



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOHAMED

BOUDIAF - M'SILA



FACULTE : Science et Technologie

DOMAINE : Génie Electrique

FILIERE : Electromécanique

OPTION : Maintenance Industrielle

N° ORDRE : 01

**Projet de fin d'études Pour l'obtention du
Diplôme de Master Académique :**

**Simulation et Expérimentation d'un Système de CND par
Courants de Foucault pour la détection de fissures**

Préparé par :

- *MANSOUR Taha Mahmoud*

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Etablissement	Qualité
Prof. ZINE Ghemari	Univ.de M'sila	Examineur
MCA. DEFDAF Mabrouk	Univ.de M'sila	Examineur
Prof. BOUCHALA Tarik	Univ.de M'sila	Encadreur
Mr.ABOURA Abderrahman	Univ.de M'sila	Co- Encadreur

Année universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement :

*Nous tenons à remercier du fond du cœur, avant tout, le ALLAH, qui
Nous a donné la volonté, le courage et la continuité dans nos études Et
nous a gardé jusqu'à l'atteinte de ce niveau.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dr. ABOURA
Abderrahmane et Pr. Bouchaala Tarik, enseignant à l'Université
Mohamed Boudiaf - M'Sila, pour m'avoir encadré tout au long de ce
travail. Son soutien, ses conseils avisés et sa disponibilité ont grandement
contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie également l'ensemble des enseignants du Master 2
Maintenance Industrielle pour la qualité de l'enseignement reçu au cours de
ma formation.*

*Mes remerciements vont aussi à mes collègues et amis pour leur aide, leurs
encouragements et les échanges enrichissants que nous avons partagés.*

*Enfin, je dédie ce travail à ma famille, en particulier à mes parents, pour
leur soutien moral constant, leurs sacrifices et leur confiance en moi tout au
long de mon parcours académique.*

Dédicace

À mes chers parents,

Pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices et votre soutien constant.

Vous êtes ma source d'inspiration et de motivation.

À mes frères et sœurs,

Pour votre présence réconfortante et vos encouragements tout au long de mon parcours.

À mes amis fidèles,

Pour votre aide précieuse, vos conseils et les moments partagés durant ces années d'études.

Je vous dédie ce travail avec toute ma reconnaissance et mon affection.

Nous souhaitons également dédier ce travail à tous Mes amis et tout le département Génie Électrique .

Sommaire :

Introduction Général.....	13
1.1. Introduction	15
1.2. Techniques du Contrôle non destructif	16
1.2.1. Contrôle Visuel	16
1.2.2. Ressuage (ou Essai par liquide pénétrant)	16
1.2.3. Magnétoscopie	17
1.2.4. Radiographie	18
1.2.5. Ultrasons	19
1.2.6. Thermographie	19
1.3. Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault.....	20
1.3.1. Principe.....	20
1.3.2. Effet de peau	22
1.3.3. Objectifs du CND-CF.....	23
1.4. Avantages et limites du CND par courant de Foucault	24
1.4.1. Avantages du CND par courant de Foucault.....	24
1.4.2. Limites du Contrôle par Courants de Foucault (CF)	24
1.5. Classification des Capteurs en Courants de Foucault	25
1.5.1. Selon la position.....	26
1.5.2. Selon la fonction du capteur.....	29
1.5.3. Selon le mode.....	30
1.6. Les capteurs multiéléments à courants de Foucault	31
1.6.1. Capteurs multiéléments	31
1.6.2. Déplacement et couverture	31
1.6.3. Motif (ou topologie)	32
1.6.4. Les paramètres définissant un capteur multiélément	32
1.7. Avantages et inconvénients du capteur multiélément	34
1.8. Conclusion.....	34
2.1. Introduction	36
2.2. Modélisation de CND par CF.....	37
2.2.1. Modélisation du dispositif :.....	37
2.2.2. Modélisation mathématique du système	38

2.3.	Équations de Maxwell	39
2.3.1.	Historique :	39
2.4.	Relations Constitutives des Matériaux en Électromagnétisme :	40
2.4.1.	Intérêt de la modélisation.....	40
2.1.	Conditions aux limites	41
2.4.2.	Conditions de continuité	41
2.4.3.	Conditions de jauge	43
2.4.4.	Hypothèses et simplifications pour la résolution des équations	44
2.5.	Formulations des équations de Maxwell dans le cadre du CND-CF.....	45
2.5.1.	Formulation basée sur le champ électrique $E^{\vec{}}$	45
2.5.2.	Formulation en potentiels $A^{\vec{}}$ (formulation A-V).....	45
2.5.3.	Formulation basée sur le champ magnétique $H^{\vec{}}$	46
2.5.4.	Formulation en potentiels $T^{\vec{}} - \Phi$ (formulation T- Φ) :.....	46
2.5.5.	Comparaison entre les formulations	46
2.6.	Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles (EDP)	47
2.7.	Principe de la méthode variationnelle	51
2.8.	Méthodes dérivées de la formulation des résidus pondérés.....	52
2.9.	Calcul de l'impédance du capteur.....	53
2.10.	Calcul de l'impédance à partir de l'énergie magnétique et des pertes Joule.....	53
2.11.	Conclusion	55
3.1.	Introduction	58
3.2.	Modélisation géométrique sous COMSOL Multiphysics 6.2.....	59
3.2.1.	Description de la géométrie du système capteur	59
3.2.2.	Configuration spatiale du capteur et de la cible	60
3.2.3.	Géométrie 3D et maillage	61
3.3.	Composantes de l'impédance du capteur	61
3.4.	Présentation du dispositif pratique	67
3.4.1.	Description du matériel utilisé	68
	Appareil de mesure : SOFRANEL :	68
	Sonde utilisée :	68
	Méthodologie expérimentale.....	69
	Paramètres standards utilisés :	69
3.5.	Analyse des résultats obtenus	69
3.5.1.	Cas de l'Al	69
3.5.2.	Cas de l'Au	70

3.5.3	Cas de Ti.....	78
3.6.	Conclusion générale sur l'analyse des résultats.....	73
	Conclusion Général	74
	Résumé	75
	Références.....	76

Abréviation :

CND :	Contrôle Non Destructif.
CF :	Courants de Foucault.
CND-CF :	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.
MEF :	Méthode des éléments finis.
3D:	Tri-dimensional.
2D :	Two-dimensional.
Wc :	Énergie cinétique.
Wp :	Énergie potentielle
MIV :	Méthode des intégrales de volume
MIS :	Méthode des intégrales de surface
MIF :	Méthode des intégrales de frontières
MDF :	Méthode des différences finies
MVF :	Méthode des volumes finis
MEF :	Méthode des éléments finis

Notations et Symboles :

Ω :	Domaine d'étude.
J_s :	Densité de courant électrique dans la source.
Γ :	Les frontières qui enveloppent le domaine d'étude.
σ :	Conductivité électrique.
μ_0 :	Perméabilité magnétique absolue du vide.
\vec{H} :	Champ magnétique [A/m].
\vec{D} :	Induction électrique [C/m ²]
\vec{B} :	Induction magnétique [T].
j :	Densité de courant [A/m ²].

ρ : Densité volumique des charges électriques [C/m³].

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

μ_0 : Perméabilité magnétique = $4\pi 10^{-7}$ [H/m].

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu [H/m].

σ : Conductivité électrique [S/m].

ϵ : Permittivité électrique [F/m].

S_0 : Constante diélectrique du vide = $8.85 \cdot 10^{-12}$ [F/m].

S_r : Permittivité électrique relative du milieu [F/m].

$\vec{\rho}_s$: La densité surfacique de charge.

\vec{J}_s : La densité surfacique de courant.

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

L : La fonction de Lagrange

n : nombre de nœud dans le domaine d'étude.

A : inconnue au nœud n du domaine.

∇_i : Fonction de pondération ou de projection.

U : La tension d'alimentation.

I : Le courant traversant la bobine.

L_d : La longueur du défaut.

W_d : La largeur du défaut.

P_d : La profondeur du défaut.

P : Le pas du déplacement du capteur.

LISTE DES FIGURES :

Chapitre I : Généralités sur le contrôle non destructif

FIGURE I-1 L'EXAMEN VISUEL.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE I-2 PRINCIPE DE LA METHODE RESSUAGE.....	17
FIGURE I-3. PRINCIPE DU CND PAR MAGNETOSCOPIE.....	18
FIGURE I-4 IMPRESSION SUR LE FILM RADIO GRAPHIQUE DE L'IMAGE DU DEFAUT.....	18
FIGURE I-5 PRINCIPE DES ULTRASONS.....	19
FIGURE I-6 PRINCIPE DU CND PAR THERMOGRAPHIE.....	19
FIGURE I-7 PRINCIPE DU CND PAR COURANT DE FOUCAULT	21
FIGURE I-8 REPARTITION DES COURANTS DE FOUCAULT SOUS UNE SURFACE PLANE	22
FIGURE I-10 DETECTION D'UNE SONDE EN CERCLANT DIFFERENTIELLE	23
FIGURE I-9 OBJECTIF DU CND PAR CF.....	23
FIGURE I-11 PRINCIPE DE LA DETECTION PAR LE COURANT DE FOUCAULT. ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.	
FIGURE I-13 SONDE INTERNE.	26
FIGURE I-14 SONDE EN CERCLANT	27
FIGURE I-15 BOBINE PONCTUELLE (PALPEUR).....	27
FIGURE I-16 BOBINE PLATE.....	28
FIGURE I-17 SONDE INTERNE TOURNANTE	28
FIGURE I-18 CAPTEUR A DOUBLE FONCTION	29
FIGURE I-19 CAPTEUR A FONCTIONS SEPARÉES	29
FIGURE I-20 CAPTEUR ABSOLUE EN MODE COMPENSE.....	30
FIGURE I-21 CAPTEUR EN MODE DIFFERENTIEL	30
FIGURE I-22 PERTURBATION DU SIGNAL D'ALIMENTATION	31
FIGURE I-23 REPRESENTATION SCHEMATISE DE BALAYAGE EN PEIGNE ET LINEAIRE OBTENU RESPECTIVEMENT AVEC UN ELEMENT SIMPLE ET UN CAPTEUR MULTIELEMENTS	32
FIGURE I-24 SCHEMATISATION D'UN CAPTEUR CFM DEFINISSANT LA COUVERTURE ET LA RESOLUTION	33
FIGURE I-25 UNIFORMITE DE SIGNAL CF SUR UN MONTAGE MULTIELEMENT	33

chapitre II: Modélisation sur un système CND par CF

Figure 2-1 Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault.....	43
Figure 2-2. James Clerk Maxwell 1831-1879.....	45
Figure 2-3 Surface Σ séparant deux milieux Ω_1 et Ω_2	49
Figure 2-4 Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF	56

CHAPITRE III: Applications et Validations

Figure 3. 1. Interface utilisateur de COMSOL 6.2.....	63
Figure 3. 2. Trois défauts de différentes profondeurs sur des plaque Al, Au et Ti	64.
Figure 3.3 Maillage du dispositif en 3D.....	65.
Figure 3.4 Composantes de l'impédance et courbes de Lissajous pour une plaque en AL.....	68
Figure 3.5 Composantes de l'impédance et courbes de Lissajous pour une plaque en Ti.....	70
Figure 3.6 Composantes de l'impédance et courbes de Lissajous pour une plaque en AUS.....	72
Figure 3.7 SOFRANEL Appareil de mesure.....	73
Figure 3.8 Pencil (probe) la sonde.....	74
Figure 3.10 Plaque d'essai.....	74
Figure 3.9 Signal obtenu lors du balayage de la plaque en aluminium.....	80
Figure 3.10 Signal obtenu lors du balayage de la plaque en austénite.....	81
Figure 3.11 Signal obtenu lors du balayage de la plaque en Titan.....	82

Liste De Tableau :

TABLEAU 1. COMPARAISON ENTRE LES FORMULATIONS LES PLUS POPULAIRES DANS LE CND-CF.....	46
TABLEAU 2 . CARACTERISTIQUE DU CAPTEUR	60
TABLEAU 3 CARACTERISTIQUE DES PLAQUES.	60
TABLEAU 4 . PROFONDEUR P1, P2 ET P3 DES DEFAUTS ARTIFICIELS DANS CHAQUE PLAQUE.	60

Introduction Générale

Dans un contexte industriel de plus en plus exigeant en matière de qualité, de fiabilité et de sécurité, le **contrôle non destructif (CND)** s'impose comme un outil fondamental pour l'évaluation des matériaux et des structures sans compromettre leur intégrité. Ces techniques permettent la détection des défauts internes ou de surface dans divers matériaux, tout en assurant la continuité de leur usage, ce qui est crucial notamment dans les secteurs de l'aéronautique, du nucléaire, de l'automobile et du ferroviaire, [1]

Parmi les méthodes CND disponibles, le **contrôle par courants de Foucault (CF)** se distingue comme étant particulièrement adapté à l'inspection des matériaux conducteurs. Il repose sur l'induction de courants électriques de faible profondeur à l'intérieur du matériau, permettant ainsi de détecter des anomalies de surface ou de subsurface. Cette méthode présente plusieurs avantages, dont la rapidité de mise en œuvre, la possibilité d'automatisation, ainsi qu'une grande sensibilité aux variations de conductivité ou de perméabilité magnétique [2]

Ce mémoire est constitué de trois chapitres

Le premier chapitre est consacré à une vue d'ensemble des techniques de contrôle non destructif, avec une analyse détaillée de la méthode CF, ses principes physiques, ses avantages, ses limites et les différents types de capteurs utilisés.

Dans le deuxième chapitre une **modélisation mathématique rigoureuse** est développée en s'appuyant sur les équations de **Maxwell**. Diverses approches de résolution sont discutées, notamment les méthodes numériques telles que la **méthode des éléments finis (MEF)**, largement utilisée pour simuler des phénomènes électromagnétiques complexes. Ces modèles permettent de simuler le comportement des courants de Foucault dans différents scénarios, en tenant compte des propriétés du matériau, de la géométrie du capteur et de la configuration expérimentale.

Enfin, le dernier chapitre du mémoire est dédié à la mise en œuvre pratique de ces concepts à travers une **modélisation sous le logiciel COMSOL Multiphysics** et une **expérimentation réelle** à l'aide de l'appareil **Phasec 2d** de la société SOFRANEL. Une configuration spécifique de capteur et d'échantillon a été définie, et plusieurs tests ont été réalisés afin de comparer les résultats issus de la **simulation numérique** et ceux obtenus **expérimentalement**. Cette comparaison, qui constitue un point central de l'étude, a révélé une **concordance remarquable entre les deux approches**, confirmant ainsi la fiabilité des modèles numériques élaborés.

Chapitre 01 :

Généralités sur Contrôle Non Destructif

1.1. Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) désigne l'ensemble des techniques physiques utilisées pour évaluer l'état des matériaux, des composants ou des assemblages sans compromettre leur fonctionnalité future. L'objectif principal du CND est de détecter les défauts présents dans la structure d'un produit sans l'endommager.

Les méthodes de CND varient en complexité. L'inspection visuelle, par exemple, constitue la technique la plus simple. Lorsqu'il s'agit d'identifier des défauts de surface non visibles à l'œil nu, on peut recourir à des techniques telles que les essais par liquide pénétrant ou les tests par particules magnétiques. Si ces inspections révèlent des défauts majeurs en surface, il devient souvent inutile de procéder à des analyses internes plus complexes comme les examens par ultrasons ou par radiographie.

Parmi les méthodes les plus fréquemment utilisées, on retrouve l'inspection visuelle ou optique, les tests par pénétrants, les essais magnétiques, les contrôles par courants de Foucault, la radiographie et les ultrasons. D'autres techniques, plus spécifiques et donc moins répandues, incluent la radiographie neutronique, l'émission acoustique, les tests thermiques et infrarouges, la détection de contraintes, les méthodes par micro-ondes, les essais d'étanchéité, l'holographie, entre autres.^[3]^[4]

Les techniques de CND sont nombreuses. Citons :

- Le ressuage
- La magnétoscopie
- Les courants de Foucault
- Les ultrasons
- La radiographie

Auxquelles il faut ajouter l'émission acoustique (en plein développement), la tomographie et la neutronographie. Certains classent également la thermographie, l'holographie, le contrôle d'étanchéité et l'analyse de signature mécanique parmi les techniques de CND.

- Les défauts **surfacciques** sont les plus problématiques sur le plan technologique. Ils incluent les criques, les fissures, les piqures, les craquelures pouvant provoquer à terme la rupture de la pièce, ou d'*aspect*, c'est à dire la variation de paramètres géométriques et/ou physiques de la pièce tels que sa rugosité, son épaisseur, l'homogénéité de la surface, qui rendent la pièce inutilisable.

- Les défauts **internes** sont des hétérogénéités de nature, forme et dimensions variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Ils sont susceptibles d'affecter la santé de la pièce et peuvent se présenter sous la forme d'une crique interne, des porosités, des soufflures, d'inclusions diverses. ^[6]

-Les techniques développées se différencient essentiellement par le type d'onde utilisé pour sonder le matériau, par exemple les méthodes ultrasons, les courants de Foucault, les rayons X ou la thermographie infrarouge. Quelle que soit la méthode, les objectifs sont les mêmes : la fiabilité de l'examen, la reproductibilité, la localisation des défauts, leur caractérisation et classement.

1.2. Techniques du Contrôle non destructif

Les techniques de CND sont diverses, et le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature de matériau, le forme de la pièce ...).

Parmi les techniques de contrôle non-destructif les plus utilisées on distingue, les techniques de ressuage, examen Visual, la magnétoscopie, la radiographie, la thermographie, l'ultrason et les courants de Foucault.

1.2.1. Contrôle Visuel

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple est le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures qui justifient l'écllosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique (contrôle optique automatique ou assisté, techniques optiques particulières.

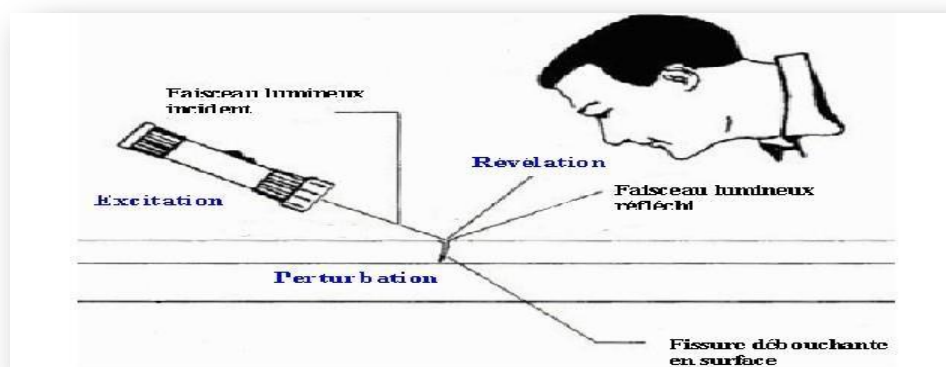


Figure 1-1 L'examen visuel.

1.2.2. Ressuage (ou Essai par liquide pénétrant)

Le ressuage est une méthode complémentaire à l'examen visuel. Elle permet de révéler des défauts de surface invisibles à l'œil nu à l'aide d'un liquide coloré ou fluorescent.

Étapes :

- Nettoyage soigneux de la surface.
- Application du liquide pénétrant (fluorescent ou coloré).
 - Élimination de l'excédent.
 - Application d'un révélateur absorbant.
 - Observation des indications colorées ou fluorescentes.
- Détection fine des fissures et porosités Moins adapté aux formes complexes, certains produits sont polluants.

On dit alors que le révélateur fait "ressuer" le pénétrant. (Voir la figure 1.1). Ces indications sont alors visibles à l'œil nu. Dans certaines industries, on utilise un pénétrant fluorescent qui est révélé

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

Des limitations peuvent apparaître avec cette technique. Ainsi, elle est difficile à automatiser et limitée à l'inspection de pièces de géométrie simple. Certains produits de ressuage présentent par ailleurs des désagréments vis-à-vis de l'environnement, de la sécurité et de l'hygiène du travail. Il arrive également que des fissures soient bouchées par des produits mal nettoyables et qu'elles soient donc invisibles. [5][6]

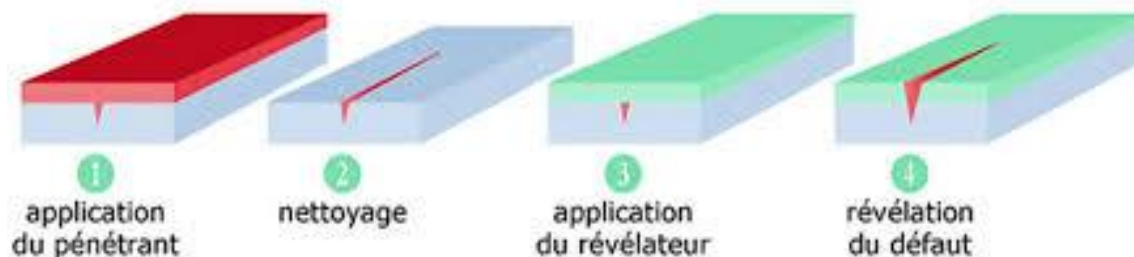


Figure 1-2 principe de la méthode ressuage.

1.2.3. Magnétoscopie

La magnétoscopie est une technique destinée spécialement aux pièces ferromagnétiques (fer, fonte ...), elle permet de détecter les défauts superficiels, débouchant en surface, ou très proche de la surface de la pièce. Le principe de cette technique est simple : il consiste à créer un champ magnétique intense à l'intérieur de la pièce. Une poudre magnétique est uniformément répartie par la suite sur la surface de la pièce. Lors de la présence d'un défaut sur son chemin, le champ magnétique est dévié et son intensité augmente en surface.

Le champ crée une fuite qui attire les particules de poudre magnétique, signalant ainsi la présence d'un défaut. ⁸

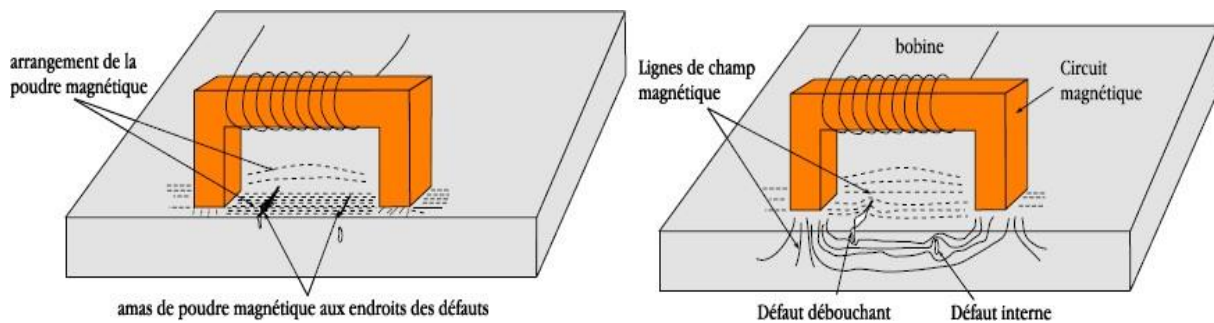


Figure 1-3. Principe du CND par magnétoscopie [35]

1.2.4. Radiographie

La radiographie est un examen de l'état interne d'une structure. Elle consiste à parcourir la structure par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon x , ou γ), suivi de la capture de rayonnement résiduel non absorbé par un récepteur qui est, généralement, un film sensible à la nature des rayons utilisés.

La radiographie peut être utilisée pour contrôler tous les types de matériaux, quel qu'en soit la complexité géométrique. Elle peut arriver à contrôler des pièces jusqu'à 20 mm d'épaisseur avec les rayons x et jusqu'à 150 mm avec les rayons γ . Les limites fondamentales de cette technique sont le volume important du dispositif qui pose un problème de transport et d'installation. D'autre part, elle a besoin d'accéder aux deux côtés de la structure pour faire un scan 3D. De plus, les rayonnements ionisants sont dangereux pour le corps humain, ce qui nécessite des procédures de sécurité strictes.[⁷]

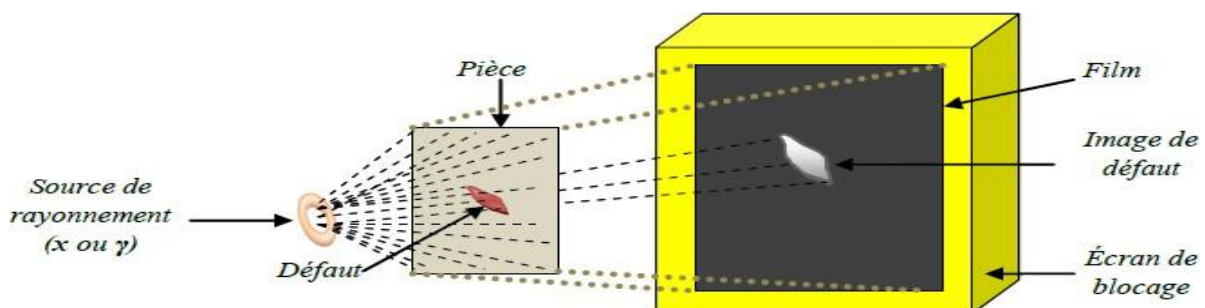


Figure 1-4 Impression sur le film radiographique de l'image du défaut [5]

1.2.5. Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce).

Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises.[8]

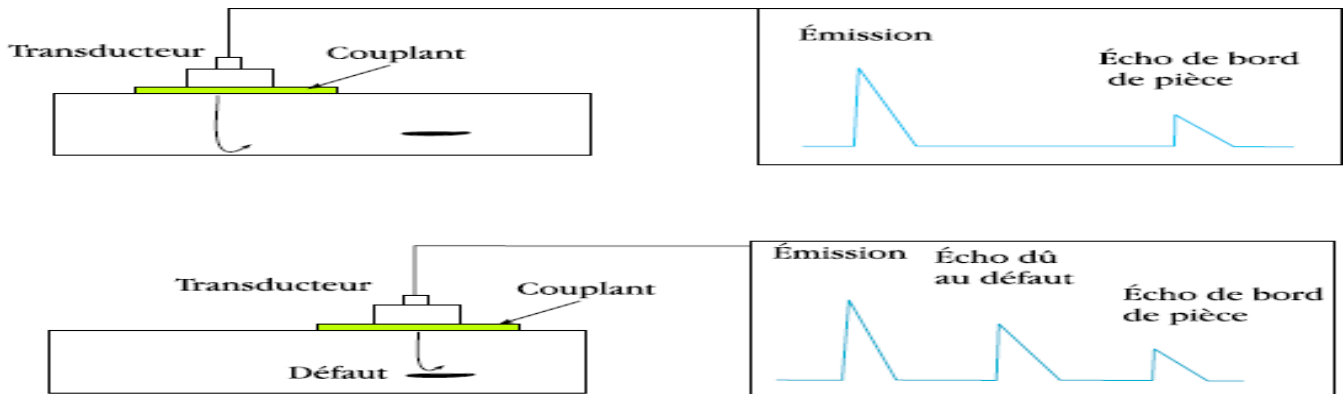


Figure 1-5 Principe des ultrasons.[6]

1.2.6. Thermographie

L'AFNOR définit la thermographie comme la " technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène thermique observée dans un domaine spectral de l'infrarouge.



Figure 1-6 Principe du CND par Thermographie

Cette technologie est applicable pour le contrôle de défauts volumiques et de défauts de surface. Le contrôle par thermographie consiste à produire dans la structure à tester un échauffement local homogène et à observer l'évolution de la température après un certain temps de latence. Les défauts présents

constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques pouvant être détectées par une caméra infrarouge. L'observation et la stimulation peuvent s'effectuer sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages) et pour le contrôle de matériaux céramiques, qui sont des conducteurs de chaleur relativement médiocres.[⁹][¹⁰]

1.3. Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault

1.3.1. Principe

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

Pour appliquer la technique de CND par CF, une bobine (appelée émetteur ou excitateur) parcourue par un courant alternatif est placée au voisinage de la pièce conductrice testée. Des courants de Foucault se développent dans la pièce en formant des boucles. Ces courants ont la même fréquence que le courant émetteur et génèrent un champ magnétique induit qui s'opposent au champ émetteur. Un défaut dans la pièce déviara la circulation des courants de Foucault et modifiera donc le champ magnétique résultant. La variation du champ magnétique est détectée à l'aide d'une bobine ou d'un capteur de champ magnétique. Un choix particulier est d'utiliser la bobine émettrice comme élément de mesure de la variation du champ résultant ,il peut Détecter de défauts sur tubes, barres, fils Les défauts comme fissure, trou, griffure, manque de matière, rupture de brins sur les objet longilignes peuvent être détectés à l'aide de capteurs encerclant ou encerclant multiéléments, Les tubes peuvent être aussi contrôlés de l'intérieur par un capteur interne Contrôle de surface plane Détection de défauts transversaux ou longitudinaux, situés à la surface ou en profondeur et Mesure de conductivité électrique, Mesure de distance et Mesure d'épaisseur.[¹¹]

En utilisant les capteurs à courants de Foucault conjointement avec les capteurs à barrière laser, on réalise un contrôle complet de la qualité géométrique de tubes ou de barres. Les barrières laser permettent des mesures de quelques microns de précision. En utilisant des capteurs intégrant plusieurs barrières, on peut contrôler toute la circonférence du tube.[¹²]

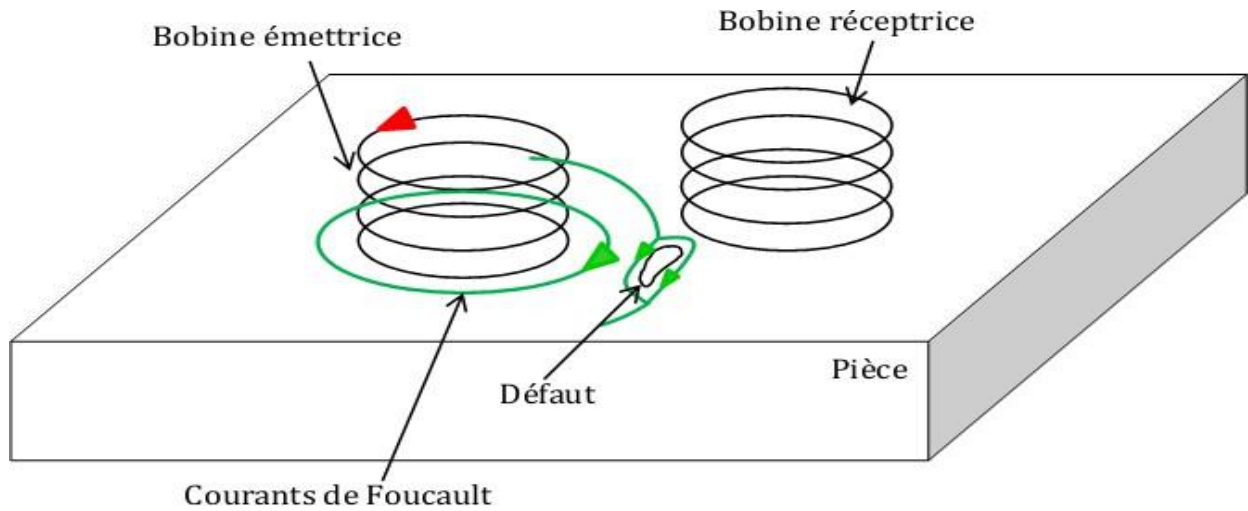


Figure 1-7 Principe du CND par courant de Foucault[9]

CND par CF, on utilise des fréquences généralement faibles (au plus quelques dizaines de MHz), ce qui implique que la longueur d'onde est grande par rapport aux dimensions de la pièce. Ceci permet de négliger l'effet de propagation de l'ond

1.3.2. Effet de peau

Ce phénomène existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant quand on s'enfonce dans un conducteur.

Le module de la densité de courant, dans une pièce d'épaisseur infinie excitée par une nappe de courants extérieure et parallèle à son plan, est représenté dans la figure I.8 Et est exprimé par la relation suivante :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}}$$

f : Fréquence d'alimentation.

μ_r : Perméabilité magnétique relative du matériau. μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

σ : Conductivité électrique.

La profondeur de pénétration est donc inversement proportionnelle à la fréquence du champ et à la nature du matériau. Si on considère une cible plane semi infinie excitée par une nappe de courants extérieurs parallèles au plan, dans ce cas le module de la densité de courant est régi par la relation suivante.

$$J_c(z) = J_{c0} \cdot e^{-z/\delta}$$

Z : Profondeur considérée à l'intérieur de la cible [m].

J(z): Module de la densité de courant en fonction de la profondeur [A/m*m]. δ : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau [m].

On constate que la densité du courant décroît d'une manière exponentielle en profondeur

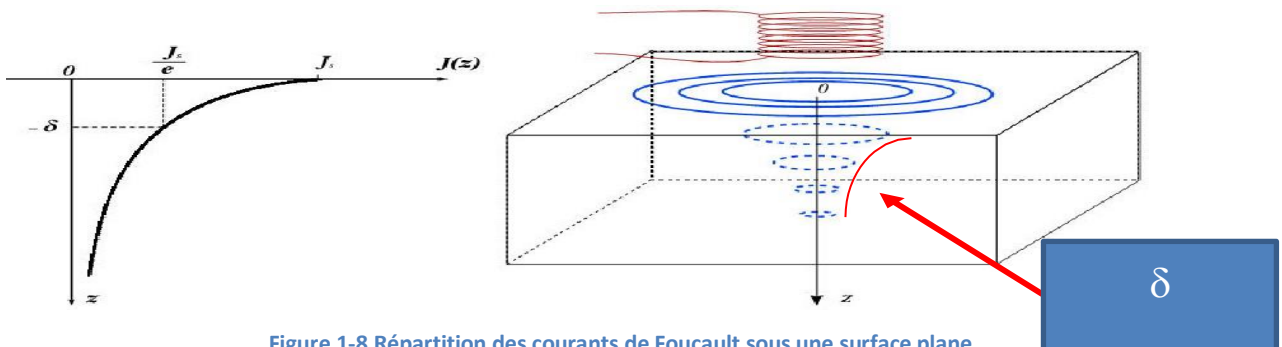


Figure 1-8 Répartition des courants de Foucault sous une surface plane

La réponse d'une cible à une excitation est recueillie par un élément sensible à une grandeur électromagnétique. Dans la majorité des cas, il s'agit de mesurer une impédance ou une différence de potentiel (d.d.p) représentative de la variation d'un flux. Cette mesure s'effectue souvent par l'intermédiaire d'une bobine

1.3.3. Objectifs du CND-CF

La figure suivante montre les différents objectifs visés par le CND-CF.

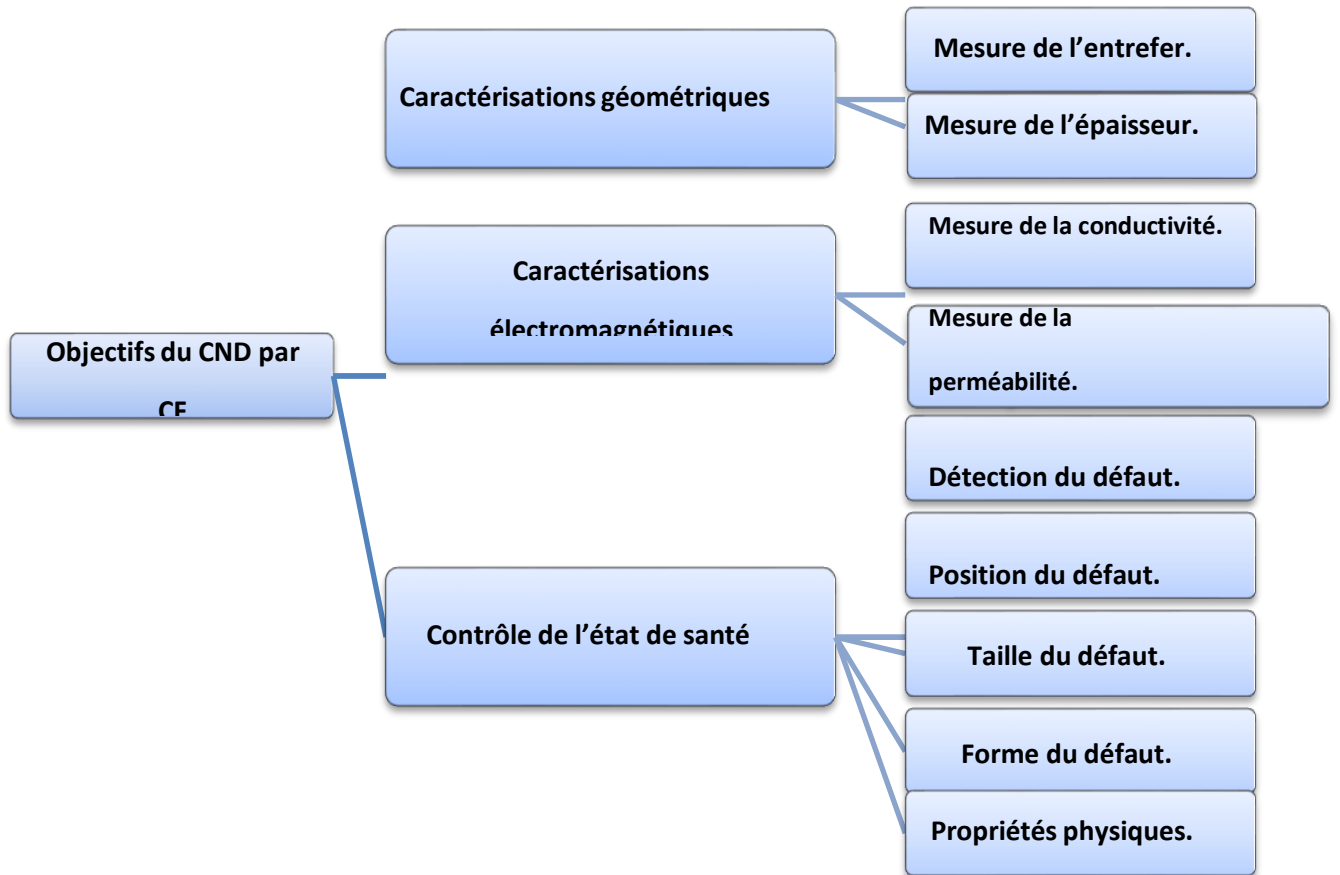


Figure 1-9 Objectif du CND par CF.

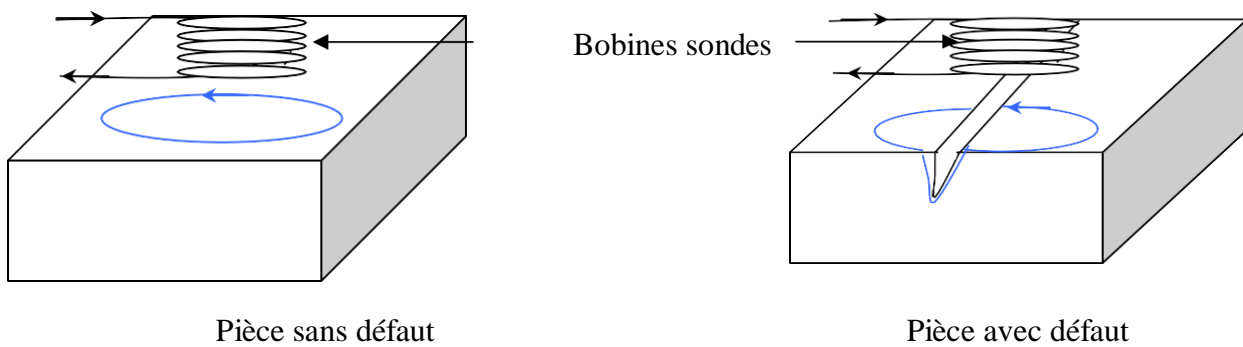


Figure 1-10 détection d'une sonde encerclant différentielle

1.4. Avantages et limites du CND par courant de Foucault

1.4.1. Avantages du CND par courant de Foucault

Le CND par courant de Foucault a plusieurs avantages tel que :

- Simplicité de mise en œuvre.
- Rapidité de balayage et de détection.
- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement en fois (quelquesmm) dans tout matériau conducteur.
- Aucune nuisance ou pollution.
- Traitement informatique avec stockage des données de modélisation.

1.4.2. Limites du Contrôle par Courants de Foucault (CF)

Bien que le CND par courants de Foucault offre de nombreux avantages par rapport à d'autres méthodes, il présente certaines restrictions et inconvénients :

Matériaux conducteurs uniquement : Cette méthode ne peut être appliquée qu'aux matériaux ayant une conductivité électrique, ce qui exclut les isolants et certains composites.

Faible pénétration en profondeur : Elle est peu adaptée à la détection de défauts situés en profondeur, sa sensibilité diminuant rapidement avec la distance sous la surface.

Analyse complexe : L'interprétation des signaux obtenus peut s'avérer difficile, nécessitant une expertise poussée pour différencier les types de défauts ou d'inclusions.

Variabilité du lift-off : Des variations dans la distance entre la sonde et la surface de la pièce (phénomène de *lift-off*) peuvent provoquer des instabilités dans les mesures d'impédance, affectant ainsi la fiabilité de la détection.

1.5. Classification des Capteurs en Courants de Foucault

Un capteur utilisé en contrôle par courants de Foucault est généralement constitué d'une bobine (ou d'un ensemble de bobines). Il remplit une double fonction : générer les courants de Foucault dans le matériau à inspecter et mesurer leurs effets, notamment à travers des variations d'impédance ou de tension, qui traduisent la présence d'éventuelles anomalies.

La géométrie du capteur, sa position par rapport à la pièce, ainsi que sa fonction spécifique peuvent varier considérablement selon l'application visée. En pratique, les capteurs peuvent être classés selon trois critères principaux :

- **Selon la position par rapport à la pièce contrôlée**

(par exemple : capteur en contact, capteur sans contact, capteur encastré...)

- **Selon la fonction assurée**

(générateur de courant, récepteur de signal, ou capteur combiné)

- **Selon le mode de contrôle utilisé**

(mesure absolue, différentielle, par balayage, multiéléments, etc.)

Cette classification permet d'adapter le choix du capteur au type de matériau, à la géométrie de la pièce et aux exigences de détection du défaut. tubes, tiges ou barres. ¹³

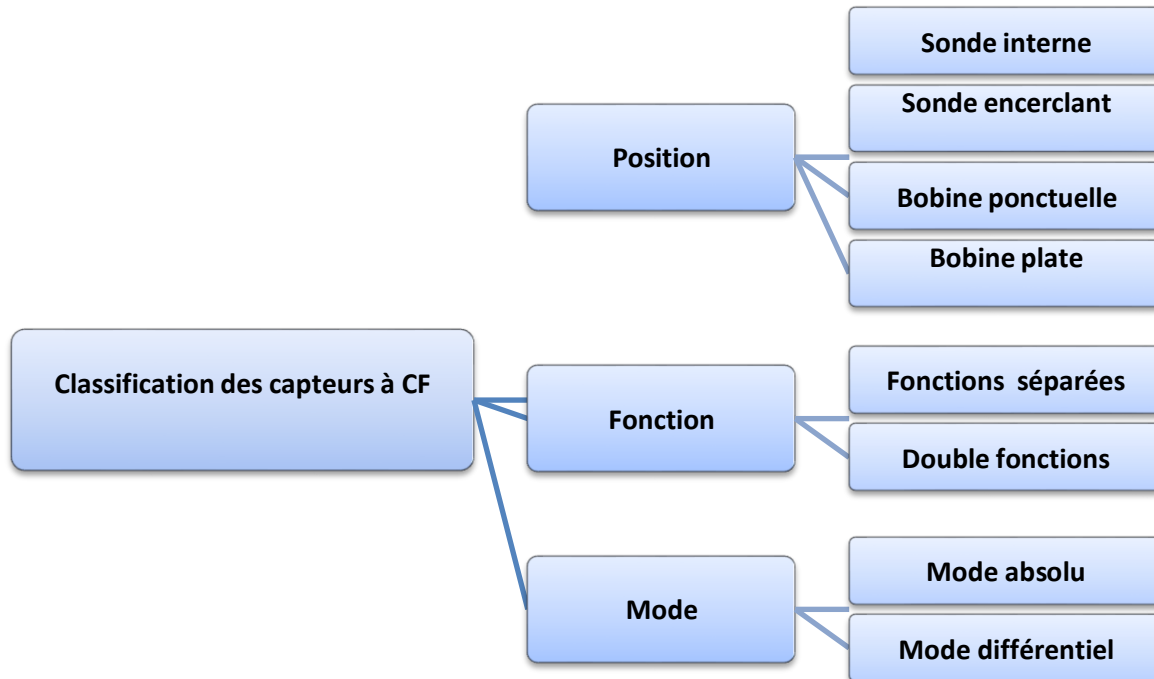


Figure 1-12 Classification des capteurs CF

1.5.1. Selon la position

a) Sonde interne

il s'agit d'un capteur conçu pour l'inspection interne de pièces creuses, tel qu'un tube ou un cylindre. Son principe repose sur des bobinages de mesure disposés autour de l'axe de déplacement du capteur à l'intérieur de la pièce. Ce type de capteur peut fonctionner avec ou sans noyau magnétique, en fonction des exigences de sensibilité ou de résolution du contrôle. figure(I.11). [14]

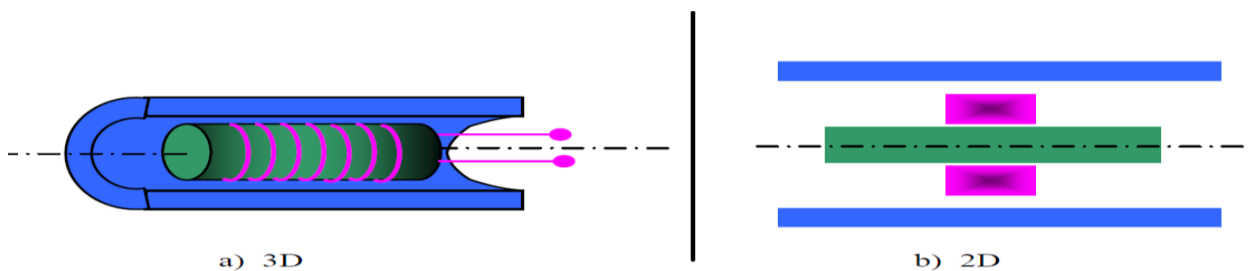


Figure 1-13 Sonde interne.

b) Sonde encerclant

Ce capteur est conçu pour envelopper l'objet à inspecter, ses bobines de mesure étant disposées autour de la pièce (voir Figure I.12). Le plus souvent, ces bobines présentent une section circulaire. Ce type de capteur est principalement utilisé pour le contrôle externe d'objets de petite section, tels que les

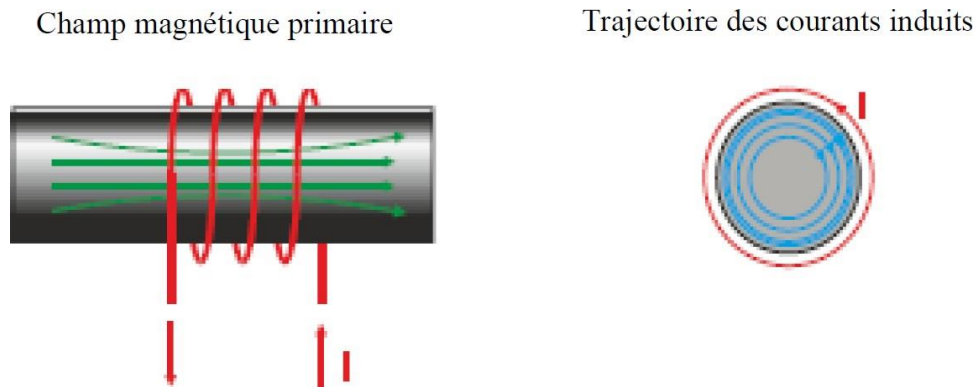


Figure 1-14 Sonde encerclant

c) Bobine ponctuelle (Palpeur)

Ce type de capteur se compose de petits enroulements formant une bobine compacte, positionnée directement sur la surface de la pièce ou à proximité immédiate. Il est spécialement conçu pour effectuer un contrôle localisé depuis la surface, avec une mobilité sur deux axes permettant un déplacement libre sur la zone à inspecter.

La surface analysée correspond approximativement à la section transversale du capteur, ce qui en fait un outil adapté pour les inspections ciblées et pour atteindre des zones difficilement accessibles. Toutefois, lorsqu'il s'agit d'examiner de larges surfaces, l'utilisation de ce capteur nécessite un balayage systématique de la pièce.⁽¹⁾

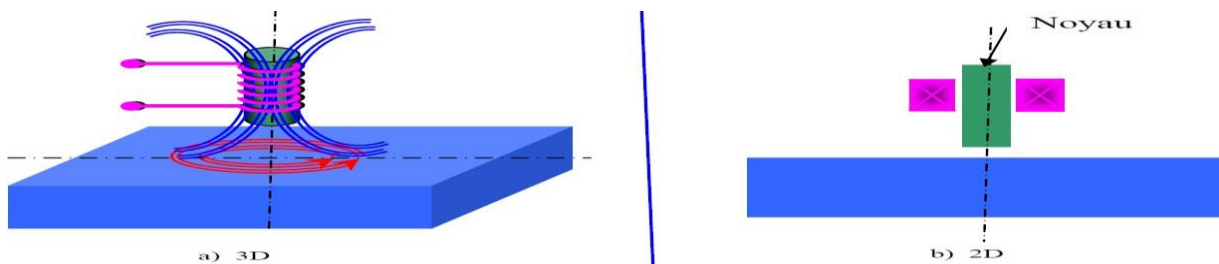


Figure 1-15 Bobine ponctuelle (Palpeur)

d) Bobine plate

À l'instar du capteur ponctuel, ce modèle fonctionne également en surface, en se déplaçant sur la pièce à examiner. Toutefois, grâce à sa forme géométrique particulière, il couvre une zone d'inspection plus étendue, ce qui le rend mieux adapté aux contrôles de surfaces plus larges.[15]

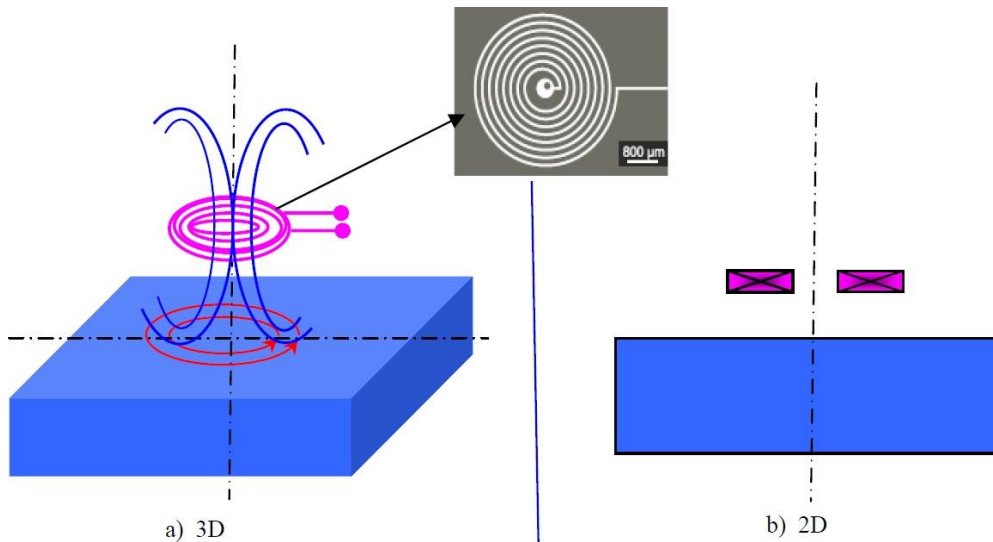


Figure 1-16 Bobine plate[9]

e) Sonde interne tournante

Dans ce cas, le capteur effectue une rotation autour de l'axe de translation lors de l'inspection. Ce mouvement génère un champ magnétique orienté perpendiculairement à l'axe du tube, ce qui permet une localisation précise des défauts situés sur la surface interne de la pièce cylindrique. ¹

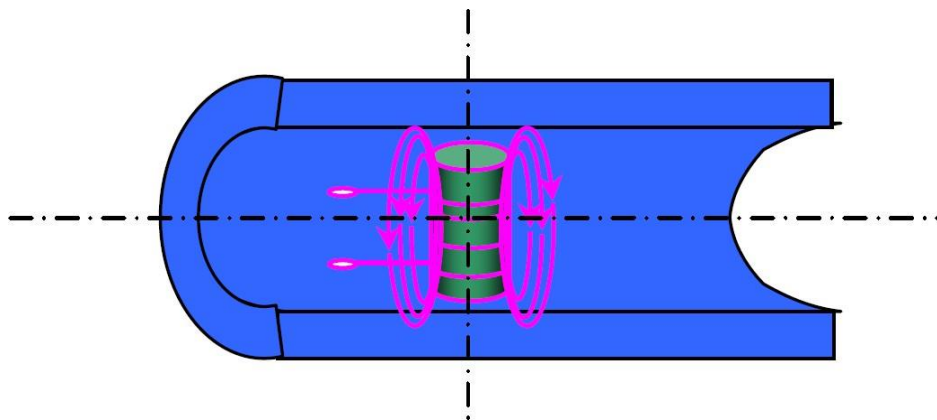


Figure 1-17 Sonde interne tournante[9]

1.5.2. Selon la fonction du capteur

Il existe un grand nombre de façons de mettre en œuvre des bobinages pour réaliser un contrôle par courants de Foucault. Nous indiquons ici les configurations de base à partir desquelles d'autres montages peuvent être envisagés.^[12]

a) Capteur double fonction

Le montage le plus élémentaire repose sur une sonde à double fonction, formée d'une seule bobine. Celle-ci assure à la fois les fonctions d'émission et de réception du signal. Lorsqu'elle est utilisée en régime sinusoïdal, l'analyse repose sur la mesure de l'impédance équivalente de la bobine, influencée par les caractéristiques de son environnement immédiat.⁸

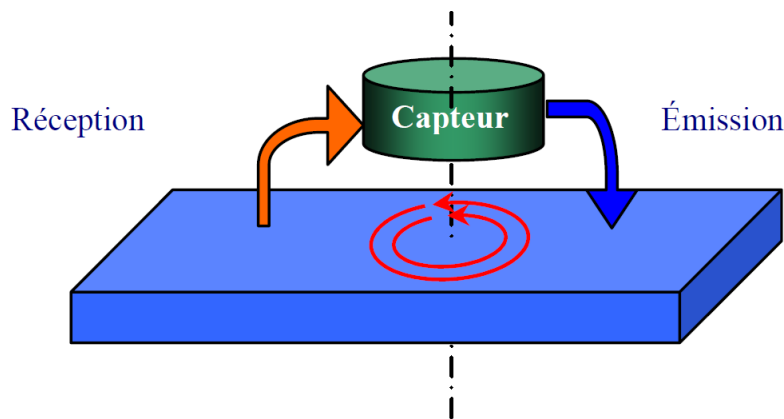


Figure 1-18 Capteur à double fonction

b) Capteurs à fonctions séparées

Dans ce cas, le capteur contient au moins deux éléments, une bobine pour l'émission d'un champ alternatif et une autre bobine ou un capteur de champ magnétique pour la réception de la réponse de la pièce examinée. Dans le cas où le récepteur est une bobine la grandeur mesurée est la force électromotrice (f.e.m) induite aux bornes de celle-ci.¹²

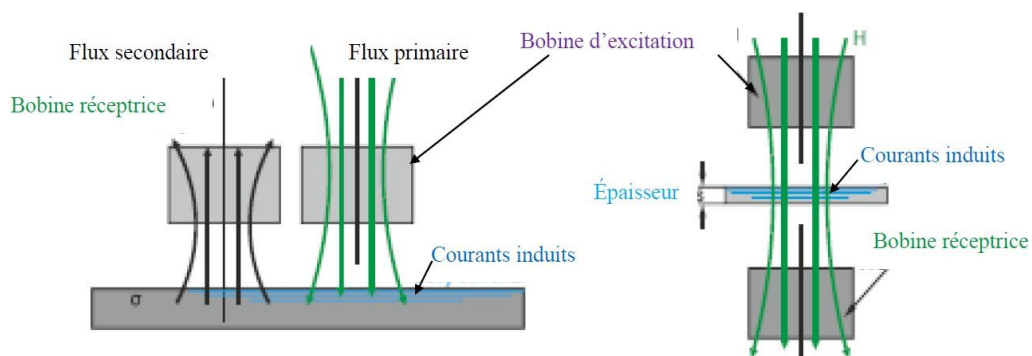


Figure 1-19 Capteur à fonctions séparées

1.5.3. Selon le mode

a) Mode absolu

Ce modèle de capteur présente une sensibilité élevée aux variations des paramètres géométriques et électromagnétiques de son environnement. En général, il est constitué d'un unique élément récepteur.

Avant d'effectuer l'inspection d'une pièce, il est fréquent de procéder à un étalonnage préalable à l'aide d'une pièce de référence ou d'une maquette, afin d'ajuster les mesures et garantir la fiabilité des résultats. ⁽¹²⁾

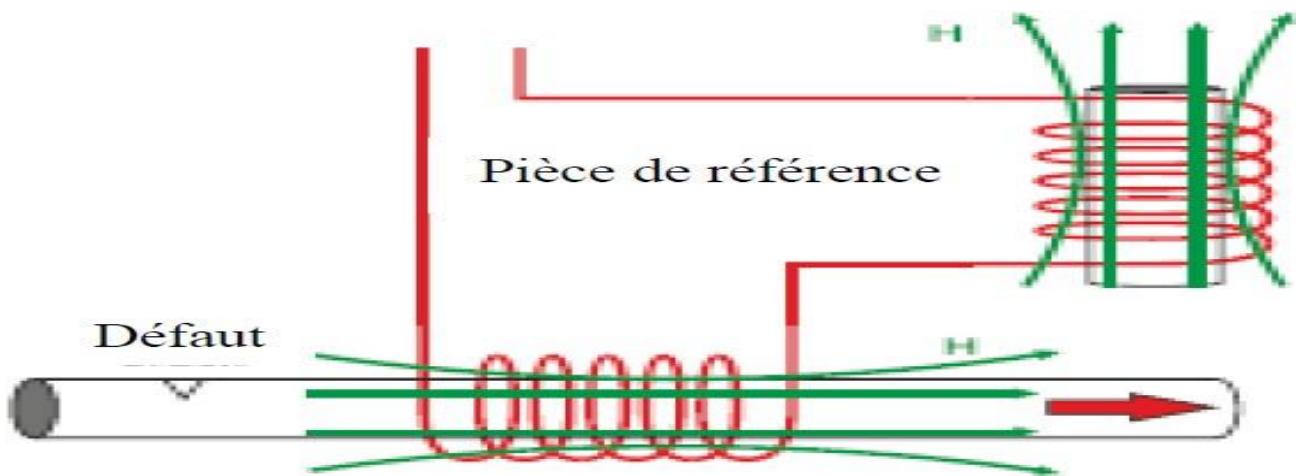


Figure 1-20 Capteur absolue en mode compensé

b. Mode différentiel

La mesure différentielle est une comparaison de deux mesures effectuées simultanément d'impédances de deux capteurs absolus dont les flux sont opposés (figure I.19).

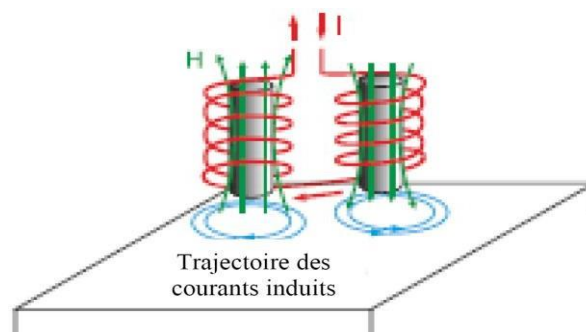


Figure 1-21 Capteur en mode différentiel

En effet, dans le cas d'une pièce saine, l'impédance différentielle est nulle (figure I.20). Par contre, si la pièce présente une anomalie l'amplitude de la grandeur d'alimentation est modifiée.¹⁶

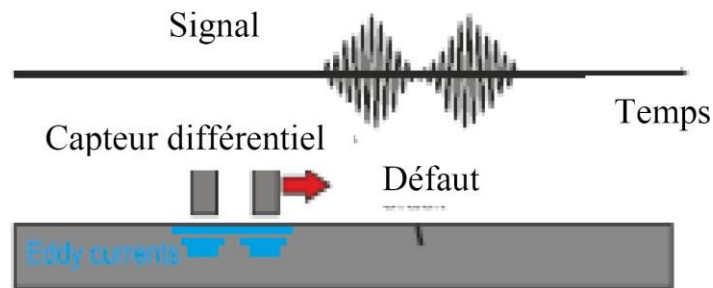


Figure 1-22 Perturbation du signal d'alimentation

1.6. Les capteurs multiéléments à courants de Foucault

1.6.1. Capteurs multiéléments

La technologie des capteurs multiéléments à courants de Foucault repose sur la génération d'un champ magnétique dans un matériau conducteur, ce qui induit des courants de Foucault révélateurs de l'état interne de la pièce à contrôler. Contrairement aux configurations classiques, ici la génération du champ et la détection des signaux sont assurées par plusieurs bobines, organisées dans un motif spécifique et activées électroniquement selon un ordre bien défini, appelé séquencement.¹⁶

1.6.2. Déplacement et couverture

Pour former un capteur multiélément, on dispose plusieurs bobines dans une géométrie adaptée (par exemple, alignées côte à côte) au sein d'un même dispositif. Ces bobines sont ensuite activées séquentiellement selon un scénario d'activation précis (voir Figure I.21).

Ce procédé permet de couvrir une surface plus large à chaque passage, réduisant ainsi le nombre total de balayages nécessaires par rapport aux capteurs classiques.

Par exemple, un balayage en peigne avec une seule bobine peut être remplacé par un balayage linéaire à l'aide d'un capteur multiéléments. De plus, il est également possible d'utiliser les capteurs multiéléments en mode peigne, ce qui élargit encore davantage la zone d'inspection et améliore la rapidité du contrôle.^[18]

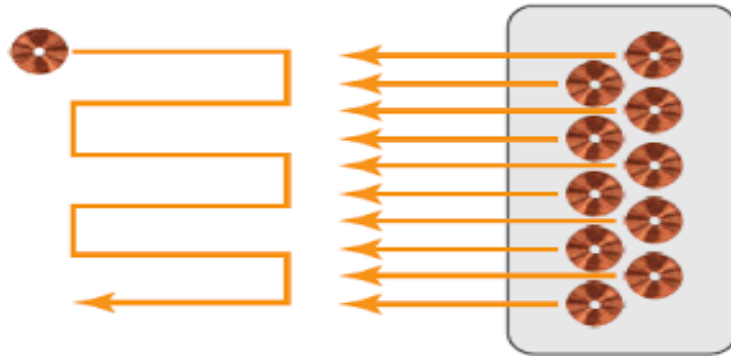


Figure 1-23 Représentation schématisé de balayage en peigne et linéaire obtenu respectivement avec un élément simple et un capteur multiéléments

1.6.3. Motif (ou topologie)

Le motif, également appelé topologie, désigne à la fois la configuration physique des bobines au sein du capteur et leur mode d'activation électronique unitaire.

Les capteurs multiéléments s'appuient sur les architectures de base conçues pour les capteurs multiéléments, telles que les montages absolus, différentiels ou en transmission. En pratique, les motifs les plus couramment employés sont de type absolu ou émission/réception (E-R).

Le motif absolu est particulièrement avantageux, car il permet la détection de défauts dans toutes les directions, indépendamment du sens de déplacement du capteur.

Il est important de noter que la sensibilité globale du capteur multiélément dépend de chacun de ses éléments. En d'autres termes, si un élément du capteur est incapable de détecter un défaut, cette limitation affectera l'ensemble du système, et le défaut pourra passer inaperçu.¹⁶

1.6.4. Les paramètres définissant un capteur multiélément

- **Couverture** : La couverture désigne la surface active inspectée par le capteur en un seul passage. En fonction de l'agencement des bobines (le motif), il est essentiel que le capteur comporte un nombre suffisant d'éléments pour couvrir intégralement (et même au-delà) la zone d'intérêt. Dans certains cas, plusieurs passages (ou scans) seront nécessaires pour assurer un contrôle complet de la surface, comme illustré en figure I.22.a.
- **Résolution** : La résolution correspond à la distance entre les centres de deux bobines adjacentes.

CHAPITRE 01 : Généralités sur le contrôle non destructif

- Elle détermine la finesse du contrôle, puisqu'elle est directement liée à la taille minimale du défaut que l'on souhaite détecter. Plus la résolution est fine (c'est-à-dire, plus les bobines sont proches), plus le capteur est capable d'identifier de petits défauts. Voir figure I.23.

- **Uniformité du signal :** Bien que non développée dans votre texte, ce paramètre mentionné initialement fait référence à la cohérence des réponses mesurées par toutes les bobines, ce qui garantit une fiabilité constante sur toute la surface inspectée.

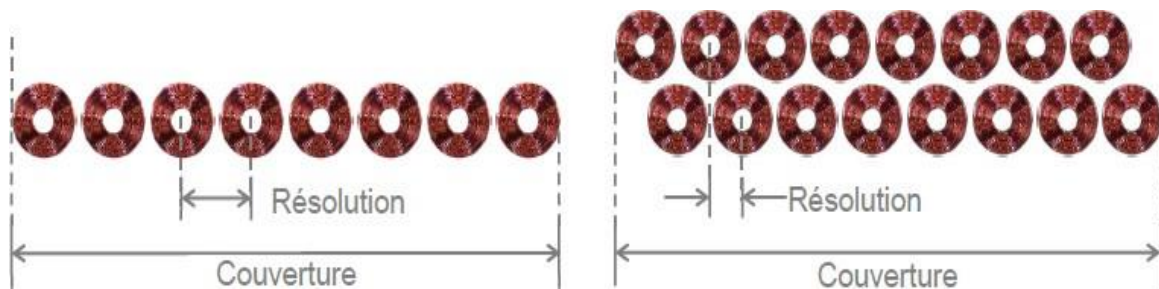


Figure 1-14 Schématisation d'un capteur CFM définissant la couverture et la résolution

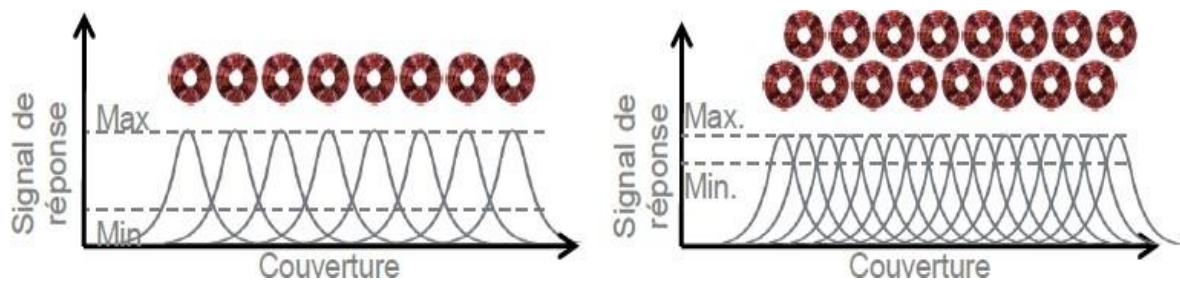


Figure 1-25 Uniformité de signal CF sur un montage multiélément

Dans les capteurs multiéléments, le multiplexage permet une optimisation de la réponse des éléments et donc d'accroître la résolution du capteur, la sensibilité des éléments (grâce à la réduction de l'inductance mutuelle) et de réduire le niveau de bruit.¹⁸

1.7. Avantages et inconvénients du capteur multiélément

• Avantages :

Le capteur multiélément présente de nombreux atouts dans le domaine du contrôle non destructif :

- Il accélère considérablement le processus d'inspection grâce à une vitesse de balayage plus élevée.
- Il permet de couvrir une large zone en un seul passage, tout en conservant une résolution élevée.
- Il simplifie les dispositifs de balayage mécaniques ou robotisés, en réduisant leur complexité.
- Il fournit une cartographie en temps réel de la zone contrôlée, facilitant ainsi l'interprétation et l'analyse des données.
- Il renforce la fiabilité du contrôle et améliore le taux de détection des défauts.

• Inconvénients :

Cependant, cette technologie comporte aussi certaines limites :

- Le coût d'acquisition de ces capteurs est relativement élevé.
- Leur conception et fabrication sont techniquement complexes, ce qui peut limiter leur disponibilité ou personnalisation.

1.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales techniques de contrôle non destructif (CND) couramment utilisées dans l'industrie, notamment : l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, la thermographie, les ultrasons, ainsi que la méthode par courants de Foucault.

Nous avons ensuite porté une attention particulière à la technique des courants de Foucault, en détaillant son principe de fonctionnement, ses objectifs, le phénomène d'effet de peau, ainsi que ses avantages et ses limitations.

Par ailleurs, nous avons abordé la classification des capteurs utilisés dans cette méthode, en fonction de leur position, de leur fonction et de leur mode d'inspection.

Enfin, une étude approfondie du capteur multiélément à courants de Foucault a été réalisée, en expliquant son principe de fonctionnement, la topologie (motif) des bobines, les paramètres qui le caractérisent, ainsi que ses avantages et inconvénients.

Le chapitre suivant portera sur la modélisation du système de CND par courants de Foucault, étape essentielle pour simuler et optimiser son comportement.

Chapitre 02 :

Modélisation du Système de Contrôle Non Destructif par CF

2.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons effectué un survol approfondi des principales techniques de contrôle non destructif (CND) utilisées dans l'industrie, avec une attention particulière portée sur la méthode basée sur les courants de Foucault. Nous avons également examiné la structure, les types et les avantages des capteurs multiéléments, qui constituent une avancée significative en matière de performance et de rapidité dans les opérations d'inspection. Cette base théorique est indispensable pour aborder la phase de modélisation, qui constitue une étape cruciale pour le développement et l'optimisation d'un système de contrôle non destructif par courants de Foucault.

En effet, pour mener à bien une inspection efficace et fiable, il ne suffit pas de disposer d'un capteur performant ; il est tout aussi essentiel de bien comprendre les propriétés physiques du matériau à inspecter, les phénomènes électromagnétiques mis en jeu, la nature des défauts recherchés, les caractéristiques géométriques de la pièce, ainsi que les traitements de signal associés. Cette compréhension approfondie ne peut être atteinte que par le biais d'une modélisation rigoureuse, qui permet de simuler et d'analyser le comportement du système dans diverses conditions d'utilisation. Ainsi, la modélisation permet de prédire avec plus de précision la réponse du système, d'identifier les paramètres influents et d'optimiser la détection des défauts.^{[15][17][11]}

L'émergence et le perfectionnement des outils informatiques modernes ont permis à la modélisation numérique de s'imposer comme un pilier central dans le domaine du CND. Elle est devenue un outil incontournable pour les chercheurs et les industriels, notamment dans la conception et l'évaluation des sondes, ainsi que dans la validation des scénarios de détection. Cette approche offre une flexibilité importante, en permettant d'explorer des configurations qui seraient difficiles, voire impossibles, à tester expérimentalement.

La base de toute modélisation électromagnétique repose sur les équations de Maxwell, qui expriment les lois fondamentales de l'électromagnétisme. Ces équations vectorielles et différentielles décrivent la propagation des champs électriques et magnétiques dans un milieu donné, et permettent de prédire l'induction de courants de Foucault dans des conducteurs soumis à un champ magnétique variable. Selon la complexité du problème à résoudre — que ce soit en raison de la géométrie du capteur, des propriétés électromagnétiques du matériau ou des conditions de détection — la résolution des équations de Maxwell peut être envisagée de façon analytique, numérique, ou via une approche mixte.¹⁵

La résolution analytique, bien qu'efficace pour des géométries simples et des hypothèses idéalisées, se heurte rapidement à des limitations dès que la configuration du problème devient réaliste et complexe. Dans ce cas, les solutions analytiques deviennent inapplicables ou imprécises. Pour contourner ces difficultés, les méthodes numériques prennent le relais. Celles-ci permettent de résoudre les équations de Maxwell dans des contextes variés, avec des géométries quelconques et des conditions aux limites complexes. Elles offrent une grande souplesse et une capacité de généralisation accrue, au prix cependant d'un coût computationnel plus important.

Ce chapitre a donc pour objectif de présenter de manière structurée l'ensemble des éléments théoriques et numériques nécessaires à la modélisation d'un système de contrôle non destructif par courants de Foucault. Nous débuterons par une description formelle du problème physique à traiter, accompagnée de la formulation des équations de Maxwell et des conditions aux limites pertinentes. Ensuite, nous passerons en revue les différentes méthodes disponibles pour résoudre ces équations, en mettant l'accent sur le calcul de l'impédance, un paramètre central dans l'interprétation des signaux issus des capteurs. Enfin, une attention particulière sera portée à la méthode des éléments finis, à travers une présentation de son principe, de ses avantages, et de sa mise en œuvre dans le contexte spécifique de la simulation des courants de Foucault.⁸

2.2. Modélisation de CND par CF

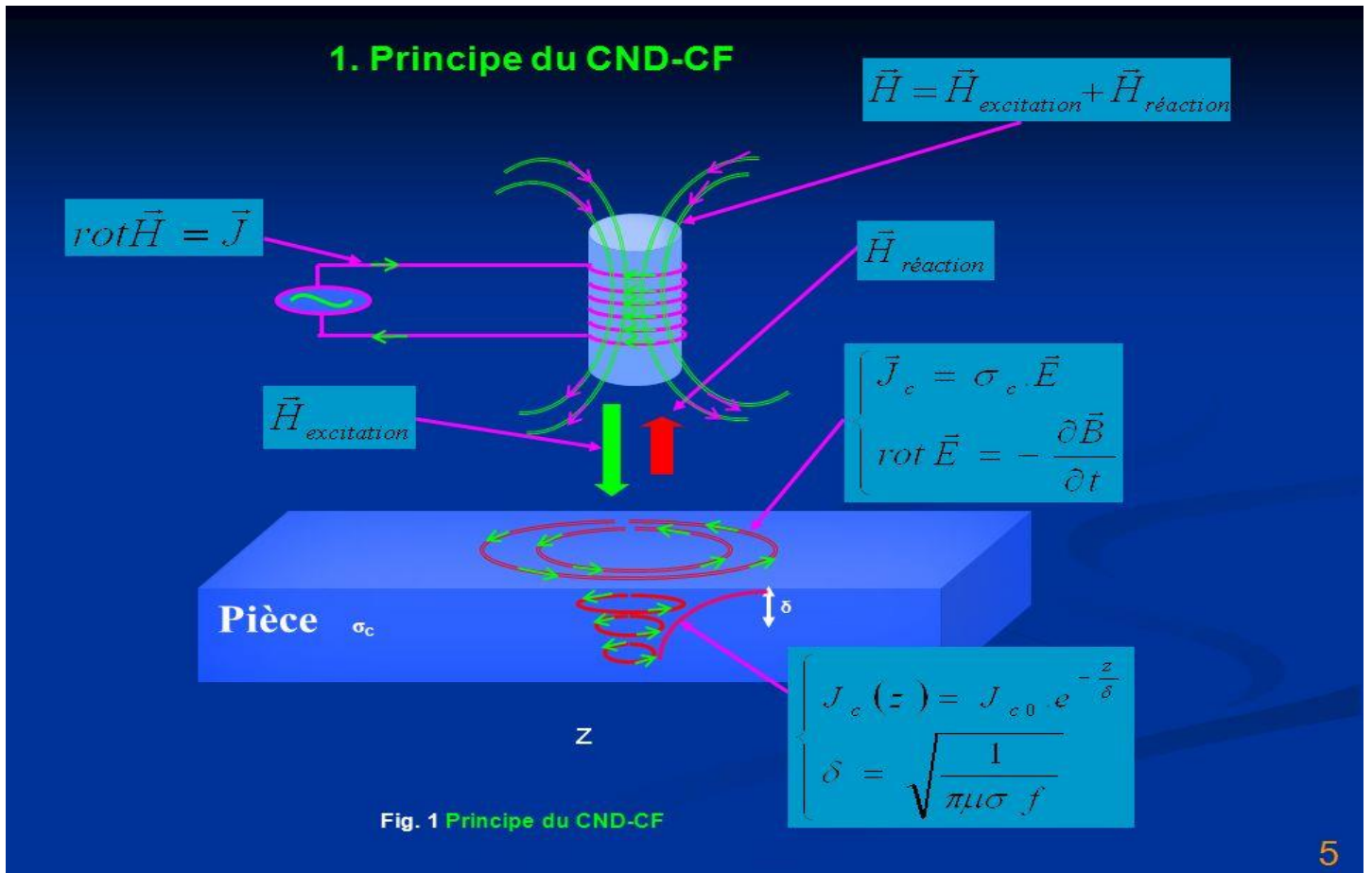


Figure 2-1 Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault.

2.2.1. Modélisation du dispositif :

Comme illustré sur la (Figure II.1), le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault est

modélisé par un système comprenant un tube en cuivre, utilisé dans les échangeurs de chaleur, et présentant divers défauts. Ce dernier est soumis à un champ électromagnétique émis par une bobine multiélément, dans laquelle un courant variable est injecté pour générer les courants de Foucault.

L'objectif est d'évaluer les courants de Foucault dans la pièce à inspecter ainsi que la variation d'impédance de la bobine.

2.2.2. Modélisation mathématique du système

Tous les phénomènes électromagnétiques dépendant du temps et de l'espace, rencontrés dans l'étude des dispositifs électrotechniques, sont gouvernés par les équations fondamentales de Maxwell, qui traduisent mathématiquement les lois physiques de l'électromagnétisme.⁹

•Loi de Maxwell Gauss (électrique) :

$$\operatorname{div}(\vec{D}) = \rho \quad 1$$

•loi de Maxwell Gauss(magnétisme) :

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = 0 \quad 2$$

•Loi de Maxwell Faraday (induction) :

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad 3$$

•Loi de Maxwell Ampère :

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad 4$$

Interprétation :

La rotation du champ électrique (\vec{E}) dans l'espace est liée à la variation temporelle du champ magnétique (\vec{B}).

Autrement dit, une variation du champ magnétique dans le temps induit un champ électrique tournant (non conservatif). [18][19]

\vec{E} : Champ électrique [V/m].

\vec{H} : Champ magnétique [A/m].

\vec{D} : Induction électrique [C/m²].

\vec{B} : Induction magnétique [T].

\vec{J} : Densité de courant [A/m²].

ρ : Densité volumique des charges électriques [C/m³].

2.3. Équations de Maxwell

2.3.1. Historique :

James Clark Maxwell, né en 1831 à Édimbourg (Écosse), est un physicien célèbre pour avoir unifié les phénomènes de l'électricité, du magnétisme et de l'induction électromagnétique dans un cadre théorique unique. En s'appuyant sur les découvertes expérimentales de Michael Faraday, André-Marie Ampère et d'autres scientifiques de son époque, il a élaboré une formulation mathématique rigoureuse qui a permis de comprendre que les champs électriques et magnétiques peuvent se propager dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques, se déplaçant à la vitesse de la lumière.

Son travail a initialement donné naissance à un système complexe de vingt équations différentielles à vingt variables, qui fut ensuite simplifié par d'autres physiciens en un ensemble plus accessible de quatre équations fondamentales, connues aujourd'hui sous le nom d'équations de Maxwell. Ces équations, publiées en 1864 lors d'une présentation à la Royal Society, décrivent avec précision le comportement des champs électromagnétiques et leurs interactions avec la matière, marquant une étape décisive dans l'histoire de la physique moderne.⁹

Dans la suite de ces travaux seul le régime harmonique sera étudié avec une convention en temps choisie en $e^{-j\omega t}$ où ω représente la fréquence angulaire ou pulsation et f la fréquence en Hz. Pour simplifier la notation la dépendance en ω de toutes les grandeurs sera implicite sauf lorsque c'est nécessaire.

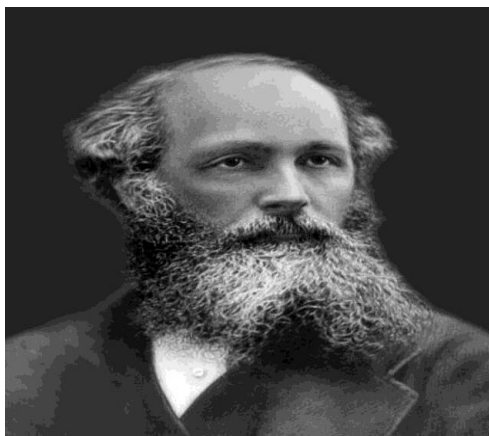


Figure 2-2 . James Clark Maxwell 1831-1879

L'étude d'un dispositif électromagnétique est basée essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et des équations de Maxwell. Ces équations sont l'expression la plus généralisée des lois de l'électromagnétisme classique.

2.4. Relations Constitutives des Matériaux en Électromagnétisme :

En physique, des grandeurs telles que la conductivité électrique (σ), la perméabilité magnétique (μ) et la permittivité électrique (ϵ) sont des paramètres fondamentaux qui décrivent la manière dont les matériaux réagissent aux champs électromagnétiques. Ces paramètres permettent de relier les équations de Maxwell aux propriétés physiques des milieux, à travers ce que l'on appelle les relations constitutives ou lois de comportement des matériaux.

Ces relations sont décrites comme suit : [20]

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad \text{avec} \quad \mu = \mu_0\mu_r \quad 5$$

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad 6$$

$$\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E} \quad \text{avec} \quad \epsilon = \epsilon_0\epsilon_r \quad 7$$

- μ : Perméabilité magnétique [H/m].
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Perméabilité magnétique [H/m].
- μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu [H/m].
- σ : Conductivité électrique [S/m].
- ϵ : Permittivité électrique [F/m].
- $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Constante diélectrique du vide [F/m].
- ϵ_r : Permittivité électrique relative du milieu [F/m].

2.4.1. Intérêt de la modélisation

Une question revient fréquemment chez les chercheurs, ingénieurs et autres professionnels : que se passe-t-il lorsqu'une certaine action est appliquée à un composant donné ? La manière la plus directe d'y répondre serait de réaliser une expérience concrète, c'est-à-dire soumettre le composant à l'action souhaitée afin d'observer ou d'évaluer le résultat. Toutefois, cette approche n'est pas toujours envisageable : dans de nombreux cas, l'expérimentation peut s'avérer coûteuse, dangereuse ou tout simplement irréalisable. Dans ces situations, la modélisation constitue une alternative pertinente. Elle consiste à élaborer un modèle réagissant de manière comparable au système réel étudié, permettant ainsi d'en anticiper le comportement.

La modélisation repose sur la création d'une représentation mathématique d'un phénomène physique réel, fondée sur certaines hypothèses simplificatrices. Cette représentation permet de prévoir les réponses du système en fonction des sollicitations appliquées.

Dans le cadre du contrôle non destructif par courants de Foucault (CF), les outils de modélisation jouent un rôle essentiel. Ils permettent de concevoir virtuellement les capteurs et de prédire leur comportement sans

qu'il soit nécessaire de les fabriquer ou de les tester expérimentalement. Cette démarche contribue significativement à la réduction des coûts liés à la phase expérimentale dans le processus de développement.

La modélisation s'articule généralement en deux étapes principales :

La première consiste en l'étude et l'analyse du problème physique à modéliser,

La seconde correspond à la résolution du problème via des outils mathématiques ou numériques.

Dans le cas du CND par CF, l'analyse du phénomène conduit à formuler des équations aux dérivées partielles (EDP), dérivées des lois fondamentales de l'électromagnétisme.[8][11][20]

2.1. Conditions aux limites

Une fois la géométrie du système définie, ainsi que les propriétés électromagnétiques des matériaux en jeu, les sources d'excitation et leurs intensités, il devient indispensable de spécifier les conditions aux limites pour pouvoir résoudre les équations d'état. Ces conditions permettent de modéliser correctement le comportement du système en tenant compte de ses symétries et de son interaction avec l'environnement extérieur.

Les conditions aux limites imposées sur le potentiel vecteur magnétique reflètent les propriétés physiques que doit respecter le champ électromagnétique sur les frontières du domaine étudié. Elles permettent d'assurer une solution cohérente et conforme à la réalité physique du problème.

Pour résoudre intégralement l'équation de Maxwell dans un domaine fini, il est donc crucial d'appliquer des conditions aux bords de ce domaine. On distingue généralement deux grandes catégories de conditions aux limites :

- **Conditions aux limites de Dirichlet** : elles imposent une valeur fixe du potentiel vecteur magnétique sur le bord du domaine (souvent nul sur une surface conductrice parfaite, par exemple).

$$\vec{u} \cdot \vec{n} = 0 \quad \text{8.a}$$

- **Conditions aux limites de Neumann** : elles spécifient la valeur de la dérivée normale du potentiel (c'est-à-dire le flux du champ magnétique traversant la frontière), ce qui correspond à fixer une certaine densité de courant ou un comportement particulier du champ magnétique.

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad \text{8.b}$$

2.4.2. Conditions de continuité

Lorsque les champs électromagnétiques traversent une interface séparant deux milieux de propriétés physiques différentes (par exemple, perméabilité ou conductivité), ils peuvent présenter des discontinuités locales. Cela signifie que les champs ne sont généralement pas dérivables à l'interface.

Toutefois, grâce aux équations de Maxwell, il est possible d'établir des **conditions de continuité** ou

conditions de passage qui décrivent le comportement des composantes des champs à travers cette interface.

Ces conditions garantissent la cohérence physique du modèle et permettent de relier les champs de part et d'autre de la surface de séparation, en tenant compte des discontinuités induites par les variations des propriétés matérielles.^{21/20}

Les principales conditions de continuité sont les suivantes :

• **Champ électrique :**

○ La composante **tangentielle** du champ électrique **E** est **continue** à travers l'interface :

$$\mathbf{E}^{1t} = \mathbf{E}^{2t} \quad 9.a$$

○ La composante **normale** du champ électrique **D** (déplacement électrique) peut être **discontinue** s'il existe une densité de charge de surface:

$$\mathbf{D}^{2n} - \mathbf{D}^{1n} = \sigma \mathbf{n} \quad 9.b$$

• **Champ magnétique :**

La composante **tangentielle** du champ magnétique **H** peut être **discontinue** si un courant de surface est présent :

$$\mathbf{H}^{2t} - \mathbf{H}^{1t} = \mathbf{K} \times \mathbf{n} \quad 9.c$$

La composante **normale** du champ magnétique **B** est **continue** :

$$\mathbf{B}^{1n} = \mathbf{B}^{2n} \quad 9.d$$

Ces conditions sont essentielles dans les méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis, pour assurer un traitement correct des interfaces entre différents matériaux.^[21]

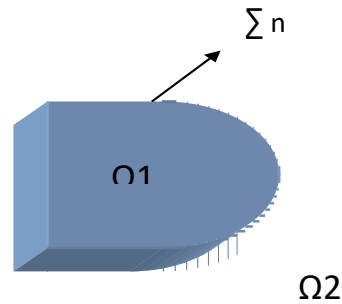


Figure 2-3 Surface Σ séparant deux milieux Ω_1 et Ω_2

Ces conditions de continuité (II.9), montrent que les composantes tangentielles E et H et les composantes normales B et D sont continus à travers l'interface Σ . Elles traduisent la continuité des composantes tangentielles E et H et normales de B et de D à l'interface Σ . La composante tangentielle n'est continue que si la surface de séparation ne possède pas une densité de courant surfacique.

2.4.3. Conditions de jauge

Dans la formulation des équations de Maxwell, notamment lors de l'utilisation du potentiel vecteur magnétique \vec{A} et du potentiel scalaire électrique, il existe une liberté mathématique dans le choix de ces potentiels. Cette liberté s'explique par le fait que certains champs et \vec{B} peuvent être exprimés à un gradient près ou à un rotationnel près, ce qui conduit à des solutions non uniques à moins d'imposer une condition supplémentaire : la condition de jauge.

Cette condition est essentielle pour lever cette indétermination et garantir l'unicité des solutions dans les formulations numériques comme dans la méthode des éléments finis.[¹⁵]

De façon générale, si l'on considère deux champs de vecteurs \vec{U} et \vec{W} , une condition de jauge peut s'écrire comme :

$$\text{div } \vec{U} = 0 \quad \text{Jauge de Coulomb} \quad 10.a$$

$$\text{div } \vec{U} + K \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \text{Jauge de Lorentz} \quad 10.b$$

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \quad \text{Jauge adaptée pour les éléments d'arêtes} \quad 10.c$$

CHAPITRE 02 : Modélisation d'un système CND par CF

Par exemple, lorsqu'on utilise une formulation en potentiel vecteur, la solution est obtenue à un gradient près.

La jauge de Coulomb s'écrit donc :

$\text{div} \mathbf{A} = 0$ normal à la surface de séparation des deux milieux Ω_1 et Ω_2 et dirigé vers l'extérieur.

2.4.4. Hypothèses et simplifications pour la résolution des équations

Selon le type de dispositif étudié, certains phénomènes physiques peuvent être négligés, notamment dans le cadre des régimes dits quasi-stationnaires. Cela permet de simplifier les équations du modèle, souvent en les découplant, rendant ainsi leur résolution plus accessible. Afin de faciliter la modélisation dans notre cas d'étude, nous adoptons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- a) Dans un milieu conducteur de conductivité σ de l'ordre de 10^6 S/m, et de permittivité ϵ_0 d'environ $8,85 \times 10^{-12}$ F/m, à des fréquences proches du MHz, la condition

$\omega \cdot \epsilon_0 \ll \sigma$, ce qui permet de considérer que les courants de conduction sont nuls, soit :

$$\partial \mathbf{D} / \partial t = \mathbf{0} \quad 11$$

- b) La densité volumique de charge est considérée nulle : $\rho=0$
- c) Les paramètres σ , μ , ϵ sont supposés linéaires, c'est-à-dire indépendants de la solution du système.
- d) Le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale.
- e) Avec les hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell à résoudre deviennent :

$$\text{div } \mathbf{b} = 0 \quad 12$$

$$\text{div } \mathbf{d} = 0 \quad 13$$

$$\text{rot } \vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} \quad 14$$

$$\text{rot } \vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{J}} \quad 15$$

Avec les relations constitutives suivantes :

$$\vec{\mathbf{J}} = \vec{\mathbf{J}}^{\text{ext}} + \sigma \vec{\mathbf{E}} \quad 16$$

$$\vec{\mathbf{B}} = \mu \vec{\mathbf{H}} \quad 17$$

L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ($B_r = 0$) dans le cas où le

Système ne contient pas d'aimant permanent ou de matériau ferromagnétique.

2.5. Formulations des équations de Maxwell dans le cadre du CND-CF

2.5.1. Formulation basée sur le champ électrique \vec{E}

En dérivant l'équation de Maxwell-Ampère par rapport au temps, et en supposant que la perméabilité magnétique μ reste constante (hypothèse de linéarité du matériau), on obtient l'équation suivante, dite formulation en champ électrique :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mathbf{0} \quad 18$$

Cette formulation est utilisée lorsqu'on modélise directement les effets du champ électrique dans les matériaux conducteurs.

2.5.2. Formulation en potentiels \vec{A} (formulation A-V)

À partir de l'équation de conservation du flux magnétique, l'induction magnétique \vec{B} peut être exprimée à l'aide du potentiel vecteur magnétique \vec{A} :

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad 19$$

En introduisant cette expression dans la loi de Faraday, on obtient :

$$\nabla \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \mathbf{0} \quad 20$$

Ce qui permet d'introduire un potentiel scalaire électrique v , tel que :

$$\vec{E} = -\nabla v - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad 21$$

Ainsi, la densité de courant total s'exprime par :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} = \vec{J}_s - \sigma \nabla v - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad 22$$

La **formulation magnétodynamique** complète en termes de \vec{A} et v devient :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \nabla v = \vec{J}_s \quad 23$$

L'unicité de la solution est assurée par une **condition de jauge**, souvent la jauge de Coulomb :

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \text{ (condition de jauge de Coulomb)} \quad 24$$

2.5.3. Formulation basée sur le champ magnétique \vec{H}

En combinant les lois de Maxwell et la loi de comportement électromagnétique, on obtient directement la formulation suivante pour \vec{H} :

$$\nabla \times \left(\nabla \frac{1}{\sigma} \times \mathbf{H} \right) + \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \mathbf{0} \quad \text{Équation 25}$$

Cette approche présente l'avantage de ne nécessiter aucune condition de jauge, à condition que les conditions aux limites soient bien posées.

2.5.4. Formulation en potentiels $\vec{T} - \Phi$ (formulation $\vec{T}-\Phi$) :

Lorsque la densité de courant \vec{J} est à divergence nulle, il est possible d'introduire un **potentiel vecteur électrique** \vec{T} tel que :

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T} \quad \text{Équation 26}$$

L'unicité de cette formulation nécessite également une condition de jauge. L'équation résultante est alors :

$$\nabla \times (\sigma \nabla \times \mathbf{T}) + \mu \frac{\partial (\mathbf{T} - \nabla \Phi)}{\partial t} = \mathbf{0} \quad \text{Équation 27}$$

2.5.5. Comparaison entre les formulations

Le Tableau 2.1 récapitule une comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF.

Formulation	Potentiels régions non conductrices	Potentiels régions conductrices	Avantages	Inconvénients
$AV - \vec{A}$	A_x, A_y, A_z, V	A_x, A_y, A_z, V	Pas de problèmes régions multiples identiques	Nombres d'inconnues importants
$\vec{T} - \Phi$	Φ	A_x, A_y, A_z, Φ	Faible temps de calcul – Réduction inconnues	Problèmes de Régions multiples

Tableau 1 .Comparaison entre les formulations les plus populaires dans le CND-CF

Formulations magnétodynamiques :

Une association des relations constitutives, les relations de passage, les conditions aux limites et les conditions de jauge sont à la base de formulations qui permettent la mise en œuvre d'une solution outil éléments finis 3D. Il faut donc, avoir une formulation aux dérivées partielles qui régit notre système. En générale il est plus fréquent, dans les travaux CND-CF, d'avoir recours à l'utilisation au champ électrique et magnétique en fonction de potentiels. Car la solution converge mieux que si les inconnues étaient les champs (E, H).

On peut classer les formulations en deux types suivants :

- Formulations basées sur le champ électrique ($\mathbf{E}, \mathbf{A}-\mathbf{V}$), formulation en potentiel vecteur magnétique \mathbf{A}
- Formulation basées sur le champ magnétique ($\mathbf{H}-\Phi, \mathbf{T}-\Omega$) n , comprend des formulations en \mathbf{H} ou la formulation en \mathbf{T} .

2.6. Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles (EDP)

La résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) est une étape cruciale dans la modélisation des phénomènes physiques, notamment en électromagnétisme et contrôle non destructif. Plusieurs méthodes existent pour résoudre ces équations, qui se divisent en deux grandes familles : les méthodes analytiques et les méthodes numériques. Le choix de la méthode dépend essentiellement de la complexité géométrique et physique du problème à étudier.

• Méthodes analytiques :

Les méthodes analytiques sont généralement employées pour des configurations géométriques et électromagnétiques simples. Ces configurations sont souvent linéaires et se limitent à une ou deux dimensions, les cas tridimensionnels étant rares. Parmi les techniques analytiques couramment utilisées, on trouve :²¹

- La **méthode de séparation des variables**, qui permet de résoudre certaines EDP lorsque les conditions aux limites et la géométrie sont simples,
- Les outils basés sur le **noyau de Green** et les **équations intégrales de Fredholm**, qui facilitent la résolution en reformulant le problème sous forme d'intégrales,
- La **loi de Biot-Savart**, utilisée pour calculer les champs magnétiques générés par des courants,
- Le **théorème de réciprocité de Lorentz**, ainsi que le **théorème des images**, souvent appliqués en optique et électromagnétisme.

Ces méthodes offrent des solutions exactes ou quasi-exactes, mais leur application est limitée à des cas particuliers.

• Méthodes numériques :

Avec l'essor des capacités informatiques, les méthodes numériques se sont généralisées. Elles permettent d'étudier des configurations plus complexes, notamment les systèmes sonde-pièce en contrôle non destructif.

Ces méthodes incluent :

- La Méthode des Intégrales de Volume (MIV).
- La Méthode des Intégrales de Surface (MIS).
- La Méthode des Intégrales de Frontières (MIF).
- La Méthode des Différences Finies (MDF).
- La Méthode des Volumes Finis (MVF).
- La Méthode des Éléments Finis (MEF) .

• Méthode des Intégrales de Volume (MIV) :

La MIV repose sur la résolution d'équations intégrales utilisant les fonctions de Green adaptées à la géométrie étudiée. Ces fonctions permettent d'exprimer les champs électriques ou magnétiques générés par l'interaction entre le capteur et la cible par convolution avec les sources (courants ou charges). Pour une mise en œuvre numérique, les équations intégrales sont discrétisées via la méthode des moments, qui consiste à subdiviser le domaine en cellules élémentaires (souvent cubiques) où les grandeurs électromagnétiques sont supposées constantes. La résolution numérique se fait alors par inversion itérative des systèmes linéaires ainsi obtenus.[²²]

• Méthode des Intégrales de Surface (MIS) :

La MIS modélise les défauts comme des surfaces de conductivité nulle avec une ouverture très réduite, ce qui empêche le passage du courant. Cette hypothèse simplifie le traitement du problème et rend la méthode adaptée aux défauts localisés. Cependant, elle présente une limite due à la définition des fonctions de Green, restreignant les types de configurations exploitables .²⁴

• Méthode des Intégrales de Frontières (MIF) :

La MIF s'appuie sur la subdivision en nœuds situés sur les frontières des différentes régions du dispositif. Les valeurs calculées sur ces frontières permettent, dans certains cas, d'évaluer les champs à l'intérieur du domaine. Cette méthode nécessite un espace mémoire important et un temps de calcul conséquent en raison de matrices denses et de rang élevé. Elle est souvent utilisée en magnétostatique ou couplée à la méthode des éléments finis pour modéliser des milieux linéaires et non conducteurs .^{19/15/8/23}

• **Méthode des Différences Finies (MDF) :**

Historiquement, la MDF est l'une des premières méthodes numériques développées. Elle consiste à discrétiser le domaine en un maillage régulier constitué de points avec des mailles rectangulaires. Les opérateurs différentiels sont approximés par des différences finies entre les valeurs de la fonction inconnue en points voisins, s'appuyant sur le développement de Taylor. Si cette méthode est simple à programmer, elle offre une faible précision et est peu adaptée aux géométries complexes du fait de la contrainte du maillage régulier.^{19/8/25/24}

• **Méthode des Éléments Finis (MEF) :**

La MEF est une méthode puissante qui consiste à mailler tout le domaine d'étude en petits éléments (tétraèdres, prismes, etc.). Les équations aux dérivées partielles sont reformulées sous une forme variationnelle, ce qui permet de créer et d'assembler des matrices décrivant le système. La résolution du système matriciel s'effectue soit par des méthodes directes soit itératives. La MEF se distingue par sa capacité à traiter des configurations géométriques et physiques très diverses, ce qui la rend particulièrement adaptée aux capteurs souples et aux pièces de formes complexes. C'est la méthode choisie pour le présent travail.^{[25][26]}

• **Méthode des Volumes Finis (MVF) :**

Principalement utilisée en mécanique des fluides, la MVF a aussi été appliquée à d'autres domaines tels que le transfert thermique et l'électromagnétisme. Elle consiste à subdiviser le domaine en volumes élémentaires (tétraèdres, hexaèdres, prismes, etc.), chaque volume entourant un nœud.

La détermination précise de ces volumes limite cependant l'application de la méthode aux géométries plus simples. ^[19]

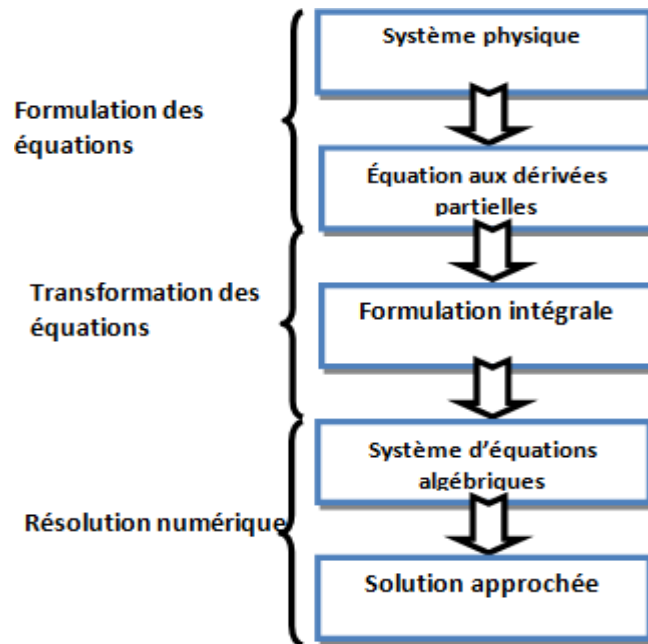


Figure 2.6-4 Présentation de différentes étapes de résolution d'un problème par la MEF.

Les résistances, les inductances et mutuelles élémentaires sont calculées analytiquement. Ensuite une sommation numérique permet de calculer ainsi l'impédance totale de l'inducteur. Donc, cette impédance contient des expressions analytiques qui sont sommées numériquement ; d'où vient l'appellation **semi-analytique**.^[19]

Méthodes semi-analytiques

Ce sont des méthodes mixtes, qui sont une combinaison de méthodes analytiques couplées à des méthodes numériques. Ces méthodes ne sont appliquées que pour résoudre certains types de problèmes. Cette approche nous permet d'obtenir des expressions analytiques faciles à résoudre et de réduire le temps de simulation tout en ayant des résultats assez proches de la réalité.

Les résistances, les inductances et mutuelles élémentaires sont calculées analytiquement. Ensuite une sommation numérique permet de calculer ainsi l'impédance totale de l'inducteur. Donc, cette impédance contient des expressions analytiques qui sont sommées numériquement d'où vient l'appellation semi-analytique.

Elles regroupent la méthode des multi-transformateurs et celle des circuits couplés.^[26]

2.7. Principe de la méthode variationnelle

La méthode variationnelle nécessite la connaissance à priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée par le principe de l'action Hamiltonienne qui stipule l'existence d'une fonctionnelle type intégral défini par:

$$F(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \quad 28$$

Où :

$$L = W_c - W_p \quad 29$$

L : est la fonction de Lagrange résultant de la coénergie du système de type cinétique et de son énergie potentiel.

Ω : est le domaine d'étude

La résolution du problème variationnelle défini par la fonction d'énergie F(A) revient à minimiser cette fonctionnelle.

La minimisation s'effectue en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_n} = 0 \quad 30$$

n : nombre de nœud dans le domaine d'étude.

A : inconnue au nœud n du domaine.

Formulation résidus pondérés

Le principe de la méthode des résidus pondérés consiste à remplacer la solution exacte par la solution approchée, ce qui va engendrer une erreur appelée résidus R ;

$$R_i = L(A) - f \quad 31$$

Tel que :

R_i : est le résidu de l'approximation.

$L(A)$: opérateur différentiel.

f : fonction définie sur le domaine d'étude Ω .

A : l'inconnue à chercher.

À l'aide de fonction de pondération bien choisie, on impose à l'intégrale du résidu des'annuler en N points du domaine Ω .

$$\int_{\Omega} \mathbf{R}_i \Phi_i \cdot \partial\Omega = 0 \quad 32$$

Φ_i : Fonction de pondération ou de projection.

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

2.8. Méthodes dérivées de la formulation des résidus pondérés

La formulation des résidus pondérés permet de déduire plusieurs méthodes de résolution numériques, dont le principe repose sur la minimisation ou l'annulation du résidu issu de l'équation différentielle à résoudre. Le choix des fonctions de pondération est déterminant dans la nature de la méthode obtenue. Parmi les plus utilisées.

on peut citer :

La méthode de collocation par points : elle repose sur l'utilisation de la fonction de Dirac comme fonction de pondération. L'approche consiste à imposer l'annulation du résidu en un ensemble de points prédéfinis du domaine, appelés points de collocation. C'est une méthode directe qui permet une approximation locale de la solution.

La méthode des moindres carrés : elle vise à minimiser la norme quadratique de l'erreur, que ce soit sur l'équation différentielle elle-même ou sur les conditions aux limites. Elle assure une distribution globale équilibrée de l'erreur sur l'ensemble du domaine.

La méthode de Galerkin : dans ce cas, les fonctions de pondération sont choisies identiques aux fonctions d'approximation. Cette méthode a l'avantage de conduire, dans le cas de systèmes linéaires, à un système algébrique symétrique, ce qui facilite grandement sa résolution numérique.

Contrairement à la **formulation variationnelle**, qui nécessite la connaissance explicite de la fonctionnelle d'énergie du système étudié, la méthode des résidus pondérés se base uniquement sur la forme différentielle de l'équation à résoudre, ce qui la rend plus flexible dans certains cas.^[27]

Discrétisation du domaine de résolution :

Dans le cadre de la méthode des éléments finis, le domaine d'étude est subdivisé en sous-domaines appelés éléments finis. Au sein de chaque élément, l'inconnue (comme le potentiel vecteur magnétique) est approximée à l'aide de fonctions d'interpolation, généralement polynomiales. Cette approximation repose sur les valeurs nodales, c'est-à-dire les valeurs de l'inconnue aux nœuds de chaque élément.

On parle ainsi d'interpolation nodale, et les fonctions associées sont choisies de manière à être égales à 1 au nœud concerné et nulles aux autres nœuds de l'élément. Ce choix permet d'assurer la continuité de l'inconnue sur l'ensemble du domaine maillé.

2.9. Calcul de l'impédance du capteur

Le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault repose essentiellement sur l'analyse de la réponse électrique du capteur lors de son déplacement à proximité de zones comportant des défauts. Les grandeurs mesurées (ou simulées) sont influencées par plusieurs paramètres : propriétés électriques du matériau, forme et nature des défauts, géométrie du capteur, fréquence d'excitation, etc.

Une fois le **potentiel vecteur magnétique** calculé en chaque nœud du domaine maillé, il est possible de déduire d'autres grandeurs physiques, notamment les **courants de Foucault** et le **champ électrique**. Cependant, ces grandeurs ne sont pas toujours accessibles expérimentalement. Ainsi, dans la pratique, on procède souvent par la **mesure ou le calcul de grandeurs dérivées**, comme l'**impédance du capteur**, pour caractériser la présence ou non de défauts dans la pièce inspectée.

L'impédance de la bobine, qui constitue le paramètre clé dans ce type de contrôle, est influencée par les interactions électromagnétiques entre le champ produit par la bobine et les courants induits dans la pièce. Plusieurs formulations théoriques et expressions analytiques ou numériques de l'impédance ont été développées dans le domaine du CND par courants de Foucault, afin de mieux comprendre et interpréter les résultats obtenus.^[10]

2.10. Calcul de l'impédance à partir de l'énergie magnétique et des pertes Joule

L'impédance complexe du capteur utilisé en contrôle non destructif par courants de Foucault peut être déduite à partir de deux grandeurs fondamentales : l'énergie magnétique emmagasinée dans le domaine et les pertes par effet Joule. Ces deux quantités permettent de relier les caractéristiques électromagnétiques du système aux variations de l'impédance induites par la présence d'un défaut.

L'énergie magnétique emmagasinée dans l'espace d'étude est donnée par la relation :

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_V \frac{1}{\mu} |B|^2 dv \quad 33$$

$$P_J = \frac{1}{2} \iiint_{\text{conducteur}} \frac{1}{\sigma} |J|^2 dv \quad 34$$

Connaissant W_m et P_J , nous pouvons accéder facilement à la résistance R et à la réactance X , équivalentes du capteur.

Les expressions reliant la résistance aux pertes Joule, et la réactance de l'énergie magnétique sont données par les relations suivantes :

$$R = \frac{P_J}{I^2}, X = \frac{2\omega W_m}{I^2} \quad 35$$

Avec I et ω représentent respectivement le courant d'excitation parcourant la bobine et sa pulsation. On peut déduire alors les variations ΔX et ΔR .

$$\Delta X = \omega \iiint_V \frac{|B|^2 - |B_0|^2}{\mu I^2} dv \quad 36$$

$$\Delta R = \frac{1}{2\sigma I^2} \iiint_{\text{conducteur}} (|J|^2 - I_0^2) dv \quad 37$$

Avec :

B_0 : Induction pour pièce de référence (sans défaut);

B : Induction pour pièce de à tester (avec défaut);

J_0 : Densité des courants induits;

J : Densité des courants induits.

Calcul de l'énergie électromagnétique de la bobine

On peut calculer la variation de l'impédance par la détermination de l'énergie électromagnétique de la bobine constituant le capteur. Cette variation est donnée par la formule ci-après :^[10]

$$W_{em} = I^2 \Delta Z = - \int \Omega_s (E - E_0) \cdot J_s d\Omega_s \quad 38$$

\vec{E} et \vec{E}_0 représentent les champs électrique respectivement en présence et en absence de la fissure.

I est l'intensité du courant parcourant la bobine et Ω_s représente le volume occupé par la bobine.

Dans la bobine, le champ électrique s'écrit:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -j\omega \mathbf{A} \quad 39$$

D'où, l'expression de la variation d'impédance ΔZ :

$$\Delta Z = -j\omega \int \Omega_s (\mathbf{A} - \mathbf{A}_0) \cdot \mathbf{J}_s d\Omega_s \quad 40$$

\mathbf{A} et \mathbf{A}_0 étant les potentiels vecteurs magnétiques respectivement en présence et en absence de la fissure.

Il convient de souligner que le terme $I^2 \Delta Z = \int_{\Omega_s} (\vec{A} - \vec{A}_0) \cdot \vec{J}_s d\Omega_s$, divisé par $j\omega$, représente la variation de l'énergie électromagnétique stockée dans la bobine, observée entre les cas avec et sans présence de défaut.

Les deux approches de calcul aboutissent à des résultats équivalents. Toutefois, dans notre étude, nous avons choisi d'adopter la première méthode.

En raison de la taille importante des matrices générées, l'utilisation d'algorithmes de pré conditionnement ainsi que de méthodes itératives s'avère indispensable pour résoudre efficacement le système d'équations obtenu.

De nos jours, plusieurs logiciels de simulation numérique facilitent la résolution des équations aux dérivées partielles modélisant les phénomènes électromagnétiques liés au contrôle non destructif par courants de Foucault. Parmi eux, **COMSOL Multiphysics**, qui repose sur la méthode des éléments finis, se distingue par sa capacité à modéliser avec précision ces phénomènes, tout en offrant la possibilité de s'interfacer avec **MATLAB** pour un traitement plus avancé.[²⁸]

2.11. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude détaillée de la modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF), une technique largement utilisée dans l'industrie pour la détection de défauts de surface et de sous-surface dans les matériaux conducteurs. Nous avons débuté par une présentation rigoureuse des fondements théoriques en exposant les équations de Maxwell, qui régissent les phénomènes électromagnétiques. Ces équations ont été accompagnées par les différentes conditions nécessaires à une bonne formulation du problème physique, notamment les conditions aux limites, les conditions de continuité aux interfaces et les conditions de jauge permettant de lever l'ambiguïté sur les potentiels électromagnétiques.

Par la suite, une attention particulière a été portée aux différentes approches possibles pour la résolution des équations aux dérivées partielles issues de la formulation électromagnétique. Trois grandes classes de

méthodes ont été discutées : les méthodes analytiques, souvent limitées aux cas simples ou à géométrie régulière ; les méthodes semi-analytiques, qui combinent des éléments analytiques et numériques ; et surtout les méthodes numériques, qui permettent de traiter des géométries complexes et des conditions réalistes. Parmi ces dernières, la méthode des éléments finis (FEM) s'est révélée particulièrement adaptée pour la simulation des phénomènes impliqués dans le CND par courants de Foucault, en raison de sa flexibilité et de sa robustesse.

Dans la dernière partie du chapitre, nous avons abordé les différentes formulations de l'impédance complexe, qui constitue une grandeur physique clé dans l'interprétation des signaux issus du capteur à courants de Foucault. Ces expressions permettent de relier les variations d'impédance à la présence de défauts dans la pièce inspectée, par le biais de grandeurs physiques telles que l'énergie magnétique emmagasinée et les pertes Joule.

Enfin, dans la perspective de mettre en œuvre ces concepts dans un cadre de simulation, nous avons justifié le choix du logiciel **COMSOL Multiphysics**. Ce dernier repose sur la méthode des éléments finis et offre un environnement modulaire capable de traiter une large gamme de phénomènes physiques couplés. Il permet non seulement une modélisation précise des phénomènes électromagnétiques, mais également une intégration facile avec des outils comme **MATLAB** pour l'analyse post-traitement des résultats. Dans le cadre de notre mémoire, COMSOL sera utilisé comme plateforme de simulation pour le CND-CF appliqué à l'inspection des tubes d'échangeurs de chaleur. La résolution des équations dans notre étude s'appuiera entièrement sur la méthode des éléments finis, en tenant compte des spécificités géométriques, matérielles et physiques du problème étudié.

CHAPITRE 03 : Applications et validation

3.1. Introduction

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons à l'application de la méthode des courants de Foucault pour détecter les signaux issus de trois défauts surfaciques sur une plaque métallique plane en Al, Ti et Aus. Pour ce faire nous implémentons le modèle sous Comsol, ensuite nous comparons les signaux obtenus à ceux issus d'une inspection réelle réalisée par un dispositif à CF industriel au sein de la société SAIGE.

La simulation est réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysiques 6.2 qui est un environnement de modélisation multi-physique reconnu pour sa capacité à intégrer les phénomènes électromagnétiques, thermiques, mécaniques et couplés. En effet, via son interface (voir la figure ci-dessus) le concepteur pourrait introduire aisément :

- La géométrie de la plaque (dimensions, matériau, épaisseur).
- La nature et la position des trois défauts (type entaille ou cavité, profondeur, largeur, espacement).
- Les caractéristiques du capteur (taille, nombre de spires, fréquence d'excitation, mode de balayage).

Le maillage raffiné au niveau des zones présentant des discontinuités.

L'objectif principal de cette simulation est d'évaluer la capacité du capteur à détecter et localiser les trois défauts, et d'analyser l'influence de leur profondeur sur les signaux recueillis au niveau du capteur.

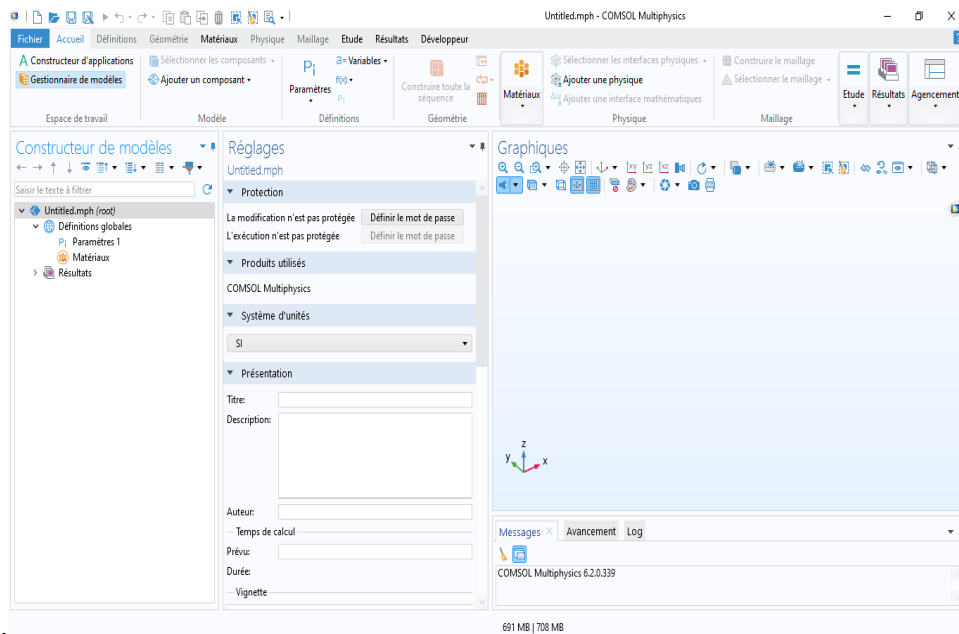


Figure 3. 1. Interface utilisateur de COMSOL 6.2

L'interface de COMSOL peut être séparée en quatre parties. A gauche, on retrouve le Model où il est possible de définir des variables et d'autres paramètres du problème (Paramètres), le modèle (Model) où

se retrouvent la géométrie (Géométrie), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles physiques s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh). Le modèle comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur (Study) et les options d'affichage et de post traitement des données (Results). La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans le modèle : par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans Geometry. C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. En haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer l'agrandissement de l'affichage (zoomer), l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc... Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre. Finalement, au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, les progressions des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée.

3.2. Modélisation géométrique sous COMSOL Multiphysics 6.2

3.2.1. Description de la géométrie du système capteur

La première étape a consisté à créer la géométrie du modèle 3D dans l'environnement COMSOL :

- **Plaque métallique** : de forme rectangulaire, avec des dimensions typiques conducteur.
- **Défauts** : trois défauts ont été introduits sur la surface de la plaque. Ces défauts sont modélisés sous forme de cavités rectangulaires ou entailles de dimensions variables
. Ils sont positionnés à différentes distances les uns des autres pour étudier l'effet de proximité.
- **Capteur**: qui constitue une bobine multi-spires dont on doit affecter le nombre de tours, la section du fil ainsi que sa conductivité. D'autre part, il est à rappeler que la bobine peut être sous plusieurs formes, c'est pourquoi la forme circulaire, linéaire ou numérique de la bobine doit être choisie au préalable.

3.2.2. Configuration spatiale du capteur et de la cible

CAPTEUR	
Nombre de bobines	1
Rayon externe (m)	4e-3
Rayon interne (m)	2.5e-3
Hauteur (m)	2e-3
Nombre de spires	200

Tableau 2 . Caractéristique du capteur

Nous notons que le Lift-off qui est la distance entre le capteur et la cible à inspecter est 1mm. En effet, cette configuration permet au capteur de se déplacer le long de la plaque et couvrir toutes les zones contenant les défauts. Dans ce contexte et dans le but d’élargir cette étude nous effectuons cette inspection sur trois plaques en Al, Ti et Au dont les caractéristiques sont données sur le tableau et la figure ci-dessous.

Plaque	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	conductivité (M Sm ⁻¹)	densité de courant (Kg/m ³)
Al	101.8	25.6	9	37.7	2700
Au	76.3	25.6	6.5	1.4	7950
Ti	80.2	3.5	8	2.5	2700

Tableau 3 Caractéristique des plaques.

	Plaque Al	Plaque Au	Plaque Ti
P1 (mm)	1	1	1.016
P 2 (mm)	0.5	0.5	0.508
P3 (mm)	0.2	0.2	0.203

Tableau 4 . Profondeur P1, P2 et P3 des défauts artificiels dans chaque plaque.

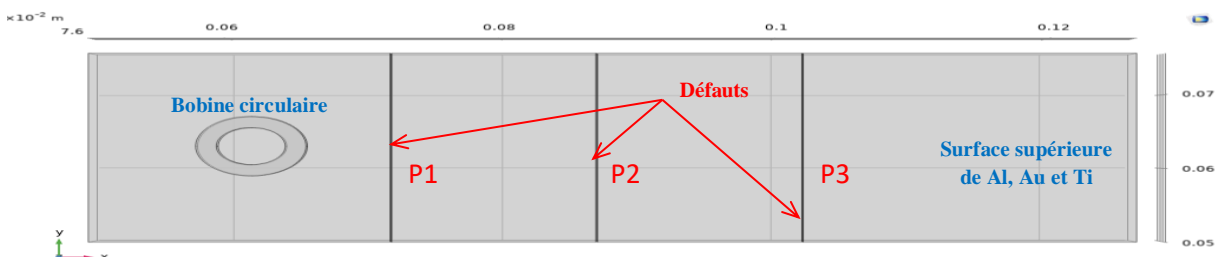


Figure 2. 2. Trois défauts de différentes profondeurs sur des plaque Al, Au et Ti

3.2.3. Géométrie 3D et maillage

La première étape fondamentale de toute simulation numérique consiste à définir avec précision le domaine de calcul, la géométrie de la pièce à inspecter ainsi que le capteur utilisé. Dans le cadre de cette étude, nous avons modélisé une plaque métallique rectangulaire de dimensions, contenant trois défauts artificiels de types cavités rectangulaires, répartis à différentes positions sur la surface. Tel que discuté précédemment.

Une fois la géométrie définie, l'étape suivante consiste à générer un maillage adapté à la simulation électromagnétique par courants de Foucault. Le maillage constitue l'une des étapes les plus critiques du processus, car la précision et la stabilité des résultats en dépendent directement. Un maillage trop grossier peut fausser les résultats, tandis qu'un maillage trop fin peut alourdir inutilement le temps de calcul.

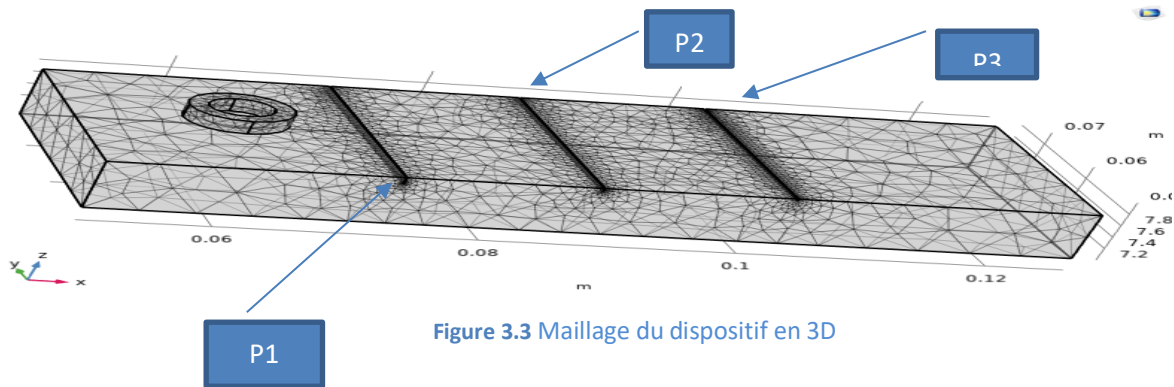
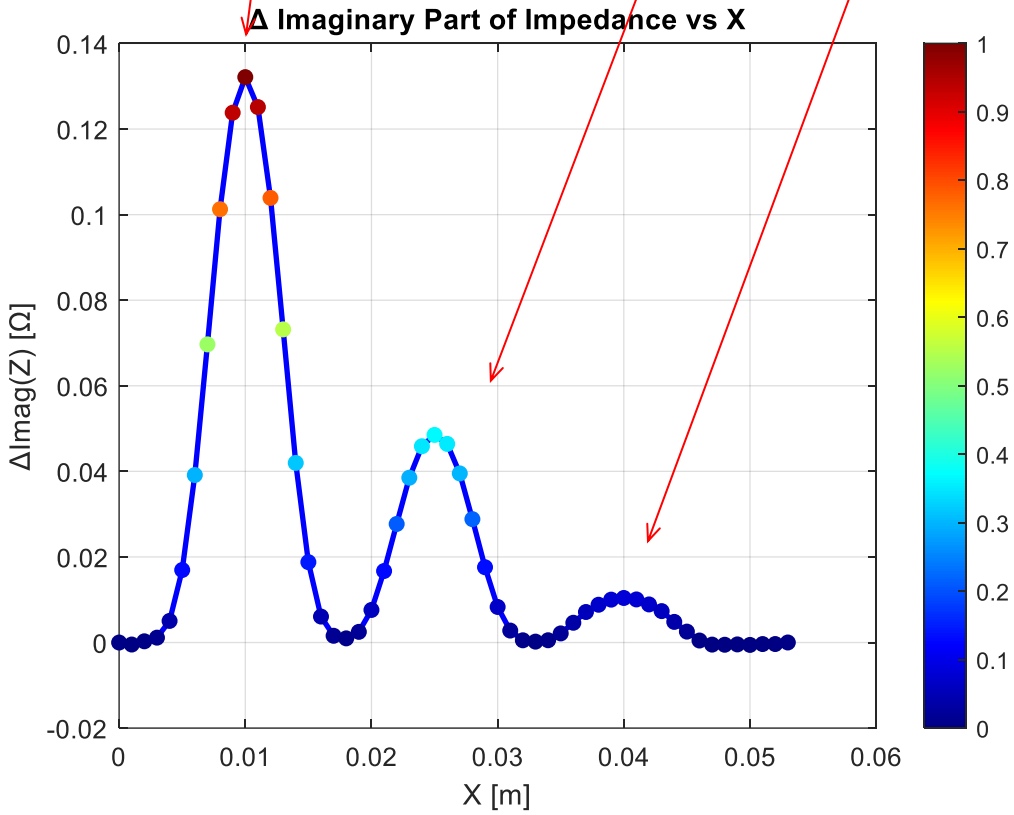
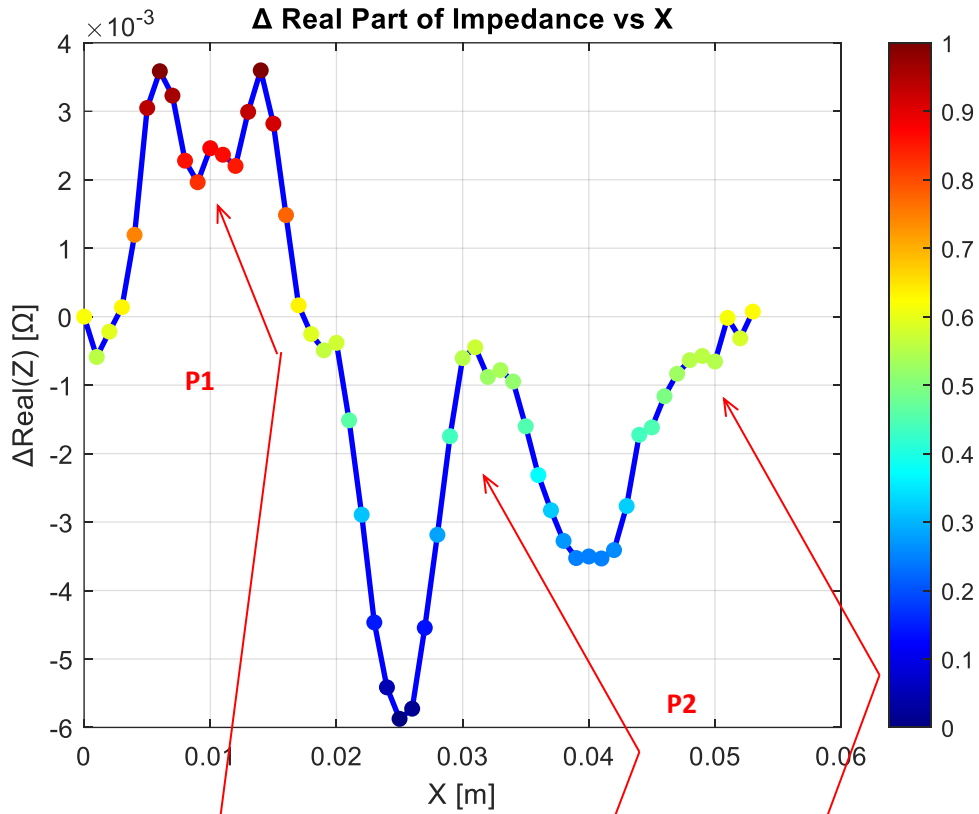


Figure 3.3 Maillage du dispositif en 3D

3.3. Composantes de l'impédance du capteur

L'excitation du capteur est une **source de courant alternatif sinusoïdal**, typiquement à une fréquence de quelques dizaines à centaines de kHz selon le matériau analysé. Cette fréquence permet de maximiser l'effet des courants de Foucault en surface. En effet, les résultats de calcul de l'impédance du capteur se déplaçant le long de l'axe OX pour une plaque d'Al, AUS et Ti sont montrés sur les figures.



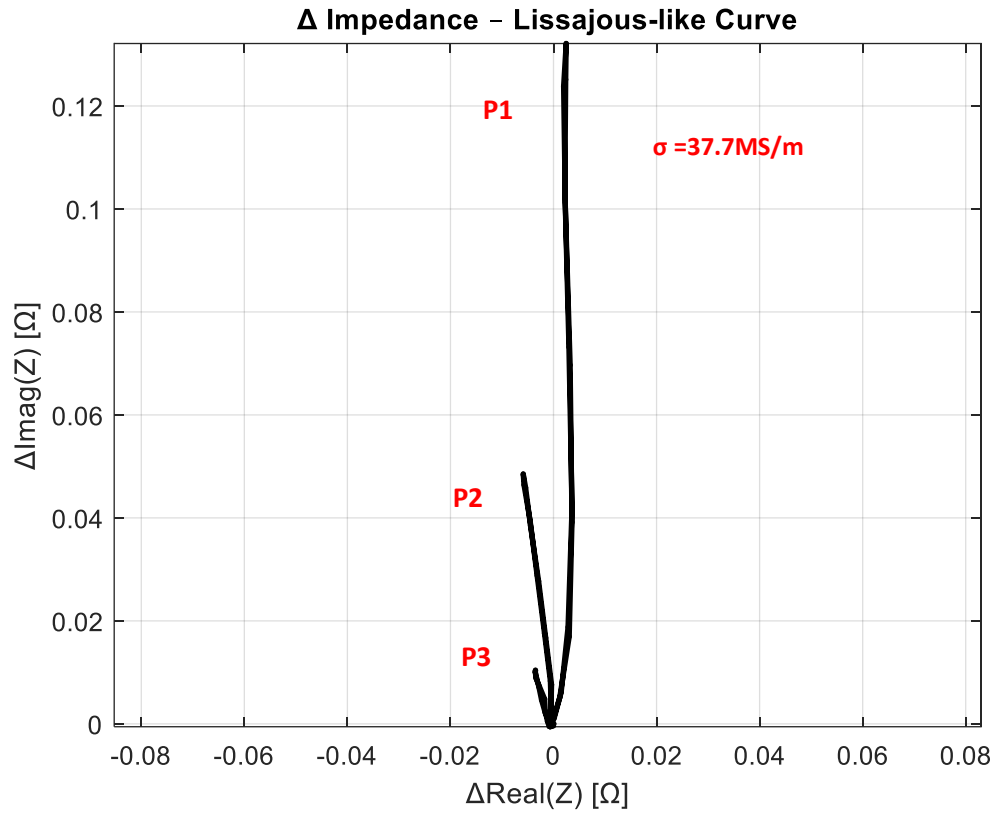
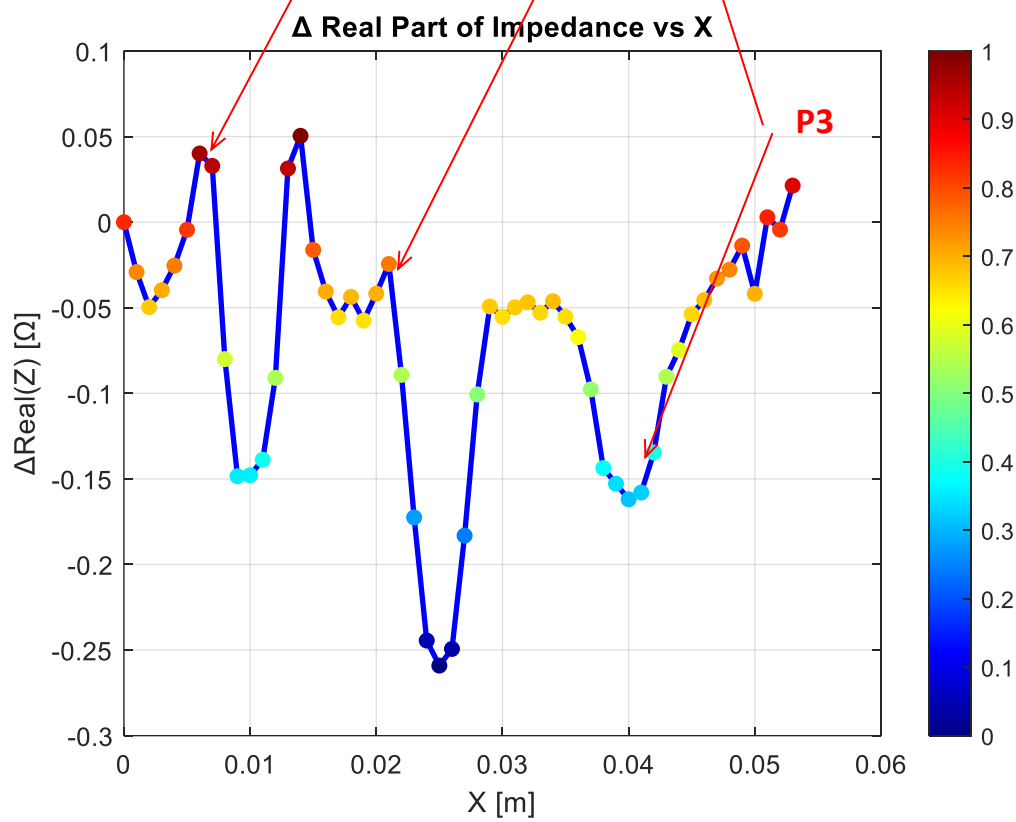
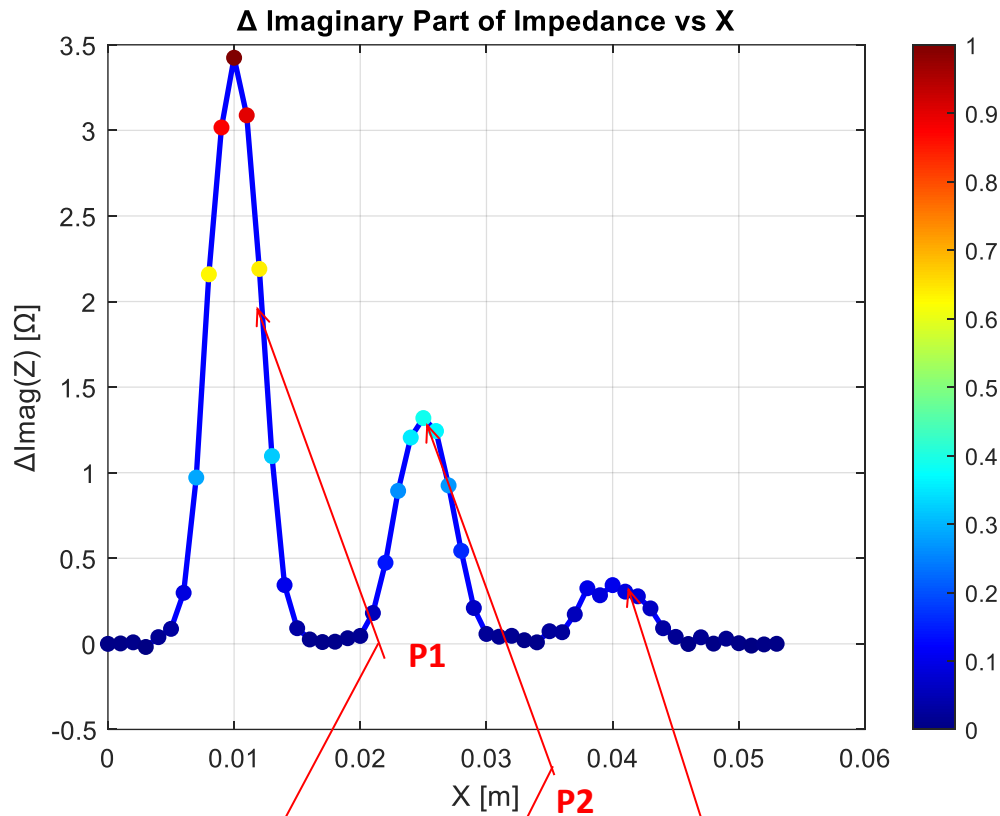


Figure 3.5. Composantes de l'impédance et courbes de Lissajous pour une plaque en AL a 10kHz



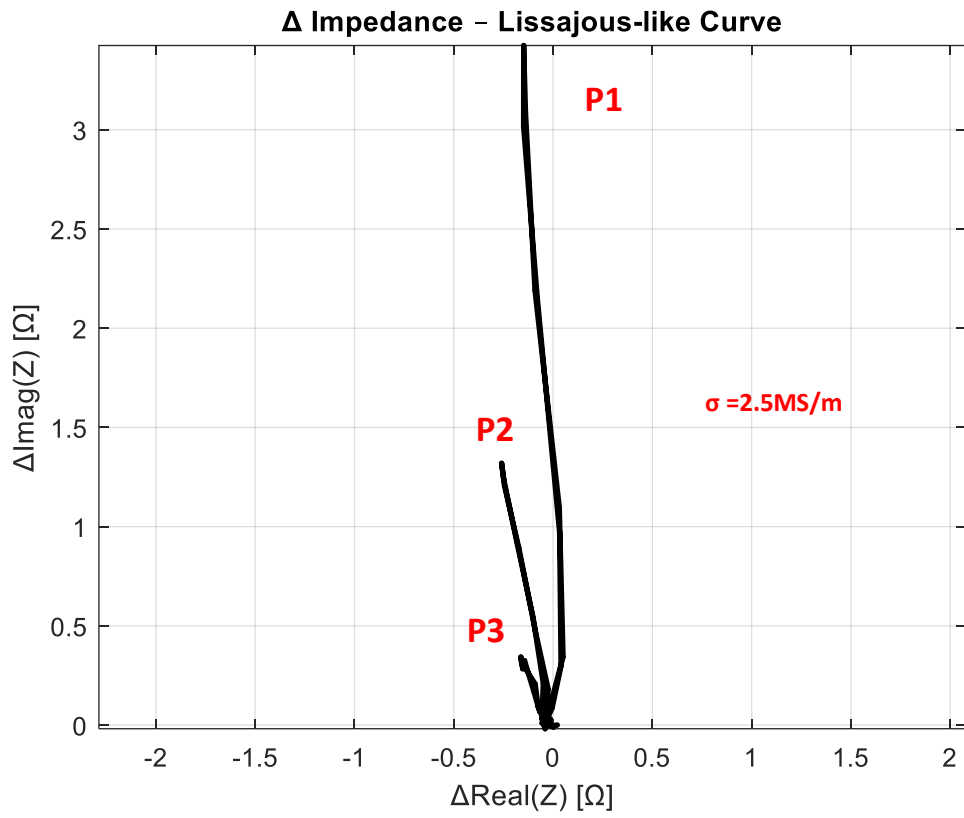
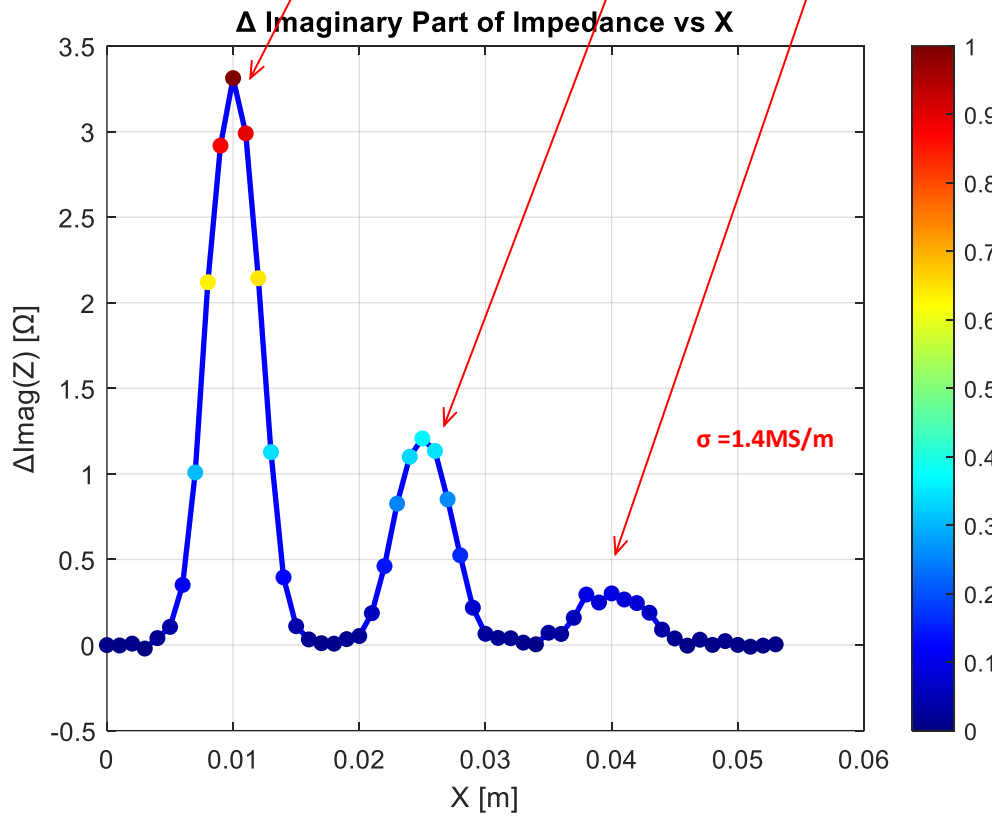
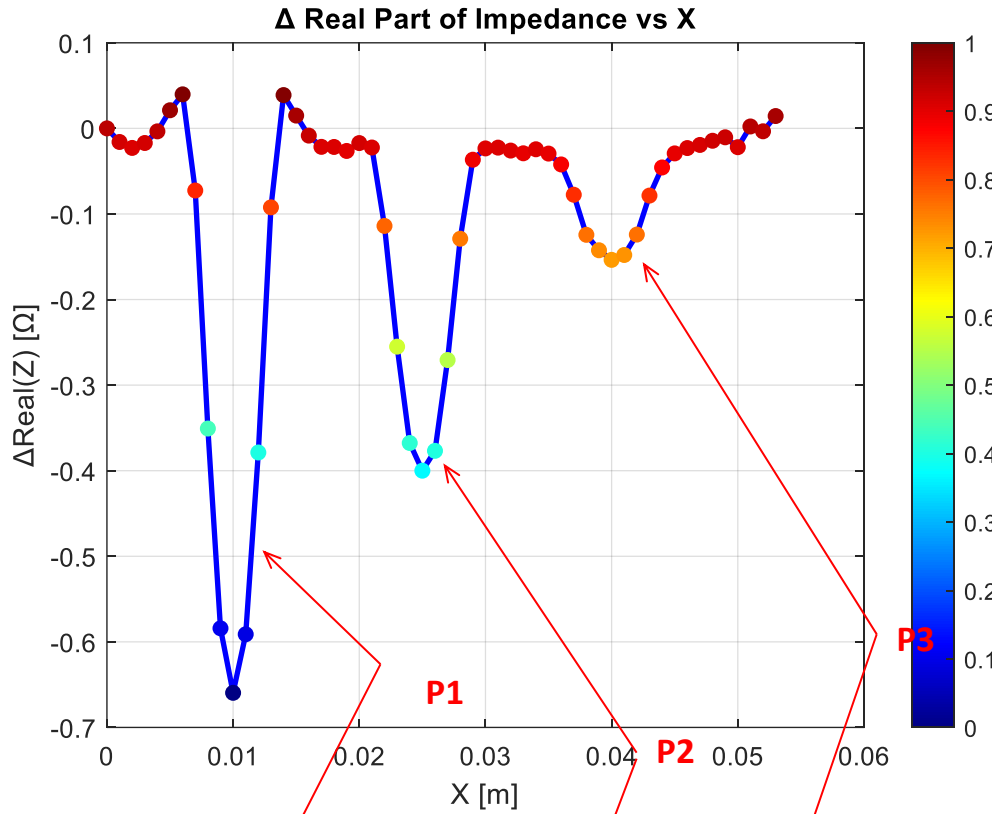


Figure 3.6. Composantes de l'impédance et courbes de Lissajous pour une plaque en Ti



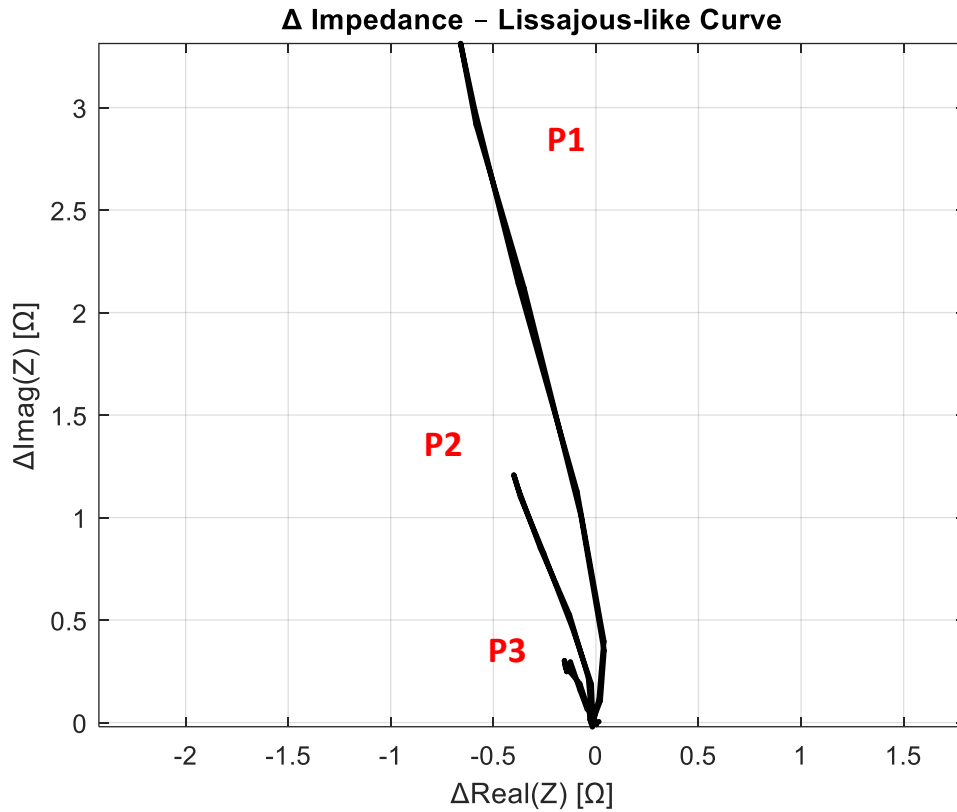


Figure 3.7. Composantes de l'impédance et courbes de Lissajous pour une plaque en AUS

3.4. Présentation du dispositif expérimental

Dans le cadre du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault, nous avons utilisé un dispositif de la marque SOFRANEL, permettant l'analyse électromagnétique de matériaux conducteurs. Cette technique repose sur l'induction électromagnétique : un courant alternatif traversant une bobine génère un champ magnétique qui induit à son tour des courants de Foucault dans la pièce à tester. Les interactions entre ces courants et les défauts potentiels modifient la réponse électrique de la bobine, permettant ainsi la détection des anomalies.

Le dispositif que nous avons utilisé dans le cadre de cette expérimentation est un système de la marque **SOFRANEL**, connu pour sa robustesse et sa précision dans les essais de type électromagnétique.

Le dispositif pratique utilisé pour accomplir cette étude est constitué de :

- Appareil à courants de Foucault Phasec2d
- Un capteur à CF surfacique
- Trois plaques en Al, Ti et Au comportant des défauts artificiels de la même taille que ceux étudiés par simulation.

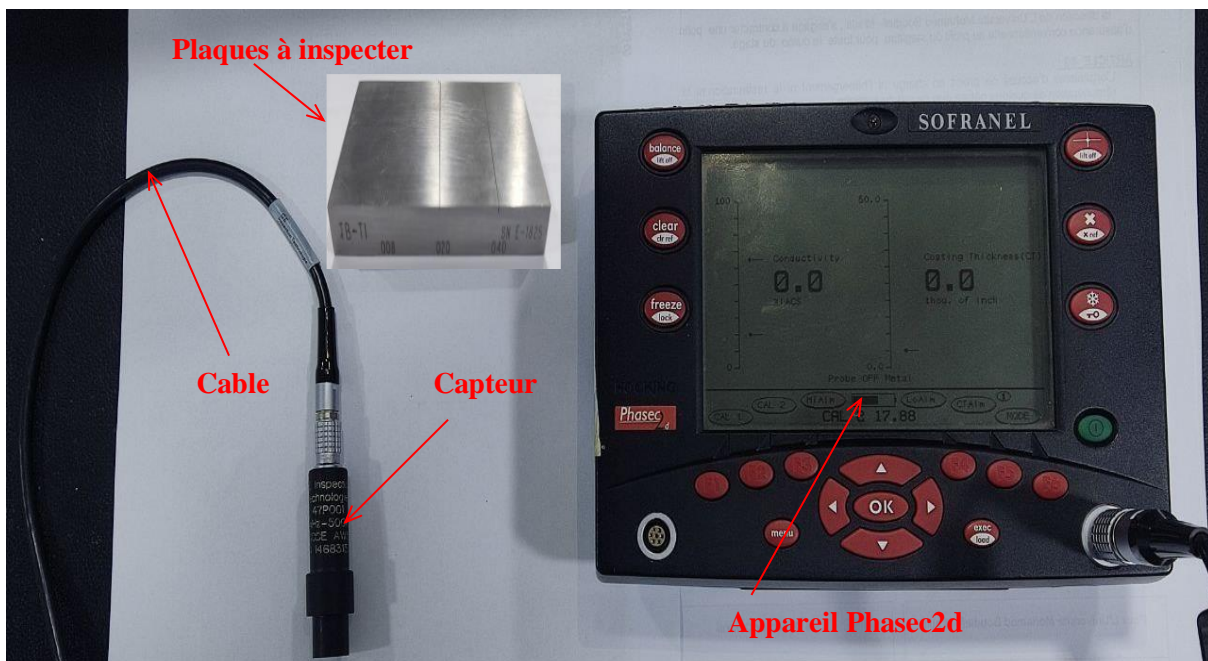


Figure 3.8. dispositif expérimental

3.4.1. Description du matériel utilisé

Appareil de mesure : SOFRANEL :

- Type : Appareil portable de contrôle par courants de Foucault.
- Écran : Affichage XY permettant la visualisation vectorielle des réponses du matériau en fonction de la phase et de l'amplitude.
- Fonctions intégrées : réglage de la phase, du gain, freeze, balance, sweep, etc.
- Affichage des données : Phase, gain, mode SPOT/XY/TIME.

Sonde utilisée :

- Type : Sonde mono-élément (ou multiélément selon le cas).
- Fonction : Induire les courants de Foucault et recueillir les signaux de retour.
- Mode d'utilisation : La sonde est déplacée manuellement à la surface de la pièce testée.





Figure 3.9. Pencil (probe) la sonde

Méthodologie expérimentale

L'objectif de cette manipulation est de comparer les réponses électromagnétiques de trois matériaux conducteurs (aluminium, titane, austénite) soumis à un champ alternatif généré par la sonde. Chaque matériau est testé séparément, les paramètres de phase et de gain étant ajustés pour optimiser la visualisation du signal.

Paramètres standards utilisés :

- **Phase** : 206.0°
- **Gain** : variable (40.5 pour le titane par exemple)
- **Mode de balayage** : SWEEP activé
- **Affichage** : XY, SPOT ou DISP selon la précision recherchée

3.5. Analyse des résultats obtenus

Le déplacement du capteur suivant la longueur des plaques et le réglage nécessaire permet d'obtenir des signatures de défauts très représentatives. [29]

3.5.1. Cas de l'Al

La courbe de Lissajous obtenue en traçant la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance du capteur est montrée sur la figure suivante.

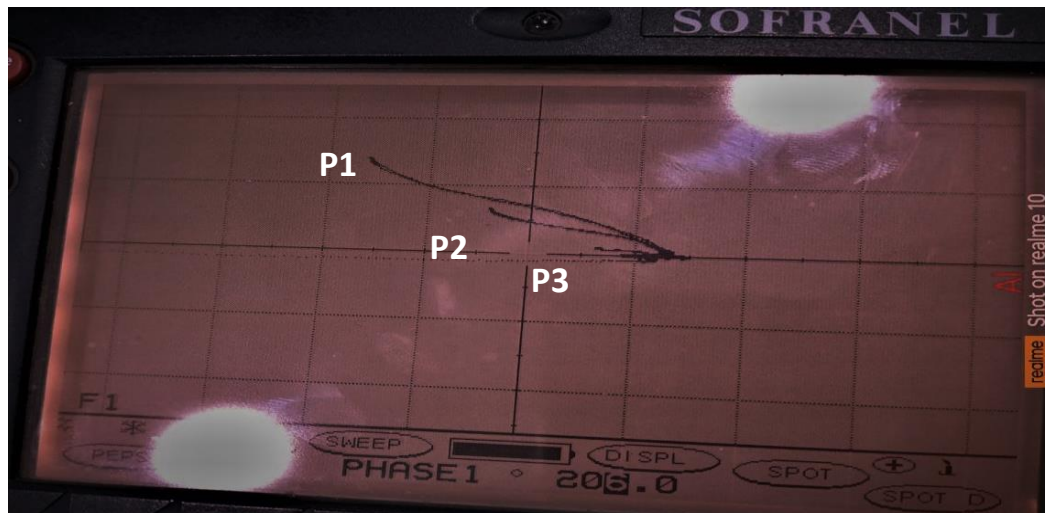


Figure 3.11. Signal obtenu lors du balayage de la plaque en aluminium.

Observations visuelles :

- Le signal se distingue par une courbe nette, bien développée et dirigée vers le haut gauche.
- Forte séparation de phase, indiquant une réactivité importante.
- Le tracé est lisse, continu, sans instabilité apparente.

Interprétation technique:

- L'aluminium, avec une conductivité électrique très élevée ($\sigma \approx 35\text{--}38 \text{ MS/m}$), génère facilement des courants de Foucault puissants et bien répartis à la surface.
- La profondeur de pénétration des courants est faible à haute fréquence, ce qui rend cette plaque idéale pour la détection de **défauts de surface ou sub-surface peu profonds**.
- Le signal obtenu reflète une très bonne sensibilité du système aux perturbations induites par les défauts (fissures, porosités...).

Conclusion spécifique :

- Le comportement du signal montre que le système capteur est bien adapté à l'inspection de matériaux fortement conducteurs.
- Toute variation locale du champ est immédiatement traduite par une déviation nette du tracé

3.5.2. Cas de l'Au

La courbe de Lissajous obtenue en traçant la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance du capteur est montrée sur la figure suivante.

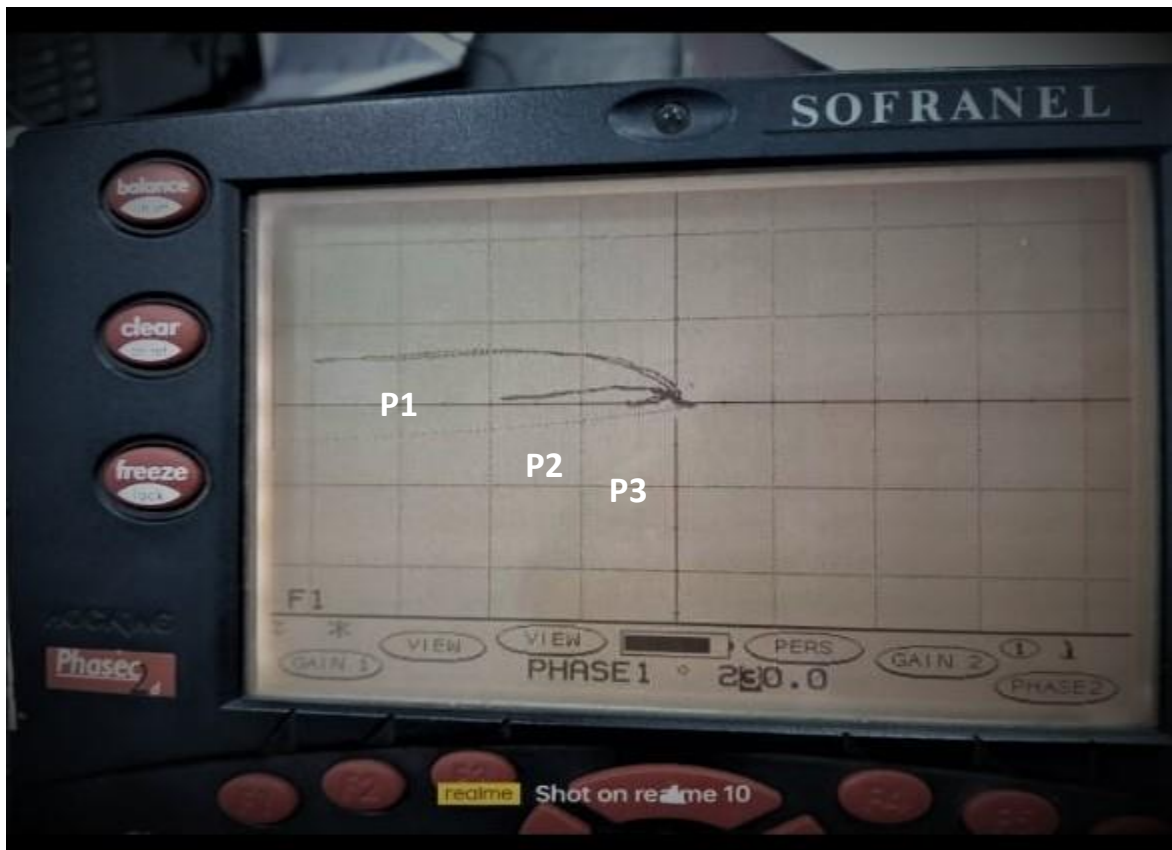


Figure 3-12 Signal obtenu lors du balayage de la plaque en austénite

Observations visuelles :

- Le tracé est relativement long, avec une courbure plus faible que celui de l'aluminium.
- On note une séparation modérée du signal, avec une orientation caractéristique d'un matériau à perméabilité magnétique légèrement supérieure.
- Le signal reste clair mais moins accentué que dans le cas de l'aluminium.

Interprétation technique :

- L'austénite est un acier inoxydable non magnétique, mais sa conductivité est plus faible que l'aluminium ($\sigma \approx 1.4-1.6 \text{ MS/m}$).
- La réponse électromagnétique est donc intermédiaire : moins sensible que l'aluminium,

CHAPITRE 03 : Application et validation

mais plus stable que le titane.

- Les propriétés magnétiques (faible perméabilité relative) influencent la phase du signal.

Conclusion spécifique :

- L'austénite offre une bonne base de détection, mais avec une réponse atténuée.
- Le système est suffisamment performant pour détecter les défauts classiques (fissures de fatigue, corrosion localisée), à condition de bien calibrer les réglages.

6.3. Cas du Ti

La courbe de Lissajous obtenue en traçant la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance du capteur est montrée sur la figure suivante.

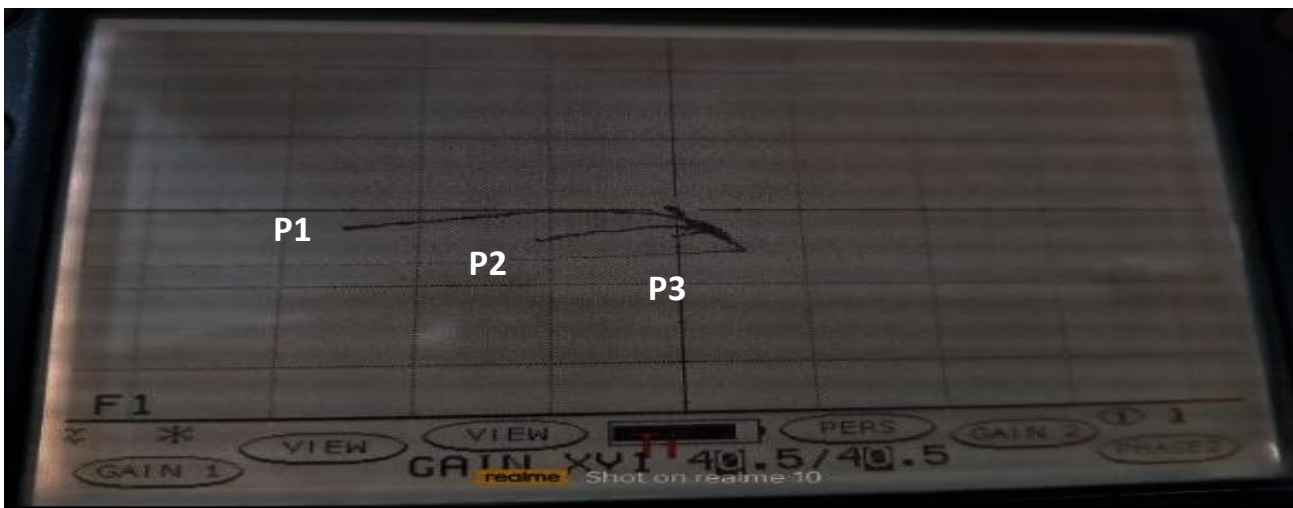


Figure III.13. Signal obtenu lors du balayage de la plaque en Titan

Observations visuelles :

- Le tracé est plus court, moins défini et de faible amplitude.
- Le signal reste cependant stable, avec une inflexion visible au niveau du point de passage du défaut.
- Le gain est réglé à 40.5, ce qui indique une nécessité d'amplification plus importante.

Interprétation technique :

- Le titane a une conductivité relativement faible ($\sigma \approx 1.8-2.4 \text{ MS/m}$), ce qui engendre des courants de Foucault moins intenses.
- Cette faible intensité induit une faible réponse en amplitude, expliquant la forme discrète

du signal.

- L'augmentation du gain est indispensable pour compenser le signal faible, ce qui peut aussi amplifier le bruit.

Conclusion spécifique :

- La détection des défauts dans le titane est plus délicate et nécessite un ajustement fin des paramètres.
- Le système de mesure reste capable d'identifier les anomalies, mais la fiabilité dépend fortement de la sensibilité du capteur et du traitement du signal.

3.6. Conclusion générale sur l'analyse des résultats

Ce travail a permis de mettre en œuvre une approche complète du contrôle non destructif par courants de Foucault, en combinant modélisation numérique et expérimentation. L'utilisation du logiciel **COMSOL Multiphysics 6.2** a permis de simuler avec précision le comportement électromagnétique du système, en tenant compte de la géométrie du capteur, des propriétés des matériaux et des conditions de mesure.

Les résultats obtenus à travers les **simulations numériques** ont été confrontés aux mesures expérimentales réalisées avec le dispositif **Phasec 2D**. La comparaison a montré une **bonne concordance entre les deux approches**, validant ainsi la fiabilité du modèle utilisé et la pertinence des hypothèses formulées.

Cette convergence entre simulation et expérience représente un résultat très satisfaisant, soulignant le potentiel de la modélisation pour anticiper et optimiser les procédures de contrôle. Elle ouvre également des perspectives prometteuses pour le développement de capteurs plus performants et l'intégration de techniques d'analyse avancées, comme l'intelligence artificielle, pour améliorer l'interprétation des données.

En somme, ce travail démontre que la synergie entre modélisation et expérimentation constitue pour renforcer la précision et l'efficacité des méthodes de contrôle non destructif. [30]

Conclusion Générale

En résumé, cette étude propose une approche complète et structurée du contrôle non destructif par courants de Foucault, une technique à la fois performante, non invasive et adaptable à de nombreuses configurations industrielles. En partant d'un cadre théorique solide fondé sur les équations de Maxwell, ce travail vise à modéliser avec précision le comportement des courants induits dans des matériaux conducteurs afin de détecter d'éventuels défauts. La mise en œuvre de méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis (MEF), permet de reproduire fidèlement les phénomènes électromagnétiques complexes liés à cette technique de contrôle, en tenant compte des paramètres physiques et géométriques influents.

Cette approche est complétée par une phase expérimentale rigoureuse, réalisée à l'aide de l'appareil Phasec 2D, qui vise à confronter les résultats issus de la simulation aux mesures réelles. Cette confrontation permet non seulement de valider les modèles théoriques proposés, mais également de mettre en évidence les limites et les performances du système dans un contexte réel d'utilisation.

Les résultats obtenus illustrent clairement la pertinence de cette méthodologie hybride, combinant modélisation numérique et expérimentation, pour renforcer l'efficacité et la fiabilité des procédures de contrôle. Ils témoignent également du potentiel important qu'offre la simulation dans le développement futur de capteurs plus intelligents, adaptatifs et optimisés pour différents types de matériaux ou de défauts.

Ce mémoire ambitionne ainsi de contribuer activement au progrès des techniques de contrôle non destructif, en proposant une démarche validée, reproductible et évolutive, susceptible d'être transposée à d'autres applications industrielles tel que :

- L'automatisation de l'inspection des coussinets au sein de la MEI.
- Mesure d'épaisseur des matériaux conducteurs.
- Mettre en œuvre des tests en C-scan (XY).

Résumé

Le contrôle non destructif (CND) vise à examiner l'état d'une pièce sans altérer son intégrité. Il constitue une étape essentielle du processus industriel, car il assure la fiabilité et la sécurité des composants inspectés. En plus de cet aspect sécuritaire, le CND présente un intérêt économique important en contribuant à une meilleure planification de la maintenance. Ainsi, il occupe une place centrale dans de nombreux secteurs industriels tels que l'automobile, le pétrole, la construction navale, l'aéronautique ou encore le nucléaire.

L'objectif visé par ce travail, en premier lieu, est de présenter les principales méthodes de CND et en particulier celle des courants de Foucault, ensuite faire une description rapide des capteurs les plus utilisés dans ce cadre, les équations de Maxwell qui régissent le phénomène de détection par courants de Foucault (basé sur la variation d'impédance capteur-pièce), les conditions aux limites et les paramètres qui peuvent influer sur cette détection en fin concrétiser l'étude théorique par un programme de simulation «COMSOL 6.2 » et interprétation des résultats obtenus .

المخلص

تعد المراقبة غير التدميرية من التقنيات الحيوية المستخدمة لتقييم سلامة القطع دون إلحاق ضرر بها. وقد تم تصميم هذه التقنية خصيصًا للتحقق من جودة القطع الصناعية المعرضة للاستعمال أو للإجهاد، مما يتيح الكشف المبكر عن العيوب أو الشقوق قبل أن تتطور إلى أضرار جسيمة ومن بين هذه التقنيات تيارات فوكو.

تيارات فوكو ظاهرة فيزيائية تعتمد على توليد تيارات كهربائية دائرية داخل المواد الموصلة عند تعرضها لتغير في المجال المغناطيسي. وقد أصبحت هذه الظاهرة من الأسس المعتمدة في تقنيات المراقبة غير التدميرية، خصوصًا للكشف عن العيوب السطحية وتحت السطحية في المعادن. تنشأ هذه التيارات نتيجة الحث الكهرومغناطيسي، وتتأثر بشكل واضح بخصائص المادة مثل التوصيلية الكهربائية والنفذية المغناطيسية. عند وجود شقوق أو تغيرات في البنية الداخلية للقطعة المفحوصة، فإن مسار تيارات فوكو يتغير، مما يؤدي إلى تغيرات في الإشارة الكهرومغناطيسية المستقبلية من طرف المجس، ويمكن تحليل هذه الإشارات لاكتشاف العيوب وتحديد خصائصها. وتتميز هذه التقنية بسرعتها، وعدم تسببها بأي ضرر للقطعة، وفعاليتها العالية في الكشف، مما يجعلها خيارًا مثاليًا في العديد من التطبيقات الصناعية مثل صناعة الطيران، السيارات، والبتروكيمياء.

Références

- ¹ **Dr. Lyes BIDI**, "Contrôle Non Destructif (CND) " Université Frères Mentouri Constantine1 2018/2019
- ² **BOUALI Ferroudja** " Utilisation d'une méthode semi-analytique pour l'étude du contrôle non destructif en régime pulsé " Université Mouloud Mammeri. Tizi-ouzou 27.01.2010
- ³ **DUMONT-FILLON 1996**, "Contrôle non destructif (CND)".
- ⁴ **Chiara ZORNI**, "Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques de l'expérience au modèle d'interaction ", Thèse de Doctorat, université Paris-Sud11, Paris 2012
- ⁵ **CHOUA Yahya**, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configuration de contrôle non destructif par courants de Foucault ", Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud 11, PARIS 2010
- ⁶ **HOUDA ZAIDI**, "Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples ", Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, 2012
- ⁷ **BOULOUDENINE Abderraouf**, "Etude de dispositifs de CND-CF (Contrôle non destructif par Courants de Foucault) appliqués à la caractérisation dematériaux composites à fibres de carbone", Thèse de Doctorat, Université des Frères Mentouri de Constantine, 2018
- ⁸ **Dumont-Fillon**, "Contrôle non destructif (CND)", Technique de l'ingénieur 1994
- ⁹ **Brahim RAMADANE**, "Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision" Thèse de Doctorat, Université de Nantes. 2009.
- ¹⁰ **SAFER Omar Adib**, "Etude et modélisation d'un capteur a courant de Foucault pour le contrôle non destructif", diplôme de master en genie électrique, université de m'sila, 2014.
- ¹¹ RIGUET FOUAD - archives.univ-biskra.dz
- ¹² Courants de Foucault", Encyclopédie multimédia, Atlas et organise-notes, Microsoft encarta, collection 2006.
- ¹³ **BOUCHALA Tarek**, "Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les systèmes de CND par Courants de Foucault ", Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Batna 2013.
- ¹⁴ **BAKAI, LAYACHI**, " contrôle Non Destructif par Courants de Foucault. (Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Muni d'un Alésage) ", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.

-
- ¹⁵ **BOUCHALA Tarek**, "Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault. (Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite)", Mémoire de Magister, Université Elhadj Lakhder Batna, 2008 .
- ¹⁶ **Angélique RAUDE, Hugo LEMIEUX, Michael SIROIS**, "Courants de Foucault Multiéléments : Une alternative aux méthodes conventionnelles de contrôle non destructif de surface", JOURNEES COFREND, 2800 rue Louis-Lumière, Suite 100 Québec City, Québec Canada G1P 0A4 www.eddyfi.com, 2017.
- ¹⁷ **CHOUA Yahya**, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configuration de contrôle non destructif par courants de Foucault ", Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud 11, PARIS 2010.
- ¹⁸ **Brahim BENRAMDAN**, "Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision", Thèse de Doctorat, Spécialité électrotechnique et génie électrique, Université de Nantes, 2009.
- ¹⁹ Ahmed CERJET, "Contribution a la modélisation tridimensionnelle par la méthode des volumes finis de dispositifs électromagnétiques", Thèse de Doctorat, Spécialité électrotechnique, Université de Biskra, 2007
- ²⁰ **Chiara ZORNI**, "Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques de l'expérience au modèle d'interaction ", Thèse de Doctorat, université Paris-Sud11, Paris 2012
- ²¹ **Bouzidi athmane**, "Etude du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Pulsés en utilisant les Circuits Electromagnétiques Couplés", thèse doctorat, universite A. Mira – Bejaia, 2013
- ²² **Brahimi, Badi**, "Étude de la détection des défauts dans les structures aéronautiques par capteur à courants de Foucault rotatif ", mémoire master, M'sila 2019/2020
- ²³ **NABIL BENHADDA**, "Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault", Mémoire de Magistère, université El Hadj Lakhdar Batna, 2006
- ²⁴ **LAKHDARI, Ala-Eddine**, "Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault: application a la détection des fissures". Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2011.
- ²⁵ **Abdelhak ABDYOU**, "Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif", Thèse de Doctorat, Batna 2018.

-
- ²⁶ **BOUCHALA Tarek**, "Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les systèmes de CND par Courants de Foucault ", Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Batna 2013.
- ²⁷ **KHEBBAB MOHAMED** "Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND)", Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- ²⁸ **BOUCHALA Tarek**, "Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les systèmes de CND par Courants de Foucault ", Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Batna 2013.
- ²⁹ **Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H.** (1990). Ultrasonic Testing of Materials. Springer.
- ³⁰ **Blitz, J., & Simpson, G.** (1996). Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing. Springer. → Chapitres sur les matériaux conducteurs et les techniques de détection de défauts.
- ³⁵ **BRAHIMI BADI**, ‘‘ étude de la détection des défauts dans les structures aéronautiques par capteur a courants de foucault rotatif ‘‘ mémoire master, m’sila 2019 /2020.