pour établir un diagnostic d'intégrité. L'instauration d'un système CND approprié va générer un ensemble de signaux dépendant des paramètres recherchés. Il est fréquemment nécessaire de procéder à une étape « d'inversion », qui peut être plus ou moins complexe, pour récupérer les paramètres originaux de la pièce. [3, 4, 5]

#### **I.2.4. Les stades de contrôle :**

Le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents :

**I.2.4.1. contrôle en cours de fabrication :** ce contrôle se fait pendant la production, grâce à des appareils installés directement sur la ligne de fabrication. Ces appareils sont solides, rapides, fiable et peu coûteux à utiliser. Ils permettent de détecter automatiquement les défauts bien connus et d'éliminer les produits défectueux sans intervention humaine.

**I.2.4.2. Contrôle de réception :** Ce contrôle se fait à la fin, au moment de la livraison d'un lot de pièces, d'un équipement ou d'un ouvrage. Il sert à vérifier que tout est bien conforme aux exigences de qualité fixées à l'avance. Même si le cout et la rapidité restent importants, c'est surtout la façon de faire le contrôle qui compte : choix de la méthode, réglages, étalonnage des appareils, présentation et conservation des résultats. A ce moment-là, on ne cherche pas seulement à repérer les défauts, mais aussi à comprendre leur type et leur taille.

**I.2.4.3. contrôle en service :** Ce contrôle est réalisé sur des pièces ou des structures pendant leur utilisation, souvent lors de travaux de maintenance ou après avoir remarqué un comportement anormal. Il doit être très faible, car ne pas détecter un défaut peut avoir de graves conséquences. Ce contrôle doit permettre d'identifier précisément la nature et la taille des défauts afin d'évaluer leur dangerosité. Il doit aussi être reproductible, c'est-à-dire donner les mêmes résultats à chaque fois, pour pouvoir suivre l'évolution des dommages dans le temps. [6]

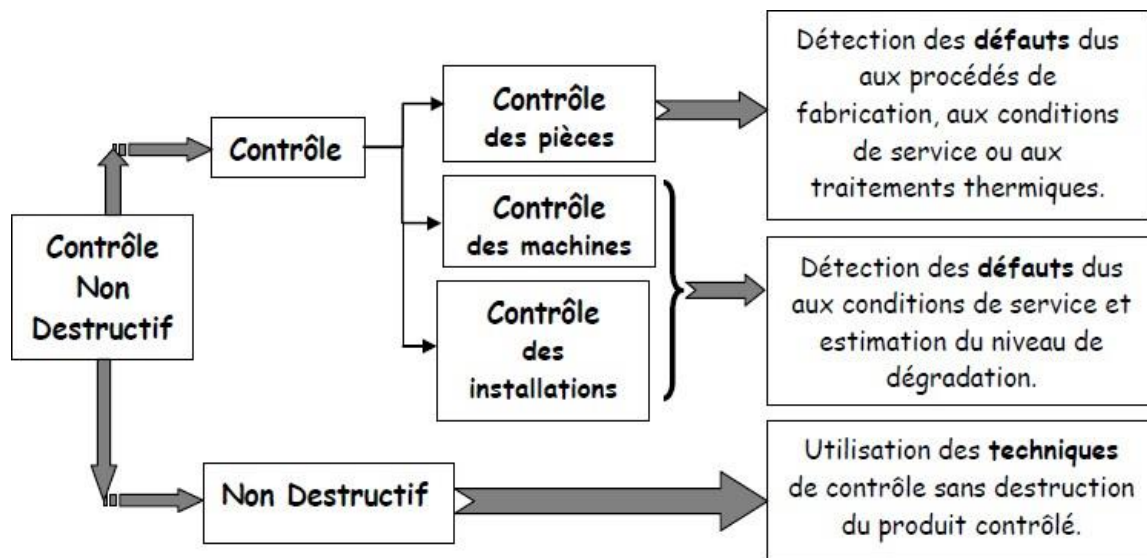


Figure I.2 : Champ d'application de CND [6]

### I.3. Généralité sur les pipelines :

Un pipeline, terme emprunté de l'anglais, désigne un conduit destiné à transporter des substances gazeuses, liquides, solides ou polyphasiques d'un lieu à un autre. Le diamètre standard d'un tuyau peut varier de près de trente millimètres (un pouce un quart) pour des liquides particuliers, à plus de trois mètres vingt (soixante-huit pouces) pour les conduites d'eau. [7]



Figure I.3 : Pipeline dans l'environnement [7]

On ne peut pas spécialiser les pipelines de longue distance, ils sont donc utilisés pour le transport de différents types de brut lorsqu'il s'agit de pétrole, et pour la distribution de

produits raffinés (comme l'essence, le diesel, le kérosène, etc.). Il est donc nécessaire de pomper successivement plusieurs produits différents à partir du même pipeline dans un ordre précis, plutôt que de dédier des sections importantes de canalisations à chaque produit spécifique. Cela rend le réseau de pipelines excessivement encombrant, entraînant des coûts supplémentaires en exploitation et maintenance. De plus, les installations annexes nécessaires doivent être mises en place pour chaque tracé de canalisation et type de produit. [8]

### I.3.1. Type de pipeline :

Le type et le nom d'une canalisation varient selon, les propriétés physiques du fluide transporté et les conditions d'acheminement. Ainsi :

- Le gaz naturel est transporté par un gazoduc.
- Le pétrole circule dans un oléoduc.
- L'eau industrielle est véhiculée par une conduite ou un émissaire, tandis que le terme aqueduc désigne plutôt les ouvrages maçonnés assurant un écoulement libre de l'eau.
- L'eau salée est transportée par un saumoduc.
- L'oxygène est acheminé via un oxygénoduc.
- L'hydrogène est conduit à travers un hydrogénoduc. [7]

### I.3.2. Importance de l'inspection des pipelines :

Il est crucial d'effectuer régulièrement des contrôles sur les pipelines pour assurer la sûreté, la constance et la pérennité des systèmes de transport de gaz, surtout quand ceux-ci ont excédé leur longévité initiale prévue. Et voici ces importances :

- Contrôle de la qualité des matériaux et des soudures : L'inspection rigoureuse des tuyaux en acier par radiographie après soudage met en évidence la nécessité de vérifier minutieusement que les soudures sont solides et sans anomalies (fissures, porosités, décalages incorrectes). Sans cette vérification, des failles structurelles pourraient provoquer des fuites ou des ruptures.
- Contrôle de la protection anticorrosion : L'usage d'un revêtement protecteur post-production a pour but d'éviter la corrosion externe une fois le pipeline enterré. Un contrôle permet de s'assurer que cette protection est correctement installée et non endommagée, ce qui prolonge la longévité du pipeline.

- Tests de résistance à la pression : Chaque tuyau subit un test de pression avant d'être opérationnel. Ceci garantit qu'il tient face aux véritables conditions d'utilisation (pression du fluide, chaleur, etc.) sans se dégrader. Ce test est indispensable pour assurer la sûreté du pipeline dès sa mise en place.
- Adhésion aux normes et optimisation économique : les pipelines doivent se conformer à des critères rigoureux concernant le diamètre, l'épaisseur, le genre d'acier ainsi que la température et la pression. L'inspection veille à ce que chaque segment respecte ces normes, en évitant des pannes onéreuses et en optimisant la relation entre l'efficacité et le coût d'exploitation. [9]

### **I.4. Techniques du contrôle non destructif :**

La méthode d'inspection non destructive (CND) est employée pour juger l'intégrité des matériaux, pièces ou structure sans causer de dommages. La CND englobe une variété de méthodes, chacune ayant ses propres atouts et faiblesses.

On peut classer les méthodes de contrôle les plus fréquemment utilisées selon le type de défaut recherché dans la pièce [10] :

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

#### **I.4.1. Examen visuel :**

L'inspection visuelle est une technique d'analyse non destructive qui utilise la lumière visible (400 à 700) pour identifier les anomalies de surface. Cela peut être direct (à l'aide de la vue ou d'outils comme des loupes ou des endoscopes) (figure I.4 a), ou indirect (grâce à des caméras ou des images capturées) (figure I.4 b). Cette méthode offre la possibilité d'identifier une multitude d'imperfections comme des fissures, des rayures ou des corrosions. Elle est capable de s'ajuster à des géométries complexes et garantit une traçabilité des résultats, même si la précision varie en fonction du type d'inspection (manuelle ou mécanisée). Plusieurs éléments influent sur sa sensibilité telle que l'éclairage, la résolution des instruments et la disposition de l'inspection. Ce dernier autorise l'identification d'un grand nombre de défauts de surface

sur divers matériaux, tant en production qu'en entretien. Malgré sa polyvalence et son faible coût, cette technique relève ses restrictions lorsqu'il s'agit de surfaces lustrées, de formes complexes ou de grandes pièces, et elle reste fortement tributaire de l'intervenant. Sa valeur se trouve dans sa simplicité, sa rapidité, son aptitude à être employée dans des contextes difficiles, et le fait qu'elle a un impact environnemental ou sanitaire minime. [11]



(a) Miroir d'inspection

(b) Système visuel

**Figure I.4.**Exemple de test visuel [10]

### I.4.2. Ressuage :

Cette méthode permet de repérer des irrégularités qui sont directement liées à la surface. Nous employons un colorant sur les éléments à examiner, suivi de l'application d'un agent révélateur. Cet agent élimine la coloration des fissures, rendant par conséquent les indications détectables. La méthode comprend quatre phases (Voir figure I.5) la première phase implique un nettoyage minutieux de la surface à examiner, pour supprimer toute marque de graisse, de poussière ou d'impuretés susceptibles de compromettre la performance du contrôle. Puis la deuxième phase, un liquide connu sous le nom de pénétrant (qui peut être coloré ou fluorescent) est appliqué sur la surface, ce liquide pénètre dans les discontinuités. Après une période de pénétration appropriée, on procède à la troisième phase, qui vise à retirer l'excès de produit pénétrant à la surface tout en préservant celui emprisonné dans les imperfections. Pour finir, la quatrième étape consiste à utiliser un révélateur qui capte le pénétrant présent dans les fissures. Cela permet de rendre visibles les indications à l'œil nu ou sous une lumière UV, en fonction du type de pénétrant employé. [3, 11]

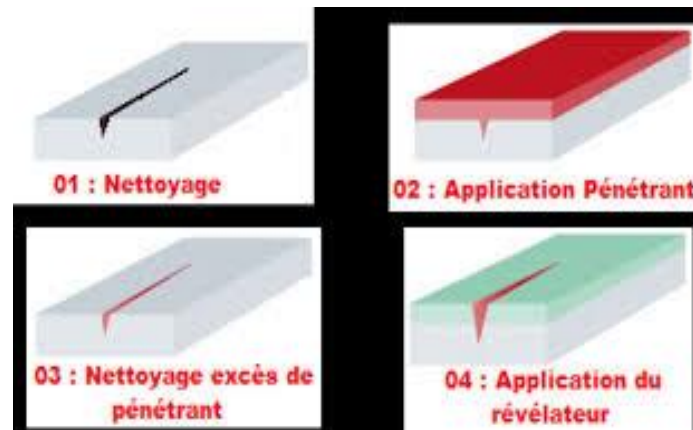


Figure I.5 : Les quatre phases de ressuage. [3]

#### I.4.3. Magnétoscopie (flux de fuite magnétique) :

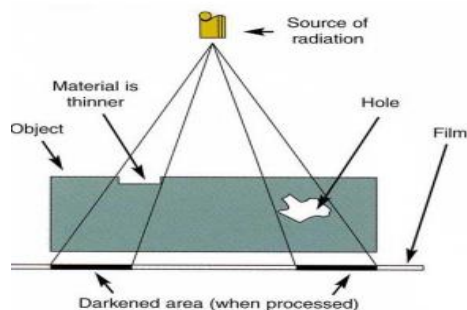
La magnétoscopie est une technique d'examen non destructif employée pour identifier des discontinuités en surface ou légèrement sous la surface (jusqu'à quelques millimètre), réservée uniquement aux matériaux ferromagnétiques. Elle est généralement privilégiée par rapport au ressuage lorsqu'elle est possible, car elle offre une plus grande rapidité et fiabilité, surtout en raison de ses avancées techniques récentes. Le fonctionnement est basé sur l'aimantation de l'élément, ce qui offre la possibilité, lors d'une anomalie, de créer un champ magnétique de fuite. Un indicateur de produit (coloré ou fluorescent) est ensuite appliqué sur la surface ; il se focalise sur le défaut et crée une indication perceptible sous une lumière blanche ou ultraviolette, en fonction de la nature du produit employé. Pour une détection exhaustive, il est nécessaire d'utiliser deux types d'aimantations orthogonales (longitudinale et transversale). Le contrôle peut être effectué par différentes méthodes : simultanée ou résiduelle, avec aimantation par champ magnétique ou courant (direct, alternatif ou redressé), et l'indication peut être révélée à l'aide de poudre sèche ou humide. Les équipements mis en œuvre sont diversifiés, allant des aimants permanents aux électroaimants portatifs, sans oublier les bancs de contrôle. Il se peut qu'une désaimantation soit exigée après inspection selon les normes établies. [11]



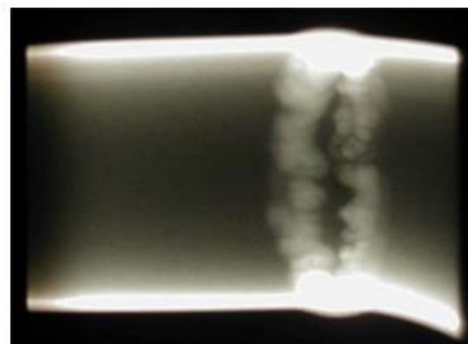
Figure I.6 : Appareil portatif de magnétisation.

#### I.4.4. Radiographie :

La radiographie est une technique d'inspection non invasive visant à produire une image de la densité matérielle d'un objet exposé à un rayonnement électromagnétique X ou gamma ( $\gamma$ ). Ce rayonnement est partiellement absorbé selon la nature et la densité du matériau, révélant les défauts internes sous forme de variations d'intensité sur un film en argent, un écran photo stimuable ou un capteur numérique. Cette approche facilite l'identification des déficits de substance internes, et propose une version plus sophistiquée. Lorsque le rayonnement pénètre dans la pièce, il génère des espaces plus sombres ou davantage de radiations ont été absorbées et des espaces plus lumineux ou moins de radiations ont été absorbées. Si la pièce présente des vides ou des défauts, une plus grande quantité de rayonnement la traverse, ce qui entraîne l'apparition de zones sombres sur l'image radiographique. La radiographie permet d'obtenir une image précise de l'uniformité du matériau d'une pièce et d'identifier les défauts à fort contraste. Toutefois, elle engendre des coûts et présente des risques liés aux rayonnements ionisants, nécessitant ainsi une réglementation rigoureuse, des instructions strictes et des mesures de sécurité adéquates. [10, 11]



(a) Schéma de la radiographie par film défectueuse

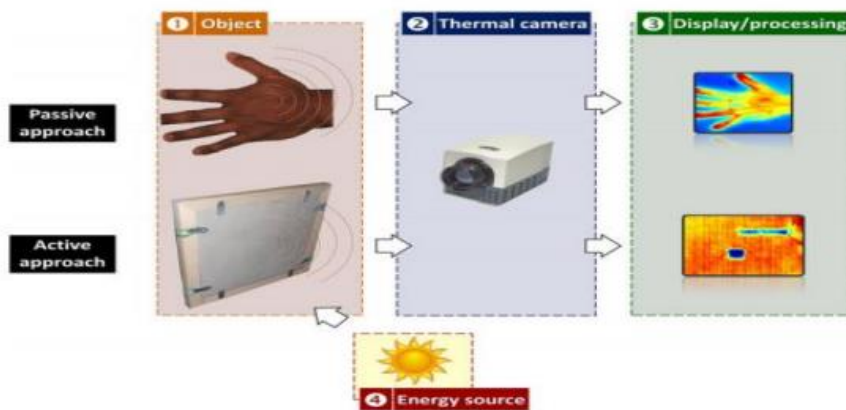


(b) film radiographiques d'une pièce défectueuse

Figure I.7 : principe du contrôle par radiographie. [12]

### I.4.5. Thermographie :

La thermographie infrarouge (IR), également appelée test thermique / infrarouge, sert à évaluer ou à établir une carte des températures de surface en fonction du rayonnement infrarouge émis par un objet lorsqu'il est soumis à un transfert de chaleur, que ce soit vers cet objet, depuis cet objet ou vers celui-ci. La plus grande partie des ondes infrarouges possède une longueur d'onde plus longue que celle de la lumière visible, mais elles peuvent être repérées grâce à des outils de détection thermique, souvent désignés sous le nom de « caméras infrarouge ». Lorsqu'elle est bien utilisée, l'imagerie thermique peut servir à identifier les dégâts causés par la corrosion, les délaminages, les décollements, les vides, les inclusions et un grand nombre d'autres situations nuisibles. [10]



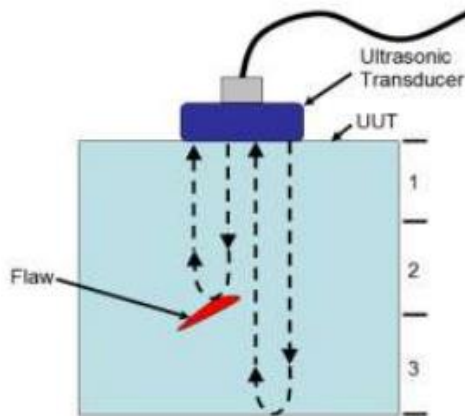
**Figure 1.8 :** Configuration expérimentale pour les approches passives (haut) et actives (bas).

[10]

### I.4.6. Ultrasons :

La méthode de contrôle par ultrasons repose sur la diffusion et la propagation d'une onde ultrasonore dans l'espace à examiner, suivies de la collecte et de l'étude de cette onde après son interaction avec le matériau. Selon ce principe largement général, plusieurs techniques distinctes existent, en fonction de si le contrôle se réalise en transmission ou en réflexion, si les équipements d'émission et de réception sont combinés ou séparés, selon la nature et l'angle des ondes ultrasonores employées. [11]

L'émission d'ultrasons se fait grâce à des « transducteurs » qui reposent essentiellement sur l'effet piézoélectrique (figure I.9.a). Les signaux acoustiques reçus, comme par exemple la réflexion d'un défaut, sont convertis en impulsions électriques. Ces impulsions peuvent ensuite être traitées et affichées à l'écran pour leur interprétation (figure I.9.b). [3]



(a) Schéma de principe



(b) Réponse du défaut à l'examen

**Figure I.9 :** principe du contrôle ultrasons. [3]**I.4.7. Courants de Foucault :**

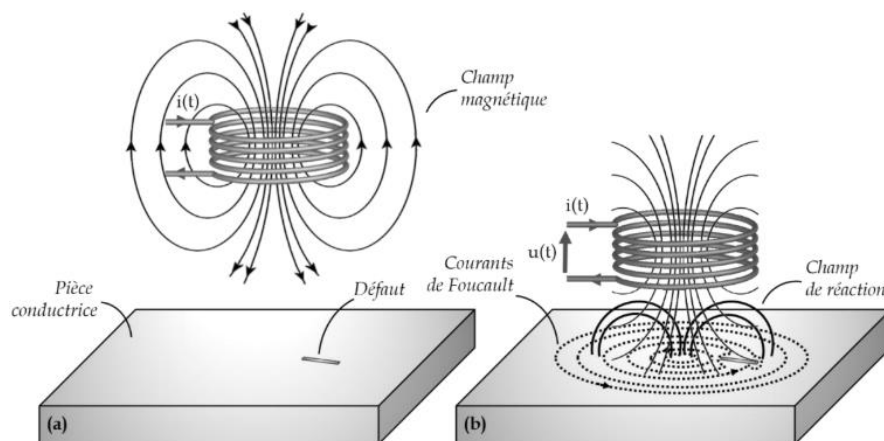
Le phénomène des courants induits dits courants de Foucault est découvert par le physicien français Léon Foucault en 1855. La figure (I.10) représente l'expérience de Foucault basée sur un dispositif constitué d'un disque de cuivre placé entre les deux pôles d'un électro-aimant [Bertrand\_1878]. Le disque en cuivre, sous l'action de la manivelle, peut atteindre une vitesse de 150 à 200 tours par seconde. Quand le disque est lancé à toute vitesse, l'alimentation de l'électro-aimant arrête la rotation du disque en quelques secondes. Afin de restituer au disque le mouvement qu'il a perdu, une certaine force doit être appliquée à la manivelle. La résistance éprouvée lors de l'action de la manivelle s'accumule sous forme de chaleur à l'intérieur du corps tournant. Cette expérience permet de démontrer la présence de courants induits au sein d'un matériau conducteur en mouvement lorsqu'un champ magnétique est appliqué. Effectivement, l'induction de courants dans le disque génère un champ qui, s'opposant au champ magnétique de l'électro-aimant, permet de freiner le mouvement de disque.

**Figure I.10 :** Machine d'induction de Foucault (collection de l'École Polytechnique) [13]

Le phénomène des courants induits dans un conducteur se manifeste lorsqu'un champ magnétique varie dans le temps. Par exemple, lorsqu'une bobine parcourue par un courant variable est placée à proximité d'un matériau conducteur, elle engendre l'apparition de courants de Foucault au sein de ce matériau.

La figure (I.11.a) représente la génération d'un champ magnétique variable qui se produit lorsqu'une bobine est traversée par un courant alternatif. Selon la distance (ou entrefer) qui sépare la bobine du matériau conducteur, on observe une quasi-absence de courants induits dans la pièce conductrice, la bobine étant alors placée dans l'air. Cependant, comme illustré dans la figure (I.11.b), lorsque cet entrefer est réduit, des courants induits apparaissent dans la pièce conductrice. Ces courants de Foucault forment des boucles de courant et génèrent un champ magnétique dit champ de réaction.

Le champ de réaction modifie la force électromotrice de la bobine, fournissant ainsi des informations sur l'état du matériau contrôlé. En l'absence de défauts, ce champ de réaction dépend de propriétés telles que la conductivité électrique ( $\sigma$ ) et la perméabilité magnétique ( $\mu$ ) du matériau. En revanche, lorsqu'une inhomogénéité locale, comme une fissure, est présente dans le matériau, les lignes des courants induits sont altérées, ce qui entraîne une modification du champ de réaction. [13]



**Figure I.11:** (a) Génération d'un champ magnétique par la bobine.

(b) Induction de CF dans l'échantillon et apparition d'un champ de réaction. [13]

#### I.4.7.1. Type de courant de Foucault :

Il existe deux types de courant de Foucault :

- Principes des courants de Foucault traditionnels :

Les courants de Foucault (CF), qui ne requièrent pas de liaison entre l'élément à examiner et le dispositif de mesure, sont en pleine expansion parmi les diverses techniques d'évaluation non destructive des matériaux conducteurs.

Prenons en compte une pièce conductrice placée dans l'induction magnétique générée par un enroulement traversé par un courant sinusoïdal. Le flux généré dans le matériau est aussi une fonction sinusoïdale, produisant des courants connus sous le nom de Courant de Foucault.

L'orientation des courants de Foucault est influencée par les propriétés du matériau (conductivité, perméabilité), la configuration et la taille des composants, l'emplacement de la pièce par rapport au capteur (bobinage) ainsi que les spécificités du courant inducteur (amplitude, fréquence).

➤ Principe de courant de Foucault pulsés :

L'approche de contrôle par courant de Foucault pulsés (CFP), qui est une technique récente d'inspection et de détection de la corrosion sur des matériaux multicouches, est mise en œuvre dans le cadre des Contrôles Non Destructifs (CND).

Et également des évaluations de l'épaisseur et de la conductivité des assemblages de tôles conductrices. Cette technique de vérification par courant de Foucault, qui s'appuie sur le principe de l'induction électromagnétique, requiert un matériel simple et assez abordable financièrement. Les anomalies manifestent alors des variations de courant d'induction. Les courants de Foucault pulsés peuvent s'infiltrer profondément dans le matériau, même si celui-ci est composé de plusieurs couches non fixées mécaniquement. [12]

### **I.5. Critères pour sélectionner un capteur :**

Les critères de sélection d'un capteur sont les suivants : Les conditions d'opération (atmosphère, durée, environnement) ; Contraintes physiques et technologiques d'usage ; Adaptation au programme d'installation, de fiabilité et de maintenance. [2]

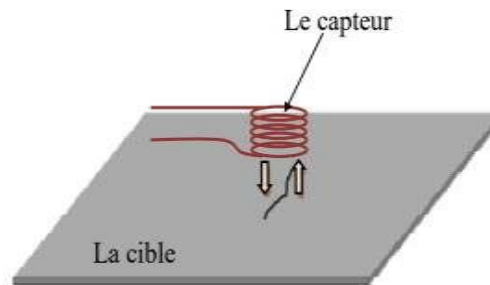
### **I.6. Différents types des capteurs inductifs :**

Il y a plusieurs méthodes pour effectuer le bobinage en vue d'un contrôle par courant de Foucault. Nous présentons ici les configurations fondamentales des capteurs.

#### **I.6.1. Capteur de type absolu :**

C'est un capteur multifonction qui est composé d'une unique bobine émettrice-réceptrice, créant un courant alternatif grâce à la circulation du courant à travers elle. Ses variations

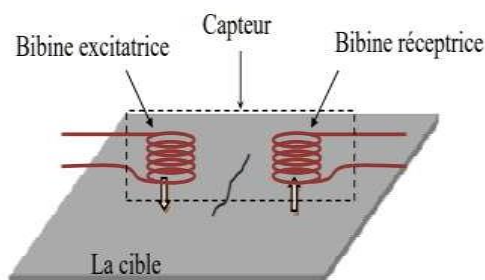
d'impédance peuvent être détectées en mesurant précisément son signal de sortie (figure I.12). [4, 14].



**Figure I.12 :** Capteur absolu [4]

### I.6.2. Capteur double :

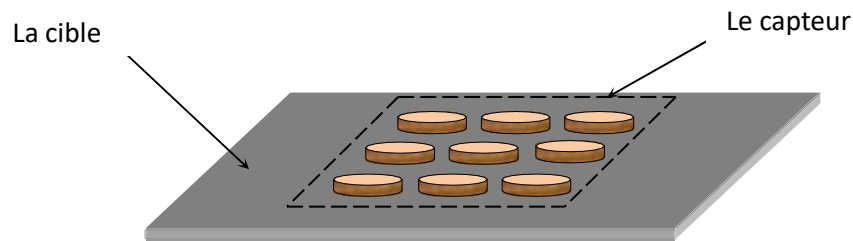
Il s'agit d'un capteur à fonctions distinctes, composé de deux bobines : une bobine excitatrice destinée à générer le flux, et une autre réceptrice conçue pour le recueillir. Ces deux bobines sont intégrées dans un même boîtier afin d'éviter toute altération accidentelle de leur interaction. Ce genre de détecteur est couramment employé pour les vérifications à basse fréquence ( $f < 1\text{KHz}$ ). [4, 14]



**Figure I.13:** Capteur double [4]

### I.6.3. Capteur multiple :

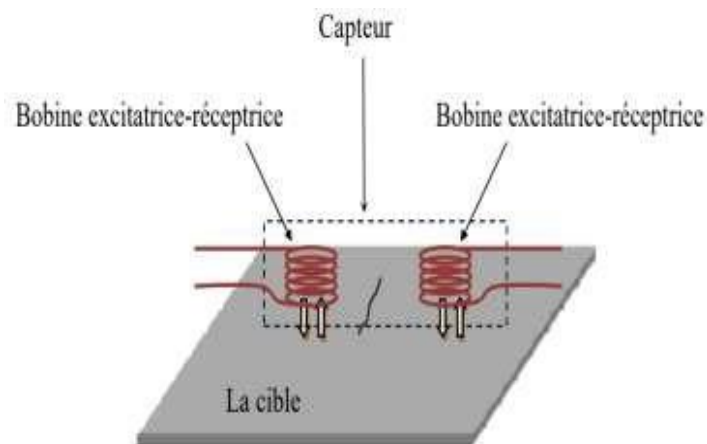
Il est possible de réaliser un capteur multiple (capteur matriciel) en assemblant un groupe de bobines identiques qui opèrent de façon autonome (figure I.14). Il est indispensable de constituer un capteur matriciel pour satisfaire à certains critères. Si un contrôle est effectué selon deux axes, l'utilisation d'un seul capteur peut rendre la procédure d'inspection trop prolongée. Pour résoudre ce problème, il est très pertinent de combiner en ligne plusieurs capteurs élémentaires qui fonctionnent simultanément. En multiplexant les données provenant de chaque source, on peut obtenir plus rapidement les caractéristiques de la cible. L'agencement judicieux de plusieurs capteurs, espacés en fonction des défauts à repérer, permet la collecte de signaux hautement informatifs.



**Figure I.14 :** Capteur matriciel [4]

#### I.6.4. Capteur différentiel :

Un détecteur fonctionnant en mode différentiel est un dispositif conçu pour ne mesurer que les variations locales des caractéristiques d'un produit, en comparant en temps réel deux signaux captés dans des zones adjacentes. Ce type de capteur intègre généralement deux bobines identiques, entre lesquelles on mesure la différence d'impédance. Grâce à cette configuration, le détecteur met en évidence les irrégularités présentes à la surface de la pièce inspectée, tout en s'affranchissant des perturbations globales, telles que les variations de distance entre la sonde et la pièce. Il s'agit donc d'un outil particulièrement adaptés pour une détection précise de défauts locaux.



**Figure I.15 :** Capteur différentiel [4]

#### I.7. Principe des capteurs inductifs :

Un capteur inductif, qui comprend une bobine traversée par un courant changeant au fil du temps, produit des courants induits lorsqu'il est à proximité d'objets métalliques. Ces courants, qui génèrent un flux magnétique s'opposant au flux générateur, modifient donc l'impédance du capteur. C'est l'examen de ce changement d'impédance qui donnera les informations utilisables pour la surveillance. Effectivement, le parcours, la distribution et la force des courants de Foucault sont influencés par les propriétés physiques et géométriques

des objets examinés, ainsi que, naturellement, par les conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage). Il est donc compréhensible qu'un défaut, représentant une discontinuité électrique altérant le flux des courants induits, puisse provoquer une modification de l'impédance détectable à la bobine d'excitation, comme le démontre la figure (I.16). [4, 15]

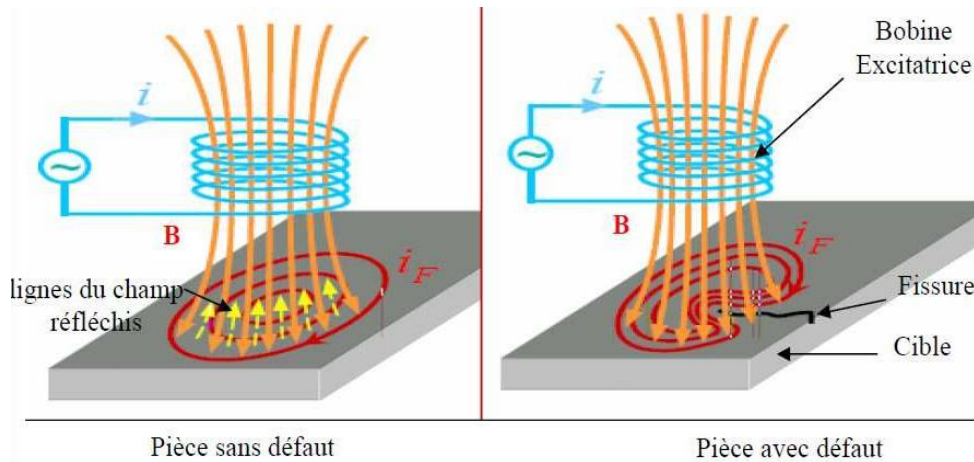


Figure I.16: Principe des capteurs inductifs. [4]

### I.8. Disposition des capteurs :

Dans la pratique, on distingue principalement trois configurations.

#### I.8.1. Première disposition : capteur encerclant

Cette mesure est conçue pour le contrôle en continu des produits longs de forme simple et de diamètre réduit comme les fils, barres et tubes (figure I.17). Les bobines sont fixées et sécurisées dans un espace moulé dont l'alésage doit avoir un diamètre légèrement plus grand que celui du produit, afin d'atteindre un coefficient de remplissage aussi proche que possible de l'unité. Ce critère est essentiel pour garantir une sensibilité de détection élevée sans recourir à un taux d'amplification trop important qui pourrait détériorer la relation signal/bruit.

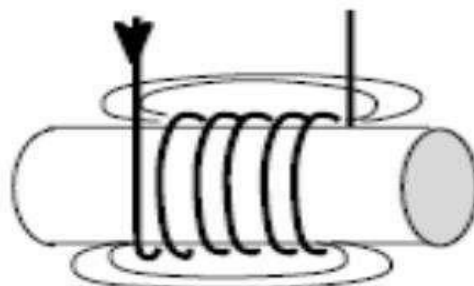


Figure I.17 : Capteur encerclant. [3]

### I.8.2. Deuxième disposition : capteurs internes

Ce dispositif est dédié à l'examen interne des tubes, pour lesquels les bobines sont également moulées de manière concentrique par rapport à l'axe du produit (figure I.18). On utilise principalement ce genre de capteur pour surveiller les nombreux tubes de faible diamètre présents dans les échangeurs thermiques ou les générateurs de vapeur au sein du secteur nucléaire.

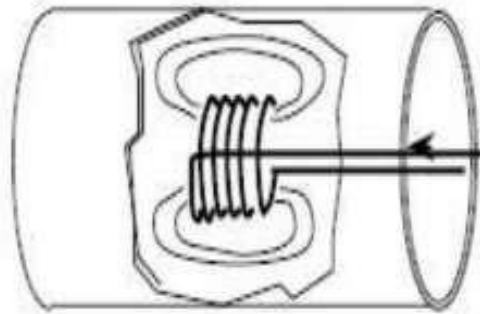


Figure I.18 : Capteur interne [4]

### I.8.3. Troisième disposition : capteurs ponctuels

Cette option est conçue pour des explorations occasionnelles par contrôle manuel ou pour le survol de vastes zones via un contrôle automatique (figure I.19). Les sondes employées, qui possèdent une ou plusieurs bobines moulées, sont habituellement équipées d'un noyau en ferrite hautement perméable aux champs alternatifs faibles. Ce noyau a pour fonction de déplacer les enroulements loin de la surface à examiner, tout en conservant une sensibilité optimale pour la détection. [4]

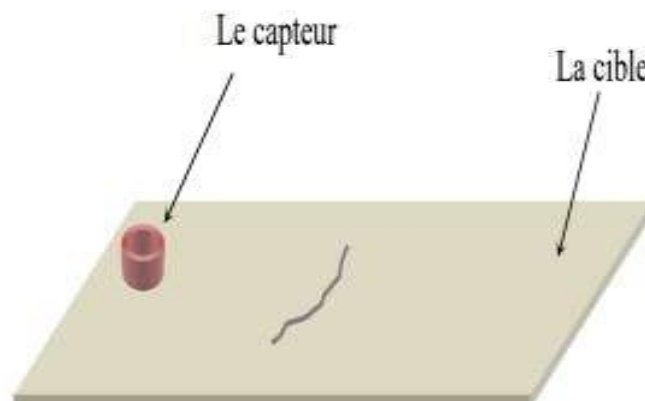


Figure I.19: Capteur ponctuels [4]

## 1.9. Avantages du CND par courant de Foucault :

- Rapidité de balayage et de détection (environ 3 fois plus rapide que la magnétoscopie).
- Peut détecter des défauts même à travers un revêtement en surface.
- La qualité de détection reste bonne, peu importe la vitesse à laquelle on fait le contrôle.
- Les données peuvent être traitées par ordinateur et enregistrées pour une analyse plus tard.
- C'est une méthode propre, sans danger pour l'environnement.
- Le système est facile à transporter : on peut l'utiliser dans des zones difficiles d'accès, car l'équipement est léger et portable (pas besoin de grosse machines). [2]

## I.10. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les généralités sur le contrôle non destructif (CND), en exposant ses principes de base, les différents types de défauts qu'il permet de détecter, ainsi que les principales étapes de la procédure de CND. Nous avons également détaillé les différents stades de contrôle, depuis la fabrication jusqu'au service. Une attention particulière a été portée aux pipelines, en mettant en évidence leurs types et l'importance cruciale de leur inspection régulière pour garantir la sécurité et la fiabilité des installations. Nous avons ensuite exploré les techniques majeures du CND, avec un focus sur la méthode par courants de Foucault, en précisant les types de courants utilisés, ainsi que les critères de choix des capteurs. Les capteurs inductifs, leurs principes de fonctionnement et leur disposition ont aussi été abordés en détail. Enfin, les avantages du contrôle par courants de Foucault ont été discutés, mettant en lumière les points forts et les limites de cette méthode. Le chapitre suivant portera sur les aspects de modélisation électromagnétique ainsi que sur les méthodes semi-analytique utilisées pour la simulation des champs induits par courants de Foucault.

# **Chapitre II**

*Modélisation par la  
méthode de circuit couplé*

## II.1. Introduction :

Ce chapitre présente les bases de la modélisation électromagnétique appliquée au contrôle non destructif. Il expose les équations fondamentales de Maxwell, les lois de comportements des matériaux, la loi d'Ohm et les conditions de passage. Les hypothèses simplificatrices, les modèles magnétostatiques et magnétodynamiques, ainsi que le choix des variables d'état et la formulation en potentiel vecteur sont également abordés. Enfin, différentes méthodes de résolution analytiques, numériques, et semi-analytiques sont introduites, avec une attention particulière à la méthode des circuits couplés et la formulation intégrale.

## II.2. L'importance de la modélisation :

La modélisation joue un rôle essentiel dans le développement logiciel en structurant les besoins avant même l'écriture du code. Elle aide à comprendre et définir clairement les exigences du système tout en facilitant la conception de son architecture. Grâce aux représentations visuelles comme les diagrammes, elle améliore la communication entre les parties prenantes et permet une détection précoce des erreurs, évitant ainsi des corrections coûteuses par la suite. Elle sert également de référence documentaire, simplifiant la compréhension, la maintenance et l'évolution du système. Enfin, elle favorise la réutilisation des éléments existants, renforçant ainsi la robustesse, l'efficacité et la pérennité des applications développées. [16]

## II.3. Equations de base de l'électromagnétisme :

L'étude d'un dispositif électromagnétique est basée essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et des équations de Maxwell. [17]

### II.3.1. Equations de Maxwell:

La compréhension des phénomènes physiques en jeu permet de développer un modèle mathématique capable de prédire la réponse du capteur en fonction des caractéristiques physiques et géométriques de la cible. La modélisation des interactions électromagnétiques repose sur les équations de Maxwell. Ces équations, formulées de manière locale, sont valables dans tout système de coordonnées. L'ensemble des phénomènes nécessitant le calcul du champ électromagnétique est régi par ces quatre équations aux dérivées partielles fondamentales. [18]

$$\text{Loi de Maxwell-ampère} \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_C + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Loi de Maxwell – Faraday} \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Loi de conservation de flux de données} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Loi de Maxwell - Gauss} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

$\vec{D}$  : Est l'induction électrique en coulombs par mètre carré [ $C/m^2$ ]

$\rho$  : Densité de charge volumique [ $C/m^3$ ]

$\vec{E}$  : Champ électrique [ $V/m$ ]

$\vec{H}$  : Champ magnétique [ $A/m$ ]

$J_C$  : Densité de courant de conduction [ $A/m^2$ ]

$t$  : Le temps [ $s$ ]

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

$\vec{B}$  : Induction magnétique [ $T$ ]

L'équation (II.1) de Maxwell-Ampère, généralise le théorème d'Ampère. Permet d'établir une relation entre le champ électromagnétique et les courants électriques. Elle traduit la création d'un champ magnétique par les courants électriques de conduction et de déplacement.

L'équation (II.2) de Maxwell-Faraday. Correspond à la loi d'induction de Faraday qui établit un lien entre un champ électrique et un flux magnétique (relation entre un champ et sa source).

L'équation (II.3) traduit la conservation du flux (champ magnétique).

L'équation (II.4) de Maxwell-Gauss traduit la conservation de la charge électrique. [18]

### II.3.2. Lois de comportement des matériaux :

Une relation constitutive décrit le comportement local des grandeurs électromagnétiques au sein d'un matériau. Dans le cas le plus général, ces relations permettent de modéliser la réponse du matériau aux champs appliqués. [19]

$$\text{Dans un milieu diélectrique} \begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} & \text{milieu linéaire isotrope (II.5)} \\ \vec{D} = \epsilon(x, y, z) \vec{E} & \text{milieu linéaire anisotrope (II.6)} \\ \vec{D} = \epsilon(\vec{E}) \vec{E} & \text{milieu linéaire isotrope (II.7)} \end{cases}$$

$$\text{Dans un milieu magnétique} \begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r & \text{linéaire isotrope (II. 8)} \\ \vec{B} = \mu(x, y, z) \vec{H} + \vec{B}_r & \text{linéaire anisotrope (II. 9)} \\ \vec{B} = \mu(\vec{H}) \vec{H} + \vec{B}_r & \text{non linéaire isotrope (II. 10)} \end{cases}$$

$\epsilon$  : Perméabilité électrique absolue [F/m]

$\mu$  : Perméabilité magnétique absolue [H/m]

$\vec{B}_r$  : Induction magnétique [Tesla]

**II.3.4. La loi d'Ohm :**

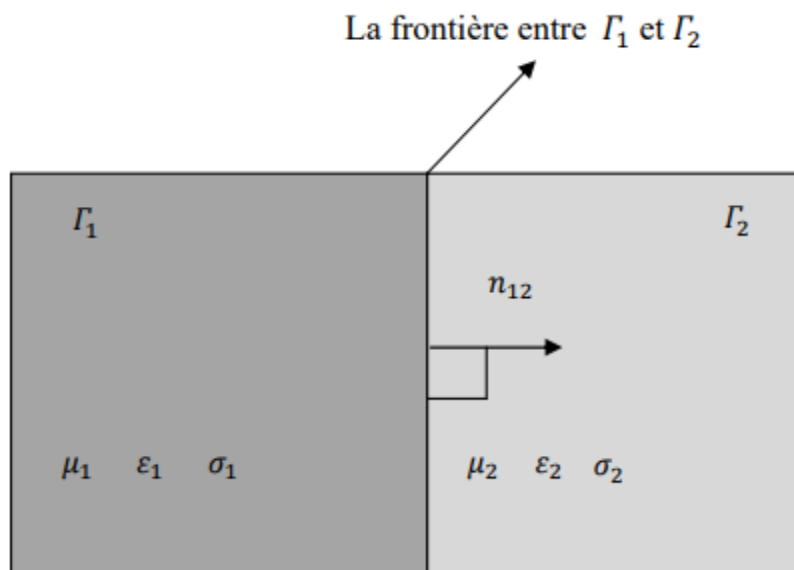
C'est la loi qui exprime dans un milieu conducteur. La densité du courant  $J$  en relation avec le champ électrique  $\vec{E}$ . La loi concerne tout milieu ayant une conductivité électrique. [19]

$$\begin{cases} \vec{J}_C = \sigma \vec{E} & \text{milieu conducteur} & \text{(II. 11)} \\ \vec{J}_C = \sigma \vec{E} + \vec{J}_S & \text{milieu conducteur avec source} & \text{(II. 12)} \end{cases}$$

$\vec{J}_S$  : Densité de courant source [A/m<sup>2</sup>]

**II.3.5. Relation de passage :**

Les équations précédentes s'appliquent en tout point d'un milieu continu. Cependant, à l'interface entre les deux milieux, identifiés par les indices 1 et 2, certaines conditions spécifiques doivent être respectées. [19]



**Figure II.1 :** interface entre deux milieux différents [19]

Continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique (E)

$$\vec{E}_1 \wedge \vec{n} = \vec{E}_2 \wedge \vec{n} \quad (\text{II.13})$$

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

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

Discontinuité de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique (H)

$$\vec{H}_1 \wedge \vec{n} - \vec{H}_2 \wedge \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{II.15})$$

Discontinuité de la composante normale de la vectrice induction électrique D en présence de charges superficielles  $\rho_s$

$$\vec{n}(\vec{D}_1 - D_2) = \rho_s \quad (\text{II.16})$$

$\vec{n}$  est le vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux 1 et 2.

$\vec{J}_s$  est la densité surfacique d'une nappe de courant entre les deux milieux.

### II.3.6. conditions de jauge :

Les équations de Maxwell décrivent des champs qui peuvent être exprimés soit à partir d'un gradient (champ rotationnel), soit à partir du rotationnel (champ à divergence). Cela explique l'utilisation des jauge dans certaines formulations afin d'assurer l'unicité de la solution.

Si l'on considère (U) et (W) comme des champs vectoriels, les conditions de jauge peuvent, de manière générale, s'exprimer sous la forme suivante. [3]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb} \quad (\text{II.17})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} + K \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz} \quad (\text{II.18})$$

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \quad \text{Jauge adapté pour les éléments d'artères} \quad (\text{II.19})$$

### II.4. Hypothèse simplificatrice :

Ces hypothèses permettent une modélisation plus simple des phénomènes électromagnétiques en jeu dans les dispositifs considérés. Selon la configuration des dispositifs étudiés, certaines hypothèses peuvent être posées afin de négliger des phénomènes jugés secondaires, ce qui permet de simplifier les équations de Maxwell et d'obtenir des modèles plus accessibles à l'analyse.

Dans le cadre de notre étude, les dispositifs examinés présentent les caractéristiques suivantes : les fréquences utilisées pour le contrôle non destructif (CND) demeurent inférieures à 1 MHz. Cette condition autorise l'adoption de l'approximation quasi-stationnaire, dans laquelle les courants de déplacement peuvent être négligés ( $\frac{\partial D}{\partial t} = 0$ ). De plus, il est supposé que la densité de courant de surface est nulle ( $J_s = 0$ ), tout comme la densité de charge volumique ( $\rho_s = 0$ ).

Les équations de Maxwells à résoudre sont : [10]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (\text{II.20})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.21})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.22})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.23})$$

### II.5. Modèle électromagnétique :

Sur la base des équations de Maxwell simplifiées (II.20-23) relatives au domaine de l'électrotechnique nous définirons les modèles magnétostatique et magnétodynamique. [19]

#### II.5.1 Modèles magnétostatique :

En magnétostatique, le champ magnétique est généré par des sources de courant qui ne varient pas dans le temps. Dans ce contexte, le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  est nul, ce qui entraîne un découplage entre les champs électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{B}$ . Pour compléter cette description, il convient d'intégrer la loi de comportement des matériaux (II.10) ainsi que les conditions aux limites appropriées.

Le système d'équations régissant les phénomènes magnétostatique s'écrit :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.24})$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}_s \quad (\text{II.25})$$

#### II.5.2 Modèles magnétodynamique :

En magnétodynamique, les sources de tension ou de courant évoluent dans le temps, ce qui entraîne l'apparition de courants induits. Ces courants induits établissent un couplage entre les

champs électrique et magnétique, modifiant ainsi leur interaction dans le système. Pour compléter cette description, il est essentiel d'intégrer les lois de comportement des matériaux électriques (II.5) et magnétiques (II.8), ainsi que les conditions aux limites qui régissent la dynamique du champ magnétique et électrique dans le milieu considéré. Le système d'équations régissant les phénomènes magnétodynamiques s'écrit :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = 0 \quad (\text{II.26})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \sigma\vec{E} + \vec{J}_s \quad (\text{II.27})$$

### II.6 choix de la variable d'états :

Pour traiter les équations magnétostatique et magnétodynamique différentes formulations mathématique du problème peuvent être obtenues, soit en utilisant les champs magnétiques ou électriques comme variables principales, ou en introduisant de nouvelles variables que sont les potentiels électriques ou magnétiques. A chacune de ces grandeurs magnétiques et électriques correspond une équation aux dérivées partielles.

Les formulations en champs présentent un inconvénient majeur, qui est la discontinuité aux interfaces et l'utilisation d'éléments d'arrêtes dans la discrétisation. De plus les vecteurs ont généralement trois composantes, augmentant par-là le nombre d'inconnues, ce qui entraîne un temps de résolution plus important. Pour remédier à ces inconvénients on fait appel aux potentiels vecteur/scalaire électrique ou magnétiques.

Il existe plusieurs types de potentiels, parmi lesquels, on peut citer le potentiel vecteur magnétique et le potentiel scalaire électrique. La résolution des équations en potentiel vecteur magnétique, s'avère être particulièrement intéressante dans des configurations axisymétriques, car seuls la composante azimutale est non nulle. La condition de Jauge de continuité qui assure l'unicité du potentiel vecteur magnétique A est naturellement vérifiée [19]

### II.7. Formulation en termes de potentiel vecteur :

Les équations de Maxwell constituent un système différentiel du premier ordre qui, dans le cas général, ne permet pas d'explicitement séparément les champs E et B. en introduisant une variable d'état appropriée à la géométrie des dispositifs étudiés, nous pouvons réduire les équations de Maxwell à une équation aux dérivées partielles facile à résoudre. [20]

Dans une configuration cylindrique, le potentiel magnétique  $A$  et le potentiel électrique scalaire  $V$  sont les variables d'état les plus appropriées. En se basant sur l'équation (II.22), on formalise le potentiel vecteur magnétique  $A$  par la relation suivante :

On définit le potentiel vecteur magnétique  $A$  par l'équation suivante :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\vec{A} \quad (\text{II.28})$$

En tenant compte de cette dernière écriture, l'équation (II.21) devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\vec{E} + \frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{II.29})$$

A partir de cette relation, on peut définir un potentiel scalaire électrique  $V$  tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial\vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}}V \quad (\text{II.30})$$

En rassemblant l'équation (II.30) et (II.28), on peut obtenir à la relation suivante :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}\right) = \begin{cases} -\sigma\left(\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right) - \sigma.\overrightarrow{\text{grad}}V & \text{équation magnétodynamique avec source} \\ -\sigma\left(\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right) & \text{équation magnétodynamique sans source} \\ -\sigma.\overrightarrow{\text{grad}}V & \text{équation magnétostatique avec source} \\ 0 & \text{équation magnétostatique sans source} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Si on introduit la notion de la loi d'Ohm (II.11), les équations de Maxwell seront représentées par les deux équations couplées suivantes :

$$\left\{ \overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}\right) = \vec{j} \right. \quad (\text{II.32})$$

$$\left. \vec{j} = -\sigma\left(\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}}V\right) \right. \quad (\text{II.33})$$

Dans une configuration cylindrique. En négligeant la forme hélicoïdale des spires inductrices le problème devient bidimensionnel car il possède une symétrie de révolution. Dans une configuration axisymétrique (coordonnées cylindrique  $(r, \theta, z)$ ), la formulation utilisant le potentiel vecteur offre l'intérêt suivant ; lorsque le courant d'excitation est orienté suivant la

direction  $\theta$ , le système présente une seule inconnue celle de la composante azimutale suivant l'axe  $\theta$  ( $A_\theta$ ) du vecteur  $A$ . Dans une telle configuration, les courants sont perpendiculaires au plan d'étude.

$$\vec{J} = \begin{pmatrix} 0 \\ J_\theta \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_\theta \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ A_\theta \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{B} = \begin{pmatrix} B_r \\ 0 \\ B_z \end{pmatrix}; \vec{H} = \begin{pmatrix} H_r \\ 0 \\ H_z \end{pmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Dans notre configuration, le vecteur  $A$  ne possède qu'une seule composante. En régime harmonique (source sinusoïdales), il est courant d'adopter une formulation complexe. Dans ce cadre, les grandeurs  $A$  et  $J$  peuvent être traitées comme des scalaires complexes, représentant leur unique composante significative. Cette simplification permet une réduction substantielle des équations de Maxwell et facilite la résolution numérique du problème. [20]

$$\begin{cases} \text{div}(\overrightarrow{\text{grad}}A) = -\mu J & (\text{II.35}) \\ J = -\sigma(j\omega A + \overrightarrow{\text{grad}}V) & (\text{II.36}) \end{cases}$$

## II.8. Méthodes de résolution :

Différentes approches peuvent être employées pour résoudre les équations aux dérivées partielles évoquées précédemment. [20]

### III.8.1 Méthodes analytiques :

Les premières recherches se sont appuyées sur des techniques de résolution analytique appliquées aux équations provenant de modèles unidimensionnels. Lorsqu'il s'agit de modèle à deux dimensions, obtenir une solution analytique devient beaucoup plus complexe.

Toutefois, pour certaines géométries simples, il est possible d'obtenir des solutions exactes en utilisant la méthode de séparation des variables. Dans des situations particulières, ces solutions analytiques servent de référence pour valider les résultats obtenus par d'autres méthodes de résolution. [20]

### II.8.2. Méthode numérique :

Une fois que nous avons choisi un modèle mathématique adéquat et les conditions aux limites initiales associées. Nous sommes en mesure de la résoudre. Dans cette section, nous allons étudier la résolution numérique des problèmes mathématiques exprimés par les équations aux dérivées partielles (EDP). Pour la résolution numérique des EDP. On a généralement trois

approches principales sont la méthode des différences finies (MDF), la méthode des volumes finis (MVF) et la technique des éléments finis (FEM) [3]

### II.8.3. Méthode semi analytique :

Les méthodes mixtes combinent des approches analytiques et numériques pour résoudre certains problèmes. Elles offrent des expressions analytiques simples et réduisent le temps de simulation, tout en donnant des résultats proches de la réalité.

Pour simuler le contrôle non destructif, nous avons choisi la méthode des grandeurs électromagnétiques couplées. Ce modèle, initialement développé pour le chauffage par induction par Delage et Ernest, discrétise l'inducteur et la charge en spires concentriques avec une densité de courant supposée uniforme. Cela forme un réseau de résistances et d'inductances couplées, représenté par un système d'équation analytiques. En le résolvant numériquement, on peut calculer la différence de potentiel aux bornes de la bobine et la répartition du courant. Ainsi, il est possible d'obtenir l'impédance de la bobine et d'estimer la puissance injectée dans la charge. [3]

#### II.8.3.1 Principe de la méthode des circuits couplés :

La méthode des circuits électriques magnétiquement couplés consiste à diviser le conducteur en petites sections qui prennent la forme de circuits circulaires et coaxiaux. Chaque section est conçue pour que le courant y soit réparti de façon homogène. Cette subdivision peut suivre un schéma irrégulier, selon la forme de l'objet étudié, notamment dans les zones où les grandeurs physiques varient beaucoup ou lorsque l'effet de peau joue un rôle important. [19]

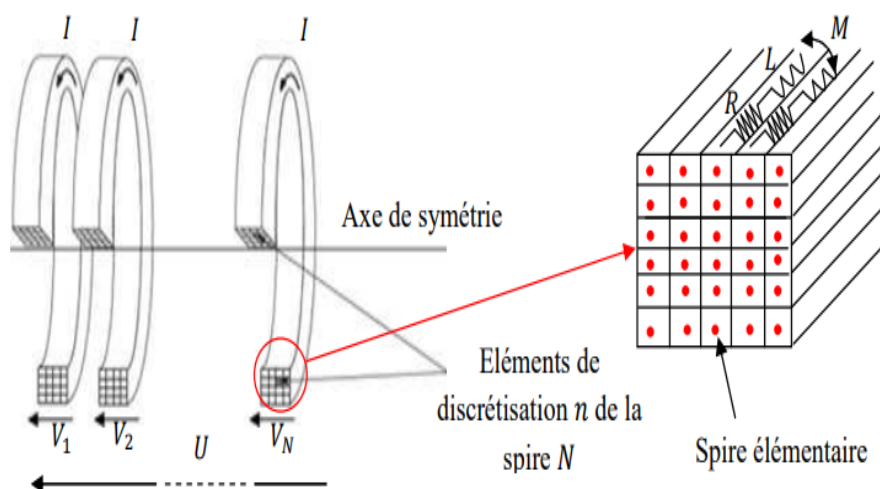


Figure II.2 : Découpage des conducteurs en éléments [19]

### II.8.3.2. Formulation intégrale des équations :

Considérons deux points de l'espace  $p$  et  $q$  ( $p$  représente le récepteur et  $q$  l'émetteur). Le système simplifié (II.32-33) peut alors être réécrit de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A}(p, q) \right) = \vec{J}(q) \\ \vec{J}(p) = -\sigma(p) \left( \frac{\partial \vec{A}(p, q)}{\partial t} + \text{grad} V(p) \right) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(II. 37)} \\ \text{(II. 38)} \end{array}$$

On définit  $A(p, q)$  comme le potentiel vecteur magnétique, inconnu au point  $p$ , généré par la source située en  $q$ .  $J(p)$  représente la densité de courant au point  $p$  dans la charge, tandis que  $J(q)$  correspond à la densité de courant au point  $q$  dans la source.

L'équation de poisson (II.37) décrit la génération du potentiel vecteur magnétique  $A(p, q)$  par la densité de courante source  $J(q)$ .

En revanche, l'équation (II.38) exprime l'induction de la densité de courant  $J(q)$  sous l'effet de la variation temporelle du potentiel vecteur magnétique ainsi que la variation spatial du potentiel scalaire électrique.

La résolution de l'équation (II.37) à l'aide transformation de Fourier conduit à la formulation du potentiel vecteur magnétique selon la loi de Biot et Savart, donnée comme suit :

$$\vec{A}(p, q) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_v \frac{\vec{J}(p, q)}{|\vec{oq} - \vec{op}|} dv \quad \text{(II. 39)}$$

Il convient de noter que les point  $p$  et  $q$  peuvent se trouver dans des domaines distincts ou partager le même milieu. Le potentiel est alors évalué au point récepteur  $p(r, z)$ , mais il est engendré par une spire de section  $s(q)$ , centrée en  $q(r, z)$ , de contour  $C$  et parcourue par une densité de courant  $J(q)$ . En supposant que la section de la spire est suffisamment réduite pour que l'effet de peau négligeable, on admet que le courant  $y$  est uniformément réparti, ce qui permet d'écrire [9]:

$$J(q) dv = I(q) d\ell \quad \text{(II. 40)}$$

$$I(q) = J(q) s(q) \quad \text{(II. 41)}$$

Le système étant à symétrie de révolution, le potentiel vecteur magnétique ne possède qu'une composante azimutale, orientée selon l'angle  $\theta$ . le courant s'écoule le long d'un contour  $C$  de rayon  $r(q)$ , dont la longueur  $\ell(q)$  [20]

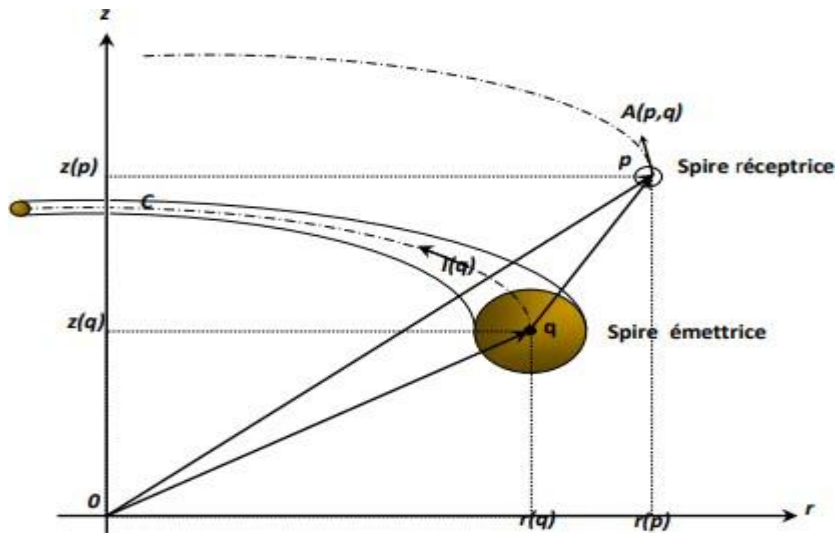


Figure II.3 : configuration de spire élémentaire [20]

Nous pouvons écrire :

$$\vec{A}(p, q) = A_\theta(p, q)\vec{e}_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} I(q) \int_c \frac{d\ell}{|\vec{op} - \vec{oq}|} \quad (42)$$

En utilisant les coordonnées cylindriques et en tenant compte de la symétrie de révolution du système pour intégrer dans l'intervalle  $[0, \pi/2]$ , nous réécrivons la formulation (II.42) comme suite[20] :

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{2\pi} G(p, q) I(q) \quad (II. 43)$$

Avec :

$$G(p, q) = \sqrt{\frac{r(p)}{r(q)}} E(k(p, q)) \quad (II. 44)$$

$$E(K(p, q)) = \frac{(2 - K^2)E_1(k) - 2E_2(K)}{K} \quad (II. 45)$$

$$K(p, q) = \sqrt{\frac{4r(p)r(q)}{[r(p) + r(q)]^2 + [z(p) - z(q)]^2}} \quad (II. 46)$$

$E_1(K)$  et  $E_2(K)$  Représentent respectivement les intégrales elliptiques de première et de seconde espèce au sens de Legendre.

Les grandeurs  $r(p)$  et  $r(q)$  désignent les rayons cylindriques des points émetteur et récepteur, tandis que  $z(p)$  et  $z(q)$  correspondent à leurs hauteurs respectives.

L'expression générale du gradient du potentiel en coordonnées cylindriques s'écrit comme suite :

$$\vec{\text{grad}}V(p) = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r(p)} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{e}_\theta \quad (\text{II.47})$$

Comme la circulation du courant se fait le long du périmètre moyen de la spire, alors, la composante du gradient de potentiel selon l'axe radial est nulle ( $\frac{\partial V}{\partial r} = 0$ ) figure II.5, ce qui nous amène à donner l'expression du gradient du potentiel électrique par :

$$\vec{\text{grad}}V(p) = \frac{1}{r(p)} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{e}_\theta \quad (\text{II.48})$$

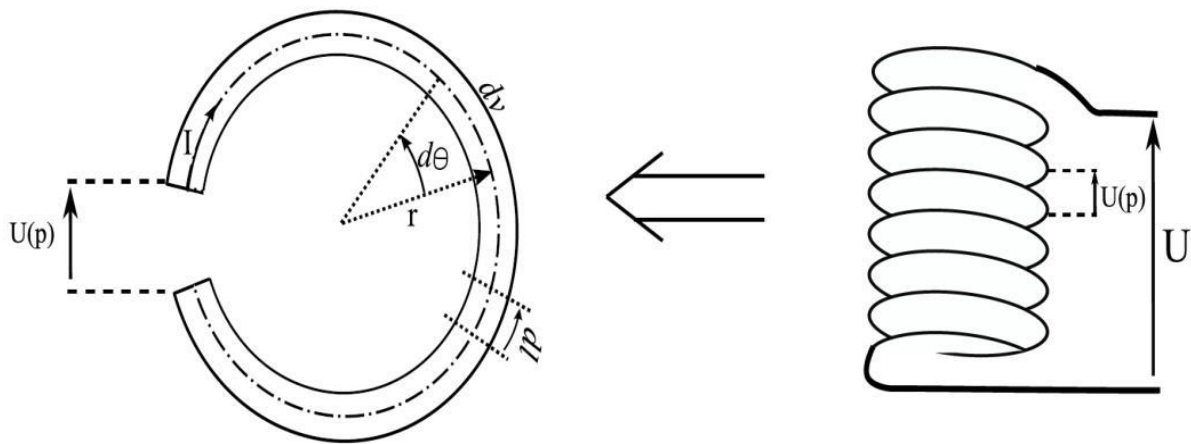


Figure II.4 : Représentation d'une spire élémentaire [20]

Or tout le long du périmètre moyen, le courant est le même. Dans ce cas, nous déduisons que le gradient de potentiel est constant. En notant  $u(p)$  la tension appliquée aux bornes de la spire, on peut donc écrire :

$$\int_{u(p)}^0 dV(p) = (\vec{\text{grad}}V(p) \vec{e}_\theta) r(p) \int_0^{2\pi} d\theta \quad (\text{II.49})$$

$$U(p) = -2\pi r(p) \vec{\text{grad}}V(p) \vec{e}_\theta \quad (\text{II.50})$$

Cela nous permet d'exprimer la variation spatiale du potentiel électrique scalaire en fonction de la tension appliquée ou induite  $u(p)$  aux bornes de la spire, selon la relation suivante :

$$\overrightarrow{\text{grad}}V(p)\vec{e}_\theta = \frac{u(p)}{2\pi r(p)} \quad (\text{II.51})$$

En substituant les expressions du potentiel vecteur magnétique (équation II.43) et du potentiel scalaire électrique (équation II.51) dans l'équation (II.38), on obtient la forme de l'équation électromagnétique élémentaire dans une spire, exprimée en fonction de la densité de courant ainsi que la tension entre le point q et la charge p [9].

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma(p)} J(p) + \mu_0 r(p) G(p, q) \frac{dI(q)}{dt} = u(p) \quad (\text{II.52})$$

A partir de cette équation, il est possible de mettre en évidence la génération d'une densité de courant  $J(p)$  en un point quelconque p, induite par la tension constante  $u(p)$  appliquée en ce point, ainsi que par la variation temporelle de l'intensité du courant situé en un point q.

De manière générale, le potentiel vecteur magnétique en un point p résulte de la contribution de l'ensemble du domaine  $\Omega$ , on peut exprimer le potentiel vecteur magnétique comme une intégrale sur toutes les densités de courant, en utilisant l'équation (II.43) de la manière suivante. [9]

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{\pi^2} \iint_{\Omega} G(p, q) J(q) d\Omega \quad (\text{II.53})$$

En couplant cette dernière équation avec (II.52), nous obtenons :

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma(p)} J(p) + \mu_0 r(p) \iint_{\Omega} G(p, q) \frac{dJ(q)}{dt} d\Omega = u(p) \quad (\text{II.54})$$

Et si l'excitation, est sinusoïdale, alors l'opérateur  $\frac{d}{dt}$  peut être remplacé par  $j\omega$  ce qui nous conduit à écrire :

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma(p)} J(p) + j\mu_0 \omega r(p) \iint_{\Omega} G(p, q) J(q) d\Omega = u(p) \quad (\text{II.55})$$

Cette équation est la formule généralisée des circuits électromagnétiques couplés.

### II.8.3.3. Equation intégrale du capteur en présence d'une structure à contrôler :

Pour établir l'équation du capteur en présence d'une pièce métallique à proximité, il convient d'intégrer l'effet des courants induits dans une pièce. [20]

Nous pouvons réécrire l'équation (II.55) comme suite :

$$\frac{2\pi r_s(p)}{\sigma_s(p)} J_s(p) + j\mu_0 \omega r_s(p) \iint_{\Omega_s} G_{ss}(p, q) J_s(q) d\Omega_s = u(p) \quad (\text{II.56})$$

Avec :

$$G_{ss}(K(p, q)) = \sqrt{\frac{r_s(q)}{r_s(p)}} E(k(p, q)) \quad (\text{II.57})$$

L'équation (II.56) devient alors :

$$u(p) = \frac{2\pi r_s(p)}{\sigma_s(p)} J_s(p) + j\mu_0 \omega r_s(p) \left[ \iint_{\Omega_s} G_{ss}(p, q_s) J_s(q_s) d\Omega_s + \iint_{\Omega_c} G_{sc}(p, q_c) J_c(q_c) d\Omega_c \right] \quad (\text{II.58})$$

L'indice c représenter la pièce (charge). Nous donnons dans l'équation qui suite l'expression de  $G_{sc}$  qui est fonction des coordonnées  $p$  et  $q_c$  :

$$G_{sc}(K(p, q)) = \sqrt{\frac{r_c(q_c)}{r_s(p)}} E(K(p, q_c)) \quad (\text{II.58})$$

#### II.8.3.4. Discrétisation de l'équation du capteur en présence de la pièce :

Pour évaluer la tension aux bornes du capteur en présence de la pièce, on procède à une décomposition du domaine de la pièce en  $N_c$  spire équivalentes, définir par leur centres  $q_c(r_c, z_c)$  et leur surface  $S_c$ . [20]

L'équation (II.58) est remplacée par l'équation (II.59) :

$$U_T = \sum_{p=1}^{N_s} \frac{2\pi r_s(p)}{\sigma_s(p) S_s(p)} I_s + j\mu_0 \omega I_s \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_s} G_{ss}(p, q_s) + j\mu_0 \omega \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_c} G_{sc}(p, q_c) I_c(q_c) \quad (\text{II.59})$$

### II.8.3.5. Système d'équations représentant la structure à contrôler:

La pièce, modélisée comme un conducteur massif équivalent à un circuit fermé, ne présente aucune tension induite à ses bornes. Chaque spire fictive de la pièce est modélisée par une équation intégrale qui englobe l'effet de la spire en question sur elle-même ainsi que les effets des autres spires élémentaire fictives de la pièce sans oublier de rajouter l'effet des spires réelles de la source. [20]

$$0 = \frac{2\pi}{\sigma_x(p)S_c} I_c(p) + j\mu_0\omega \left[ \iint_{\Omega_c} G_{cc}(p, q_s) I_c(q_c) d\Omega_c + \iint_{\Omega_s} G_{cs}(p, q_s) I_s(q_s) d\Omega_s \right] \quad (\text{II.60})$$

Les  $N_c$  équations discrétisées représentant la pièce sont données par l'écriture suivante :

$$\frac{2\pi}{\sigma_s(p)S_c(p)} I_c(p) + j\mu_0\omega \sum_{q=1}^{N_c} G_{cc}(p, q_c) I_c(q_c) + j\mu_0\omega \sum_{q=1}^{N_s} G_{cs}(p, q_s) I_s(q_s) = 0 \quad (\text{II.61})$$

$$p = \overline{1, N_c}$$

### II.8.3.6. Impédance du capteur en présence d'une pièce métallique :

L'équation (II.59) et l'ensemble des équations (II.61) forment le système d'équations à résoudre. On peut les assembler comme suite :

$$\begin{cases} Z_0 I_s + j\mu_0\omega \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_c} G_{sc}(p, q_c) I_c(q_c) = U_T \\ \left[ \frac{2\pi}{\sigma_c(p)S_c(p)} I_c(p) + j\mu_0\omega \left[ \sum_{q_c=1}^{N_c} G_{cc}(p, q_c) I_c(q_c) + \sum_{q_s=1}^{N_s} G_{cs}(p, q_s) I_s(q_s) \right] \right] = 0 \end{cases} \quad (\text{II.62})$$

$$p = \overline{1, N_c}$$

Dans le but de résoudre ce système, nous le mettons sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} Z_0 & M_{sc} \\ M_{cs} & M_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_c(1) \\ I_c(2) \\ \vdots \\ I_c(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_T \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.63})$$

Les éléments de la matrice inductance sont définis comme suit :

$Z_0$  est l'impédance du capteur à vide. Grandeur représente l'effet de la source sur elle-même.

$$Z_0 = \frac{U_T}{I_s} = \sum_{p=1}^{N_s} \frac{2\pi r_s(p)}{\sigma_s(p)S_s(p)} + j\mu_0\omega \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_s} G_{ss}(p, q) \quad (\text{II.64})$$

$M_{sc}$  est un vecteur ligne représentant l'effet des spires de la pièce sur celles de la source.

$$M_{sc}(1, q_c) = j\mu_0\omega \sum_{p=1}^{N_s} G_{sc}(p, q_c)r_s(p) \quad (\text{II.65})$$

$$q_c = \overline{1, N_c}$$

$M_{cs}$  est un vecteur colonne représentant l'effet des spires de la source sur celles de la pièce.

$$M_{cs}(q_c, 1) = j\mu_0\omega \sum_{p=1}^{N_s} G_{sc}(q_c, p) \quad (\text{II.66})$$

$$q_c = \overline{1, N_c}$$

$M_{cc}$  est une matrice carrée représentant l'effet des spires de la pièce sur elle-même.

$$\begin{cases} M_{cc}(q_c, q_c) = \frac{2\pi}{\sigma_c(q_c)S_c(q_c)} + j\mu_0\omega G_{cc}(q_c, q_c) \\ M_{cc}(q_c, p_c) = j\mu_0\omega G_{cc}(q_c, p_c) \\ q_c = \overline{1, N_c} \quad \text{et} \quad p_c \neq q_c \end{cases} \quad (\text{II.67})$$

La résolution du système donne le courant d'excitation  $I_s$  et les  $N_s$  courants induits  $I_c(i)$  dans la pièce. Si l'excitation est imposée en courant,  $I_s$  est alors connu, et le système matriciel peut être réduit de la manière suivante :

$$[M_{cc}] \begin{bmatrix} I_c(1) \\ I_c(2) \\ I_c(3) \\ \vdots \\ I_c(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.68})$$

En générale, la valeur de l'impédance sera donnée par l'équation suivante :

$$Z = \frac{U_T}{I_s} = Z_0 + j\frac{\mu_0\omega}{I_s} \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_c} G_{sc}(p, q_c)I_c(q_c) \quad (\text{II.69})$$

Pour évaluer l'influence que provoque la présence de la pièce au voisinage de la source, il faut retrancher la valeur de l'impédance du capteur à vide. [20]

$$\Delta Z = Z - Z_0 = j\frac{\mu_0\omega}{I_s} \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_c} G_{sc}(p, q_c)I_c(q_c) \quad (\text{II.70})$$

**II.9. Conclusion:**

Ce chapitre a posé les fondations théoriques de la modélisation électromagnétique dans le contexte du contrôle non destructif (CND). À travers les équations fondamentales de Maxwell, les lois de comportement des matériaux et la formulation en potentiel vecteur, nous avons structuré une base solide pour représenter les phénomènes électromagnétiques dans les milieux conducteurs. L'adoption de certaines hypothèses simplificatrices a permis une réduction du problème complexe à des modèles exploitables, comme les modèles magnétostatique et magnétodynamique. Nous avons également exploré plusieurs approches de résolution analytiques, numériques et semi-analytiques en insistant sur l'intérêt particulier de la méthode des circuits couplés pour sa capacité à représenter finement les interactions électromagnétiques tout en restant accessible au calcul. Cette méthode, par sa formulation intégrale, permet une estimation précise des courants induits et des tensions dans les dispositifs de CND. Ainsi, cette modélisation constitue un socle essentiel pour simuler, concevoir et optimiser les capteurs utilisés dans la détection des défauts internes ou externes dans les structures industrielles.

# **Chapitre III**

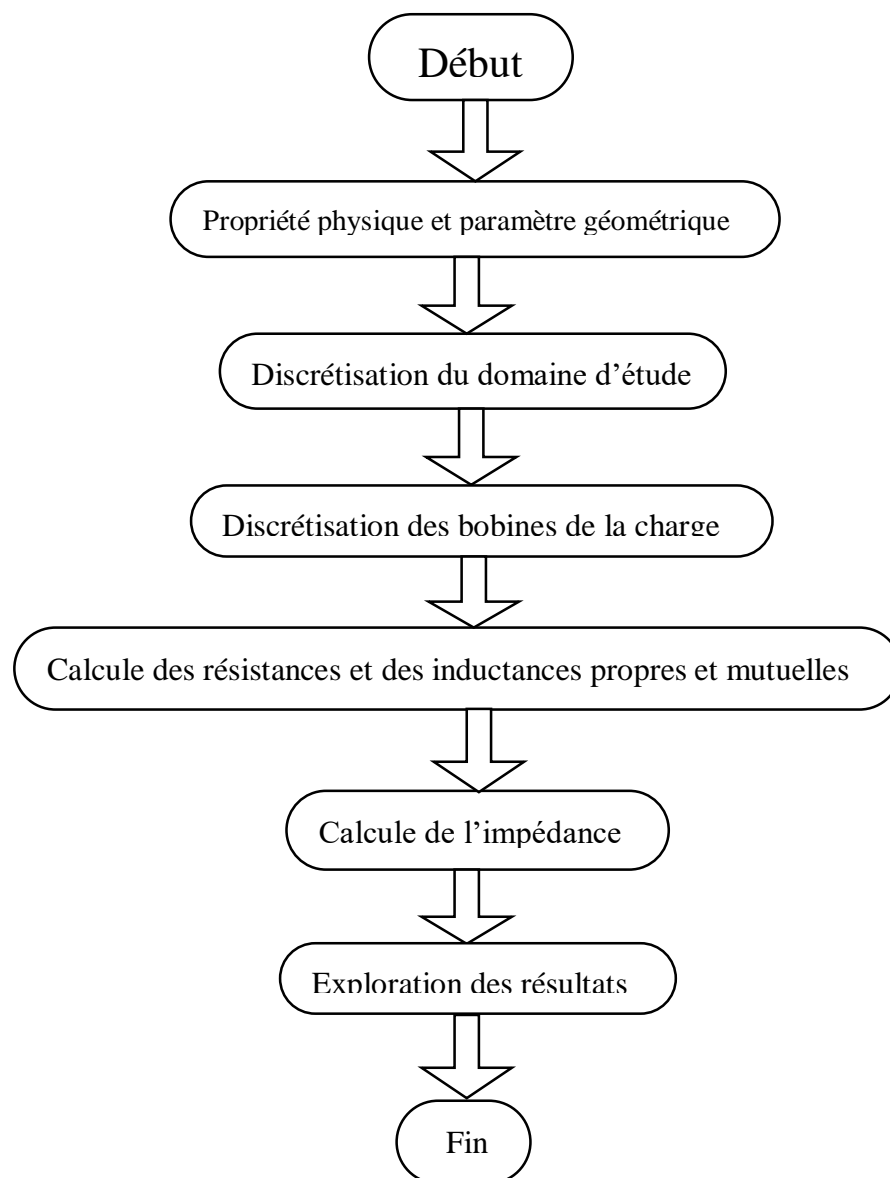
*Application et validation*

### III.1. Introduction :

Ce chapitre vise à évaluer la sensibilité d'un modèle de capteur différentiel à courants de Foucault pour la détection de défauts sur une pièce métallique asymétrique. Pour cela, nous avons étudié la variation de l'impédance, ainsi que ses composantes réelle (résistance) et imaginaire (réactance) en fonction de déplacement du capteur. L'analyse s'est concentrés sur deux paramètres principaux la fréquence d'excitation et la conductivité du matériau.

#### L'organigramme

Le schéma ci-dessous résume les différentes étapes suivies par le programme de calcul.



**Figure III.1 :** Organigramme de calcul

### III.2. Propriétés physique et paramètre géométriques :

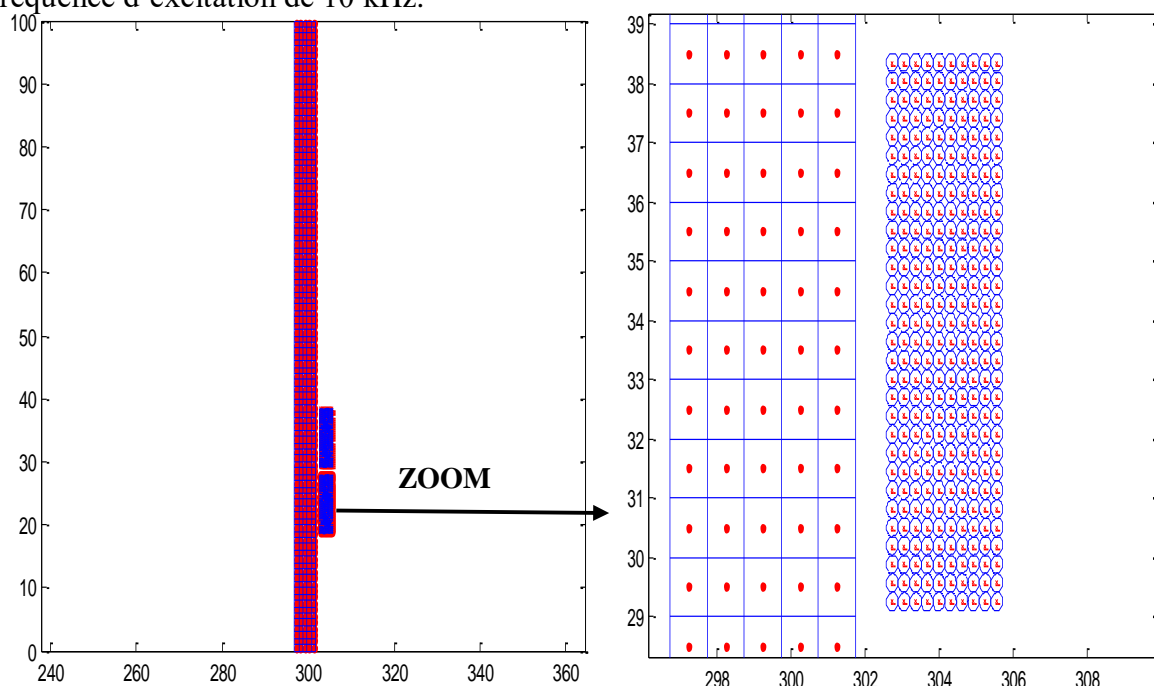
Les propriétés géométriques et physiques du matériau sont définies comme suit : elles incluent les dimensions principales, la forme de la structure, ainsi que les caractéristiques de matériau utilisé, telle que la conductivité électrique et la perméabilité magnétique.

La charge	Le capteur
Rayon intérieure : 296.75 mm	Longueur : 10 mm
Rayon extérieure : 302.75 mm	Epaisseur : 7 mm
épaisseur : 5 mm	Nombre de spire : 300
Conductivité électrique : 2.16[MS/m]	conductivité électrique : 59.98[MS/m]
Perméabilité électrique : 63 [H/m]	Perméabilité : $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]

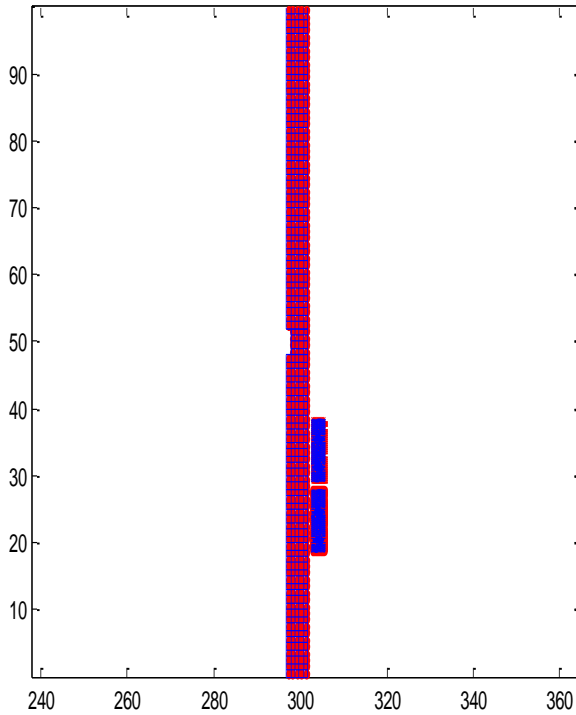
**Tableau III.1 :** Caractéristique physique et géométrique du dispositif d'étude

### III.3. Discrétisation du domaine d'étude :

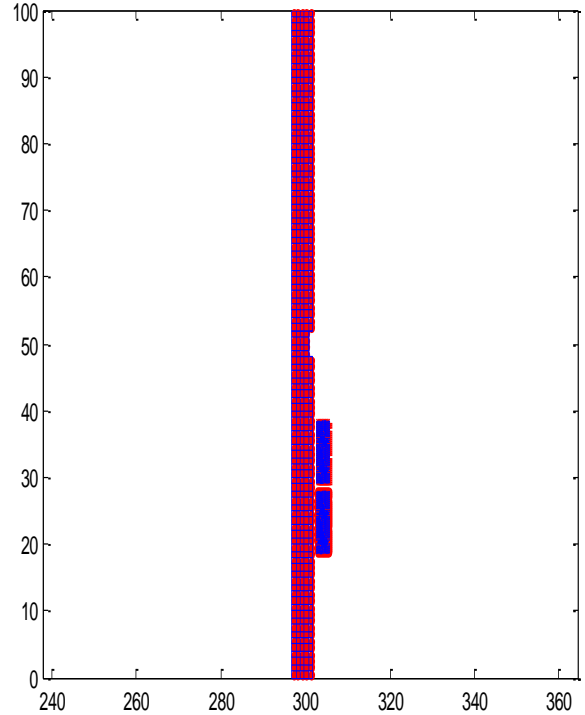
Les figures (III.2 / III.3.a / III.3.b) suivantes représentent la discrétisation du dispositif d'étude dans trois cas : une charge sans défaut, une charge avec un défaut interne et une charge avec un défaut externe. Les paramètres utilisés sont les suivants : la distance entre la charge et le capteur (lift-off) est fixée à 1 mm, tandis que la distance entre les deux bobines (gap) est de 0.5 mm, le nombre de spire est fixé à 300, avec un pas de 0.5 mm entre chaque spire, et une fréquence d'excitation de 10 kHz.



**Figure III.2 :** Discretisation des dispositifs d'étude appliqués à une charge sans défaut



**Figure III.3.a :** Discretisation du dispositif pour un défaut interne à 20%



**Figure III.3.b :** Discretisation du dispositif pour un défaut externe à 20%

#### III.4. Résultats et discussions :

Les résultats de simulation présentés dans cette section ont été obtenus en déplaçant le capteur le long de la surface extérieure de la pièce, avec un pas de 0.5 mm. L'analyse porte sur l'influence de la fréquence et de la conductivité électrique. La profondeur de pénétration standard, est déterminée par la relation suivante :

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

- La fréquence ( $\omega = 2\pi f$ )
- La conductivité  $\sigma [S m^{-1}]$
- La perméabilité magnétique  $\mu [H m^{-1}]$

#### III.5. Comparaison entre un défaut interne et externe :

Les figures (III.4/ III.5/ III.6) ci-dessous montrent la comparaison des résultats concernant la variation de l'impédance, de la résistance et de la réactance du dispositif étudié. Cette analyse a été effectuée dans trois cas : sans défaut, avec un défaut interne, et un défaut externe. La fréquence choisie est de 10 kHz.

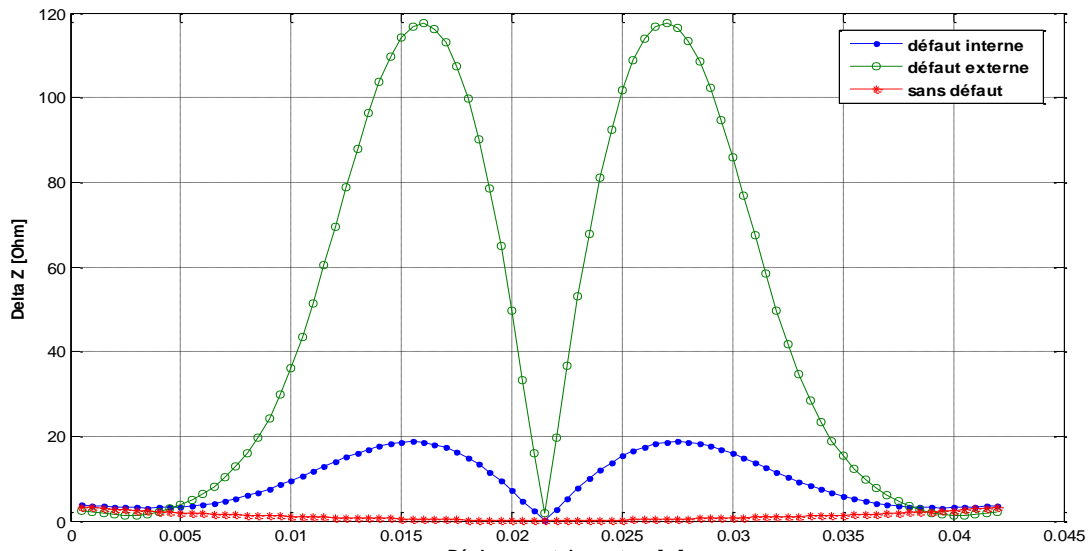


Figure III.4 : Comparaison de variation de l'impédance entre un défaut interne et externe

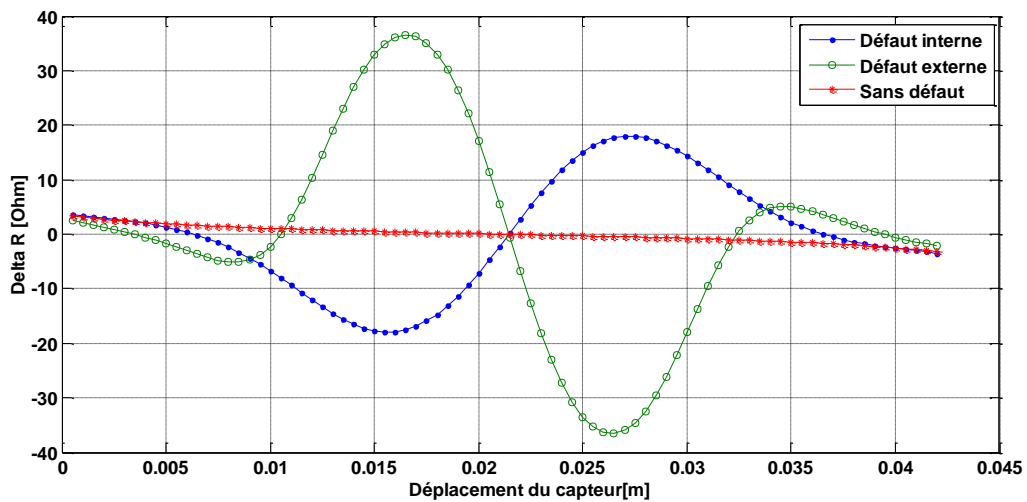


Figure III.5: Comparaison des variations de la résistance entre défaut interne et externe

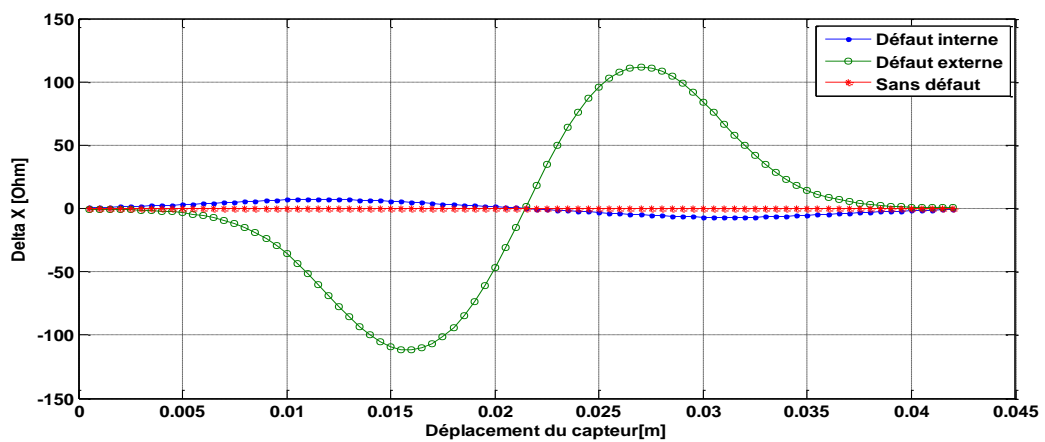


Figure III.6 : Comparaison de variation de la réactance entre un défaut interne et externe

- **Comparaison**

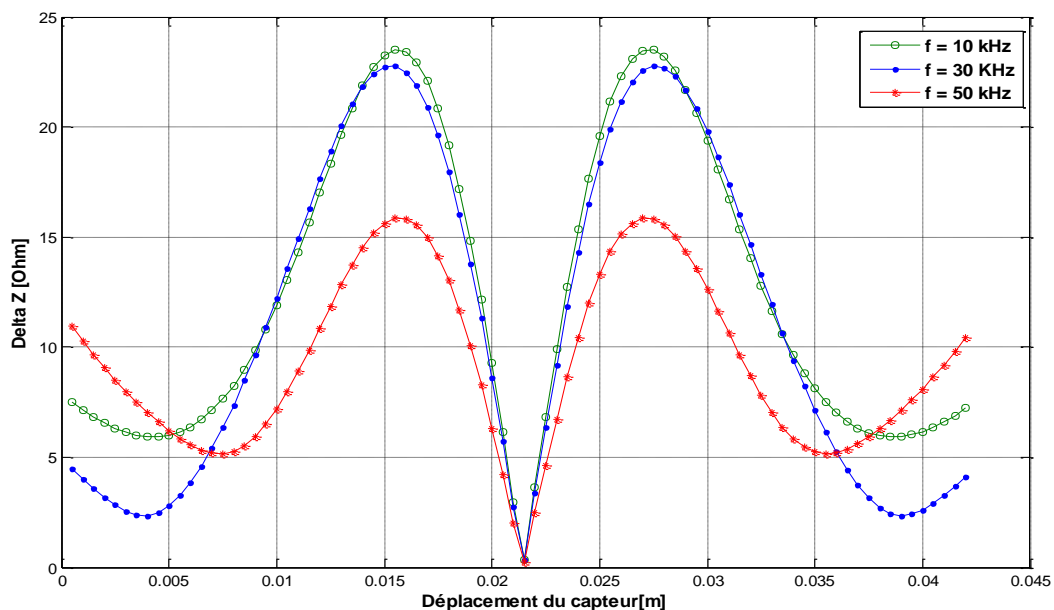
La comparaison des résultats obtenus à une fréquence de 10 kHz, en présence d'un défaut interne et d'un défaut externe, concernant la variation de l'impédance, de la résistance et de la réactance, est illustrée dans les figures III.4, III.5 et III.6. Dans les trois cas, la réponse mesurée en présence du défaut externe est plus marquée que celle associée au défaut interne. Cette différence s'explique principalement par la position du capteur, situé plus près du défaut externe, ce qui amplifie la réponse enregistrée.

### III.6. Influence de la fréquence sur la sensibilité du capteur :

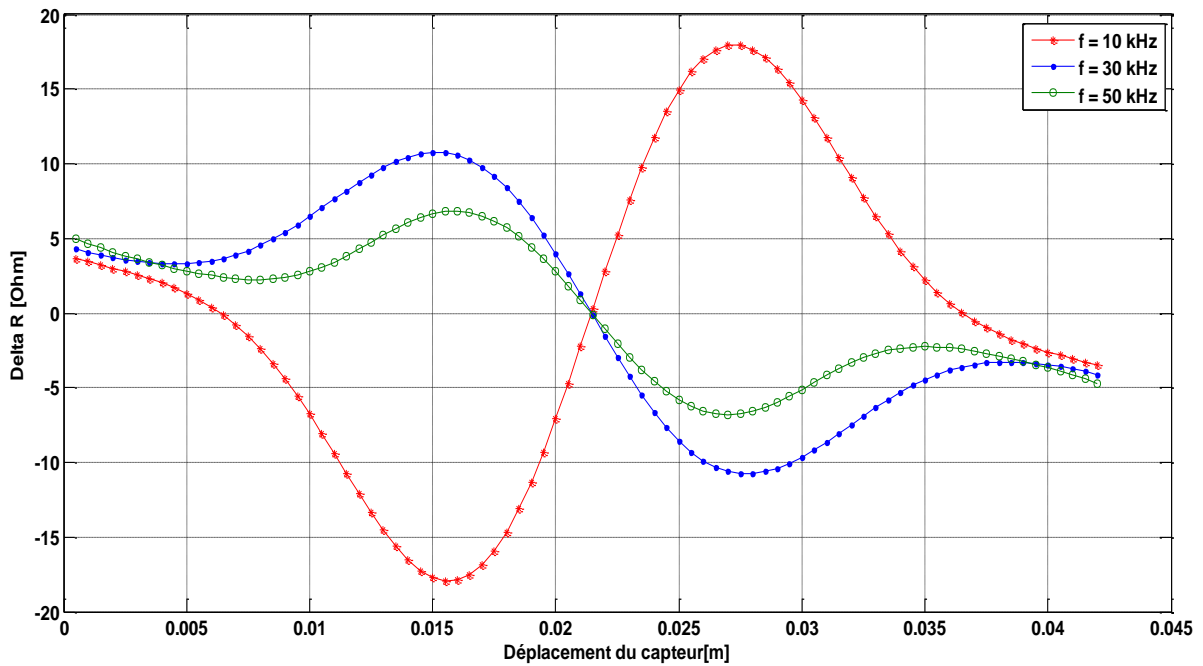
Cette étude porte sur l'analyse des défauts internes et externes dans un dispositif donné. En examinant la variation de l'impédance, de la résistance et de la réactance en fonction du déplacement du capteur, nous cherchons à mettre en évidence les différences de comportement entre les deux types de défauts, ainsi que leur influence sur les performances globales de détection.

#### III.6.1. Défaut interne :

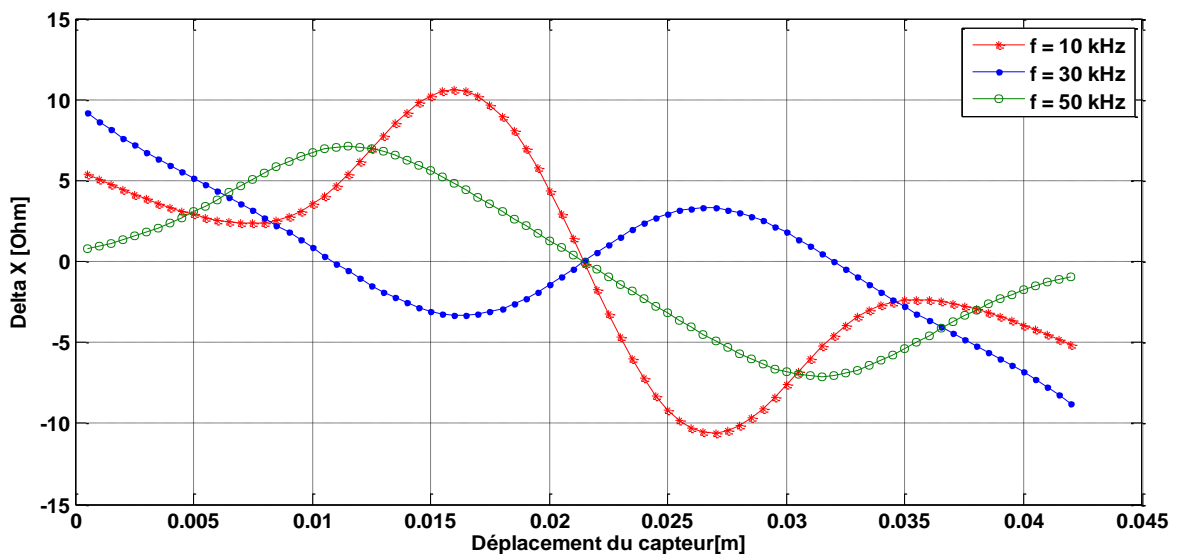
Les figures ci-dessous illustrent l'évolution de l'impédance ( $\Delta Z$ ), de la résistance ( $\Delta R$ ) et de la réactance ( $\Delta X$ ) du système en présence d'un défaut interne. Ces résultats sont présentés pour différentes fréquences (50 kHz, 30kHz, 10kHz), en fonction de l'emplacement du capteur par rapport au matériau examiné.



**Figure III.7 :** Variation de l'impédance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de fréquence



**Figure III.8:** Variation de la résistance en fonction de déplacement du capteurs pour différentes valeurs de fréquence



**Figure III.9 :** Variation de la réactance en fonction de déplacement du capteur pour différente valeur de fréquence

D’après les figure ( III.7, III.8, III.9) , il apparait que l’impédance ainsi que ses composantes (résistance et réactance) diminuent lorsque la fréquence augmente, l’analyse graphique montrent que le capteur présente une meilleur sensibilité à la détection de défauts internes à des fréquence plus faible, notamment à 10 kHz.

III.6.2. Défaut externe :

les figures ci-dessous montrent respectivement, les variations de l'impédance, de la résistance et de la réactance du système, en présence d'un défaut externe, en fonction de déplacement du capteur. Les résultats, obtenus pour les différentes fréquences notés : 50kHz, 30kHz et 10kHz sont comme suit :

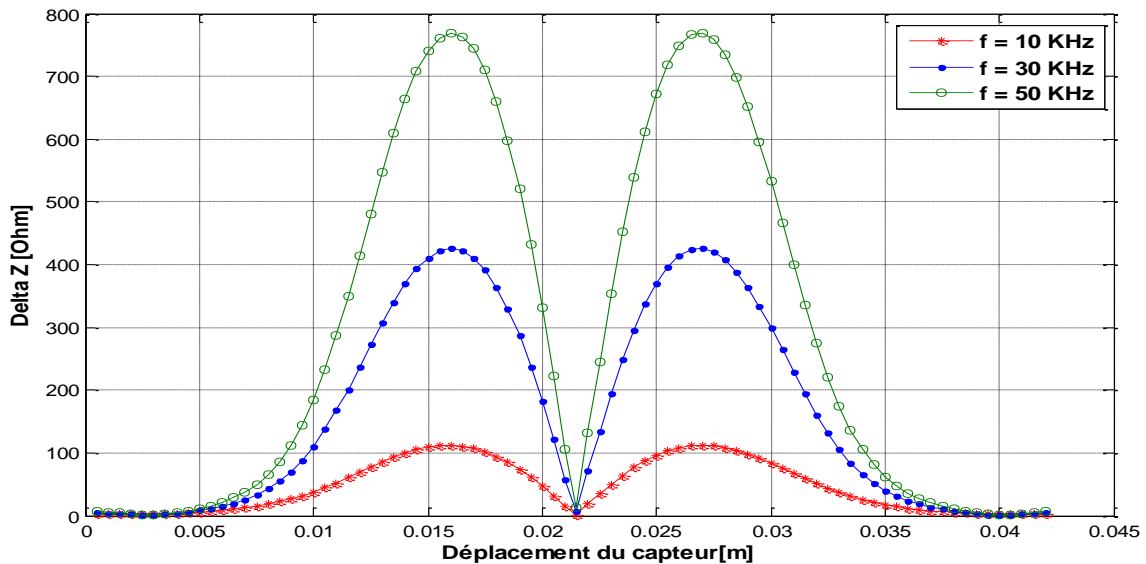


Figure III.10 : Variation de l'impédance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de fréquence

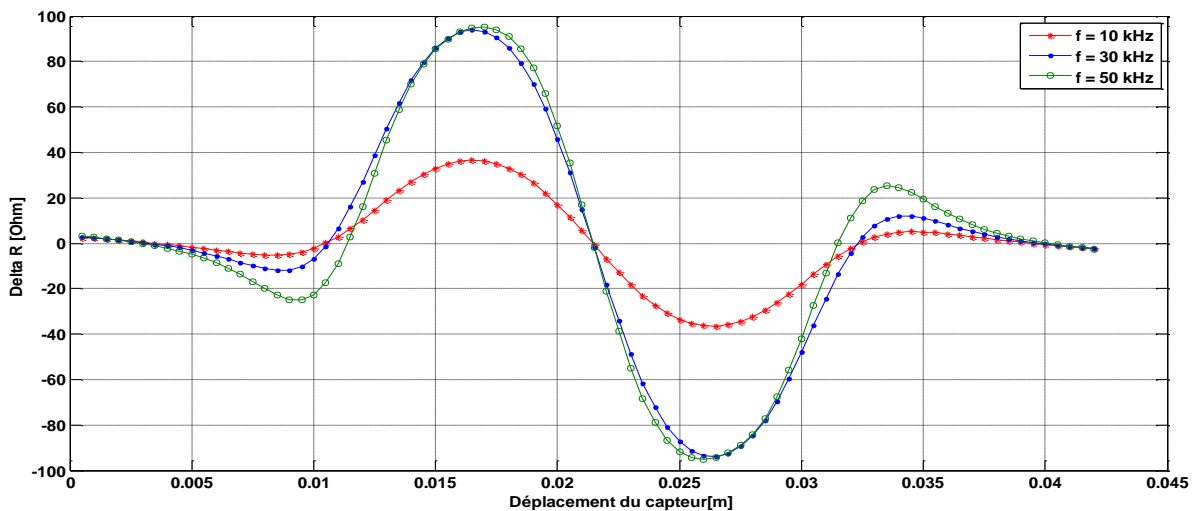
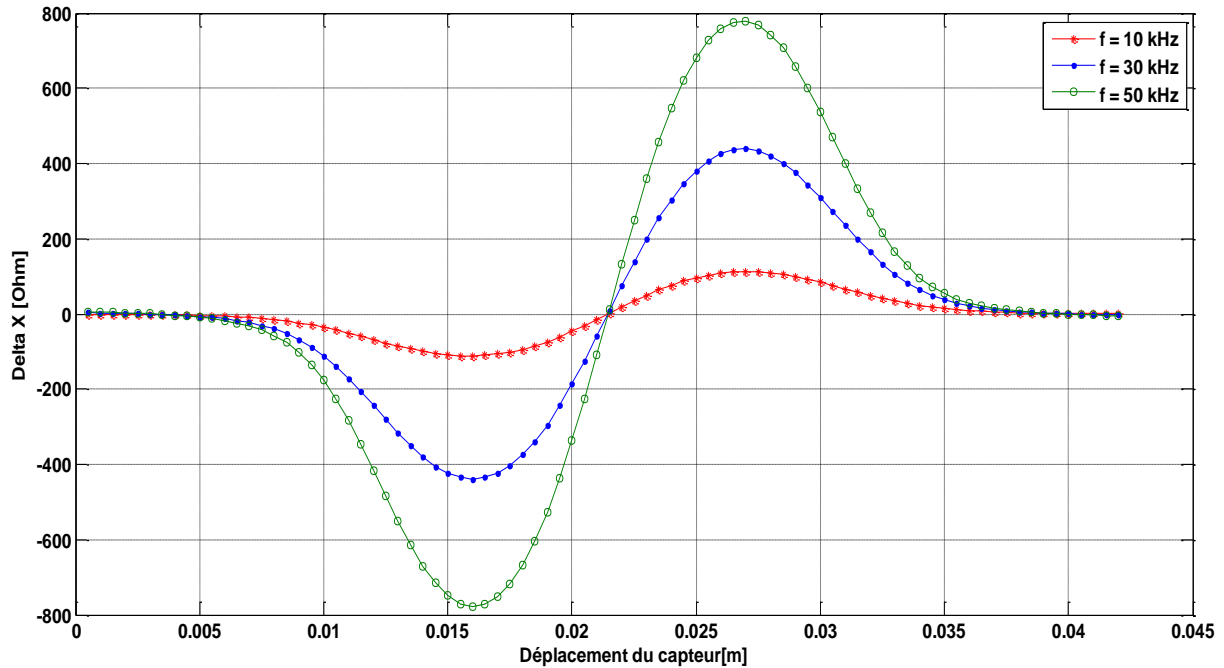


Figure III.11 : Variation de la résistance en fonction de déplacement de capteur pour différentes valeurs de fréquences



**Figure III.12 :** Variation de réactance en fonction du déplacement du capteur pour différentes valeurs de fréquence

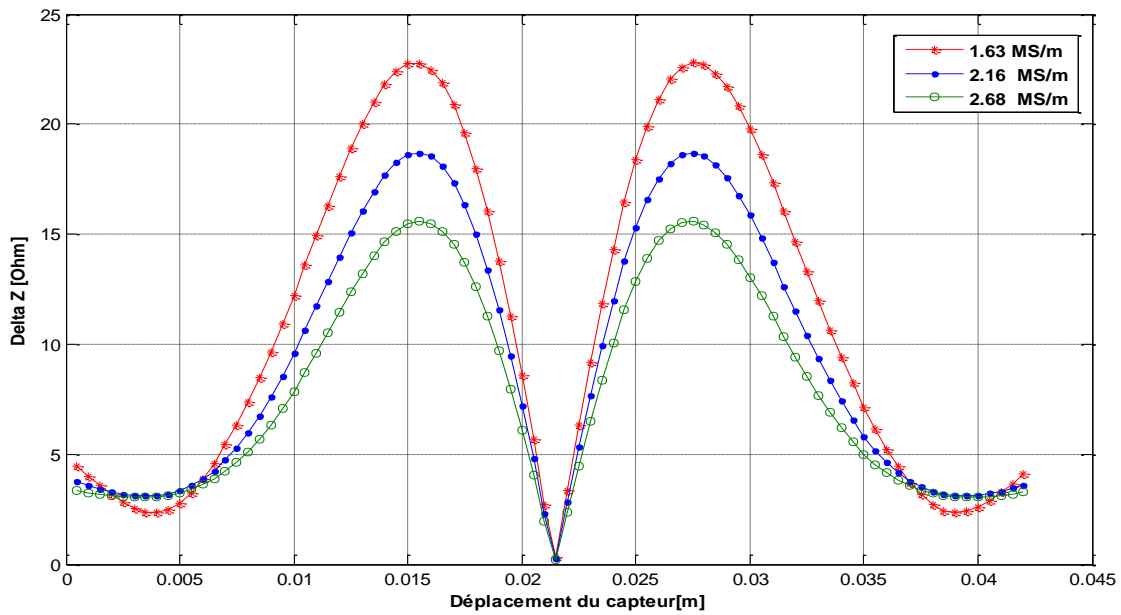
Comme nous pouvons voir sur les différentes figures (III.10, III.11, III.12) que l'impédance et ses composantes réelle et imaginaire augmentent avec la fréquence. En d'autres termes, une augmentation de la fréquence rend le capteur plus sensible à la détection des défauts externes

### III.7. Influence de la conductivité sur la sensibilité du capteur :

Pour une profondeur du défaut correspondant à 20% de l'épaisseur du tube, les figures ci-dessous illustrent la variation de l'impédance, la réactance et la résistance en fonction du déplacement du capteur, pour différentes valeurs de la conductivité : 1.63 MS/m, 2.16 MS/m et 2.68 MS/m, tout en maintenant une fréquence de 10 kHz.

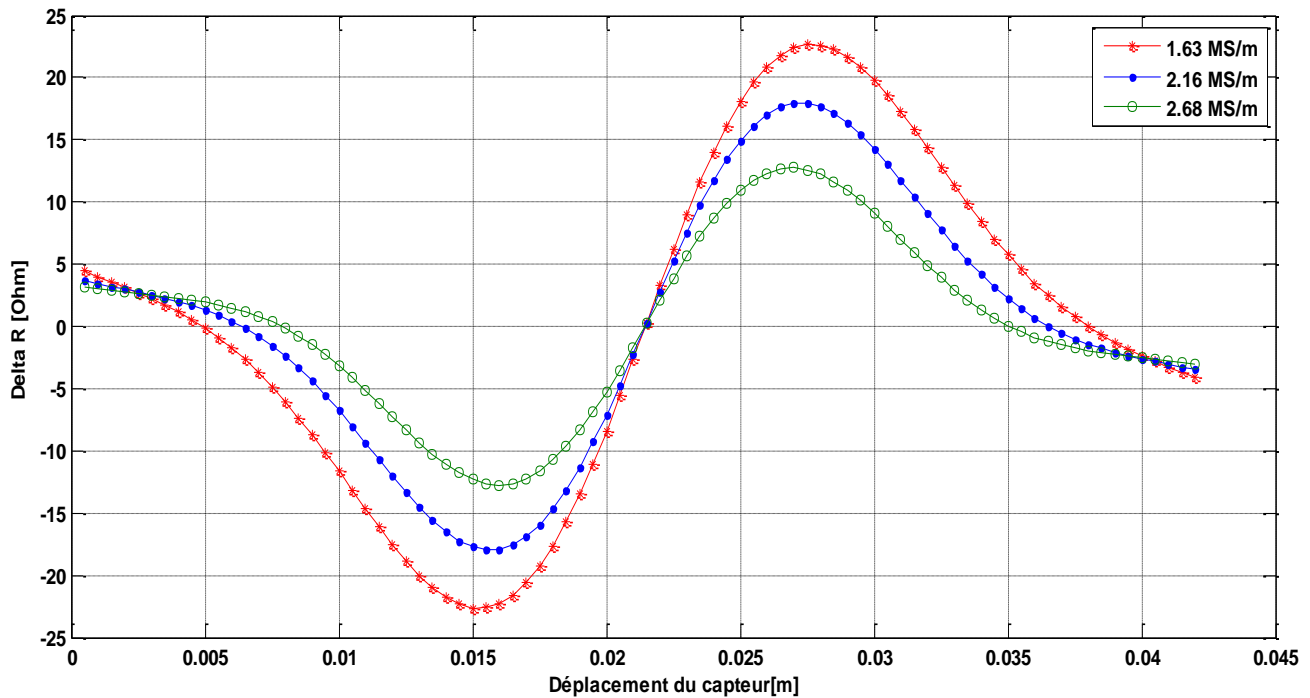
#### III.7.1. Défaut interne :

- La figure (III.13) représente la variation de l'impédance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de conductivité (1.63 MS/m, 2.16MS/m, 2.68MS/m)



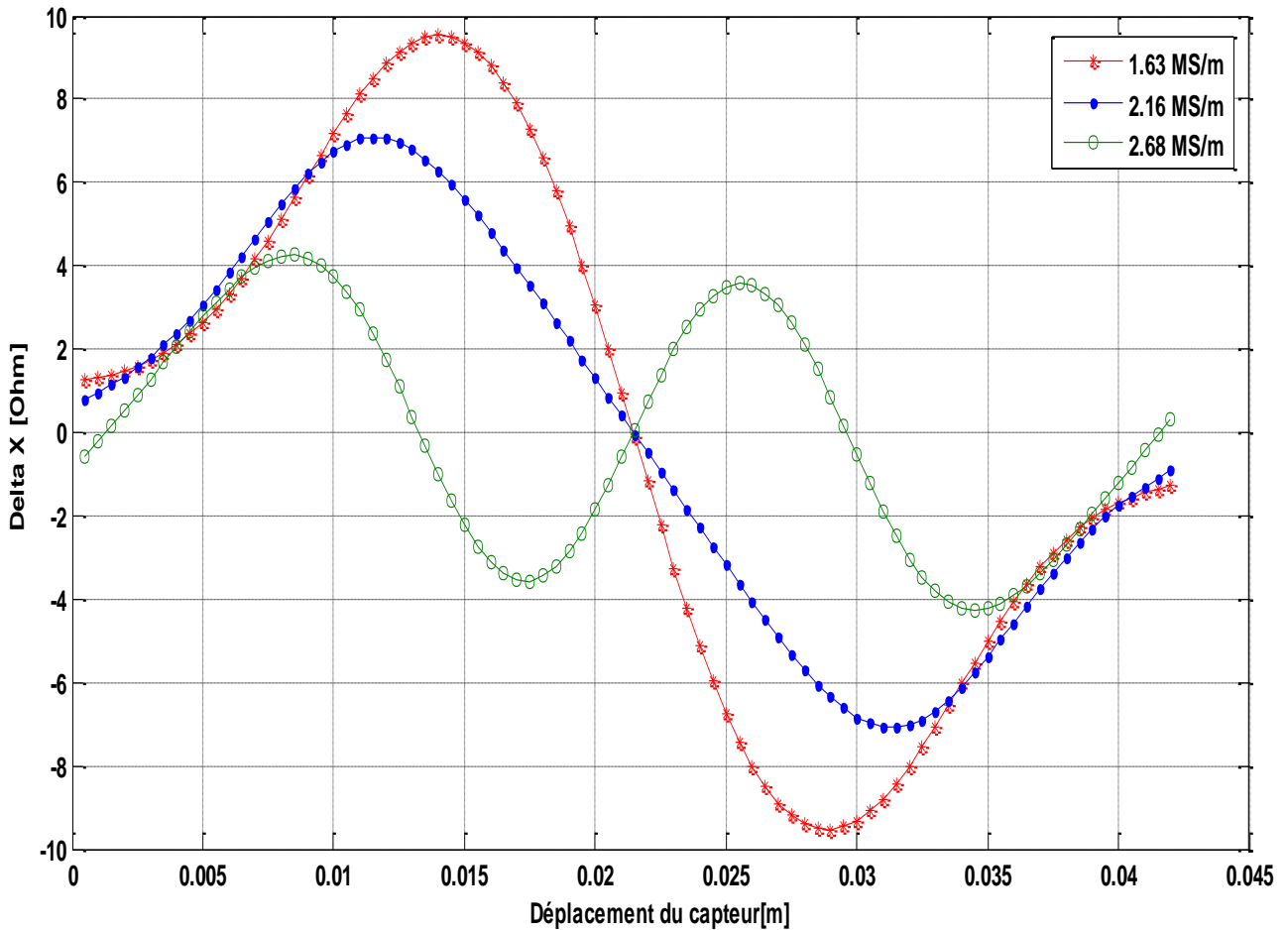
**Figure III.13 :** Variation de l'impédance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de conductivité à 10kHz

- La figure (III.14) représente la variation de la résistance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de conductivité (1.63 MS/m, 2.16MS/m, 2.68MS/m)



**Figure III.14 :** Variation de la résistance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de conductivité à 10 kHz

- La figure (III.15) représente la variation de la réactance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de conductivité (1.63 MS/m, 2.16MS/m, 2.68MS/m).

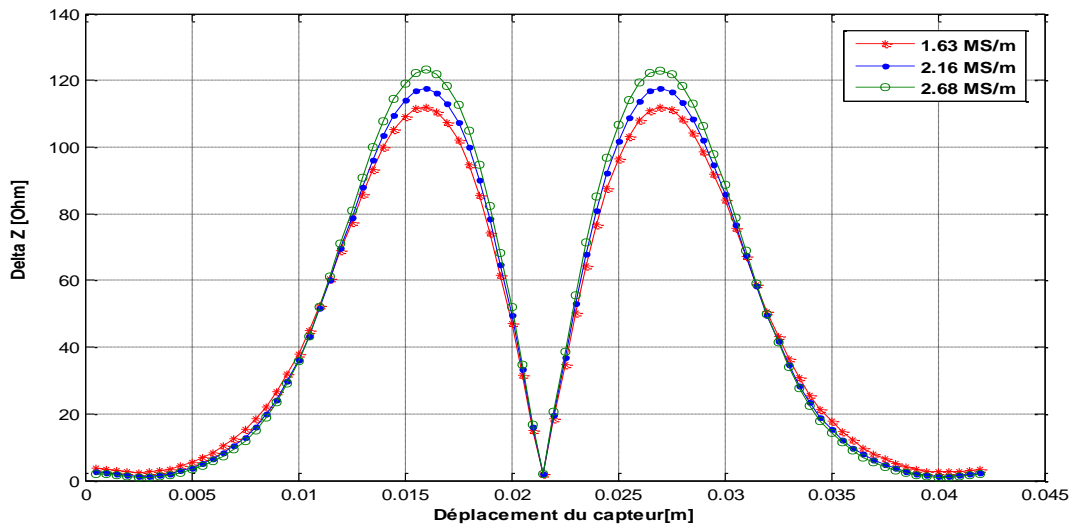


**Figure III.15 :** Variation de la réactance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de conductivité à 10kHz

D'après les résultats obtenus sur un défaut interne, on remarque que l'impédance du capteur est inversement proportionnelle à la conductivité du matériau, pour différentes valeurs de conductivité testées (1.63 MS/m, 2.16MS/m, 2.68MS/m). En effet, les valeurs maximales et minimales de l'impédance et ses composantes sont obtenues respectivement avec une conductivité de 1.63 MS/m et de 2.68MS/m

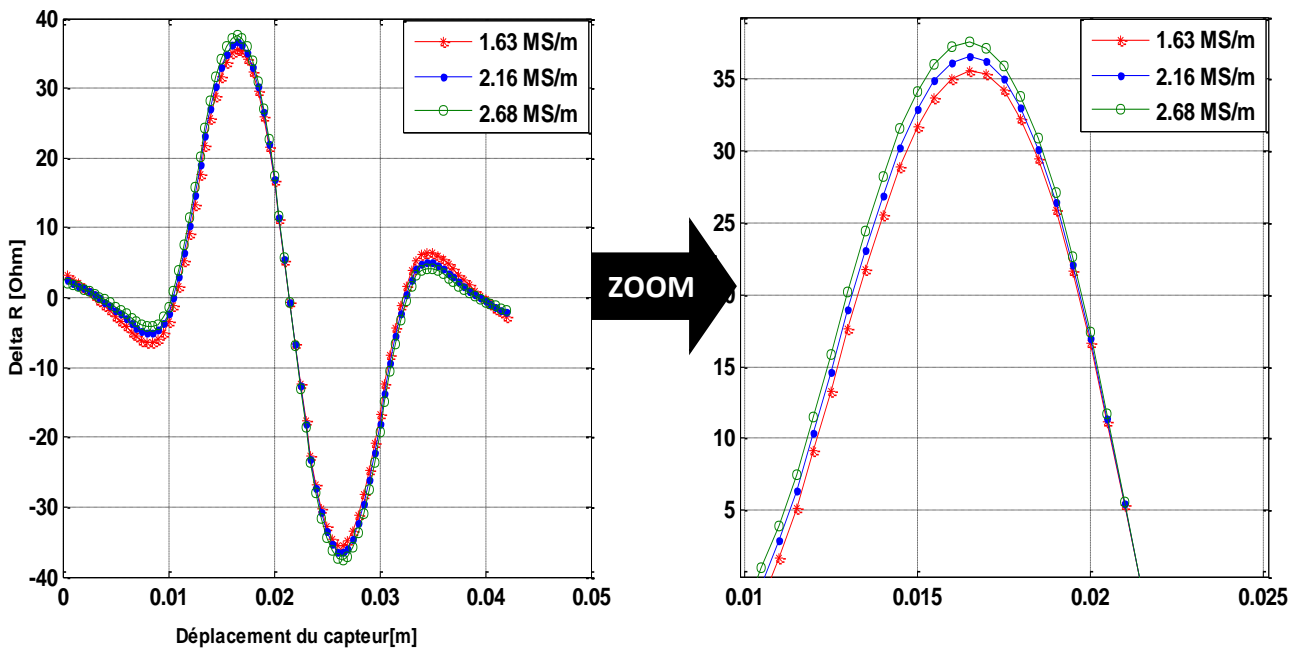
### III.7.2 : Défaut externe :

- La figure (III.16) illustre la variation de l'impédance en fonction du déplacement du capteur, pour trois valeurs de conductivité différentes : 1.63 MS/m, 2.16MS/m, 2.68MS/m



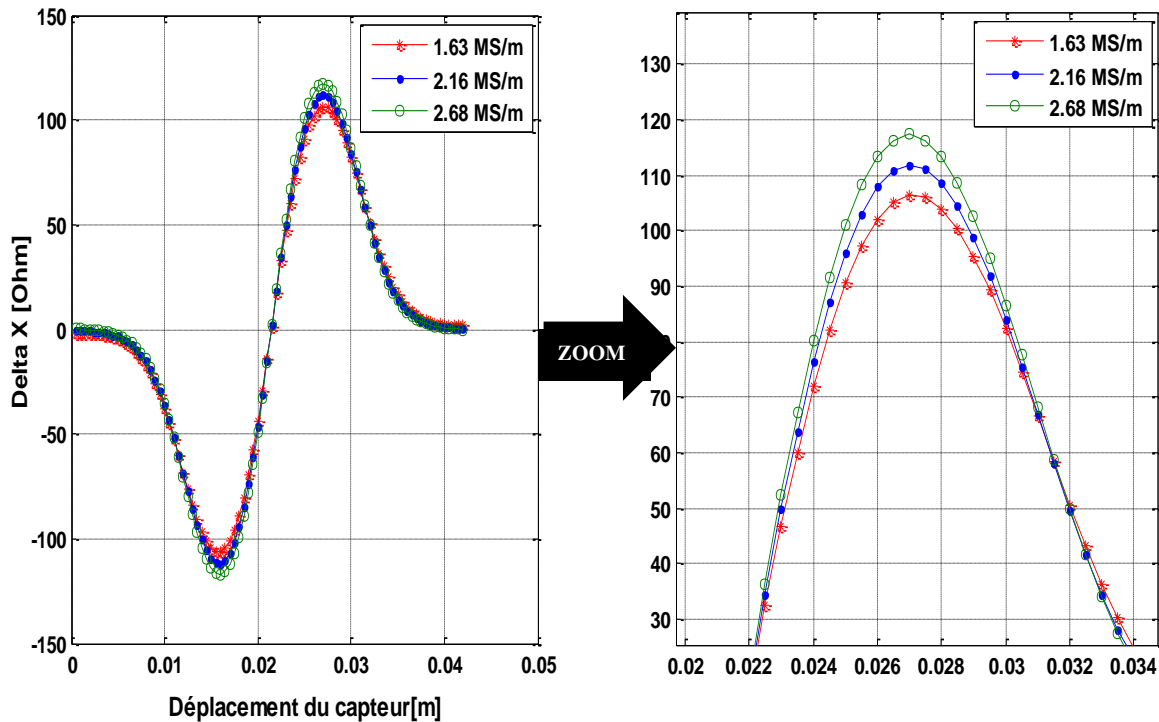
**Figure III.16 :** Variation de l'impédance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de conductivité à 10kHz

- La figure(III.17) illustre la variation de la résistance en fonction du déplacement du capteur, pour trois valeurs de conductivité différentes : 1.63 MS/m, 2.16MS/m, 2.68MS/m



**Figure III.17 :** Variation de la résistance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de conductivité à 10kHz

- La figure (III.18) illustre la variation de la réactance en fonction du déplacement du capteur, pour différentes valeurs de conductivité : 1.63 MS/m, 2.16MS/m, 2.68MS/m



**Figure III.18 :** Variation de la réactance en fonction du déplacement de capteur pour différentes valeurs de conductivité à 10kHz

Dans le cas d'un défaut externe, les figures (III.16 / III.17/ III.18) illustrent respectivement la variation de l'impédance et ses composantes réelles et imaginaire en fonction du déplacement du capteur, pour différentes valeurs de conductivités (1.63 MS/m, 2.16MS/m, 2.68MS/m). Dans les trois cas, on observe que ces grandeurs augmentent avec la conductivité. En d'autres termes, une élévation de la conductivité améliore la sensibilité du capteur à la détection des défauts externes.

### III.8. La différence entre un défaut interne et externe :

Les défauts internes et externes sont détectés différemment selon la fréquence et la conductivité. Le capteur est particulièrement sensible aux défauts internes lorsqu'on utilise de basse fréquence et que la conductivité du matériau est faible. En revanche, la détection de défaut externe est facilitée par l'utilisation de hautes fréquences et de matériaux à forte conductivité. Ce phénomène est justifié par la loi de la profondeur de pénétration (III.1)

- A une faible valeur de la conductivité, la profondeur de pénétration des courants de Foucault est importante, ce qui permet de détecter plus facilement le défaut interne
- A une grande valeur de conductivité, la profondeur de pénétration est faible, augmentant la sensibilité du capteur à détecter un défaut externe.

**III.9. Conclusion :**

L'objectif de ce chapitre est de faire une étude comparative sur la sensibilité du capteur à courant de Foucault à détecter la présence d'un défaut dans une pièce métallique pour différentes cas de figures : charge sans défaut, avec un défaut interne et avec un défaut externe. Les résultats de simulations sont obtenus en termes de la variation d'impédance ( $\Delta Z$ ) et ses composantes (réelle ( $\Delta R$ ) et imaginaire ( $\Delta X$ )).

Dans le premier cas nous avons analysé la sensibilité du capteur à discriminer le défaut interne d'un défaut externe. On effet la signature du défaut externe est plus marquée que le défaut interne.

Dans le deuxième cas nous sommes intéressés à l'effet de la fréquence sur la sensibilité du capteur à détecter la présence d'un défaut dans la pièce. Pour ce faire nous avons choisi trois différentes valeurs (50 kHz, 30 kHz, 10 kHz). Nous avons constaté que, dans le cas d'un défaut interne, la variation de l'impédance et ses composantes diminuent avec l'augmentation de la fréquence. Contrairement au défaut externe, une fréquence plus élevée améliore la sensibilité du capteur à détecter ce type de défaut.

Nous nous sommes également intéressés à l'effet de la conductivité de la charge sur la sensibilité du capteur à détecter la présence d'un défaut interne ou externe sur la pièce à inspecter. Les résultats d'investigations montrent que la variation de l'impédance et ses composantes (réelle et imaginaire), dans le cas d'un défaut interne, diminuent avec l'augmentation de la conductivité. Tandis que la variation de cette impédance et ses composantes augmente en présence d'un défaut externe.

# *Conclusion générale*

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale :

Dans ce travail nous avons étudié le comportement électromagnétique d'un capteur différentiel à courant de Foucault à détecter deux différents types de défauts internes et externes dans une pièce métallique. L'évaluation de la sensibilité du capteur à détecter ces défauts est obtenue en termes de la signature de défaut (variation de l'impédance et ses composantes réelle et imaginaire) en fonction de la position du défaut sur la surface de la pièce.

Pour évaluer les performances de ce capteur à détecter la présence des défauts (interne et externe) nous avons pris en considération deux paramètres essentiels ; l'effet de la fréquence d'excitation et la conductivité de la pièce à étudier sur la sensibilité du capteur.

Pour ce faire un code de calcul circuits couplés a été implémenté sous MATLAB. Les résultats d'investigations ont montré que:

- ✓ Lors d'une confrontation des résultats obtenus avec un défaut interne et un défaut externe introduits dans la charge à une profondeur de 20% de l'épaisseur de la charge, à une fréquence de 10kHz, nous avons constaté que : la signature du défaut en termes d'impédance, résistance et réactance est significativement plus marquée en présence d'un défaut externe. Cela s'explique par la proximité du capteur par rapport au défaut externe, qui renforce l'interaction électromagnétique et améliore la sensibilité de détection.
  
- ✓ L'analyse de l'effet de la variation de la fréquence pour différentes valeurs (50 kHz, 30 kHz, 10 kHz) sur la sensibilité du capteur à détecter le défaut à montré que :  
La signature du défaut interne en termes de l'impédance et ses composantes (réelles et imaginaire) diminue avec l'augmentation de la fréquence, la valeur maximale est obtenue avec une fréquence de 10 kHz. Par contre dans le cas d'un défaut externe la sensibilité du capteur est plus remarquable en augmentant la fréquence. En effet, les valeurs maximales de l'impédance et ses composantes réelle et imaginaire sont respectivement :  $\Delta z = 781\Omega$ ,  $\Delta R = 97\Omega$  et  $\Delta x = 786\Omega$  obtenues à une fréquence de 50kHz.

# Conclusion générale

---

- ✓ L'analyse de l'effet de la variation de la conductivité pour différentes valeurs (1,63 MS/m, 2,16 MS/m, 2,68 MS/m) a permis d'observer l'évolution de l'impédance et de ses composantes (réelle et imaginaire). Les résultats ont montré qu'une faible conductivité favorise la détection des défauts internes, tandis qu'une conductivité plus élevée améliore la détection des défauts externes.

Nous pouvons dire que le choix de la fréquence et de la conductivité a un effet important sur la détection et la discrimination entre la présence d'un défaut interne ou externe.

En conclusion, notre étude a prouvé l'efficacité de calcul circuit couplé sur la détection la discrimination entre la présence d'un défaut interne et externe introduit dans la charge. En effet, la méthode représente un temps de calcul réduit avec une meilleure précision.

# *Bibliographie*

- [1] F. THOLLON, « Conception et optimisation de capteurs à courants de Foucault pour la détection de défaut profonds dans des matériaux amagnétiques », Thèse, l'école doctorale de Lyon des sciences pour l'ingénieur électronique, électrotechnique, automatique, 1995.
- [2] A. KHERCHAOU, K. SABER BACHA, « Modélisation semi-analytique d'un capteur à courant de Foucault : application détection de défauts », Mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2022.
- [3] K. ZIANE, « Modélisation d'un capteur différentiel à courant de Foucault pour la détection des défauts dans des matériaux magnétiques », Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2024.
- [4] A. LAKHDARI, «étude et modalisation de capteurs en CND par courant de Foucault : application à la détection des fissures », Diplôme de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, 2011.
- [5] Site internet, « Contrôle Non Destructif », [www.Techno-Science.net](http://www.Techno-Science.net).
- [6] D.YD, « Cours\_ Instrumentation\_et\_Mesures », 1<sup>ère</sup> année Master Energétique, Université de Mila, 2022.
- [7] R. CHETHOUTHI, A. AMRI, « Maintenance industrielle : pipe de transport des hydrocarbures », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 26 juin 2022.
- [8] Dj. BENNACER, « Etude des phénomènes d'interfaces verticales de écoulements diphasiques dans un pipeline - Cas des Carburants », Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [9] PAVEL PETERKA, « Système de diagnostic des pipelines », Article paru dans Metalurgija, Université Technique de Kosice, Avril 2006.
- [10] 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.
- [11] COFREND, «cofrend - Les essais non destructifs» [Online].Available: [https://www.cofrend.com/jcms/mdc\\_110743/fr/les-essais-nondestructif.cid=mhe\\_5012](https://www.cofrend.com/jcms/mdc_110743/fr/les-essais-nondestructif.cid=mhe_5012). [Accessed: 07- Mar- 2019].
- [12] E. BOUABDALLAH, M. MATALLAH, « Réalisation d'une maquette didactique pour les mesures CND «Courant Foucault », Mémoire, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022.
- [13] B. DELABRE, « Développement de capteurs flexibles à courants de Foucault : applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique », thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2016.
- [14] Y. CHAOUA, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configuration de contrôle non destructif par courant de Foucault », Thèse de Doctorat, Spécialité Physique, Ecole Doctorale, Université de Paris-Sud 11,2009.
- [15] L. OUKHELLOU, « Para métrisation et Classification de signaux en Contrôle Non Destructif. Application à la Reconnaissance des Défauts de Rails par Courant de Foucault », Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 1997.
- [16] Site web: <https://fr.linkedin.com/pulse/importance-de-la-mod>.

[17] N. BENHADDA, « Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault », Mémoire de Magistère En Electrotechnique, Université El Hadj Lakhdar Batna, 2006.

[18] M. NASSIMA, « étude et réalisation d'un système multi capteurs destiné au diagnostic des matériaux conducteurs. », mémoire de fin d'étude, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.

[19] M. MEZIANI, « Contribution à la modélisation analytique-numérique des transformateurs de puissance », Mémoire de Magister, spécialité Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

[20] S. ZERGUINI, « Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault », Thèse de Doctorat En Science, Université de Constantine.