



Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Numéro de série.....

Numéro d'inscription.....

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Filière : ELECTROMECHANIQUE

Spécialité : MECATRONIQUE

THEME

**Résolution des Problèmes Inverses dans les Systèmes
d'Inspection par Courants de Foucault Non
Destructifs des Structures Aéronautiques**

présentée par

Merwane KHEBAL

Soutenue le : 13 / 12 / 2025

Devant le jury composé de :

<u>Nom & Prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Qualité</u>
Zine GHEMARI	Prof	Université de M'sila	Président
Abdelhak ABDOU	MCA	Université de Batna2	Encadreur
Tarik BOUCHALA	Prof	Université de M'sila	Co-Encadreur
Mabrouk DEFDAF	MCA	Université de M'sila	Examineur
Sebti BELKASEM	Prof	Université de Batna2	Examineur
Abdelmalik BENDAIKHA	MCA	Université de Batna2	Examineur

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mes encadrants, Dr ABDOU Abdelhak Maître de Conférences à l'université Batna2 pour sa disponibilité, ses orientations précieuses et son soutien constant tout au long de ce travail de recherche. Je remercie aussi mon co-directeur de thèse, Dr Tarik BOUCHALA, Professeur à l'université de M'sila pour ses conseils précieux et ses commentaires constructifs tout au long de l'élaboration de ce travail.

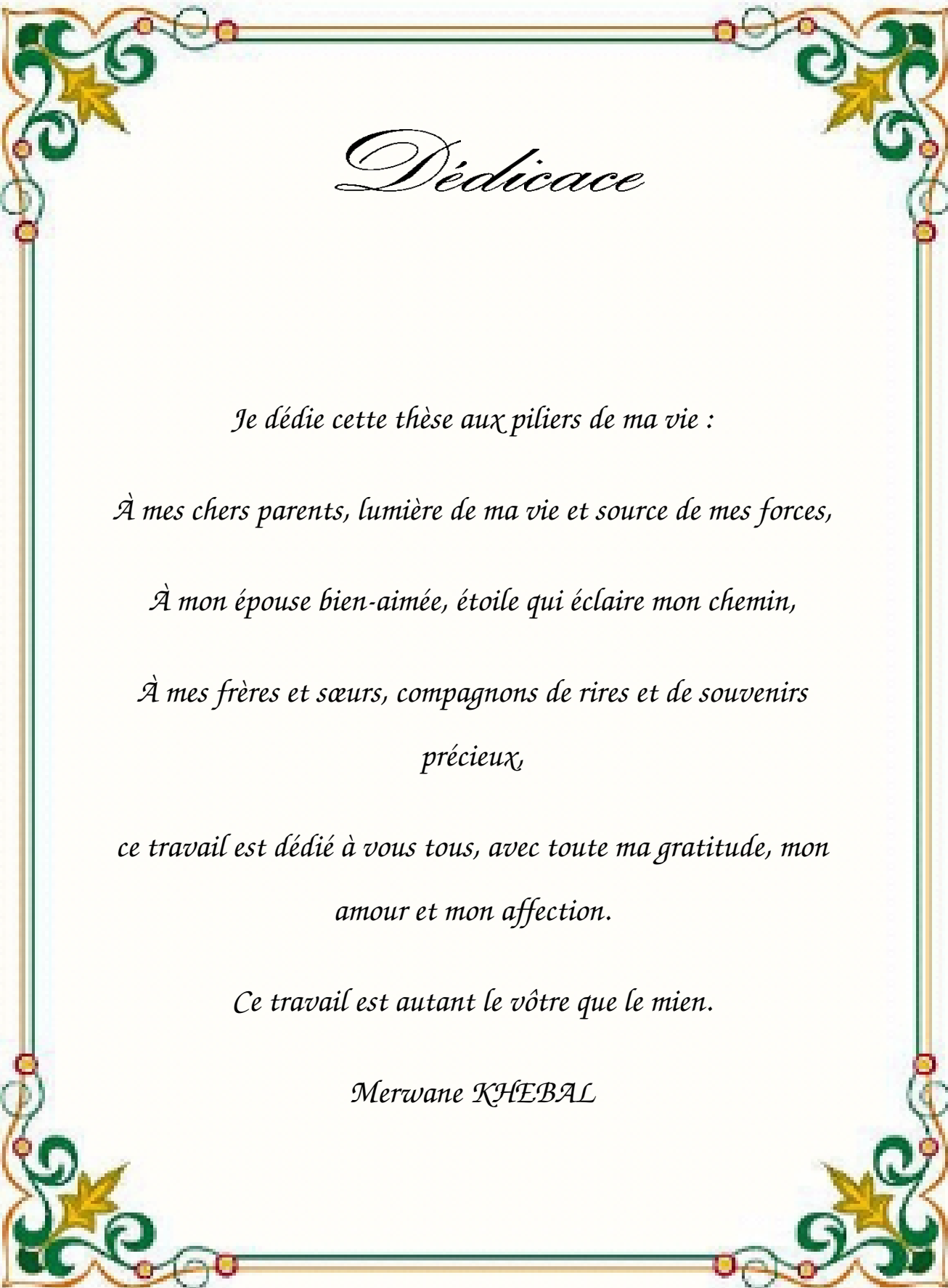
Mes sincères remerciements s'adressent également au Dr Zine GHEMARI, Professeur à l'Université de M'sila pour avoir accepté de présider le jury de soutenance. Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance, au Dr Mabrouk DEFDAF, Maître de Conférences à l'Université de M'sila, au Dr Sebti BELKASEM, Professeur à l'Université Batna2, au Dr Abdelmalik BENDAIKHA, Maître de Conférences à l'université Batna2, de m'avoir fait l'honneur en acceptant de participer au jury.

Ce travail a été réalisé au sein du Département de Génie Electrique avec la collaboration du laboratoire de génie électrique. Je tiens à remercier tout le personnel du département pour leur aide.

J'adresse aussi ma reconnaissance à mes collègues et amis pour leurs encouragements et leur aide, tout particulièrement Mr Abderrahmane ABOURA, Mr Kamel BELKHIRI and Dr Razi MORAKCHI

Enfin, je dédie une pensée particulière à ma famille, notamment à mes parents et à mon épouse Dr Khadidja SAOUDI, pour leurs patience, leurs amour et leurs soutien indéfectible.

Merwane KHEBAL



Dédicace

Je dédie cette thèse aux piliers de ma vie :

À mes chers parents, lumière de ma vie et source de mes forces,

À mon épouse bien-aimée, étoile qui éclaire mon chemin,

*À mes frères et sœurs, compagnons de rires et de souvenirs
précieux,*

*ce travail est dédié à vous tous, avec toute ma gratitude, mon
amour et mon affection.*

Ce travail est autant le vôtre que le mien.

Merwane KHEBAL

ملخص

تركز هذه الأطروحة على تطوير وتطبيق أساليب الفحص غير الإتلافي باستخدام التيارات الدوامية للكشف عن العيوب في الهياكل الجوية المعقدة ومتعددة الطبقات. بعد دراسة شاملة للتقنيات الحالية ومبادئها، تم تطوير نموذج عددي يعتمد على طريقة العناصر المحدودة لتحليل السلوك الكهرومغناطيسي للمجسات ومحاكاة استجابة النظام. كما تم اقتراح جهاز مبتكر يدمج مصفوفة دوارة من المجسات وتم التحقق من صحته عددياً، مما أظهر متانة وحساسية أفضل. وتتناول الدراسة أيضاً المشكلات العكسية المتعلقة بتقدير المعاملات الكهرومغناطيسية، من خلال تطبيق أربعة خوارزميات تحسين مستوحاة من الطبيعة ومقارنة أدائها في تقدير كل من الموصلية الكهربائية، والنفاذية المغناطيسية النسبية، وعمق العيب اعتماداً على بيانات المحاكاة. وتؤكد النتائج فعالية هذه الأساليب في تحسين دقة وموثوقية عمليات الفحص. وتشمل المساهمات الرئيسية لهذا البحث تصميم وتحقيق أنظمة كشف جديدة، وتطوير منهجية منهجية لحل المشكلات العكسية، بالإضافة إلى تقييم مقارن لتقنيات التحسين الحديثة، مما يفتح آفاقاً واعدة في مجال الطيران وتطبيقات صناعية أخرى.

كلمات مفتاحية: الفحص غير المتلف، الثيارات الدوامية، الهياكل متعددة الطبقات، العناصر المحدودة، المشاكل العكسية.

Abstract

This thesis focuses on the development and application of eddy current non-destructive testing (NDT) methods for the inspection of complex and multilayered aeronautical structures. After a thorough review of existing techniques and their principles, a numerical model based on the finite element method was developed to analyze the electromagnetic behavior of sensors and to simulate the system response. An innovative device integrating a rotating sensor array was also proposed and numerically validated, demonstrating improved robustness and sensitivity. The study also addresses inverse problems related to the estimation of electromagnetic parameters by implementing four nature-inspired optimization algorithms and comparing their performance in evaluating electrical conductivity, relative magnetic permeability, and defect depth based on simulation data. The results confirm the effectiveness of these approaches in enhancing the accuracy and reliability of inspections. The main contributions of this research include the design and validation of new detection systems, the development of a systematic methodology for solving inverse problems, and a comparative evaluation of modern optimization techniques, offering promising perspectives for aeronautics and other industrial applications.

Keywords: Non-destructive testing (NDT), Eddy currents, Multi-layered structures, Finite element method (FEM), Inverse problems.

Résumé

Cette thèse porte sur le développement et l'application de méthodes de contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault pour l'inspection de structures aéronautiques complexes et multicouches. Après un examen approfondi des techniques existantes et de leurs principes, un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis a été développé afin d'analyser le comportement électromagnétique des capteurs et de simuler la réponse du système. Un dispositif innovant intégrant une matrice rotative de capteurs a également été proposé et validé numériquement, démontrant une meilleure robustesse et sensibilité. L'étude traite également des problèmes inverses liés à l'estimation des paramètres électromagnétiques, en mettant en œuvre quatre algorithmes d'optimisation inspirés de la nature et en comparant leurs performances pour l'évaluation de la conductivité électrique, de la perméabilité magnétique relative et de la profondeur de défaut à partir de données de simulation. Les résultats confirment l'efficacité de ces approches pour améliorer la précision et la fiabilité des inspections. Les principales contributions de cette recherche incluent la conception et la validation de nouveaux systèmes de détection, le développement d'une méthodologie systématique pour la résolution des problèmes inverses, ainsi qu'une évaluation comparative des techniques d'optimisation modernes, ouvrant des perspectives prometteuses pour le domaine aéronautique et d'autres applications industrielles.

Mots clés : Contrôle non destructif (CND), Courants de Foucault, Structures multicouches, Méthode des éléments finis (MEF), Problèmes inverses

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction Générale	1
1 Contrôle non destructif par CF dans les installations d'aéronautique	6
1.1 Introduction	6
1.2 Le contrôle non destructif	7
1.2.1 Les objectifs du CND	7
1.3 Méthodes du CND	8
1.4 Différentes méthodes de CND convetionelles	9
1.4.1 Examen visuel	9
1.4.2 Contrôle par ressuage	10
1.4.3 Contrôle par Ultrasons	11
1.4.4 Contrôle par magnétoscopie	11
1.4.5 Contrôle par Radiographie	13
1.4.6 Contrôle par courants de Foucault	13
1.5 Analyse comparative des techniques convetionelles employées en CND	15
1.6 Capteurs à courants de Foucault	17

1.6.1	Mode d'excitation	17
1.6.2	Mode de fonctionnement	19
1.7	Modes de mesure des courants de Foucault	20
1.8	Technologies des bobines	22
1.9	Différents types de défauts	23
1.9.1	Défauts ponctuel	23
1.9.2	Défauts internes	24
1.10	Domaines d'applications des capteurs à courants de Foucault en CND	24
1.11	Les avantages associés au contrôle par courants de Foucault	25
1.12	Conclusion	26
2	Modélisation d'un système de CND-CF pour la caractérisation des défauts dans les structures multicouches	27
2.1	Introduction	27
2.2	Schéma d'un système d'évaluation non-destructif	28
2.3	Modélisation du dispositif de CND par CF	29
2.4	Courants de Foucault à travers les équations de Maxwell	30
2.4.1	Mise en équations	30
2.4.2	Conditions aux limites	32
2.4.3	Conditions de continuité	32
2.4.4	Hypothèses simplificatrices	34
2.5	Formulations magnétodynamiques	35
2.5.1	Formulation en A-V	35
2.5.2	Formulation en H	36
2.5.3	Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique $T - \Phi$	36
2.5.4	Comparaison entre les formulations	37
2.6	Méthodes de résolution	37
2.6.1	Méthodes analytiques	38
2.6.2	Méthodes numériques	38
2.6.3	Approximation par la méthode des éléments finis	40

2.7	Conclusion	42
3	Application et simulation du CND-CF par capteurs multiéléments	44
3.1	Introduction	44
3.2	Capteurs multiéléments	45
3.2.1	Déplacement	45
3.2.2	Motif	46
3.2.3	Paramètres définissant un capteur multiélément	46
3.3	Réseau de capteurs et conception du système	48
3.3.1	Description du système	50
3.3.2	Implementation sous Comsol Multiphysics	53
3.4	Résultats et discussion	53
3.4.1	Effet de la largeur du défaut	54
3.4.2	Effet de la longueur du défaut	55
3.4.3	Effet de la profondeur du défaut	57
3.4.4	Effet de la variation du diamètre du rivet	60
3.5	Conclusion	61
4	Analyse par la méthodologie du problème inverse et optimisation	63
4.1	Introduction	63
4.2	Caractérisation des problèmes inverses	64
4.3	Problèmes bien et mal posés	65
4.4	Problèmes inverses linéaire et non linéaire	65
4.4.1	Problème inverse linéaire	66
4.4.2	Problème inverse non linéaire	67
4.5	Techniques de résolution des problèmes inverses	68
4.5.1	Techniques de Machine Learning et d'Intelligence Artificielle	69
4.5.2	Algorithmes d'Optimisation	72
4.6	Techniques numériques de résolution	76
4.6.1	problèmes d'optimisation sans contraintes	76
4.6.2	Problèmes d'optimisation avec contraintes	79

4.7 Conclusion	82
5 Applications et validations des méthodes inverses	84
5.1 Introduction	84
5.2 Modèle direct et base de données simulée	85
5.2.1 Résolution des équations de Maxwell	85
5.2.2 Modélisation du capteur	86
5.2.3 Grandeurs simulées	86
5.2.4 Base de données simulée	87
5.3 Méthodes inverses et algorithmes d'optimisation	87
5.3.1 Problème inverse	89
5.3.2 Algorithmes d'optimisation utilisés	90
5.4 Résultats d'optimisation	94
5.4.1 Application 1 : Estimation de la conductivité et de la perméabilité . .	95
5.4.2 Application 2 : Estimation de la profondeur du défaut	99
5.5 Conclusion	105
Conclusion Générale	107
Publications et Communications	110
Références bibliographiques	113

Table des figures

1.1	Modèles de contrôle visuel	10
1.2	Principe du ressuage	11
1.3	Principe du contrôle ultrasons	12
1.4	Principe de la magnétoscopie	12
1.5	Principe de la radiographie	13
1.6	Principe de CND-CF	14
1.7	Objectifs du CND par CF	15
1.8	Capteur à double fonctions	19
1.9	Capteur à fonctions séparées	20
1.10	Contrôle en mode absolu.	21
1.11	Contrôle en mode différentiel.	21
1.12	Bobine construite par l'enroulement d'un fil de cuivre	22
1.13	Capteur multiéléments composé de bobines gravées sur film Kapton	23
2.1	Schéma synoptique de CND par CF [1]	29
2.2	Schéma descriptif d'un problème type de CND par CF.	30
2.3	Interaction entre deux milieux différents	33
3.1	Méthode ECA : l'idée du multiplexage entre les éléments individuels	45
3.2	Balayage linéaire obtenu avec un élément simple et un capteur multiélément	46
3.3	Schématisation d'un capteur multiéléments définissant la couverture et la résolution [2]	47

3.4	Uniformité de signal CF sur un montage multiélément	48
3.5	Agencement des bobines CE dans une sonde ACE	49
3.6	Géométrie 3D du système proposé.	51
3.7	Schéma fonctionnel de la méthode de détection du système.	51
3.8	Trois défauts avec $Dd = 2.5$ mm et $Ld = 7.5$ mm. $Wd = 0.2$ mm, 0.4 mm et 0.6 mm.	54
3.9	Cartographie de la variation des paramètres de l'impédance pour différentes largeurs (a) La variation de résistance, (b) La variation de réactance	55
3.10	Trois défauts avec $Wd = 0.2$ mm et $Dd = 2.5$ mm. $Ld = 7.5$ mm, 9.5 mm et 10.5 mm	56
3.11	Cartographie de la variation des paramètres de l'impédance pour différentes longueurs (a) La variation de résistance, (b) La variation de réactance	56
3.12	Trois défauts avec $Wd = 0.2$ mm et $Ld = 7.5$ mm, $Dd = 1.5$ mm, 1.75 mm et 2.5 mm	57
3.13	Cartographie de la variation des paramètres de l'impédance pour différentes profondeurs (a) La variation de résistance, (b) La variation de réactance	58
3.14	Diagramme de phase pour une variation de la largeur du défaut	59
3.15	Diagramme de phase pour une variation de la longueur du défaut	59
3.16	Diagramme de phase pour une variation de la profondeur du défaut	60
3.17	Variation de la réactance sur 0° - 360° pour différents diamètres de rivets : $Rd = 11, 15$ et 21 mm.	61
4.1	Problèmes direct et inverse	66
4.2	Résolution d'un problème inverse non linéaire.	68
4.3	Cartographie entre neurones biologiques et formels.	69
4.4	Architecture d'un neurone formel.	70
4.5	Exemple de fonctions d'activations	71
4.6	Architecture générale d'un réseau de neurones	72
4.7	Organigramme de l'entraînement du réseau de neurones	73
4.8	Représentation du minimum local et minimum global d'une fonction.	74

4.9	Principales méthodes déterministes unidimensionnelles.	78
4.10	Principales méthodes déterministes multidimensionnelles	78
4.11	principales méthodes stochastiques	79
4.12	Principales méthodes de Transformation	81
4.13	Principales méthodes directes.	82
5.1	Schéma conceptuel du modèle direct : bobine excitatrice, plaque métallique, rivet et défaut avec indication des courants de Foucault et du champ magnétique.	86
5.2	Chaîne de génération de la base de données simulée : de la définition des paramètres à l'archivage des résultats.	88
5.3	Schéma conceptuel du problème inverse en CND par courants de Foucault. .	90
5.4	Organigramme de l'algorithme SFO.	91
5.5	Organigramme de l'algorithme AQO.	92
5.6	Organigramme de l'algorithme GJO.	93
5.7	Organigramme de l'algorithme RKO.	94
5.8	Évolution de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique (cri- tère ISE)	96
5.9	Évolution de la conductivité et de la perméabilité (critère ITSE)	96
5.10	Évolution de la conductivité et de la perméabilité (critère IAE)	97
5.11	Évolution de la conductivité et de la perméabilité (critère ITAE)	97
5.12	Erreur d'estimation des paramètres selon les méthodes d'optimisation	99
5.13	Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations (itr=50)	100
5.14	Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations (itr=100)	100
5.15	Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations (N=10)	101
5.16	Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations (N=30)	101
5.17	Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations	103
5.18	Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations	103
5.19	Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations	104
5.20	Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations	104

Liste des tableaux

1.1	Analyse comparative des procédés de CND les plus connus.	16
1.2	Analyse comparative des performances des principaux procédés de CND [3].	17
2.1	Comparaison entre les formulations les plus utilisées dans le CND-CF.	37
3.1	Paramètres physiques et géométriques.	52
5.1	Comparaison des algorithmes d'optimisation pour l'estimation des paramètres	98
5.2	Comparaison qualitative des algorithmes	98
5.3	Résultats obtenus par la méthode de Runge-Kutta.	102
5.4	Résultats obtenus par la méthode d'optimisation par Sailfish (SFO).	105

Liste des abréviations

AQO	Aquila Optimizer
CND	Contrôle Non Destructif
CF	Courants de Foucault
EC	Eddy Currents (Courants de Foucault)
FEM	Finite Element Method (Méthode des éléments finis)
GJO	Golden Jackal Optimization
NDT	Non-Destructive Testing
PSO	Particle Swarm Optimization
RKO	Runge-Kutta Optimizer
RN	Réseau Neuronal
RNA	Réseau de Neurones Artificiels
SFO	Sailfish Optimization

Introduction Générale

1-Contexte

Le Contrôle Non Destructif (CND) est une approche primordiale et incontournable pour garantir à la fois la sécurité et la fiabilité des matériaux et des installations industrielles sans compromettre leur intégrité. Ces examens permettent la détection précoce des défauts, ils sont à l'affût de la moindre anomalie (fissure, cassure, corrosion, défaut de structure,...) susceptible d'avoir un impact négatif sur la disponibilité, la sécurité ou l'utilisation des installations [4,5].

Contrairement aux contrôle destructif, qui nécessite de retirer ou de dégrader un échantillon, l'objectif principal du CND est de : détecter les défauts internes ou externes, déceler les variations de structure ou les anomalies, évaluer les grandeurs caractéristique (épaisseur, conductivité..), déterminer les caractéristiques géométriques des discontinuités inhérentes à un composant susceptibles d'affecter la performance d'une pièce. En détectant les défaillances, il contribue ainsi l'amélioration de la sûreté des installations tout en réduisant les interruptions de production, ce qui se traduit par une prolongation de la durée de vie des équipements et d'optimiser les coûts de maintenance, et par conséquent il contribue aussi à l'amélioration de la productivité et à la réduction des arrêts imprévus [6].

Diverses techniques sont employées en CND, chacune adaptée à des matériaux et types de défauts spécifiques, les plus répandues sont : contrôle par ultrasons (UT), radiographie (RT), contrôle électromagnétique (ET), magnétoscopie (MT), contrôle par ressuage (PT) et inspection visuelle (VT).

Ces contrôles sont aujourd'hui jouent un rôle essentiel dans la quasi-totalité des secteurs

industriels où la sécurité et la précision sont cruciales, comme le nucléaire, l'aérospatiale, l'aéronautique l'industrie pétrolière, le ferroviaire, et la métallurgie.

L'évolution rapide du secteur aéronautique et spatial impose des exigences de plus en plus strictes en matière de sécurité, de fiabilité et de durabilité. Dans ce contexte, la détection précoce et la caractérisation précise des défauts dans les structures aéronautiques revêtent une importance capitale, car de tels défauts, souvent invisibles à l'œil nu, peuvent compromettre non seulement la performance mais également la longévité des composants critiques [7].

Parmi les techniques CND disponibles, le contrôle par courants de Foucault (CF) se distingue par sa grande sensibilité aux variations de conductivité électrique, de perméabilité magnétique et de géométrie des défauts. Il s'agit d'une méthode électromagnétique bien adaptée à l'inspection de pièces conductrices, largement employée dans l'industrie aéronautique.

2-Problématique

Dans le secteur aéronautique, la sécurité n'est pas seulement une priorité, elle est la base de tout pour assurer la protection des vies humaines et des aéronefs, il est donc de plus en plus exigeant vis à vis des techniques de maintenance utilisées. Les conditions sévères dans lesquelles les avions sont amenées à travailler, variation de pressions et de températures, ce qui favorise l'apparition des fissures au voisinage des rivets font que le recours au CND est devenu donc une nécessité incontournable pour détecter de tels défauts.

C'est dans ce contexte que s'inscrira les études présentées dans cette thèse, à savoir le CND-CF des structures multicouches formant les fuselages ou les ailes d'avions.

Comme la surface à contrôler dans un avion est importante et que ces structures sont assemblées en grande majorité par des rivets à têtes bombées, l'utilisation de la technique de contrôle traditionnelle avec capteur mono élément s'avère peu adaptée, les résultats de contrôle peuvent être faussés ou difficilement interprétés à cause de l'influence de la hauteur du rivet à tête bombée, cette dernière est considérée comme une forte hétérogénéité, de géométrie irrégulière et d'interférence électromagnétique compliquant considérablement l'interprétation des signaux mesurés et la caractérisation fiable des défauts. Partant de ce constat, l'idée est venue de proposer un système avec matrice multiéléments qui permettent un contrôle, rapide avec réduction des coûts de maintenance et plus précis garantissant une caractérisation plus fine des défauts [8].

Le système proposé est constitué d'un l'ensemble de bobines individuelles, regroupées dans une seule sonde et formant le système de bobines multiéléments. Il réalise un balayage mécanique au autour du rivet à tête bombé, et afin de minimiser l'effet indésirable de mutualité entre les bobines adjacentes, on utilise une alimentation en mode multiplexage des éléments constituant ce capteur. Ce même système peut être adapté au diamètre du rivet à tête bombée.

3-Objectifs de la thèse et plan du manuscrit

Les travaux de thèses seront développés dans deux axes complémentaires : l'un, porte sur l'étude, la modélisation et simulation afin de résoudre le problème de détection de défauts de formes complexes pour un modèle direct basé sur l'imagerie à courants de Foucault, et l'autre, sur la méthode inverse qui permet de déduire les caractéristiques géométrique d'un défaut à partir des mesures indirectes de la perturbation qu'il cause. La méthode inverse a pour objectifs donc d'interpréter et d'estimer les paramètres physiques et géométriques d'anomalies non visibles.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de mobiliser des approches intégrées combinant modélisation physique, simulation numérique et optimisation. Les méthodes de calcul avancées, telles que la méthode des éléments finis (MEF), permettent de reproduire avec précision les phénomènes électromagnétiques mis en jeu et de mieux comprendre l'influence des paramètres géométriques et matériaux sur la réponse des sondes CF. Ces outils numériques, associés à des algorithmes d'optimisation robustes, ouvrent la voie à des stratégies de détection plus performantes et à une identification plus précise des propriétés recherchées [9].

Le manuscrit s'articulera autour de cinq axes complémentaires :

- Revue des méthodes CND et du contrôle CF : Une analyse approfondie des techniques de contrôle non destructif est proposée, avec un accent particulier sur le contrôle par courants de Foucault. Les principes physiques, les différents types de capteurs, ainsi que les avantages et limites de cette méthode y sont exposés afin de poser les bases théoriques du thèse.
- Modélisation et simulation numérique : Un système CND-CF dédié aux structures multicouches est ensuite étudié à l'aide de la MEF, mettant en lumière l'importance des outils de simulation pour analyser le comportement électromagnétique des sondes,

prédire leurs réponses et optimiser leur conception en fonction des propriétés des matériaux et des défauts.

- Validation par une première étude scientifique : Une première contribution consiste en la conception d'un système innovant basé sur une matrice rotative de capteurs CF. Ce dispositif, adapté aux configurations aéronautiques complexes, démontre des performances prometteuses en matière de sensibilité et de robustesse. Les résultats obtenus sont validés numériquement et constituent un jalon important pour l'amélioration des inspections en conditions réelles.
- Étude méthodologique des problèmes inverses : Une partie du travail est consacrée à la formulation des problèmes inverses associés au CND-CF et aux approches numériques permettant de les résoudre. Les aspects mathématiques liés à l'identification des paramètres sont détaillés, et les méthodes classiques d'optimisation adaptées à ces contextes sont discutées.
- Optimisation bio-inspirée et seconde contribution scientifique : Enfin, le dernier volet s'appuie sur un second travail et explore l'utilisation d'algorithmes d'optimisation bio-inspirés, tels que SFO (Sailfish Optimization), AQO (Aquila Optimizer), GJO (Golden Jackal Optimization) et RKO (Runge-Kutta Optimizer), pour l'estimation de la conductivité électrique, la perméabilité magnétique relative et de la profondeur du défaut. Les résultats qui seront ainsi obtenus, montreront que ces approches offrent une précision et une stabilité remarquables, rendant possible une caractérisation fiable même dans des configurations complexes.
- Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués, les problèmes rencontrés et enfin les perspectives envisagées pour la continuité de ce travail.

En définitive, cette thèse proposera une démarche intégrée allant de l'étude théorique des méthodes de contrôle non destructif par courants de Foucault jusqu'à la conception, la simulation et la validation de systèmes innovants de détection. L'analyse des problèmes inverses et l'évaluation comparative d'algorithmes d'optimisation renforcent la portée et l'originalité de ce travail. Les résultats qui seront obtenus contribueront à améliorer la fiabilité et l'efficacité des inspections dans les structures aéronautiques complexes et ouvriront des perspectives

intéressantes pour le transfert de ces approches vers d'autres domaines industriels critiques, tels que le nucléaire, l'énergie ou le ferroviaire

Contrôle non destructif par CF dans les installations d'aéronautique

1.1 Introduction

En raison des impératifs de sécurité, le secteur aérien impose des normes strictes en matière de sûreté opérationnelle [3, 10]. À l'heure actuelle, les compagnies aériennes et les organismes de réglementation font de l'aviation l'un des moyens de transport les plus sûrs, rivalisant avec le transport ferroviaire [6, 11]. Les méthodes de contrôle par courants de Foucault, développées depuis 1926, se sont avérées essentielles pour le contrôle non destructif (CND) dans l'assurance qualité des produits. Dans le processus de fabrication, il est essentiel de concevoir les pièces avec précision tout en garantissant leur disponibilité et leur performance. Dans le secteur industriel, les méthodes de CND permettent d'évaluer des caractéristiques spécifiques, telles que l'épaisseur et la conductivité, ainsi que de détecter et de caractériser d'éventuels défauts. Ce type de contrôle est particulièrement crucial dans des domaines tels que l'automobile, le pétrole, la marine, l'aéronautique et le nucléaire [12–15].

Ce premier chapitre sera consacré aux diverses techniques de CND, en mettant l'accent sur celles qui reposent sur les courants de Foucault. Nous analyserons leurs avantages et inconvénients, ainsi que les principes fondamentaux qui les sous-tendent. Ensuite, nous aborderons les différents types de capteurs utilisés dans le CND et les méthodes de traitement qui leur sont associées. Enfin, nous introduirons le concept de diagramme d'impédance normalisé.

Étant donné que notre recherche se concentre spécifiquement sur les courants de Foucault, cette technique sera examinée en profondeur, tant du point de vue phénoménologique que technologique.

1.2 Le contrôle non destructif

1.2.1 Les objectifs du CND

Le contrôle non destructif (CND) vise à examiner l'état des pièces industrielles tout en préservant leur capacité d'utilisation future. Il se décline en deux grandes catégories. La première regroupe les méthodes destinées à estimer certains paramètres constitutifs, comme l'épaisseur d'une paroi ou la distance par rapport à un autre élément, à partir de la variation des propriétés électromagnétiques du matériau. La seconde catégorie concerne la détection de défauts tels que fissures, inclusions, porosités, ainsi que les effets liés à la corrosion ou à la fatigue mécanique. Ce type de contrôle est appliqué de manière périodique durant tout le cycle de vie de la pièce et doit répondre à plusieurs critères fondamentaux [14, 16, 17].

- Rapidité d'exécution : Le contrôle doit être réalisé rapidement pour minimiser les coûts liés à l'immobilisation de la pièce, ainsi que les dépenses associées à la main-d'œuvre et au fonctionnement de l'usine.
- Coût du contrôle qualité : Le contrôle des pièces complexes peut engendrer des coûts significatifs, qu'il convient de réduire autant que possible.
- Reproductibilité : La mesure ne doit pas être influencée par des facteurs externes, et il doit être possible de contrôler une pièce plusieurs fois en obtenant toujours le même résultat.
- Fiabilité : Le contrôle doit être capable de détecter tous les défauts qu'il est censé identifier, quelles que soient les conditions d'inspection.
- Sensibilité : Il s'agit du rapport entre les variations mesurées et le paramètre évalué. Une sensibilité élevée permet de détecter plus facilement les défauts de petite taille.
- Résolution : Elle correspond à la plus petite variation de signal détectable, c'est-à-dire la dimension du plus petit défaut repérable. Plus cette dimension est petite, plus le pouvoir de résolution est élevé.

1.3 Méthodes du CND

Le contrôle non destructif (CND) englobe une variété de méthodes, chacune fondée sur un principe physique ou chimique spécifique. Ces techniques sont souvent désignées par des termes variés, en référence à des éléments tels que l'équipement utilisé, le support du procédé ou la nature de l'énergie émise, qu'il s'agisse de phénomènes acoustiques ou électromagnétiques [3, 14]. Il est conseillé d'examiner chaque méthode en fonction de sa plage caractéristique de longueurs d'onde, telles que les ultrasons, les rayons X ou l'infrarouge. Les méthodes de contrôle les plus couramment employées peuvent être classées en deux catégories principales, selon la nature des anomalies à détecter dans la pièce [18, 19].

- Les méthodes de surfacique, destinées à détecter les anomalies en surface, comprennent :
 - L'examen visuel (VT),
 - Le ressuage (PT),
 - La magnétoscopie (MPT),
 - Les courants de Foucault (ECT).
- Les méthodes volumétriques, qui s'attaquent aux anomalies internes, incluent :
 - Les ultrasons (UT),
 - Les rayonnements ionisants.

De plus, il existe d'autres méthodes offrant des avantages en termes de portée globale et de traitement en temps réel [12], telles que :

- La thermographie (TT),
- L'émission acoustique.

D'autres techniques appelées méthodes couplées sont utilisés en CND combinant deux ou plusieurs méthodes, telles que :

- laser-ultrasons (pour un contrôle sans contact),
- les ultrasons électromagnétiques
- magnéto-optiques.

1.4 Différentes méthodes de CND convetionelles

Il est difficile d'appliquer une technique unique de contrôle non destructif (CND) de manière universelle, en raison de la diversité des pièces à inspecter, de leurs géométries, des matériaux utilisés et des conditions d'inspection spécifiques. Chaque technique de CND possède ses avantages et ses inconvénients, et il existe une variété de méthodes adaptées à différents contextes [1, 11]. Plutôt que de dresser une liste exhaustive des techniques disponibles, il est plus judicieux de fournir une vue d'ensemble des plus couramment utilisées.

Parmi ces techniques, nous mettons en avant plusieurs méthodes clés, telles que l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, les ultrasons, la thermographie et les courants de Foucault. Le choix de la méthode dépend essentiellement de la nature du matériau à inspecter, de sa forme, ainsi que d'autres facteurs. Chaque technique repose sur des principes physiques spécifiques, et souvent, ces méthodes se révèlent complémentaires les unes des autres.

Le type de contrôle, comme la détection de défauts ou la mesure d'épaisseur, ainsi que les conditions dans lesquelles il est réalisé, influencent aussi le choix de la méthode. Par ailleurs, les progrès dans l'automatisation permettent aujourd'hui de numériser, stocker et traiter un grand volume de données, rendant l'analyse plus facile et précise [1, 20]. Dans cette section, nous examinerons les principales méthodes de CND, en mettant un accent particulier sur la technique des courants de Foucault, qui est au cœur de cette étude.

1.4.1 Examen visuel

Le contrôle visuel est l'une des méthodes les plus anciennes de contrôle non destructif. Elle est largement utilisée en raison de sa simplicité et de son faible coût de mise en œuvre. Cette méthode ne nécessite que l'expertise visuelle d'un opérateur expérimenté. Le contrôle visuel permet d'identifier facilement les défauts de surface tels que les fissures, rayures, porosités, retassures, inclusions étrangères, lignes, déformations, criques, traces de corrosion, et autres anomalies similaires [12, 21]. Parmi ses avantages, on note sa facilité d'utilisation, son coût modeste et sa capacité à inspecter des zones souvent difficiles d'accès. Cependant, son principal inconvénient réside dans sa dépendance à l'expertise et à l'expérience de l'opéra-

teur [22,23] Figure 1.1.

Pour résoudre ce type de problème, on utilise généralement des dispositifs optiques d'assistance à la vision [19].

- Appareils optiques classiques : Loupes, verres grossissants, microscopes métallographique, microscopes électroniques à balayage (MEB).
- Appareils optiques spécifiques : Endoscope, le stroboscope.



a) Miroir d'inspection



b) Inspection du réacteur d'un avion

FIGURE 1.1 – Modèles de contrôle visuel

1.4.2 Contrôle par ressuage

Le ressuage est une méthode relativement facile à mettre en œuvre, permettant de détecter la majorité des défauts présents à la surface, sous réserve que le matériau de la pièce ne réagisse pas chimiquement avec le pénétrant utilisé. Par définition, cette technique consiste à faire ressortir un liquide (ou un gaz) d'une discontinuité dans laquelle il avait préalablement pénétré lors de l'opération de ressuage. Le principe fondamental repose sur l'emploi d'un liquide de faible viscosité, capable de s'introduire dans les fissures et les vides ouverts à la surface des matériaux [1,12,24]. Ce liquide peut être coloré ou traité pour être fluorescent, ce qui permet de l'utiliser comme indicateur après un nettoyage intermédiaire de la surface (Figure 1.2). Cette méthode se révèle extrêmement simple et efficace pour localiser les fissures

de surface. Cependant, elle présente des inconvénients en termes d'hygiène et de sécurité, ainsi que des impacts environnementaux dus à la toxicité chimique des substances fluorescentes utilisées. De plus, certaines fissures peuvent être obstruées par des produits difficiles à nettoyer, les rendant ainsi invisibles [25, 26].

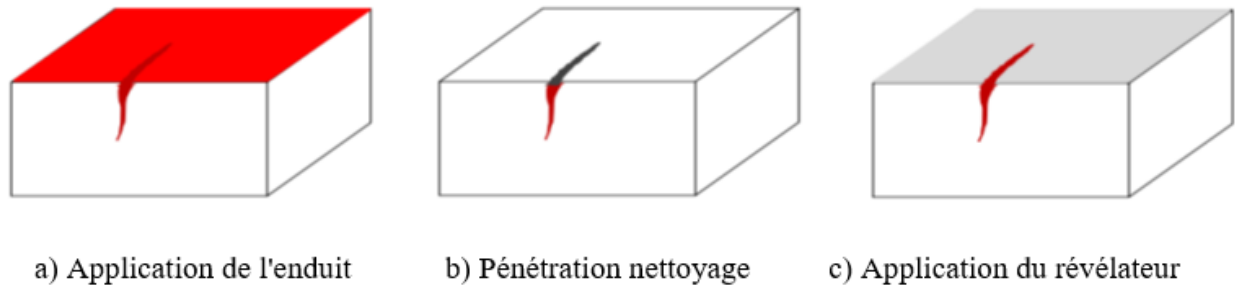


FIGURE 1.2 – Principe du ressuage

1.4.3 Contrôle par Ultrasons

Les ultrasons (UT) correspondent à des ondes mécaniques se propageant dans différents milieux, leur vitesse dépendant des propriétés de ces derniers ainsi que du type d'onde utilisé [24]. Leur propagation peut être modifiée par des discontinuités, par exemple des variations locales d'impédance acoustique. Ces ondes peuvent alors être réfléchies par des défauts, réfractées aux interfaces entre deux matériaux ou encore diffractées au niveau des bords d'une fissure. La génération des ultrasons repose généralement sur des transducteurs exploitant l'effet piézoélectrique (Figure 1.3-a). Les échos produits par la présence d'un défaut sont ensuite transformés en signaux électriques, qui sont analysés et visualisés sous forme d'impulsions sur un écran (Figure 1.3-b) [12, 22].

1.4.4 Contrôle par magnétoscopie

Cette méthode permet de détecter des défauts aussi bien en surface qu'en profondeur. Cependant, elle est limitée aux matériaux et alliages ferromagnétiques, tels que le fer, l'acier et la fonte [14, 27]. La magnétoscopie est utilisée pour repérer des discontinuités qui peuvent apparaître en surface ou, dans certains cas, jusqu'à quelques millimètres de profondeur. Les

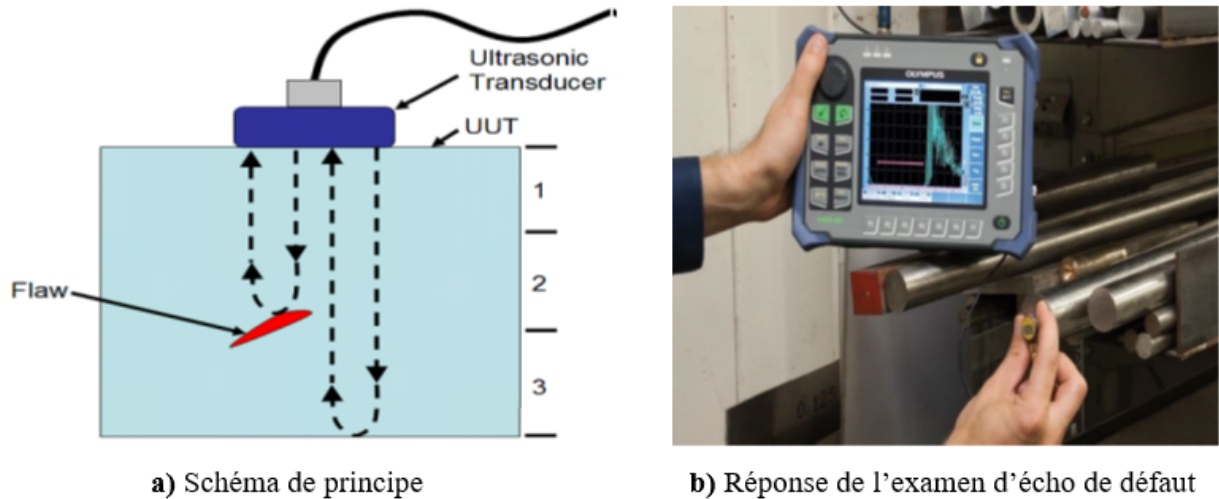


FIGURE 1.3 – Principe du contrôle ultrasons

discontinuités à la surface génèrent des fuites magnétiques à leur emplacement. En présence d'un défaut près de la surface d'une pièce, l'orientation du flux d'induction magnétique est modifiée localement, entraînant une augmentation de son intensité en surface. Cette accumulation de particules magnétiques permet donc de détecter la présence du défaut, comme le montrent les exemples qui suivent [1, 15], la Figure 1.4.

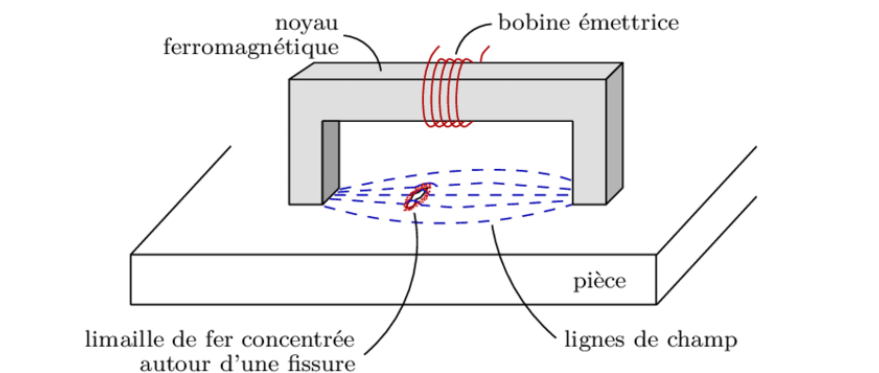


FIGURE 1.4 – Principe de la magnétoscopie

Le principal atout de la magnétoscopie (MT) par rapport à d'autres méthodes de contrôle non destructif (CND) réside dans sa capacité à être appliquée sur des géométries complexes tout en nécessitant peu de préparation de surface. De plus, cette méthode est économique et facilement transportable. Toutefois, elle présente certains inconvénients : un nettoyage minutieux doit être réalisé avant et après l'application, et dans de nombreuses situations, il

est nécessaire de démagnétiser la pièce [12, 25].

1.4.5 Contrôle par Radiographie

La radiographie est une technique largement utilisée pour inspecter l'intérieur d'un matériau. Elle consiste à soumettre la pièce à un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde. L'absorption de ce rayonnement dépend directement de la densité du matériau, entraînant une atténuation partielle de l'énergie des photons [21, 25]. Un dispositif de détection, tel qu'un film ou un écran, est placé derrière l'objet afin de former un radiogramme de la zone étudiée. L'image obtenue met en évidence les variations locales d'intensité, permettant ainsi de révéler d'éventuels défauts [18] Figure 1.5.

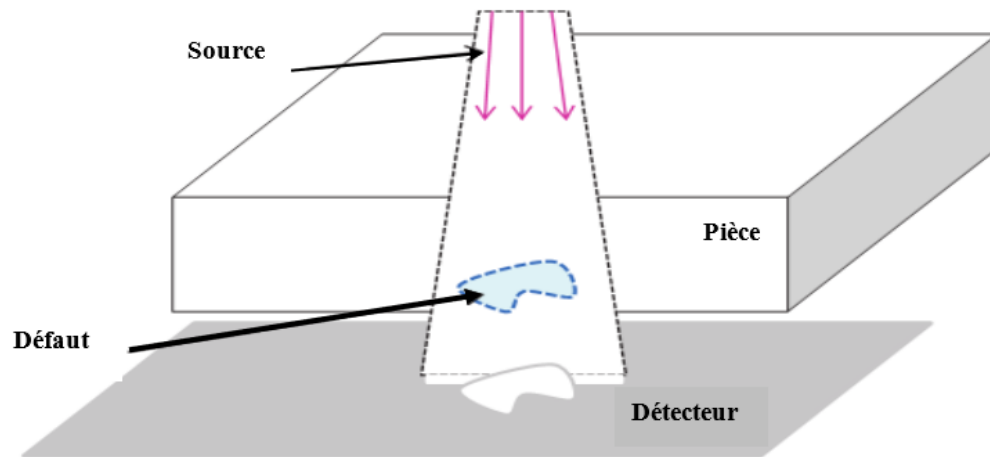


FIGURE 1.5 – Principe de la radiographie

1.4.6 Contrôle par courants de Foucault

1.4.6.1 Principe de la détection par courants de Foucault

Les courants de Foucault (CF), ou courants induits, désignent des courants électriques apparaissant dans un matériau conducteur lorsqu'il est soumis à une variation de champ magnétique ou déplacé dans un champ magnétique constant. Ce phénomène, mis en évidence en 1851 par le physicien français Léon Foucault [7, 21], engendre un champ magnétique secondaire qui s'oppose au champ initial. La superposition entre le champ d'excitation et ce

champ de réaction modifie alors le courant de la source et influence l'impédance du capteur [12, 28].

Il convient de souligner que ces courants se concentrent essentiellement en surface et que leur intensité diminue avec la profondeur [29]. Ainsi, pour identifier des défauts internes situés plus en profondeur, il est préférable d'utiliser des fréquences plus basses. La Figure 1.6 illustre ce principe de contrôle non destructif (CND) fondé sur les courants de Foucault.

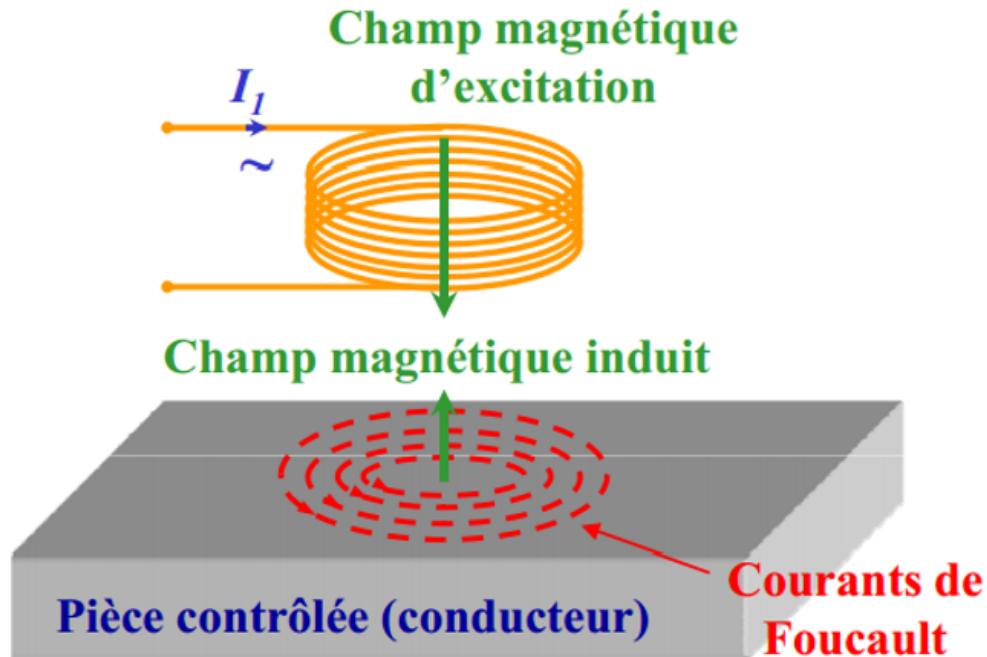


FIGURE 1.6 – Principe de CND-CF

1.4.6.2 Champ d'application

Les courants de Foucault sont applicables à tous les matériaux conducteurs et ferromagnétiques, et elles sont particulièrement efficace pour détecter des défauts à la surface ou en dessous (les courants de Foucault ont tendance à se concentrer près de la surface des matériaux conducteurs en raison de l'effet de peau) [14]. Cette méthode permet d'identifier et de mesurer divers défauts de surface, tels que les fissures et les variations d'hétérogénéité chimique, microstructurale ou mécanique. De plus, cette méthode peut être utilisée pour évaluer l'épaisseur des revêtements métalliques ou isolants sur des matériaux conducteurs [30, 31].

1.4.6.3 Objectifs du CND-CF

Différentes tâches peuvent être réalisées par un capteur à courants de Foucault. Les caractéristiques électromagnétiques et géométriques influencent l'impédance du système Capteur/-Pièce [29]. Il peut être utilisé pour caractériser à la fois la géométrie et l'électromagnétisme, ainsi que pour surveiller l'état de santé en recherchant et en identifiant les défauts. La Figure 1.7 illustre les différents objectifs visés par le CND-CF, [12, 28, 32].

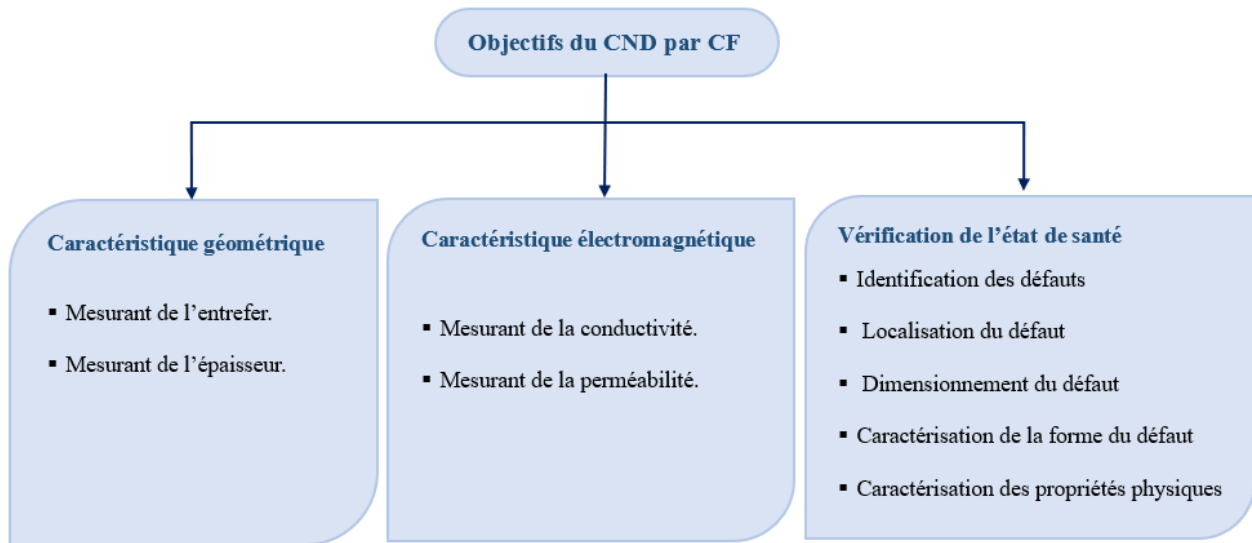


FIGURE 1.7 – Objectifs du CND par CF

1.5 Analyse comparative des techniques convetionelles employées en CND

D'après le Tableau 1.1 nous présentons une vue d'ensemble exhaustive des diverses techniques couramment utilisées en contrôle non destructif (CND). Il inclut le principe physique sous-jacent de chaque méthode, les types de défauts qu'elles permettent de détecter, leurs domaines d'application, ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients.

Il est parfois complexe de comparer ces techniques, car elles sont développées pour répondre à des besoins spécifiques ou des contextes d'application particuliers. Néanmoins, leurs performances peuvent être évaluées ou comparées en fonction de critères comme le coût, la

TABLE 1.1 – Analyse comparative des procédés de CND les plus connus.

Procédé	Principe physique	Défauts détectés	Domaines d'applications	Majeurs avantages	Majeurs inconvénients
Visuel	Inspection directe ou assistée des défauts.	Identification de défauts de surface et des imperfections esthétiques.	Contrôle continu, adapté aux tôles, verre, plastique et productions en série.	Simple et peu coûteux via caméras, permettant l'automatisation du contrôle.	Limites humaines rendent l'usage de caméras indispensable en production série.
Resuage	Effectuer l'imprégnation, nettoyer la surface et appliquer un révélateur.	Détection de défauts superficiels.	Applicable à tous les matériaux sans rugosité excessive.	Facile à appliquer aux pièces, souvent complété par une inspection visuelle.	Examen long et coûteux, exigeant des précautions d'hygiène avec les émulsifiants.
Flux de fuite magnétique	Accumulation de poudre.	Défauts débouchant fins.	Matériaux ferromagnétiques (aciers).	Très sensible.	Applicable uniquement aux matériaux ferromagnétiques.
Ultrasons	Perturbation d'une onde Échographie.	Défauts internes (y compris dans le domaine médical).	Tous les matériaux, sauf les très fins.	Inspection en profondeur, résultats immédiats.	Coûteuse et complexe à appliquer pour des pièces de très petite taille.
Radiographie	Atténuation d'un flux de rayons X ou γ .	Défauts internes.	Tous les matériaux.	Fiable, profondeur d'examen élevée, résultats archivables.	Protection du personnel, installation lourde, interprétation complexe.
Courants de Foucault	Perturbation des courants induits.	Défauts débouchants ou sous-cutanés.	Adapté aux matériaux conducteurs et ferromagnétiques.	Sensible, sans contact, automatisable même à haute température.	Applicable uniquement aux matériaux conducteurs.

rapidité, la reproductibilité et la sensibilité. Le Tableau 1.2 présente une comparaison simplifiée des principales méthodes de CND [15, 18, 24], étant donné que les matériaux utilisés en aéronautique sont des matériaux conducteur, la technique de CND-CF s'avère la plus utilisée dans ce secteur.

TABLE 1.2 – Analyse comparative des performances des principaux procédés de CND [3].

Procédé	Coût	Durée de contrôle	Reproductibilité	Sensibilité	Contraintes
Thermographie	++	++	+	+	Lenteur du contrôle
Ressuage	+	++	-	-	Toxicité
Ultrasons	++		-	++	Nécessite couplant
Radiographie	+++		+	-	Rayon X
Courants de Foucault	+	+	++	+	Matériaux conducteurs

1.6 Capteurs à courants de Foucault

Les capteurs à courants de Foucault (CF) dits élémentaires reposent sur un ou deux enroulements inductifs, le plus souvent des bobines ou micro-bobines, et sont qualifiés de «ponctuels» [32] en raison de leur zone d'inspection restreinte. Dans l'industrie, ces capteurs connaissent une large utilisation grâce à leur faible coût, leur robustesse, leur fonctionnement sans contact, leur mise en œuvre aisée et leur fiabilité éprouvée au fil du temps, répondant ainsi aux critères de sensibilité et de résolution spatiale requis.

Différentes approches d'inspection par courants de Foucault peuvent être mises en œuvre à l'aide de bobinages. On distingue notamment les bobines à double rôle émetteur-récepteur, qui peuvent opérer en mode absolu ou différentiel, ainsi que les capteurs matriciels [1, 29]. Les types de capteurs les plus courants seront présentés dans la suite.

1.6.1 Mode d'excitation

Indépendamment du type de capteur utilisé pour évaluer l'état d'une pièce, trois principaux modes d'excitation peuvent être distingués et sont résumés ci-dessous.

— Signal mono-fréquence

Cette technique met en œuvre une seule fréquence et l'excitation peut prendre la forme d'une sinusoïde. Par ailleurs, elle est utilisée lorsque l'on utilise une seule bobine à la fois pour émettre et recevoir des signaux (capteur double fonction). Elle est applicable pour les matériaux dont les caractéristiques sont linéaires. Cette méthode est peu fréquemment utilisée en raison de la difficulté à éliminer les perturbations et de la difficulté à caractériser les défauts.

— Signal multi-fréquences

La profondeur de pénétration des courants de Foucault (CF) est directement liée à la fréquence utilisée. L'objectif de cette méthode est de manipuler la fréquence de façon à permettre au capteur de recueillir des informations riches et complètes sur le matériau inspecté. Selon la fréquence choisie, différents paramètres du matériau répondront avec des amplitudes plus ou moins élevées : certains réagissent mieux à basse fréquence, tandis que d'autres sont plus sensibles à haute fréquence. L'excitation multi-fréquences peut être réalisée de deux manières :

- En séquence : La mesure est effectuée une fréquence à la fois (série de mesures mono-fréquences). Cependant, cette approche présente l'inconvénient d'un temps d'exécution relativement long.
- Simultanément : Cette méthode nécessite un équipement plus complexe et coûteux capable de générer plusieurs fréquences en même temps [24].

Le contrôle par CF multi-fréquences est couramment utilisé pour analyser les données du capteur et déterminer les propriétés du matériau inspecté.

— Signal pulsé

Le principe de la méthode du signal pulsé repose sur l'excitation d'une bobine par un signal pulsé, composé de multiples fréquences alternant au sein d'une bande de fréquences définie. Développée dans les années 1950, cette technique permet de mesurer l'épaisseur des revêtements ainsi que de détecter des défauts sous-cutanés dans les matériaux. Les signaux d'excitation peuvent adopter diverses formes, telles que rectangulaire, triangulaire ou semi-sinusoïdale, selon les besoins spécifiques de l'inspection [21, 25].

1.6.2 Mode de fonctionnement

En général, tous les capteurs remplissent deux rôles : celui de fournir de l'alimentation et celui de réaliser des mesures. Lorsque l'enroulement remplit les deux fonctions, on parle de capteur à double fonction ; sinon, on évoque un capteur à fonctions distinctes.

— Capteurs à double fonction : Émetteurs et récepteurs

C'est un dispositif où les différents composants remplissent simultanément les rôles d'émetteur et de récepteur. Le modèle le plus simple de ce type de capteur se compose d'une seule bobine (voir Figure 1.8). Grâce au mouvement des courants de Foucault (CF) à l'intérieur du matériau, le champ magnétique de réaction est sujet à des variations. Toute perturbation de ce champ entraîne un changement de l'impédance de la bobine, affectant ainsi la réactance inductive et la résistance effective. En mesurant cette impédance, on peut recueillir des informations sur l'état du matériau étudié. Les capteurs à double fonction figurent parmi les dispositifs les plus couramment utilisés pour les applications de contrôle non destructif. [28, 29].

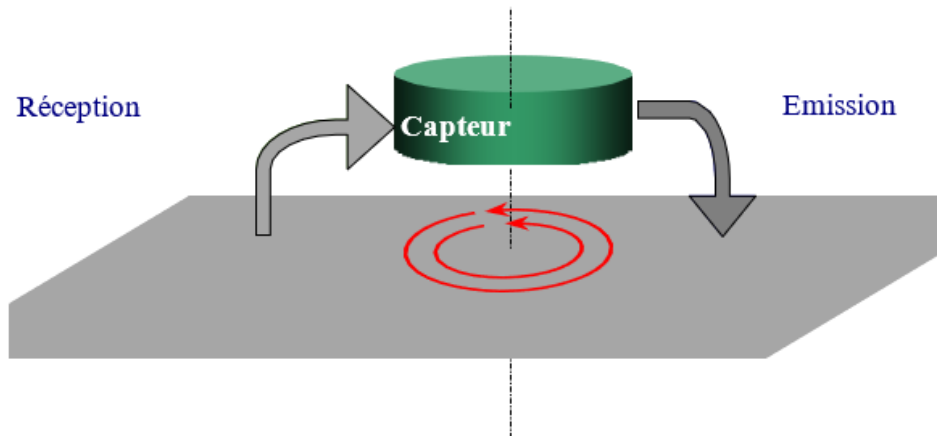


FIGURE 1.8 – Capteur à double fonctions

— Capteur à fonctions séparées

Les capteurs à fonctions séparées se composent d'éléments distincts dédiés à la transmission et à la réception. Au moins une bobine est utilisée pour assurer la fonction d'émission. Concernant la réception, plusieurs technologies de capteurs de champ magnétique peuvent être mises en œuvre, notamment des capteurs inductifs (bobines), à effet Hall, des capteurs à fluxgate,

ainsi que des dispositifs à magnétorésistance géante (GMR) ou à magnéto-impédance géante (GMI) [4, 33]. Dans tous ces cas, c'est le champ magnétique qui est mesuré. Par exemple, dans la configuration illustrée à la Figure 1.9, la fonction de réception est assurée par une bobine.

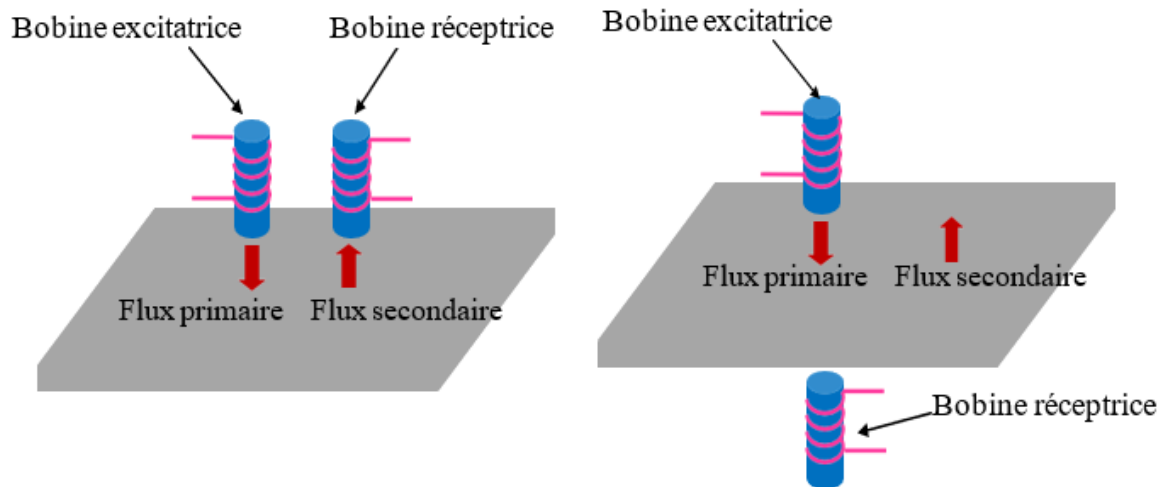


FIGURE 1.9 – Capteur à fonctions séparées

1.7 Modes de mesure des courants de Foucault

On peut opter pour un contrôle en mode absolu ou différentiel.

- Mesure absolue : Une mesure absolue repose sur l'utilisation d'un seul récepteur. Cette méthode permet d'évaluer simultanément les paramètres électromagnétiques du matériau, tels que sa conductivité électrique et sa perméabilité magnétique, ainsi que son épaisseur. Avant d'effectuer le contrôle d'une pièce, il peut être nécessaire d'équilibrer le système à l'aide d'une cale étalon pour ajuster le signal à une valeur prédéfinie Figure 1.10.
- Mesure différentielle : La méthode différentielle nécessite l'utilisation d'au moins deux récepteurs proches. Cette technique consiste à comparer les données recueillies simultanément par les récepteurs, ce qui permet de compenser les effets perturbateurs tels que les variations des propriétés électromagnétiques (conductivité électrique et perméabilité magnétique), les changements de température du matériau, ainsi que l'effet

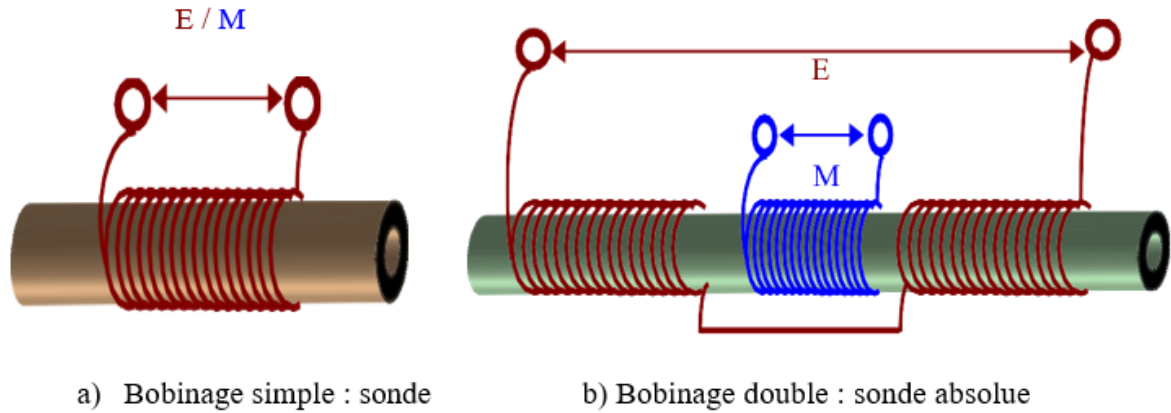


FIGURE 1.10 – Contrôle en mode absolu.

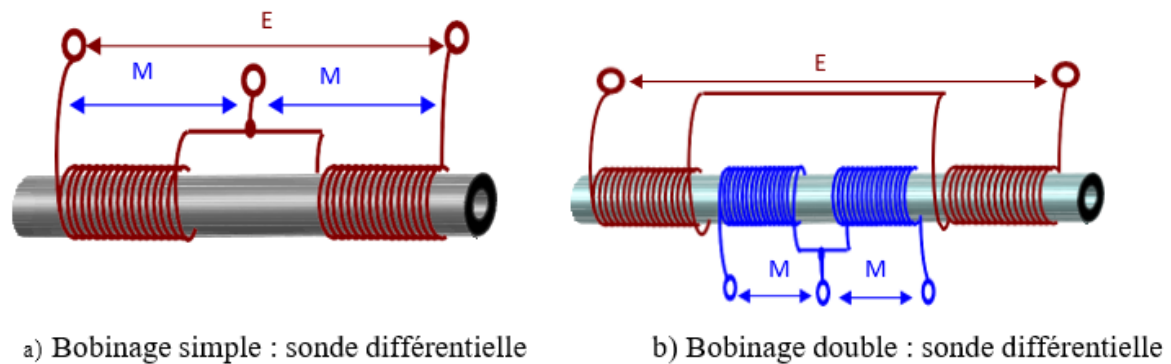


FIGURE 1.11 – Contrôle en mode différentiel.

d'entrefer [24, 28].

La mesure différentielle est également sensible aux imperfections locales du matériau inspecté. Lors du déplacement du capteur, la présence d'un défaut provoque un déséquilibre du signal, qui se manifeste lorsque l'un des récepteurs se rapproche du défaut tandis que l'autre en est éloigné Figure 1.11.

- Caractéristiques des sondes en mode différentiel :
 - Composées de deux bobines adjacentes ou concentriques.
 - Réduction de la sensibilité au lift-off.
 - Détection des défauts par asymétrie.
 - Utilisation : détection de défauts de petite taille [1, 24].

1.8 Technologies des bobines

Les capteurs inductifs se déclinent en deux principaux types de bobines :

- Bobines traditionnelles : Elles sont constituées par l'enroulement d'un fil conducteur, généralement en cuivre émaillé, autour d'un noyau (comme illustré à la Figure 1.12). Ce noyau peut être fait d'air, de plastique, de ferrite ou parfois d'un matériau magnétique. Dans le domaine du contrôle non destructif (CND), les noyaux en ferrite sont particulièrement prisés, car ils permettent de focaliser et d'amplifier le champ magnétique produit par la bobine d'excitation.
- Bobines gravées : Il existe deux sous-catégories de bobines gravées :
 - Bobines sur circuits imprimés (PCB) : Fabriquées à l'aide de la technologie classique des circuits imprimés, elles sont largement utilisées pour leur simplicité de production et leur flexibilité d'intégration.
 - Micro-bobines : Ce sont des bobines miniatures fabriquées en salle blanche à l'aide de techniques de micro-fabrication. Elles sont souvent employées pour des applications de haute précision.

Ces capteurs, de par leur flexibilité, s'avèrent particulièrement adaptés à l'inspection de surfaces complexes. Par exemple, la Figure 1.13 présente un capteur multiéléments composé de 4x32 bobines gravées sur un film de Kapton, où les bobines sont reliées à des connecteurs situés de chaque côté du film via de nombreux fils électriques [1, 15, 21, 28].



FIGURE 1.12 – Bobine construite par l'enroulement d'un fil de cuivre



FIGURE 1.13 – Capteur multiéléments composé de bobines gravées sur film Kapton

1.9 Différents types de défauts

La détection d'un défaut dans une pièce permet de révéler une hétérogénéité du matériau ou une variation locale des propriétés physiques ou chimiques, susceptibles de nuire à son bon fonctionnement. Toutefois, les défauts sont généralement classés en deux grandes catégories en fonction de leur emplacement : les défauts de surface et les défauts internes [1, 16, 32]. Ces deux types de défauts sont couramment utilisés pour regrouper les différentes déficiences observées.

1.9.1 Défauts ponctuel

La première catégorie regroupe les défauts ponctuels, qui sont les plus préoccupants sur le plan technologique. En raison de la présence de criques, de piqûres, de fissures et de craquelures, ces défauts sont susceptibles de provoquer la rupture de la pièce, notamment en entraînant des fissures de fatigue. Dans le cas des pièces métalliques, les fissures sont souvent très fines (de quelques micromètres) et deviennent dangereuses lorsqu'elles atteignent une profondeur de plusieurs dixièmes de millimètre. Cela nécessite l'utilisation de méthodes non destructives sensibles pour leur détection [1, 15].

La deuxième catégorie concerne les imperfections d'aspect, qui se manifestent par des variations des paramètres géométriques ou physiques, tels que la rugosité, l'excès d'épaisseur ou des taches diverses. Ces imperfections peuvent nuire à l'esthétique du produit et le rendre inutilisable. Bien qu'un contrôle visuel puisse être effectué, nous prévoyons de le remplacer

par des contrôles optiques automatisés.

1.9.2 Défauts internes

Le volume d'un matériau contient une variété d'hétérogénéités qui diffèrent par leur nature, forme et taille. Chaque secteur technologique et industriel présente ses propres défis particuliers. Par exemple, dans l'industrie métallurgique, des fissures internes et divers types d'inclusions peuvent compromettre l'intégrité structurelle des pièces moulées, forgées ou soudées [34, 35].

Dans certains cas, le problème peut simplement résider dans la présence d'un corps étranger à l'intérieur d'une enceinte scellée ou d'un produit emballé. Dans de nombreuses situations, l'inspection visuelle seule est insuffisante. Par conséquent, des techniques de contrôle non destructif (CND), telles que la radiographie, le contrôle par ultrasons, ou des méthodes plus spécialisées comme l'émission acoustique et l'imagerie infrarouge, sont généralement nécessaires pour répondre à des situations spécifiques.

1.10 Domaines d'applications des capteurs à courants de Foucault en CND

Les techniques de contrôle par courants de Foucault (CF) sont largement utilisées pour diverses applications, parmi lesquelles :

- La détection des effets thermiques sur les alliages d'aluminium, notamment la surchauffe des composants dans le secteur aéronautique.
- La mesure de l'épaisseur de revêtements, qu'il s'agisse de revêtements conducteurs non magnétiques sur des substrats magnétiques, ou d'isolants sur des substrats conducteurs.
- La recherche de défauts sur des produits issus de la fabrication, tels que des tubes, des rails ou des plaques.
- Le suivi et la surveillance des installations et équipements en service [24, 25].

Cependant, en cas d'incident, les conséquences peuvent être irréversibles. Les accidents aé-

riens les plus graves sont généralement causés par une perte de contrôle de l'appareil par les pilotes, souvent en raison de défaillances mécaniques ou électriques. Les problèmes mécaniques les plus fréquents apparaissent dans les zones soumises à des contraintes et à la fatigue, telles que les moteurs, les systèmes de fixation, ainsi que les boulons et rivets du fuselage et des ailes.

1.11 Les avantages associés au contrôle par courants de Foucault

L'utilisation de la méthode de contrôle par courants de Foucault présente plusieurs avantages notables, tels que :

- Une rapidité dans le balayage et la détection des défauts.
- La capacité à détecter à travers des revêtements de surface sans altérer ceux-ci.
- Une grande pertinence pour les opérations de maintenance, en particulier pour l'inspection des tubes de générateurs de vapeur, des remontées mécaniques, des ponts suspendus, ainsi que des moteurs d'avions.
- Une efficacité prouvée pour le tri de pièces ayant des conductivités électriques différentes, notamment pour distinguer des alliages soumis à des traitements thermiques variés ou des nuances d'alliages mélangées accidentellement.
- Aucune préparation spécifique de la surface n'est requise avant l'inspection.
- La qualité de la détection demeure stable, quel que soit la vitesse de balayage.
- Un étalonnage complexe n'est pas nécessaire ; une simple calibration de l'appareil est suffisante.
- La possibilité de traiter les données informatiquement, permettant ainsi leur stockage et modélisation.
- Une méthode respectueuse de l'environnement, puisqu'elle n'entraîne pas de pollution.
- Enfin, cette technique est facilement automatisable et offre des résultats instantanés ;

1.12 Conclusion

Ce premier chapitre a été une synthèse approfondie des techniques de contrôle non destructif (CND) pour la détection de défauts dans divers matériaux, en mettant l'accent sur la méthode des courants de Foucault (CF). Cette technique, basée sur l'induction de courants électriques dans un matériau conducteur, permet de détecter des anomalies en mesurant les variations de conductivité et de perméabilité magnétique. Son efficacité est démontrée dans des secteurs comme l'aéronautique et l'automobile pour la détection de fissures et d'inclusions.

Le chapitre a analysé également les types de capteurs associés aux courants de Foucault, en comparant leurs performances selon les besoins de l'inspection. Bien que la méthode CF présente des limites, telles qu'une faible profondeur de pénétration, les récents progrès technologiques ont renforcé ses capacités. Le texte justifie le choix de cette méthode comme technique principale de la thèse pour une inspection précise et fiable des matériaux, soulignant son rôle essentiel dans la préservation de l'intégrité et la sécurité des structures étudiées.

Comme la simulation joue un rôle essentiel dans le contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault, étant donné qu'elle facilite la modélisation des interactions entre le capteur et la pièce à tester, d'optimiser le design des systèmes de contrôle, minimiser les coûts d'expérimentation, estimer et prévoir la détection de défauts plus ou moins complexes, tout cela pour rendre le contrôle plus efficaces et plus fiable. C'est pour ces motifs que la prochaine section sera dédiée à la modélisation du CND-CF.

Modélisation d'un système de CND-CF pour la caractérisation des défauts dans les structures multicouches

2.1 Introduction

Les outils de simulation jouent un rôle crucial dans le domaine du contrôle non destructif (CND), notamment dans l'application des courants de Foucault (CF). Ces outils permettent de surmonter divers défis rencontrés lors des études expérimentales paramétriques, tels que les coûts élevés, la complexité des configurations et la disponibilité limitée d'échantillons de référence. En effet, la mise en place d'un banc d'essai physique peut s'avérer non seulement onéreuse, mais également impraticable dans certains contextes [4, 20].

Dans ce chapitre, nous proposons les éléments suivants :

- Une revue des principes physiques et des équations de Maxwell pour les CND par courants de Foucault.
- La description et la comparaison des formulations numériques ($A - V, H, T - \Phi$) et des conditions aux limites.
- Un panorama des méthodes de résolution (BEM, FDM, FVM, MEF) et les critères de choix.
- La mise en œuvre pratique par éléments finis 3D et les hypothèses simplificatrices

adoptées.

La simulation repose sur une modélisation mathématique sophistiquée qui imite le comportement d'un système à travers des calculs élaborés basés sur des équations différentielles partielles. Ces équations représentent les lois physiques fondamentales qui régissent le comportement des matériaux et des champs électromagnétiques. Dans ce cadre, une compréhension approfondie des phénomènes physiques sous-jacents est essentielle pour développer des modèles précis capables de prédire la réponse de la sonde en fonction des paramètres de la cible, comme la conductivité, la perméabilité et la géométrie des défauts [23, 24, 36].

De plus, l'utilisation de méthodes analytiques et numériques, telles que la méthode des éléments finis (MEF), permet d'analyser une large gamme de scénarios géométriques et de matériaux complexes. Cette approche offre la flexibilité nécessaire pour modéliser des configurations variées, allant des géométries simples aux structures plus élaborées, sans nécessiter de prototypes physiques. En conséquence, la modélisation numérique est devenue un outil indispensable pour optimiser les performances des systèmes avant leur mise en œuvre, garantissant ainsi leur efficacité et leur fiabilité [1, 15, 19, 29].

Enfin, La modélisation d'un système de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) est essentielle pour évaluer l'intégrité des structures multicouches, notamment dans le secteur aéronautique. Ces structures, qui intègrent plusieurs matériaux et épaisseurs, présentent des défis uniques en matière de détection des défauts. Les courants de Foucault permettent d'identifier diverses anomalies, telles que les fissures, les délaminations et les inclusions, en fournissant des informations précises sur l'état des matériaux sans les endommager.

2.2 Schéma d'un système d'évaluation non-destructif

La chaîne de mesure en contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault se compose of quatre éléments essentiels :

- La source d'excitation.
- La sonde.
- Le système d'acquisition.
- Le système de traitement.

En général, la structure du système de CND par courants de Foucault est illustrée dans la Figure 2.1 suivante :

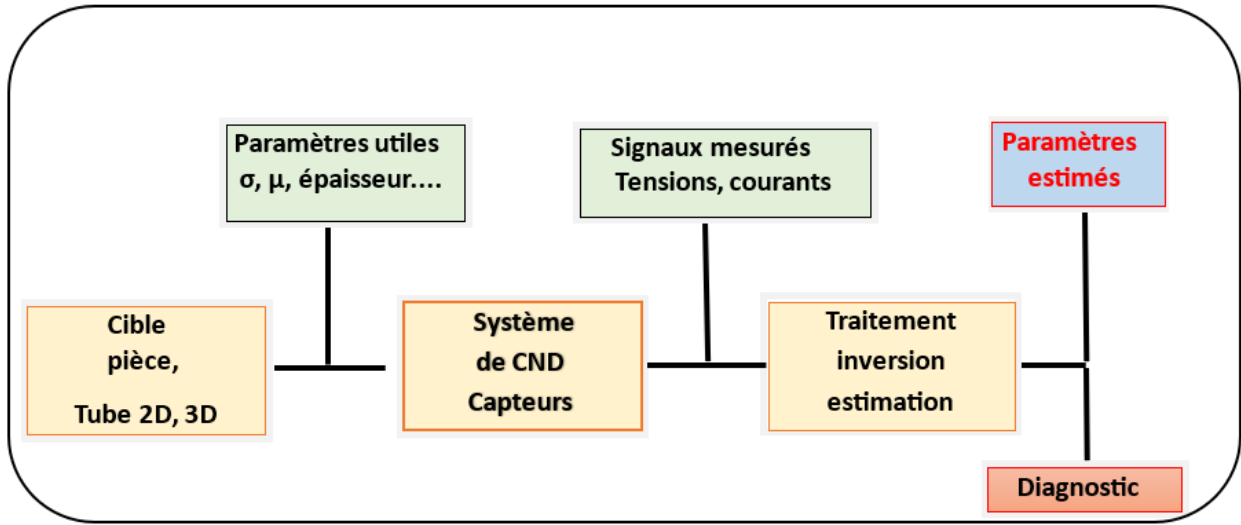


FIGURE 2.1 – Schéma synoptique de CND par CF [1]

2.3 Modélisation du dispositif de CND par CF

La structure géométrique du système de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF), régie par les équations de Maxwell en régime linéaire harmonique, se divise en trois parties principales :

- La source d'excitation,
- La cible,
- Les capteurs.

L'interaction entre ces trois composantes est décrite par les équations de Maxwell, qui modélisent le comportement électromagnétique du système en régime harmonique. Ces équations définissent comment le champ électromagnétique généré par la source d'excitation interagit avec la cible et les capteurs, permettant ainsi de prédire la réponse globale du système CND-CF dans diverses conditions d'inspection [37, 38].

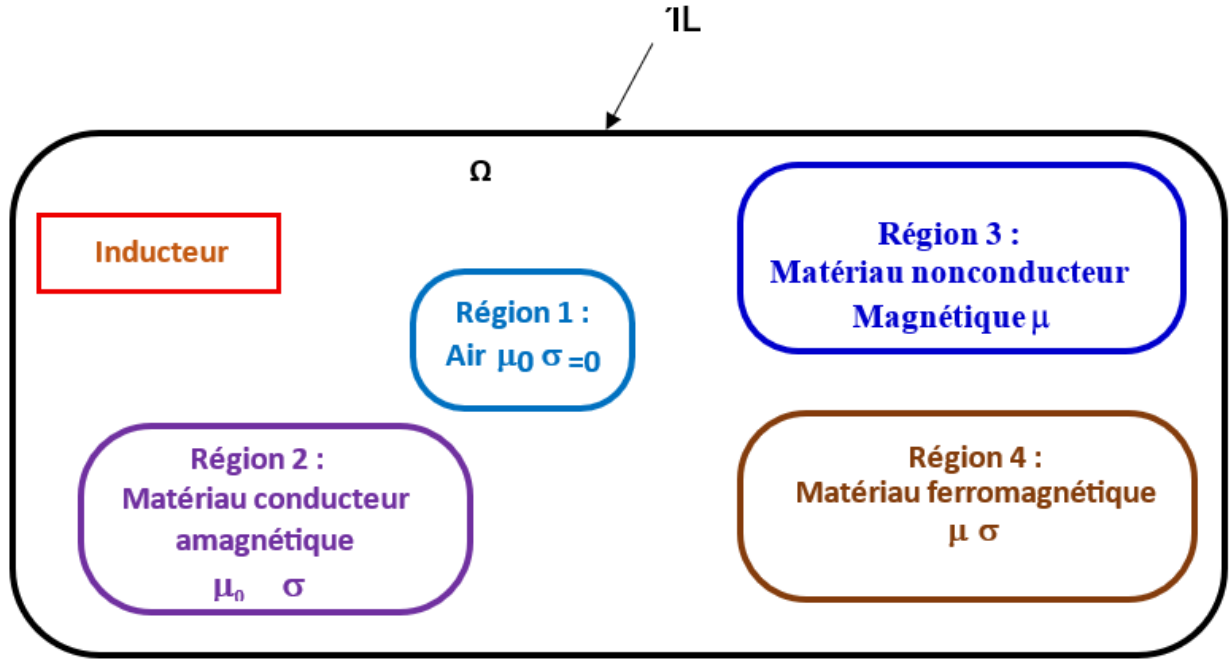


FIGURE 2.2 – Schéma descriptif d'un problème type de CND par CF.

2.4 Courants de Foucault à travers les équations de Maxwell

Pour analyser et prédire le comportement des systèmes physiques, des modèles numériques sont élaborés à partir des équations fondamentales qui les décrivent. Ces modèles permettent d'anticiper les résultats des mesures en fonction des paramètres propres au système étudié. Dans le cas particulier du contrôle par courants de Foucault (CCF), une équation aux dérivées partielles (EDP) peut être obtenue à partir des équations de Maxwell. Cette EDP constitue un outil de modélisation permettant de prévoir la distribution et l'intensité des courants de Foucault générés dans le matériau [10].

2.4.1 Mise en équations

Les phénomènes électromagnétiques, qu'il s'agisse de la lumière, des ondes radio ou encore de l'électricité, trouvent leur description fondamentale à travers les équations de Maxwell. Ces quatre relations établissent le lien entre les champs électrique et magnétique ainsi que leur interaction avec les milieux matériels. Elles peuvent être formulées de la manière suivante [39] :

Équation de Maxwell-Faraday

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Équation de conservation du flux magnétique

$$\text{div} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

Équation de Maxwell-Ampère

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{J}_s + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.3)$$

Équation de Maxwell-Gauss

$$\text{div} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

Avec :

- $\vec{E}$: Champ électrique [V/m],
- $\vec{H}$: Champ magnétique [A/m],
- $\vec{B}$: Induction magnétique [T],
- $\vec{J}$: Densité de courant [A/m²],
- $\vec{D}$: Induction électrique [A · s/m²],
- ρ : Densité volumique de charge [C/m³],
- t : Temps [s].

L'équation (2.3) constitue une généralisation de la loi d'Ampère, donnée par $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_s$. Associée à l'équation (2.1), elle forme l'un des couples fondamentaux des équations de couplage électromagnétique. En parallèle, les équations (2.2) et (2.4) sont regroupées sous l'appellation d'équations de conservation.

Cependant, l'utilisation directe des équations de Maxwell dans la résolution des problèmes électromagnétiques s'avère souvent peu pratique, car elle nécessite le traitement simultané des quatre équations différentielles. Pour lever cette indétermination, les champs électriques et magnétiques sont reliés à travers des relations constitutives — également appelées lois de comportement — qui traduisent les propriétés des matériaux. Ces lois prennent généralement la forme suivante :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

Dans cette formulation, les paramètres μ (perméabilité magnétique) et σ (conductivité électrique) peuvent être traités comme des scalaires dans le cas de matériaux isotropes, ou comme des tenseurs afin de modéliser les effets liés à l'anisotropie [40]. Il convient également de souligner que la relation entre l'induction magnétique B et le champ magnétique H n'est pas nécessairement linéaire. Par ailleurs, pour garantir l'existence et l'unicité de la solution du système d'équations (2.1) à (2.7), il est indispensable d'introduire trois catégories de conditions : les conditions aux limites, les conditions de continuité et les conditions de jauge [14, 34].

2.4.2 Conditions aux limites

Pour un domaine Ω délimité par une frontière Γ , et avec n désignant un vecteur unitaire normal à la surface, deux types de conditions peuvent être imposées pour une variable u , [24, 41] :

- Dirichlet homogène $u \cdot \vec{n} = 0$
- Neumann homogène $\frac{\partial U}{\partial n} = 0$

2.4.3 Conditions de continuité

Lorsque des champs électromagnétiques rencontrent une interface séparant deux milieux, des discontinuités peuvent apparaître. Néanmoins, il existe des conditions permettant de décrire le comportement des champs lors de leur passage à travers cette interface. Considérons deux domaines distincts, notés Ω_1 et Ω_2 , caractérisés par des propriétés physiques différentes et séparés par une surface Σ , comme illustré dans la Figure 2.3. Les relations de continuité imposées aux champs au niveau de cette interface Σ peuvent alors s'exprimer sous la forme suivante [1, 14].

Continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique E

$$\vec{E}_1 \wedge \vec{n} = \vec{E}_2 \wedge \vec{n} \quad (2.8)$$

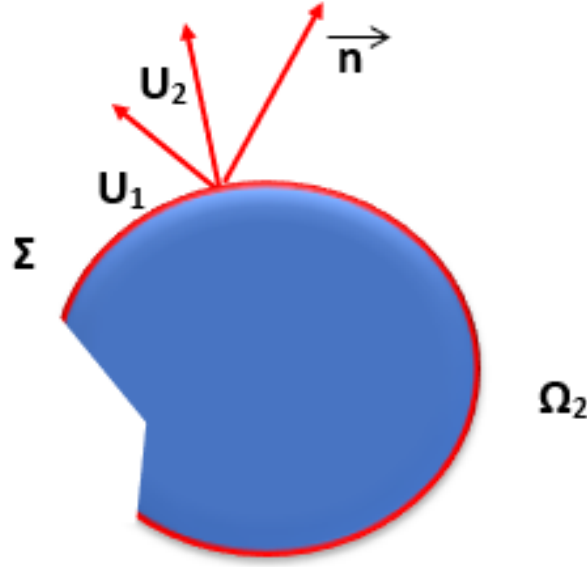


FIGURE 2.3 – Interaction entre deux milieux différents

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

$$\vec{B}_1 \wedge \vec{n} = \vec{B}_2 \wedge \vec{n} \quad (2.9)$$

Discontinuité de la composante tangentielle du vecteur champ magnétique H

$$\vec{H}_1 \wedge \vec{n} - \vec{H}_2 \wedge \vec{n} = \vec{J}_s \quad (2.10)$$

Discontinuité de la composante normale du vecteur induction électrique D en présence de charges Superficielles ρ_s

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_s \quad (2.11)$$

Où :

$\vec{n}$: Vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux Ω_1 et Ω_2 ,

$\vec{J}_s$: Densité surfacique d'une nappe de courant entre les deux milieux.

Les équations présentées précédemment fournissent une description globale de l'ensemble des phénomènes électromagnétiques. Cependant, dans la plupart des situations, une résolution directe de ces équations n'est pas réalisable. En fonction de la forme des dispositifs, certains phénomènes peuvent devenir négligeables. Ainsi, les équations se simplifient, donnant lieu à des modèles plus accessibles [14].

2.4.4 Hypothèses simplificatrices

La plupart des travaux réalisés jusqu'à présent sur le calcul des champs électromagnétiques et des courants de Foucault dans les systèmes concernés reposent sur un certain nombre d'hypothèses :

- Dans le cadre des applications de Contrôle Non Destructif (CND) utilisant les courants de Foucault, on considère généralement un régime magnétodynamique basse fréquence, dit quasi-stationnaire. Dans ce cas, le courant de déplacement est supposé négligeable, ce qui revient à poser $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$.

En complément, certaines hypothèses spécifiques à la modélisation adoptée sont posées :

- Le courant d'excitation est supposé fourni par une source idéale, avec une valeur connue à l'avance. Ainsi, l'expression $\sigma \vec{E}$ peut être scindée en une composante imposée $\vec{J}_s$ (densité de courant source) et une composante liée au champ électrique induit. Pour représenter uniquement les courants de Foucault, on conserve la notation $\sigma \vec{E}$.
- La densité de courant sur l'interface séparant deux milieux est considérée nulle ($\vec{J}_s = 0$).
- La densité volumique de charge est également supposée nulle ($\vec{\rho}_s = 0$).

Sous ces conditions, les équations de Maxwell à traiter prennent la forme suivante :

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.15)$$

Avec les relations constitutives suivantes :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (2.16)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.17)$$

L'induction magnétique rémanente peut être négligée ($\vec{B}_r = 0$) lorsque le système ne comporte pas d'aimant permanent ou de matériau ferromagnétique [37, 42].

2.5 Formulations magnétodynamiques

La formulation qui permet d'implémenter une solution en éléments finis 3D repose sur une combinaison de relations constitutives, de relations de passage, de conditions aux limites et de conditions de jauge. Il est essentiel de définir une formulation régie par des équations aux dérivées partielles pour notre système. Dans le domaine du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (CND-CF), il est fréquent de privilégier l'expression des champs électrique et magnétique en fonction de potentiels, car cette méthode assure une convergence plus efficace par rapport à une approche où les inconnues seraient les champs (E) et (H) [24, 30, 41].

Deux familles de formulations peuvent être identifiées :

- Formulations basées sur le champ électrique ($E, A - V$), avec une formulation en potentiel vecteur magnétique A .
- Formulations basées sur le champ magnétique ($H - \Phi, T - \Omega$), comprenant des formulations en H ou la formulation en J [1].

2.5.1 Formulation en A-V

Selon l'équation de conservation du flux (2.4), l'induction magnétique (B) dérive d'un potentiel magnétique (A), comme l'indique [43] :

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}) \quad (2.18)$$

Lorsque cette équation est remplacée dans (2.13), on obtient :

$$\text{rot} \left[\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] = 0 \quad (2.19)$$

Un potentiel électrique v peut être déterminé à partir de l'équation (2.20), qui est donné par la relation ci-après :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\text{grad}(v) \Leftrightarrow \vec{E} = -\text{grad}(v) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.20)$$

La combinaison des équations (2.16) et (2.20) nous permet d'écrire :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} = \vec{J}_j - \left[\sigma \overrightarrow{\text{grad}} v + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] \quad (2.21)$$

Finalement la formulation magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire électrique s'écrit :

$$\text{rot}\left[\frac{1}{\mu} \text{rot}(A)\right] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \text{grad } v = -J_s \quad (2.22)$$

L'unicité du potentiel doit être garantie par l'application d'une jauge. Dans la formulation $A - V$, la jauge de Coulomb apparaît comme la plus efficace [30].

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (2.23)$$

2.5.2 Formulation en H

La combinaison des équations (2.12) et (2.16) mène directement à l'équation à résoudre :

$$\text{rot}\left[\frac{1}{\sigma} \cdot \text{rot}(\vec{H}) + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\right] = 0 \quad (2.24)$$

2.5.3 Formulation en potentiels vecteur électrique et scalaire magnétique $T - \Phi$

Comme la divergence de la densité de courant induite est nulle ($\text{div} J = 0$), on peut introduire un potentiel vecteur électrique noté T , selon [24, 43] :

$$\vec{J} = \text{rot } \vec{T} \quad (2.25)$$

Tout comme pour la formulation $A - V$, l'unicité de la solution requiert l'introduction d'une jauge, telle que la jauge de Coulomb, ce qui conduit à l'expression suivante :

$$\text{rot}\left[\frac{1}{\sigma} \text{rot } \vec{T}\right] + N \frac{\partial}{\partial t} \left[\vec{T} \overrightarrow{\text{grad}} \Phi\right] = 0 \quad (2.26)$$

La sélection d'une formulation dépend principalement des ressources informatiques, des moyens disponibles et du niveau de précision nécessaire, en fonction de la dimension et de la complexité du problème à traiter. Les formulations duales (E, H) , qui satisfont rigoureusement les équations de Maxwell, représentent une option pertinente. Elles permettent d'obtenir une solution unique en respectant des conditions aux limites appropriées et ne nécessitent pas l'application d'une jauge, comme le souligne [1, 41].

2.5.4 Comparaison entre les formulations

Le Tableau (2.1) présente une synthèse des formulations les plus utilisées dans le domaine du contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF), telle qu'exposée dans [30, 34]. Le choix d'une formulation dépend principalement de la taille et de la complexité du problème étudié, mais aussi des moyens de calcul disponibles, de la simplicité d'implémentation ainsi que du niveau de précision attendu. Les formulations dites duales (E et H), conformes aux équations de Maxwell, garantissent une solution unique sous des conditions aux limites bien définies et ne requièrent pas l'introduction de jauges. Néanmoins, lorsque des éléments nodaux sont employés, la continuité des champs doit être assurée, ce qui devient délicat en présence de discontinuités des champs E et H aux interfaces de matériaux différents [44, 45].

TABLE 2.1 – Comparaison entre les formulations les plus utilisées dans le CND-CF.

Formulation	Potentiels régions non conductrices	Potentiels régions conductrices	Avantages	Inconvénients
$\vec{A}V - \vec{A}$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, V$	$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z, V$	Pas de problèmes régions multiples identiques	Nombre élevé d'inconnues
$\vec{T} - \Phi$	Φ	$\vec{T}_x, \vec{T}_y, \vec{T}_z, \Phi$	Temps de calcul réduit, Diminution des inconnues.	Problèmes de régions multiples

2.6 Méthodes de résolution

L'analyse des phénomènes physiques liés au Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (CND-CF) peut être réalisée à travers des modèles mathématiques permettant

d'anticiper la réponse du capteur en fonction des caractéristiques de la pièce inspectée. Ces modèles s'appuient sur la résolution des équations de Maxwell. Selon le degré de complexité de la géométrie étudiée, cette résolution peut être abordée soit par des méthodes analytiques, soit par des approches numériques. Dans ce dernier cas, les équations aux dérivées partielles sont généralement traitées à l'aide de l'une des méthodes numériques suivantes :

- méthode des éléments de frontière (BEM),
- méthode des différences finies (FDM),
- méthode des volumes finis (FVM),
- méthode des intégrales de volume,
- méthode des éléments finis (FEM).

2.6.1 Méthodes analytiques

La résolution analytique des équations de Maxwell offre des avantages significatifs, notamment en termes de rapidité et de précision des résultats. Des études antérieures, telles que celles de [1, 46] ont démontré cette efficacité en appliquant la méthode de séparation des variables à diverses configurations, telles qu'une bobine à air axisymétrique au-dessus de couches métalliques et une bobine encerclant des cylindres métalliques concentriques. Toutefois, la complexité croissante des configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault (CND par CF) rend souvent la solution analytique impraticable, voire impossible, nécessitant ainsi le recours à des méthodes numériques, comme l'ont illustré [18, 46, 47]. Bien que les solutions analytiques demeurent des références précieuses, notamment pour des géométries simples en deux dimensions, leur complexité limite leur utilisation dans des applications pratiques.

2.6.2 Méthodes numériques

Avec l'avancée des outils informatiques, les méthodes numériques se sont largement développées, permettant d'analyser une multitude de configurations entre la sonde et la pièce. Parmi ces techniques figurent les méthodes des différences finies, des éléments de frontière, des intégrales de volume et des éléments finis (MEF). Cependant, il convient de souligner

que l'utilisation de ces méthodes exige des temps de calcul considérables et des capacités de mémoire élevées, nécessitant ainsi des outils informatiques sophistiqués pour leur mise en œuvre efficace [4, 15].

2.6.2.1 Méthode des Éléments de Frontière (BEM)

Cette méthode transforme les équations aux dérivées partielles en équations intégrales, dans lesquelles les fonctions de Green jouent le rôle de noyaux en représentant la réponse générée par une source ponctuelle dans la configuration étudiée. Néanmoins, la difficulté liée à la détermination de ces fonctions restreint l'application de la BEM principalement aux géométries simples. Par ailleurs, cette approche est surtout pertinente lorsque la profondeur de pénétration des courants de Foucault peut être considérée comme négligeable face aux autres dimensions, ce qui survient généralement en régime de hautes fréquences [48].

2.6.2.2 Méthode des Différences Finies (MDF)

Le principe de cette méthode repose sur deux éléments essentiels : la discrétisation des opérateurs différentiels et la garantie de convergence du schéma utilisé. La discrétisation consiste à remplacer les dérivées partielles par des combinaisons de valeurs calculées en des points discrets, appelés nœuds, qui forment le maillage. Traditionnellement, le domaine d'étude est subdivisé en un réseau régulier de points rectangulaires, où les opérateurs différentiels sont remplacés par des différences finies entre les valeurs des inconnues aux nœuds voisins. Bien que simple à implémenter, cette méthode présente des limites lorsqu'il s'agit de traiter des géométries complexes, en raison de la contrainte d'utiliser un maillage uniforme.

2.6.2.3 Méthode des Volumes Finis (MVF)

La méthode des volumes finis, également appelée méthode des volumes de contrôle, repose sur une approche de type résiduel pondéré où les fonctions de pondération sont considérées constantes à l'intérieur de chaque volume fini. Elle consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur des volumes de contrôle entourant les nœuds du maillage, plutôt que de se limiter aux nœuds eux-mêmes. Ainsi, le domaine est découpé en sous-régions, chacune associée à un nœud. La construction du système global diffère de celle obtenue avec les

éléments finis : les matrices sont générées directement par le processus d'intégration sur les volumes de contrôle, et non par assemblage élément par élément [15, 49].

2.6.2.4 Méthode des Intégrales de Volume

Cette méthode s'appuie sur la résolution d'équations intégrales. En pratique, la discrétisation est réalisée au moyen de la méthode des moments. On suppose que les grandeurs électromagnétiques et les propriétés constitutives sont uniformes dans une cellule cubique élémentaire. La résolution numérique est ensuite effectuée par des techniques d'inversion itérative, permettant d'obtenir une approximation du champ et des courants induits.

2.6.2.5 Méthode des Éléments Finis (MEF)

La MEF repose sur la transformation des équations différentielles partielles en un système algébrique. De manière générale, sa mise en œuvre se déroule selon les étapes suivantes [18, 19] :

- Formulation variationnelle : reformulation du problème sous forme variationnelle et définition de l'espace des fonctions admissibles.
- Maillage : subdivision du domaine en éléments (triangles, tétraèdres, hexaèdres), puis représentation du champ au moyen d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base locales.
- Assemblage : élaboration des matrices élémentaires et constitution du système global.

2.6.3 Approximation par la méthode des éléments finis

Cette section est divisée en deux parties. Dans un premier temps, elle introduit le problème du contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF), en définissant le domaine, les opérateurs différentiels et l'espace fonctionnel des grandeurs électromagnétiques. Les équations de Maxwell sont regroupées sous une structure mathématique comportant deux séries spatiales, et différentes solutions magnétodynamiques sont envisagées.

La seconde partie porte sur la résolution numérique des équations de Maxwell en utilisant un maillage tétraédrique. Plusieurs formulations en potentiels sont présentées afin de faciliter

la modélisation des phénomènes électromagnétiques. Très étudiée dans la littérature, la MEF combine la discrétisation spatiale (géométrie du domaine) et la représentation approchée du champ.

Les étapes principales incluent :

- La subdivision du domaine (maillage).
- Le choix des fonctions d'interpolation.
- La formulation du système d'équations algébriques.
- La résolution du système obtenu.

Un problème magnétodynamique peut être formulé de manière générale sur un domaine Ω avec frontière Γ comme suit :

$$L(u) = f \quad \text{dans } \Omega \quad (2.27)$$

$$M(u) = g \quad \text{sur } \Gamma \quad (2.28)$$

où L et M désignent des opérateurs différentiels, f et g des fonctions connues, et u la variable recherchée.

La formulation forte, représentée par (3.49), est souvent difficile à traiter en raison de la présence de dérivées d'ordre élevé et de discontinuités potentielles. Pour y remédier, on recourt à une formulation variationnelle faible, obtenue soit par la méthode de Galerkin, soit par minimisation d'une fonctionnelle d'énergie :

$$F(u) = \int_{\Omega} N \cdot (L(u) - f) d\Omega = 0 \quad (2.29)$$

où N représente la fonction de pondération, scalaire ou vectorielle, appartenant au même espace fonctionnel.

Dans le domaine discrétisé, plusieurs approches permettent d'évaluer les grandeurs physiques :

- approximation nodale,
- circulation le long des arêtes,
- intégration par éléments de volume.

Ces choix dépendent du type de grandeur étudiée [50].

Pour un élément e comportant m nœuds, les composantes A_x, A_y, A_z du potentiel vecteur

magnétique ainsi que le potentiel scalaire électrique V sont approchés par :

$$A_s^e = \sum_{i=1}^m N_j^e A_{s_i}^e, \quad (2.30)$$

$$V^e = \sum_{i=1}^m \alpha_j v_j. \quad (2.31)$$

Enfin, la variation d'impédance est déterminée en tenant compte de l'énergie magnétique stockée w_m et des pertes ohmiques P_J :

$$w_m = \frac{1}{2} \iiint_v \frac{1}{\mu} |\vec{B}|^2 dv, \quad (2.32)$$

$$P_J = \frac{1}{2} \iiint_c \frac{1}{\sigma} |\vec{J}|^2 dv. \quad (2.33)$$

Ces grandeurs permettent d'évaluer précisément l'évolution de l'impédance dans le système électromagnétique étudié.

2.7 Conclusion

En conclusion, les outils de simulation s'affirment comme des éléments cruciaux dans l'optimisation des processus d'analyse et de contrôle, particulièrement dans le domaine du contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF). Leur capacité à contourner les limitations inhérentes aux méthodes expérimentales traditionnelles les rend indispensables, car elles permettent d'évaluer les performances des systèmes de manière économique et efficace avant leur mise en œuvre concrète. Cela est particulièrement pertinent dans des contextes où le coût et le temps associés aux essais physiques peuvent être prohibitifs.

La modélisation mathématique, qui repose sur des principes fondamentaux de la physique, ainsi que sur les équations de Maxwell, joue un rôle fondamental dans cette démarche. En décrivant avec précision l'interaction entre la cible et le capteur, elle facilite la résolution des problèmes directs et inverses liés aux courants de Foucault. Cela permet non seulement d'anticiper le comportement des systèmes dans différentes conditions, mais aussi de concevoir des scénarios d'inspection optimisés, augmentant ainsi la qualité des résultats obtenus.

De plus, l'intégration de ces techniques de simulation dans les études paramétriques ne se limite pas à un simple avantage : elle est devenue une nécessité incontournable pour garantir la

fiabilité et l'efficacité des inspections non destructives. En fournissant des insights précieux sur les paramètres influençant les performances des systèmes, ces outils permettent d'identifier les variables critiques, de tester différentes configurations et de réaliser des analyses de sensibilité. Ainsi, ils favorisent une approche proactive et adaptable dans la conception et la mise en œuvre des processus d'inspection, contribuant à une meilleure gestion des risques et à une optimisation continue des techniques de contrôle.

Dans le contrôle non destructif (CND) utilisant la technique des courants de Foucault, une matrice de capteurs constituée par un ensemble de sondes miniatures organisées en rangées pour l'examen simultané d'une vaste zone d'un matériau conducteur. À la différence des systèmes à un seul capteur qui requièrent une inspection mécanique lente, l'application d'une matrice offre une amélioration significative en termes de rapidité d'évaluation et de précision spatiale. L'utilisation de cette technique est très répandue dans le milieu industriel, notamment pour la détection de fissures et de corrosion sur les surfaces d'aéronefs. Cette technique sera utilisée au troisième chapitre pour le contrôle non destructif au voisinage du rivet d'assemblage, dans les structures multicouches utilisées en aéronautique, car ce dernier est le plus souvent le siège de contraintes élevées.

Application et simulation du CND-CF par capteurs multiéléments

3.1 Introduction

Dans le domaine de l'aéronautique, il est primordial de garantir l'intégrité structurelle des composants des avions. Les techniques de contrôle non destructif (CND) jouent un rôle crucial [3] à cet égard, car elles permettent de détecter les défauts et les imperfections sans endommager les pièces inspectées. L'une de ces méthodes de contrôle non destructif qui a gagné en importance dans l'industrie aérospatiale est l'utilisation des courants de Foucault en mode multiplexé multiéléments pour la détection des défauts autour des rivets à tête arrondie dans les structures multicouches [10, 11].

Les joints rivetés sont couramment utilisés dans les structures aéronautiques, et l'intégrité de ces joints est essentielle pour la sécurité et les performances globales de l'avion. Le contrôle par courants de Foucault est une technique CND polyvalente qui convient bien à l'inspection des matériaux conducteurs, ce qui en fait un choix idéal pour l'inspection des composants métalliques dans les structures multicouches d'aéronautiques [6, 12–14].

Dans ce contexte, la simulation numérique joue un rôle important en permettant de modéliser les phénomènes électromagnétiques, d'analyser l'influence des paramètres géométriques et matériaux, et d'évaluer les performances des systèmes CND par courants de Foucault avant toute application expérimentale.

3.2 Capteurs multiéléments

La méthode des capteurs multiéléments utilisant les courants de Foucault repose sur la génération d'un champ magnétique à l'intérieur d'un conducteur, entraînant ainsi l'induction de courants qui fournissent des informations sur l'état de la pièce examinée. Pour créer et mesurer ce champ magnétique, on recourt à une ou plusieurs bobines activées électroniquement, agencées selon un motif spécifique et répétitif sur l'ensemble des éléments ou bobines qui composent le capteur. Ce processus est généralement désigné sous le terme de séquençement, qui se rapporte à la chronologie d'activation de chaque motif [10, 15, 16].

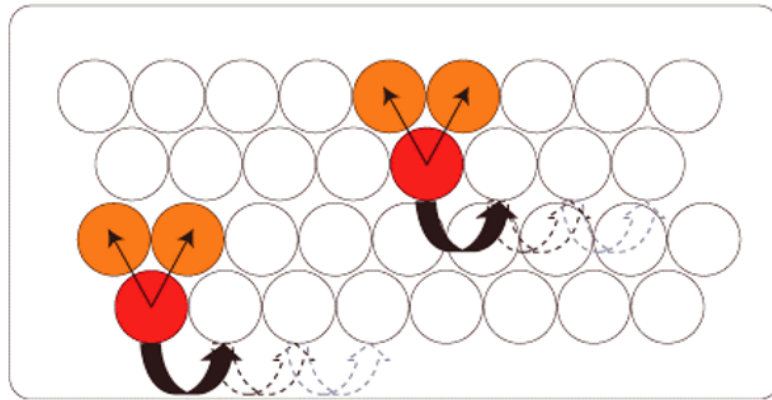


FIGURE 3.1 – Méthode ECA : l'idée du multiplexage entre les éléments individuels

3.2.1 Déplacement

Pour générer des courants de Foucault multiples (CFM), plusieurs bobines sont disposées selon une configuration spécifique, souvent côte à côte et suivant un motif déterminé. Ces bobines sont activées électroniquement en suivant une séquence prédéfinie. Cette méthode permet d'étendre la zone active, réduisant ainsi de manière significative le nombre de balayages requis pour inspecter un composant, comparé aux techniques traditionnelles des courants de Foucault. Par exemple, un balayage en peigne avec un capteur mono-élément peut être remplacé par un balayage linéaire utilisant un capteur multiélément (Figure 3.2). En outre, il est également possible d'effectuer des balayages en peigne avec des capteurs multiéléments, ce qui augmente encore davantage la surface inspectée et accélère le processus de contrôle. [7]

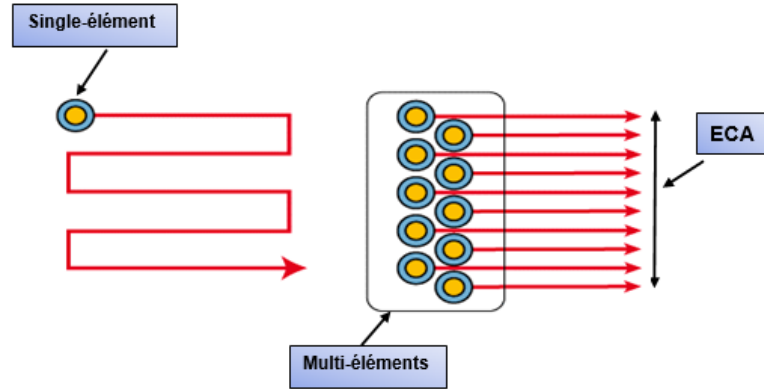


FIGURE 3.2 – Balayage linéaire obtenu avec un élément simple et un capteur multiélément

3.2.2 Motif

La topologie, souvent désignée sous le terme de motif, se réfère à la configuration physique des bobines au sein d'un capteur, ainsi qu'à leur activation électronique individuelle. Les motifs employés dans les capteurs multiéléments s'inspirent généralement des configurations fondamentales conçues pour les capteurs monoéléments, incluant les montages absolus, différentiels et en transmission. En règle générale, les motifs les plus répandus sont de type absolu ou émission/réception (E-R). Le motif absolu permet de détecter des défauts sous toutes les orientations, indépendamment du mouvement du capteur. Dans un capteur multiélément, chaque élément présente une sensibilité et des limites de détection identiques, ce qui signifie que si l'un d'entre eux échoue à identifier un défaut, la performance globale du capteur n'est pas compromise [7, 15].

3.2.3 Paramètres définissant un capteur multiélément

Les caractéristiques du capteur multiélément liées à son motif incluent la couverture, la résolution et l'uniformité des signaux.

3.2.3.1 Couverture

La couverture fait référence à la zone active du capteur. Selon le motif sélectionné, il est essentiel que le capteur intègre un nombre adéquat de bobines pour assurer une couverture dépassant la zone d'intérêt, ce qui permettra une inspection en une seule passe. Dans certains

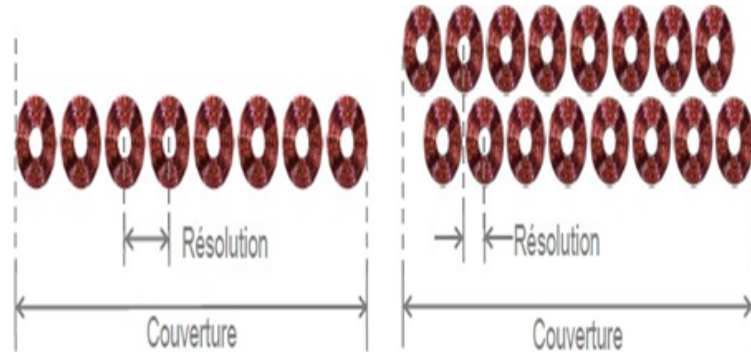


FIGURE 3.3 – Schématisation d'un capteur multiéléments définissant la couverture et la résolution [2]

cas, des scans multiples peuvent s'avérer nécessaires pour examiner l'intégralité de la surface [28, 29].

3.2.3.2 Résolution

La résolution correspond à la distance entre les centres de deux bobines adjacentes, et elle est déterminée en fonction de la taille minimale du défaut à détecter.

3.2.3.3 Uniformité du signal

L'uniformité du signal d'un capteur se réfère à sa capacité à produire une signature de courants de Foucault constante pour un défaut donné, indépendamment de l'élément du capteur qui effectue la détection. Cet aspect est crucial pour optimiser les chances de repérer le défaut visé. L'uniformité du signal est influencée par la conception physique des éléments et la configuration du capteur. En règle générale, les composants d'un capteur à courants de Foucault multiéléments (CFM) sont disposés de manière à assurer une sensibilité à la fois adéquate et uniforme [7, 28, 29].

Dans les capteurs multiéléments, le multiplexage permet d'optimiser la réactivité des éléments, ce qui contribue à améliorer la résolution du capteur, à accroître la sensibilité des éléments en réduisant l'inductance mutuelle, et à diminuer le niveau de bruit. L'inspection par courants de Foucault multiéléments présente plusieurs avantages par rapport aux autres techniques d'inspection par courants de Foucault :

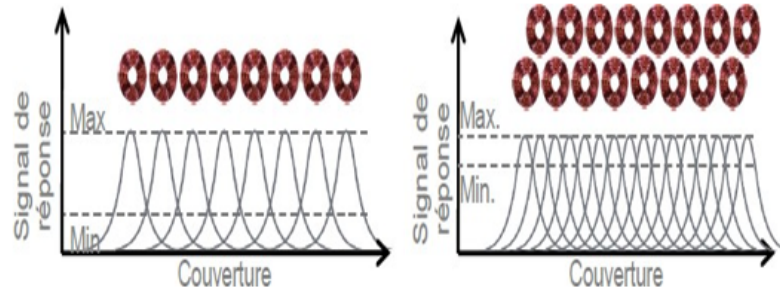


FIGURE 3.4 – Uniformité de signal CF sur un montage multiélément

- Temps d’inspection plus rapide
- Couverture d’une plus grande surface en une seule passe.
- Inspection simplifiée.
- Inspection de formes complexes.
- Cartographie en temps réel.
- Précision accrue.

3.3 Réseau de capteurs et conception du système

Contrairement aux systèmes classiques de courants de Foucault qui distinguent les fonctions d’émission et de réception, l’architecture proposée utilise un réseau de bobines à double fonction, chacune étant capable à la fois d’exciter et de mesurer. Cette approche améliore la résolution spatiale, réduit la complexité du système et élimine la nécessité d’éléments distincts pour l’émission et la réception [51].

Le modèle de simulation repose sur une configuration paramétrique d’une sonde à bobine unique, dans laquelle chaque bobine assure simultanément l’excitation et la mesure d’impédance. Cela diffère des architectures de type transformateur qui utilisent des bobines distinctes pour l’excitation et la réception. La Figure 3.5 illustre le concept de balayage adopté dans ce travail, où chaque bobine fonctionne en mode double usage. Cette configuration est couramment employée dans les modélisations préliminaires en raison de sa simplicité et de sa capacité à isoler les variations d’impédance liées aux défauts.

Afin de répondre aux besoins pratiques d’inspection des structures aéronautiques com-

plexes, le système est conçu pour fonctionner selon deux modes de balayage :

- balayage raster avec une seule bobine mobile ;
- balayage linéaire avec un réseau fixe de plusieurs bobines fonctionnant en parallèle.

Ce concept est représenté à la Figure 3.5, qui montre comment l'efficacité et la couverture du balayage peuvent être optimisées en fonction du nombre de bobines utilisées.

Un schéma de multiplexage orchestre l'activation séquentielle des phases d'excitation et d'acquisition de chaque bobine, réduisant ainsi les effets d'inductance mutuelle et garantissant une collecte cohérente des données. La conception proposée offre également une sensibilité élevée de détection, une adaptabilité aux surfaces courbes et une localisation précise des défauts, autant d'atouts essentiels pour les applications d'inspection in-situ des aéronefs.

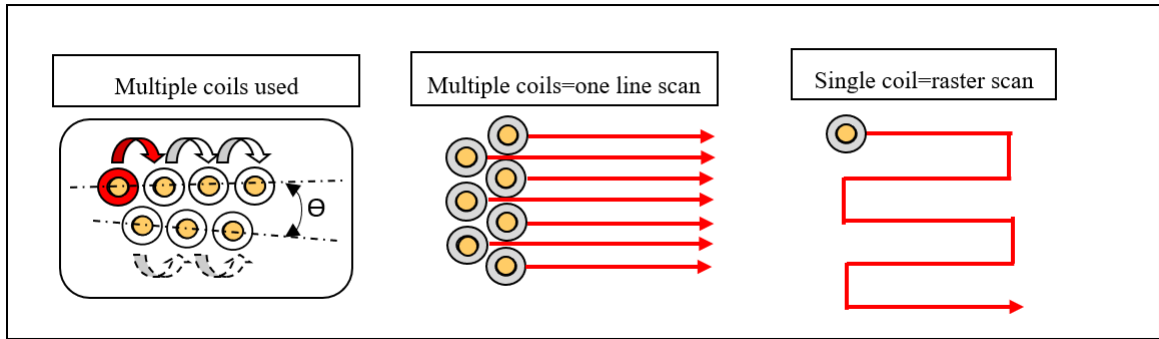


FIGURE 3.5 – Agencement des bobines CE dans une sonde ACE

Deux rangées de capteurs sont utilisées, décalées géométriquement par un petit angle θ . La seconde rangée est disposée de manière à ce que ses bobines soient positionnées entre celles de la première rangée. Dans un premier temps, les bobines de la rangée 1 sont excitées de façon alternée. Ensuite, l'ensemble du réseau de capteurs est décalé d'un pas angulaire θ , après quoi la rangée 2 est excitée. Dans cette nouvelle position, la rangée 2 occupe l'emplacement précédent de la rangée 1. Le processus se poursuit en excitant à nouveau la rangée 1 après un autre décalage, et ainsi de suite. Cette séquence alternée, associée à des décalages angulaires constants, est répétée jusqu'à la dernière étape où seule la rangée 2 est excitée. Grâce à l'algorithme développé, les données de la rangée 2 à l'étape courante sont combinées avec celles de la rangée 1 de l'étape précédente, permettant ainsi d'obtenir un balayage linéaire continu sans lacunes spatiales entre bobines adjacentes.

Par ailleurs, pour répondre aux besoins pratiques d’inspection des composants aéronautiques critiques, il est essentiel que les capteurs à courants de Foucault satisfassent aux critères suivants [52–54] :

- Flexibilité, adaptée à la détection de défauts sur des surfaces complexes ;
- Haute efficacité de détection, supprimant la nécessité de plateformes de déplacement, et permettant des inspections *in-situ* et en service ;
- Grande sensibilité, capable de détecter des micro-défauts ;
- Haute résolution spatiale, autorisant la mesure précise de la longueur des fissures ;
- Absence de connaissance préalable requise concernant la position et l’orientation des défauts.

Les bobines à courants de Foucault sont multiplexées selon un schéma prédéfini lors de l’acquisition des données afin d’atténuer les effets d’inductance mutuelle. L’inspection par réseau de capteurs à courants de Foucault (ECA) reprend les principes des méthodes traditionnelles de détection de défauts par courants de Foucault, tout en offrant une couverture complète en un seul passage et des capacités d’imagerie améliorées [55]. Cette technologie se révèle être un outil efficace et un gain de temps important en inspection, notamment grâce à l’imagerie en C-scan qui améliore la détection et la dimension des défauts. Des sondes spécifiquement conçues pour épouser le profil de la pièce permettent en outre l’inspection de formes complexes.

3.3.1 Description du système

La structure multi-couches rivetée proposée, illustrée en Figure 3.6, sert de banc d’essai représentatif pour l’évaluation des techniques de contrôle non destructif basées sur les courants de Foucault. Ce modèle reproduit les caractéristiques géométriques et physiques d’assemblages aéronautiques réels, et s’inspire d’une référence industrielle issue du secteur aéronautique. Il est constitué de plusieurs couches conductrices assemblées à l’aide de rivets à tête bombée, reflétant ainsi la complexité rencontrée dans les structures aéronautiques réelles, où des défauts peuvent apparaître en raison de la fatigue, de la corrosion ou d’imperfections de fabrication.

Pour réaliser une inspection à haute résolution de cette structure, nous avons développé un capteur multi-éléments à courants de Foucault, spécialement conçu pour surmonter les

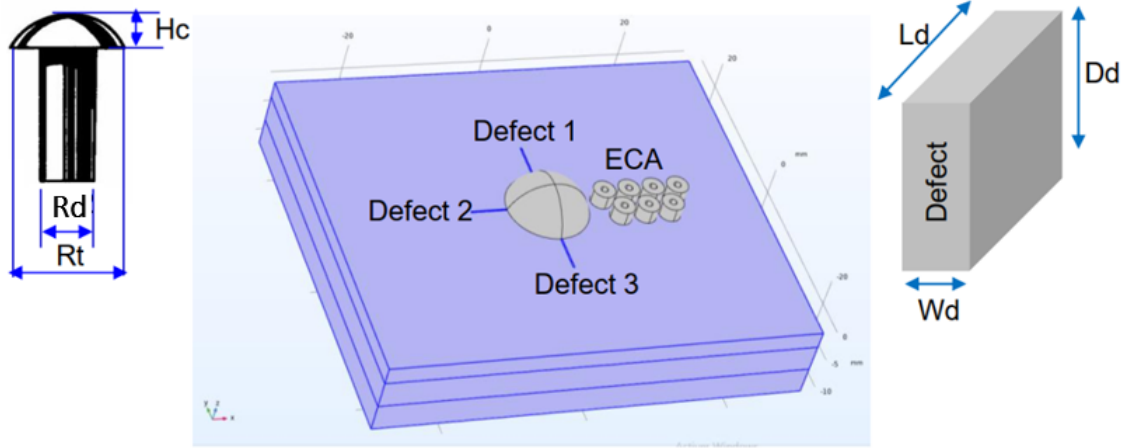


FIGURE 3.6 – Géométrie 3D du système proposé.

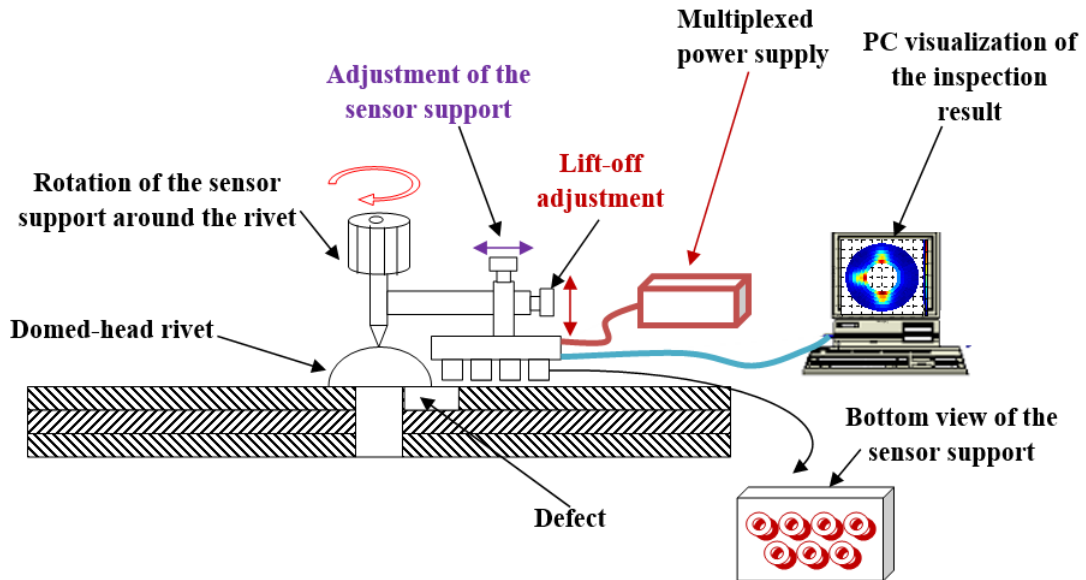


FIGURE 3.7 – Schéma fonctionnel de la méthode de détection du système.

contraintes géométriques imposées par les rivets à tête bombée. Le capteur est composé de sept bobines individuelles organisées en configuration matricielle. Ces éléments sont fixés sur un système d'anneau rotatif permettant à l'ensemble de la sonde de tourner sur 360 degrés autour de chaque rivet, comme illustré en Figure 3.7. Cette rotation garantit une couverture circconférentielle complète de la zone du rivet, sans démontage ni modification de surface.

Le processus de détection débute à une position angulaire de référence — 90 degrés avant le premier défaut artificiel. Comme indiqué en Figure 3.6, trois défauts artificiels ont été

introduits autour du rivet, séparés chacun de 90 degrés. Cette configuration reproduit les positions typiques de fissures observées en service, et l'espacement angulaire constant facilite une évaluation systématique de la sensibilité et de la résolution de détection. Au cours du balayage, la sonde enregistre les signaux de courants de Foucault à des positions angulaires successives, permettant la reconstruction d'une image électromagnétique localisant la position et l'ampleur de chaque défaut.

Cette configuration de capteur présente plusieurs avantages : elle garantit une proximité constante avec la surface du rivet, autorise un positionnement adaptatif pour des géométries non planes, et maintient un *lift-off* uniforme de 0.5 mm durant la rotation, assurant ainsi une acquisition fiable des signaux sur toute la zone inspectée. Ce contrôle précis du *lift-off* est crucial pour réduire la variabilité de la réponse électromagnétique et maintenir une sensibilité élevée aux défauts sous-jacents.

Les paramètres physiques et géométriques du système étudié sont regroupés dans le Tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Paramètres physiques et géométriques.

	Structure multicouche	Rivet
Matériau	Aluminium 7075-T6	Inconel
Géométrie	Longueur $L = 100$ mm	$H_c = 1.88$ mm
	Largeur $W = 70$ mm	$R_t = 6$ mm
	Épaisseur L1 : $h_1 = 2.5$ mm	$R_d = 3.175$ mm
	Épaisseur L2 : $h_2 = 4$ mm	Hauteur (corps du rivet) = 10.5 mm
	Épaisseur L3 : $h_3 = 4$ mm	
	Lift-off = 0.5 mm	
Propriétés	$\sigma = 17.4 \times 10^6$ (S/m)	$\sigma = 1 \times 10^6$ (S/m)
physiques	$\mu_r = 1$	

3.3.2 Implementation sous Comsol Multiphysics

La simulation de la réponse électromagnétique a été réalisée à l'aide du module AC/DC de COMSOL Multiphysics, basé sur l'approximation quasi-statique des équations de Maxwell. La formulation en potentiel vecteur magnétique a été utilisée pour modéliser l'interaction électromagnétique entre le capteur et la structure rivetée conductrice. Les relations constitutives classiques et les conditions aux limites ont été appliquées pour représenter le comportement des matériaux et des sources d'excitation, tandis que la géométrie du système et les paramètres d'excitation correspondaient à ceux du capteur développé.

Plutôt que de résoudre manuellement l'ensemble des équations de champ, la méthode des éléments finis (FEM) implémentée dans COMSOL a été employée pour calculer la distribution des courants de Foucault, le champ magnétique et la variation d'impédance induite par les défauts. La simulation a porté sur le calcul des parties réelle et imaginaire de l'impédance du capteur, basées sur l'énergie magnétique et les pertes Joule, avec et sans défauts, comme décrit dans [56–59].

Le modèle a considéré une fréquence d'excitation de 1600 Hz et une distance de *lift-off* de 0.5 mm. Un raffinement du maillage a été appliqué à proximité du capteur et des défauts afin de garantir la précision des résultats. Cette approche a permis d'observer l'influence de la taille et de la position des défauts sur le signal électromagnétique, sans avoir à résoudre explicitement les équations de champ, gérées directement par le logiciel.

3.4 Résultats et discussion

L'implémentation sous COMSOL Multiphysics a permis une visualisation détaillée des variations d'impédance dues aux changements de géométrie des défauts. Les Figures 3.8 à 3.17 présentent des courbes 2D et 3D illustrant comment les variations de résistance, de réactance et d'impédance totale sont corrélées aux paramètres géométriques des défauts. Ces résultats offrent une compréhension approfondie de l'influence des caractéristiques géométriques sur la réponse du capteur durant l'inspection.

3.4.1 Effet de la largeur du défaut

Pour étudier l'effet de la largeur du défaut sur la cartographie de l'impédance, nous fixons $L_d=7.5\text{mm}$ et $D_d=2.5\text{mm}$ on trace la cartographie de trois défauts de largeur 0.2mm , 0.4mm et 0.6mm . En effet, les résultats sont donnés sur la Figure 3.9.

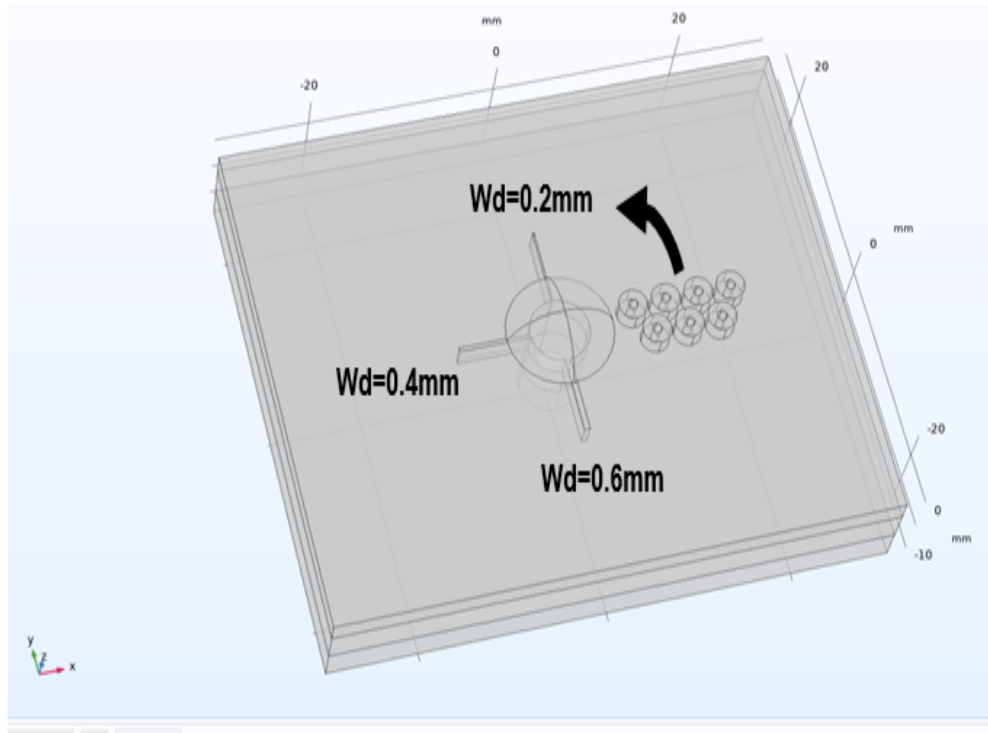


FIGURE 3.8 – Trois défauts avec $D_d = 2.5 \text{ mm}$ et $L_d = 7.5 \text{ mm}$. $W_d = 0.2 \text{ mm}$, 0.4 mm et 0.6 mm .

Grâce aux résultats obtenus, il devient évident qu'à mesure que le défaut s'élargit, il induit une distorsion plus importante des courants, entraînant une variation plus prononcée de l'impédance. Ce phénomène est dû à l'interaction accrue entre le défaut et le champ électromagnétique généré par le capteur. Comme le défaut devient plus large, il affecte une plus grande partie du champ électromagnétique, conduisant à de plus grands changements dans les mesures d'impédance.

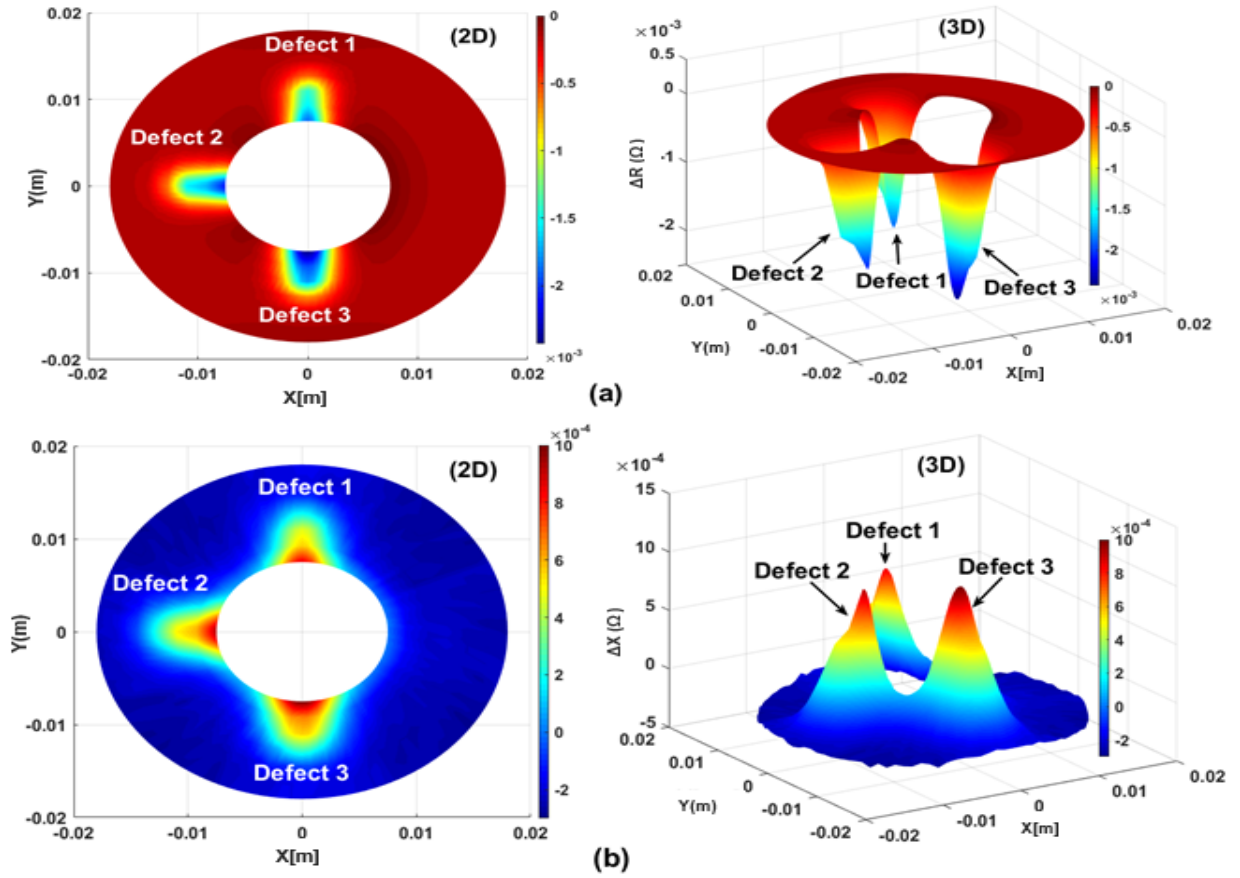


FIGURE 3.9 – Cartographie de la variation des paramètres de l'impédance pour différents défauts (a) La variation de résistance, (b) La variation de réactance

3.4.2 Effet de la longueur du défaut

Pour étudier l'effet de la profondeur du défaut sur la cartographie de l'impédance, nous fixons $W_d=0.2\text{mm}$ et $D_d=2.5\text{mm}$ on trace la cartographie de trois défauts de longueur 7.5 mm, 9.5 mm et 10.5 mm.

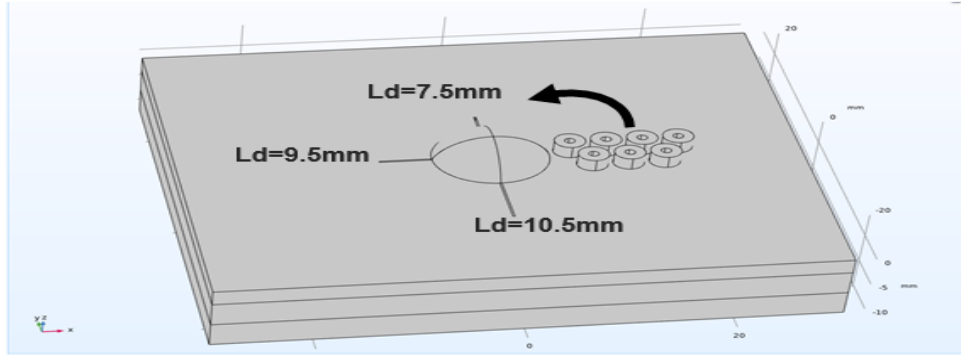


FIGURE 3.10 – Trois défauts avec $W_d = 0.2$ mm et $D_d = 2.5$ mm. $L_d = 7.5$ mm, 9.5 mm et 10.5 mm

En effet, les résultats sont donnés sur la Figure 3.11.

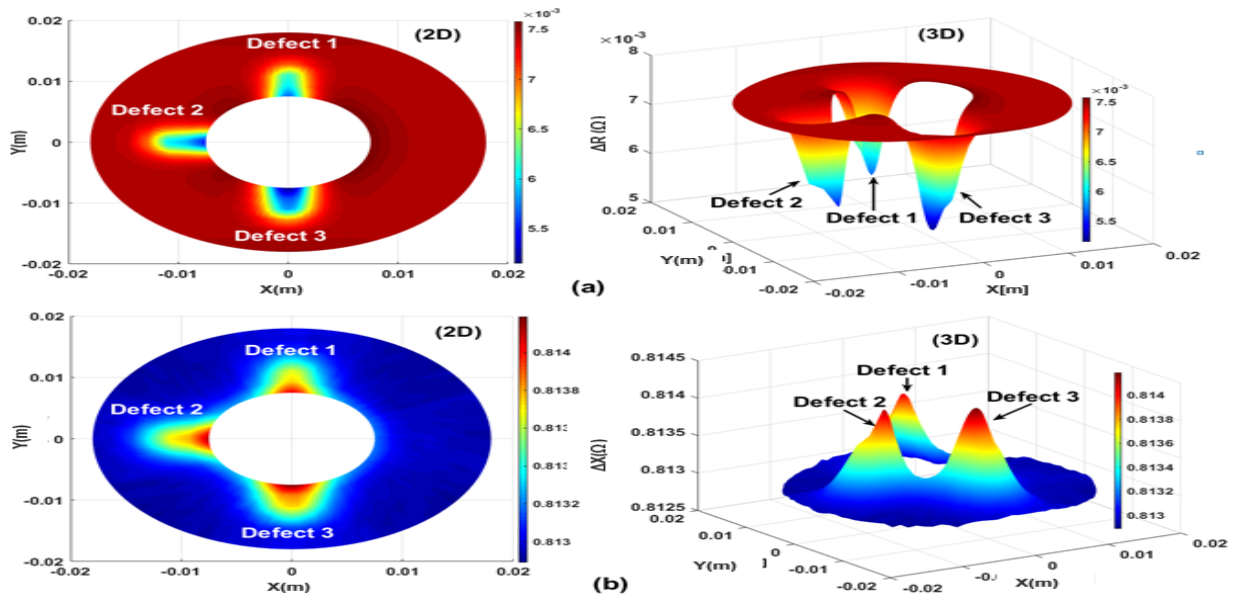


FIGURE 3.11 – Cartographie de la variation des paramètres de l'impédance pour différentes longueurs (a) La variation de résistance, (b) La variation de réactance

Similaire à l'effet observé avec la largeur, l'augmentation de la longueur de $L=7.5$ mm à 10.5 mm entraîne une augmentation proportionnelle à la fois de la résistance et de la réactance. Cette observation suggère qu'à mesure que la longueur du défaut s'étend, elle introduit une impédance supplémentaire au champ électromagnétique généré par le capteur. Par conséquent, le capteur détecte une plus grande résistance au flux de courant et une réactance plus

élevée en raison de l'interaction accrue entre le défaut et le champ électromagnétique. Cette tendance met en évidence la sensibilité du capteur aux variations des dimensions du défaut, permettant une détection précise et une caractérisation des défauts dans le matériau inspecté.

3.4.3 Effet de la profondeur du défaut

Pour analyser l'influence de la profondeur du défaut sur la cartographie de l'impédance, nous avons fixé $W_d = 0,2$ mm et $L_d = 7,5$ mm, Nous avons ensuite réalisé la cartographie de trois défauts ayant des profondeurs respectives de 1,5 mm, 1,75 mm et 2,5 mm, Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 3.13

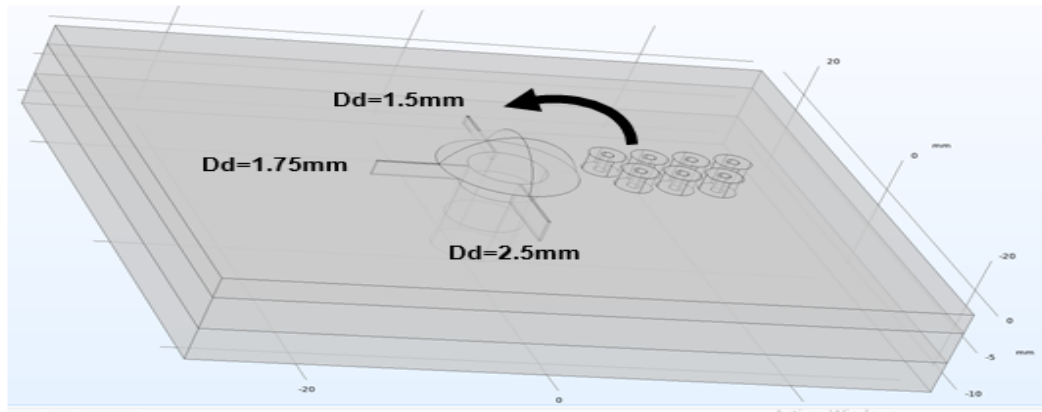


FIGURE 3.12 – Trois défauts avec $W_d = 0.2$ mm et $L_d = 7.5$ mm, $D_d = 1.5$ mm, 1.75 mm et 2.5 mm

Comme prévu, la variation de la profondeur du défaut influence notablement la réponse du capteur. Il est important de souligner que l'estimation de la profondeur demeure le principal défi, car elle est associée à des fuites, des fractures et des déchirures de matériaux dans toutes les structures. Par conséquent, un étalonnage précis de la fréquence ou l'utilisation de courants pulsés devient impératif. En effet, la profondeur d'un défaut est directement corrélée à son potentiel de causer des problèmes d'intégrité structurelle, tels que des fuites ou des fractures, ce qui rend l'estimation précise de la profondeur cruciale pour garantir la fiabilité et la sécurité des composants inspectés. Par conséquent, un étalonnage précis des paramètres d'inspection, y compris la fréquence et la modulation du courant, est essentiel pour évaluer avec précision

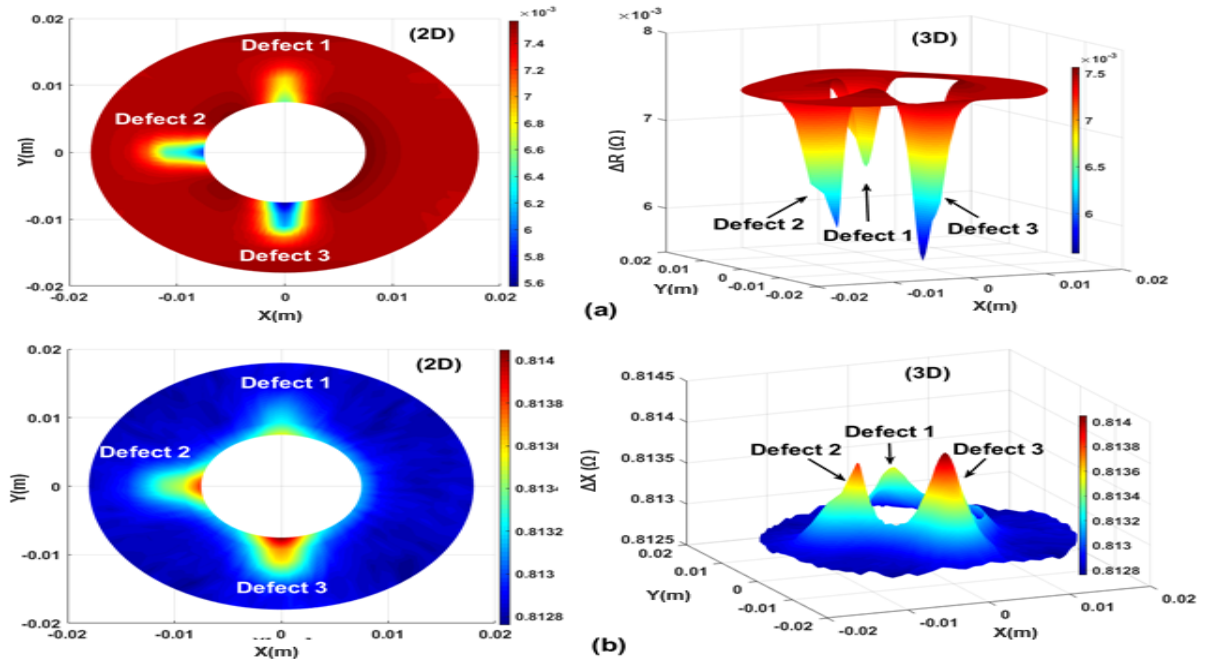


FIGURE 3.13 – Cartographie de la variation des paramètres de l'impédance pour différentes profondeurs (a) La variation de résistance, (b) La variation de réactance

la profondeur des défauts et atténuer les risques structurels potentiels.

3.4.3.1 Évolution de la phase en fonction de la géométrie du défaut

En contrôle par courants de Foucault, le signal généré par un défaut est régi non seulement par l'amplitude, mais aussi par la phase des courants induits perturbés. Le déphasage, en particulier, est reconnu comme un paramètre essentiel pour estimer la profondeur des défauts, détecter les variations des propriétés du matériau et approximer la taille des défauts. Son interprétation contribue directement à la fiabilité et à l'efficacité des inspections par CCF [60, 61].

Pour explorer cette dimension, nous avons analysé la réponse en impédance complexe du capteur et construit des diagrammes de phase correspondant aux variations géométriques des défauts, en particulier la largeur, la longueur et la profondeur. Comme illustré dans les Figures 3.14, 3.15 et 3.16, des variations d'amplitude apparaissent dans tous les cas ; cependant, un déphasage marqué et progressif est observé principalement lorsque la profondeur du défaut augmente. En revanche, les variations de largeur et de longueur conduisent à des écarts de

phase relativement faibles. Ce comportement confirme la sensibilité bien établie de la phase aux caractéristiques verticales et valide sa valeur diagnostique, même sans alignement de phase.

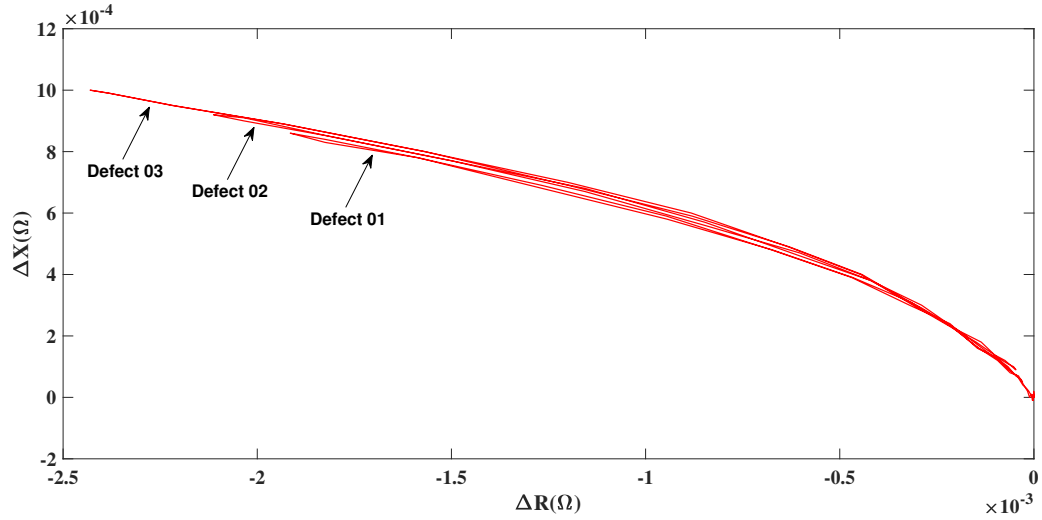


FIGURE 3.14 – Diagramme de phase pour une variation de la largeur du défaut

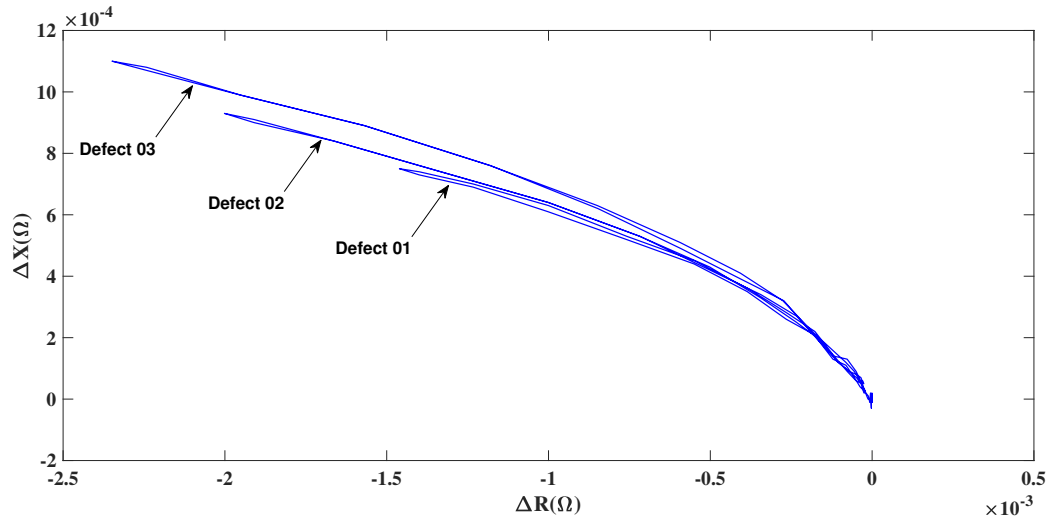


FIGURE 3.15 – Diagramme de phase pour une variation de la longueur du défaut

La figure 3.14 montre que, bien que l'amplitude varie de manière significative avec la largeur du défaut, le déphasage reste limité. Ce résultat est attendu, car tous les défauts présentent la même profondeur et un écart constant (lift-off). La faible variation de phase souligne la sensibilité réduite de ce paramètre aux changements de largeur dans ces conditions.

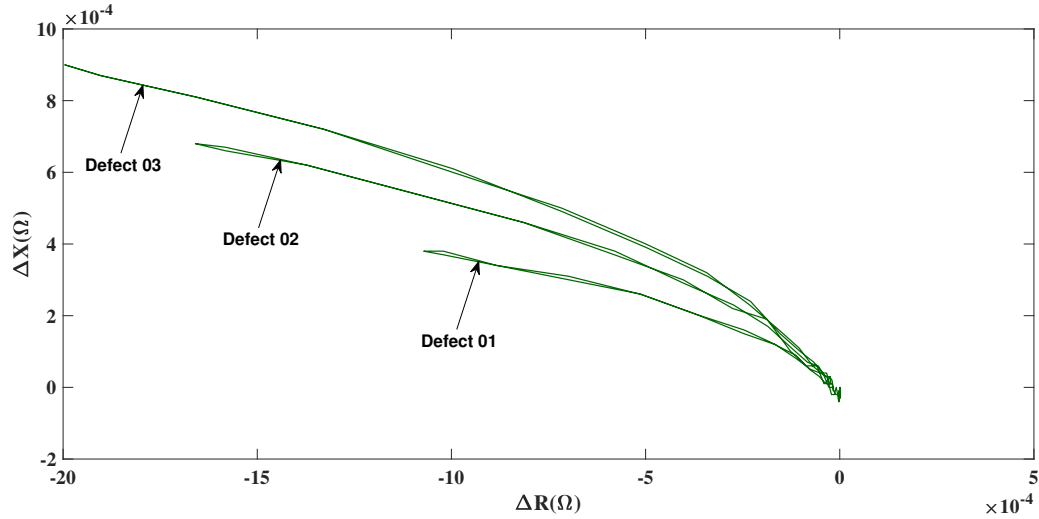


FIGURE 3.16 – Diagramme de phase pour une variation de la profondeur du défaut

La variation de la longueur du défaut, illustrée à la Figure 3.15, entraîne des différences d'amplitude marquées mais seulement des changements subtils de phase. Comme tous les défauts possèdent la même profondeur et le même lift-off, ce résultat est cohérent avec le comportement connu des signaux de courants de Foucault, où la longueur influence principalement l'amplitude plutôt que le déphasage.

Le diagramme présenté en Figure 3.16 illustre clairement qu'une augmentation de la profondeur du défaut entraîne à la fois une amplitude plus élevée et un déphasage progressif bien marqué. Ce résultat confirme l'intérêt de l'information de phase comme paramètre clé en contrôle par courants de Foucault, notamment pour l'estimation de la profondeur, l'évaluation des variations de propriétés des matériaux et l'amélioration de la détection des défauts.

3.4.4 Effet de la variation du diamètre du rivet

Après avoir examiné comment les paramètres de défaut intrinsèques, tels que la largeur, la longueur et la profondeur, influent sur le système, cette section se penche sur l'évaluation de l'efficacité du capteur dans la détection de défauts en présence de variations des dimensions des rivets. Cela implique de réaliser une évaluation exhaustive allant de 0° à 360° pour des diamètres de rivets de 11 mm, 15 mm et 21 mm. Les résultats de cette enquête sont illustrés dans la Figure 3.17.

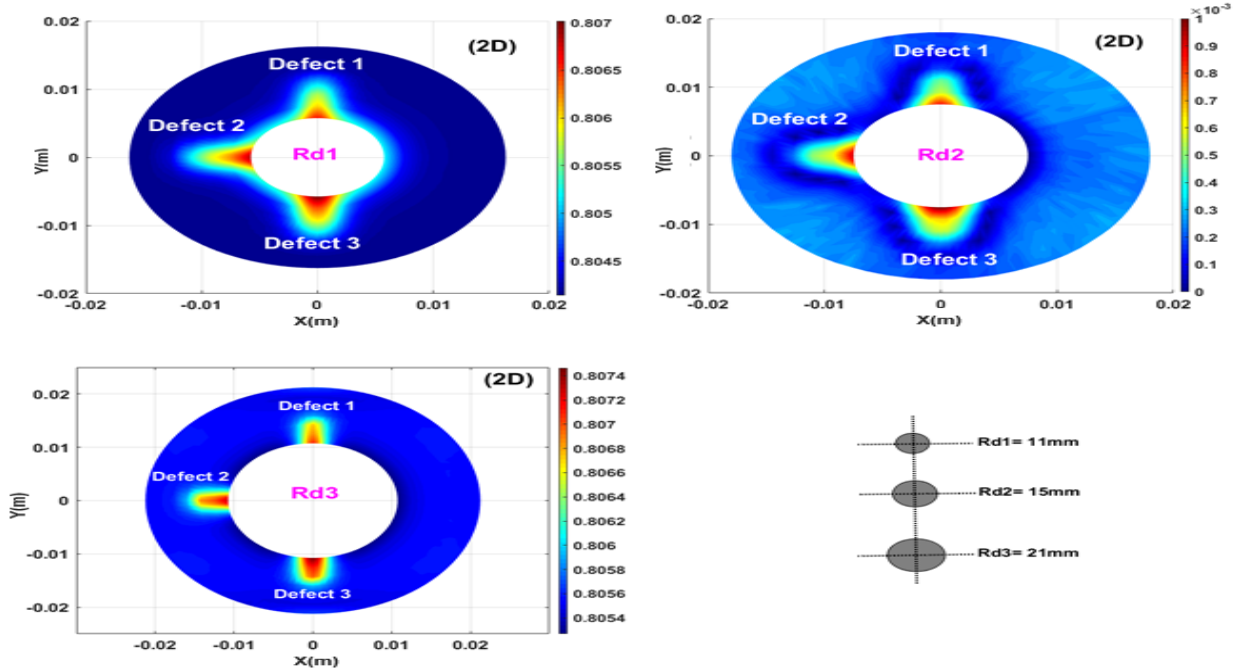


FIGURE 3.17 – Variation de la réactance sur 0°-360° pour différents diamètres de rivets : Rd = 11, 15 et 21 mm.

Après avoir analysé les résultats obtenus, il devient clair que le système a été finement réglé pour accueillir des diamètres de rivets de tailles variables. Cela démontre l'adaptabilité de notre système pour détecter efficacement les défauts à travers différentes formes et tailles. L'ajustement réussi du système pour répondre à tous les diamètres de rivets souligne sa polyvalence et sa fiabilité dans la détection de défauts. Cette adaptabilité garantit que les défauts peuvent être facilement identifiés et traités, quel que soit la forme ou la taille spécifique du rivet, améliorant ainsi l'efficacité globale et l'efficience de notre processus d'inspection.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis la lumière l'efficacité des techniques de contrôle non destructif (CND), en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation de capteurs à courants de Foucault pour l'identification des défauts dans les structures multicouches couramment employées dans le domaine aéronautique. Les structures aéronautiques, en raison de leur complexité et de leur exposition à des conditions opérationnelles sévères, nécessitent des

méthodes d'inspection robustes et fiables. Les défauts tels que les fissures, les délaminations et les inclusions peuvent être détectés avec succès dans les assemblages utilisant des rivets à tête plate. Toutefois, l'utilisation de rivets à tête bombée pose des défis significatifs en raison de leur conception, qui peut interférer avec le fonctionnement des capteurs conventionnels.

Pour surmonter ces défis, nous avons exploré un nouveau système de réseau à courants de Foucault (ECA) qui intègre une matrice de bobines. Ce système innovant permet une rotation à 360° autour de l'axe du rivet, offrant ainsi une flexibilité sans précédent dans l'inspection. Grâce à cette conception, le système est capable de détecter efficacement les défauts indépendamment de leur forme, taille ou orientation. Par exemple, même des défauts difficiles à identifier dans des espaces restreints peuvent être repérés, ce qui représente un avantage considérable pour les applications en aéronautique où la précision est essentielle.

En outre, ce nouveau système peut être facilement adapté pour inspecter des rivets de différentes tailles, ce qui améliore l'efficacité globale de la détection des défauts. Cela permet aux opérateurs de s'assurer que chaque rivet, quel que soit son type, est examiné avec rigueur. En conclusion, l'application de cette technologie de capteurs à courants de Foucault dans le contexte aéronautique non seulement répond aux exigences de sécurité et de fiabilité, mais ouvre également la voie à de nouvelles possibilités d'optimisation des procédés d'inspection. Ces avancées contribueront à la durabilité et à la performance des structures aéronautiques, tout en minimisant les risques associés aux défauts non détectés.

Le problème étudié est un modèle direct, il nous a permis simuler la perturbation de l'impédance du capteur pour une géométrie de défauts connue à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF). Tout fois pour des défauts de géométrie complexe, ce modèle s'avère potentiellement inadapté, d'où le recours au modèle inverse afin d'améliore la précision et la fiabilité de la localisation et de la quantification des défauts. C'est pour ces raisons, qu'on a jugé utile de réserver le chapitre quatre à l'étude théorique sur les méthodes inverse et techniques d'optimisation dans le contrôle non destructif par courants de Foucault.

Analyse par la méthodologie du problème inverse et optimisation

4.1 Introduction

Dans le domaine du contrôle non destructif, la caractérisation des défauts repose souvent sur la résolution d'un problème inverse, consistant à déterminer les paramètres inconnus d'un matériau ou d'un défaut à partir des réponses observées. Ces problèmes, généralement mal posés, requièrent des méthodes robustes capables de réduire l'écart entre les résultats obtenus et les valeurs attendues. L'optimisation constitue une approche efficace pour ce type de problème. Elle permet d'identifier les paramètres optimaux assurant la meilleure correspondance entre le modèle et les données disponibles. Les méthodes d'optimisation méta-heuristiques sont particulièrement adaptées grâce à leur capacité à explorer des espaces de recherche complexes et non linéaires.

Dans ce chapitre, nous exposerons la méthodologie relative au problème inverse en le replaçant d'abord dans un cadre général. Nous nous concentrerons ensuite sur la présentation de notions fondamentales, en particulier celles liées à la formulation d'un problème d'identification et d'optimisation.

Nous introduirons par la suite diverses approches numériques adaptées à la résolution de ce type de problèmes. Une première partie sera consacrée aux problèmes d'optimisation sans contraintes, où seront décrites les méthodes les plus répandues et couramment appliquées.

Une seconde partie portera sur les problèmes d'optimisation avec contraintes ainsi que sur les techniques permettant leur traitement.

L'objectif de ces deux parties n'est pas d'établir une comparaison détaillée des performances de chaque méthode ni de fournir l'ensemble des aspects liés à leur mise en œuvre, mais plutôt de souligner les propriétés communes qui rendent possible leur regroupement en plusieurs catégories.

4.2 Caractérisation des problèmes inverses

D'après J.B. Keller [62], deux problèmes sont considérés comme inverses lorsque la formulation de l'un entraîne celle de l'autre. Toutefois, cette définition, de nature symétrique, reste relativement arbitraire. Une approche plus opérationnelle consiste à définir un problème inverse comme la recherche des causes d'un phénomène à partir de l'observation expérimentale de ses conséquences. À l'inverse, dans un problème direct, les effets sont déduits des causes déjà connues. Les problèmes directs, tels que la prévision de l'évolution future d'un système physique à partir de son état présent, sont généralement mieux maîtrisés.

Les problèmes inverses peuvent prendre différentes formes, par exemple la reconstitution de l'état antérieur d'un système ou encore l'identification de ses paramètres à partir de son comportement observé. Ce dernier cas, appelé identification paramétrique, constitue le centre de notre étude. Dans ce contexte, l'estimation des paramètres est traduite en un problème d'optimisation visant à minimiser une fonctionnelle d'erreur, c'est-à-dire la différence entre les données expérimentales et les données simulées.

Sur le plan mathématique, on distingue deux grandes catégories : les problèmes linéaires, qui se ramènent à la résolution d'équations intégrales de première espèce, et les problèmes non linéaires, correspondant souvent à l'identification de paramètres dans des équations différentielles. Ces derniers sont particulièrement complexes en raison de leur caractère non linéaire, de leur dimension importante, de leur coût computationnel élevé et du fait qu'ils sont fréquemment mal posés.

La résolution de tels problèmes nécessite donc le recours à des méthodes d'optimisation performantes, capables de traiter les difficultés inhérentes comme la non-linéarité, la grande

taille des systèmes et le coût élevé des calculs.

4.3 Problèmes bien et mal posés

La notion de problème bien posé a été introduite par Hadamard [63, 64] dès 1923. Un problème est dit bien posé lorsqu'il satisfait simultanément les trois conditions suivantes :

- l'existence d'une solution,
- l'unicité de cette solution,
- et la dépendance continue de la solution vis-à-vis des données du problème.

Dans le cas où l'une au moins de ces conditions n'est pas respectée, le problème est qualifié de mal posé.

Les problèmes inverses s'écartent fréquemment de ces critères :

- Comme le modèle physique reste fixé, les données expérimentales disponibles sont souvent entachées de bruit, sans garantie qu'elles proviennent effectivement de ce modèle, même avec un autre jeu de paramètres.
- Lorsqu'une solution existe, il peut arriver que plusieurs ensembles de paramètres distincts produisent les mêmes résultats expérimentaux.
- Le défaut d'unicité constitue une difficulté importante : si plusieurs solutions sont possibles, il devient nécessaire de disposer d'informations supplémentaires pour discriminer entre elles.
- L'absence de continuité est sans doute la difficulté la plus critique, notamment dans le cadre d'une résolution numérique ou approchée. Cela implique qu'il est impossible d'obtenir une solution stable du problème inverse, car les données disponibles, bruitées et donc légèrement différentes des données idéales, conduisent à des écarts significatifs dans la solution.

4.4 Problèmes inverses linéaire et non linéaire

De façon générale, un système peut être représenté comme l'illustre la Figure 4.1. Les entrées — telles que les termes sources, la géométrie ou encore les propriétés physiques —

sont introduites dans les équations d'état décrivant le système, et produisent en sortie les solutions correspondantes. Cette démarche constitue le problème direct.

Le problème inverse, en revanche, consiste à déterminer quelles entrées sont susceptibles de générer un ensemble de sorties données [65–67]. La solution la plus intuitive consisterait à exprimer directement les entrées en fonction des sorties, autrement dit à inverser les équations qui modélisent le système. Cette approche correspond à la notion de problème inverse linéaire.

Cependant, l'inversion explicite des équations du système est rarement réalisable en raison de la complexité des modèles impliqués. Dans de tels cas, on est contraint de s'appuyer sur la résolution du problème direct.

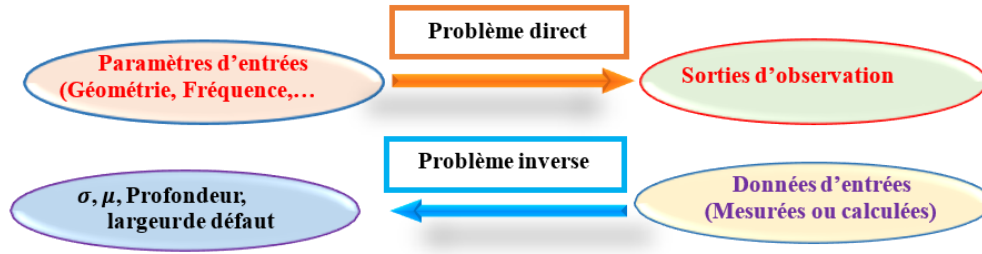


FIGURE 4.1 – Problèmes direct et inverse

4.4.1 Problème inverse linéaire

Un problème inverse de nature linéaire peut être représenté par l'équation suivante [64] :

$$G(x) = b \quad (4.1)$$

où :

- b désigne les sorties,
- x correspond aux entrées,
- G est un opérateur linéaire traduisant la relation entre les entrées et les sorties du modèle considéré.

Cette relation peut également être exprimée sous une forme matricielle reliant les sorties aux entrées :

$$\begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \vdots \end{bmatrix} = G \cdot \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \vdots \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

La résolution du problème inverse revient alors à déterminer l'inverse de la matrice G . Lorsque le problème est bien posé, cette inversion peut être réalisée directement ou à l'aide d'une décomposition en valeurs singulières (SVD) [64, 65].

En revanche, si le problème est mal posé, il devient nécessaire de reconditionner la matrice G . Dans ce cas, on fait appel à des techniques de régularisation, telles que la méthode de Tikhonov [64, 68] ou la régularisation par troncature spectrale [64].

4.4.2 Problème inverse non linéaire

Dans le cas des problèmes inverses non linéaires, la relation qui relie les sorties aux entrées du modèle présente un degré de complexité plus élevé. Cette relation peut être formulée comme suit :

$$G(x) = b \quad (4.3)$$

où l'opérateur G est de nature non linéaire.

En règle générale, ce type de problème est reformulé comme un problème d'optimisation basé sur la méthode des moindres carrés, et peut s'écrire sous la forme [65, 69] :

$$\min; ||G(x) - b||^2 \quad (4.4)$$

L'algorithme illustré à la Figure 4.2 permet d'approcher la solution recherchée en se basant uniquement sur la résolution du problème direct. À partir d'un ensemble de valeurs initiales proposées pour les entrées, on évalue l'écart entre la solution calculée et la solution attendue. Si cette différence est jugée trop importante, les entrées doivent être ajustées et le calcul répété ; dans le cas contraire, les entrées utilisées correspondent alors à celles que l'on cherche à identifier.

Le principal inconvénient de cette approche réside dans son caractère itératif, qui implique de résoudre à plusieurs reprises le problème direct. Un autre aspect important concerne le critère de convergence : la solution obtenue n'est validée qu'en fonction de la tolérance imposée par l'écart mesuré. Ainsi, la pertinence du résultat dépend étroitement de la définition de ce critère, ce qui conditionne directement la qualité de la solution d'un problème inverse.

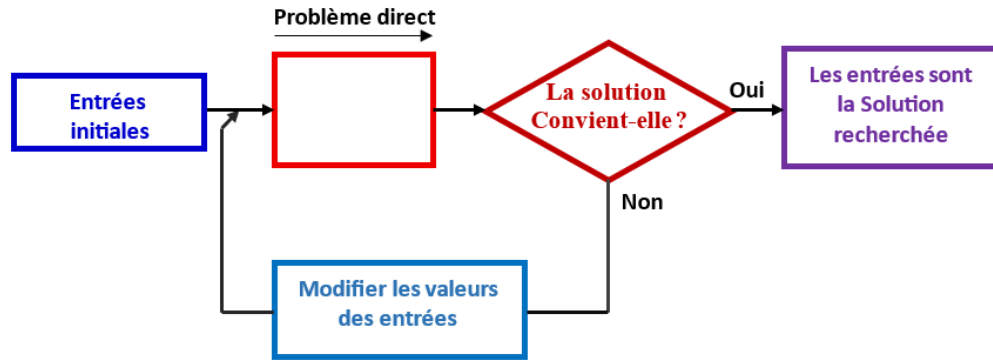


FIGURE 4.2 – Résolution d’un problème inverse non linéaire.

4.5 Techniques de résolution des problèmes inverses

La résolution des problèmes inverses occupe une place essentielle dans de nombreux domaines d’application, tels que l’exploration géophysique, le diagnostic médical ou encore le contrôle non destructif (CND). Dans ce dernier cas, la difficulté majeure réside dans l’inversion du signal, qui vise à extraire les paramètres caractéristiques des défauts à partir des mesures acquises.

Deux approches principales permettent de traiter l’inversion : l’utilisation de modèles directs inversés et le recours à des méthodes d’optimisation. Ces dernières se déclinent en deux grandes catégories : les méthodes déterministes (fondées sur des outils mathématiques ou des techniques d’apprentissage) et les méthodes stochastiques, qui incluent notamment les approches de Monte Carlo, les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes génétiques [70, 71].

Dans le cas particulier de l’inversion des signaux issus des courants de Foucault (CF), les formulations reposent le plus souvent sur une modélisation en termes de problèmes d’optimisation. Pour leur résolution, des méthodes itératives sont fréquemment utilisées [72]. En parallèle, les réseaux de neurones artificiels (RNA) [66, 73] ainsi que d’autres techniques d’apprentissage automatique, comme les machines à vecteurs de support (Support Vector Machines), offrent une alternative prometteuse aux approches itératives classiques [74, 75].

4.5.1 Techniques de Machine Learning et d'Intelligence Artificielle

4.5.1.1 Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones peuvent être considérés comme des ensembles d'opérateurs non linéaires interconnectés, formant une classe de fonctions non linéaires capables, via un processus d'apprentissage, de générer un large éventail de modèles et de correcteurs. Ils reposent sur une architecture fortement parallèle et possèdent la faculté d'acquérir et de stocker des connaissances à partir d'exemples. Leur fonctionnement s'apparente à celui du cerveau humain, dans la mesure où l'apprentissage permet d'ajuster les poids des connexions entre neurones, lesquels condensent l'information acquise sous une forme simplifiée. Ces caractéristiques confèrent aux réseaux de neurones une grande capacité d'adaptation face aux variations des propriétés des matériaux, ainsi qu'une certaine robustesse en présence de défauts.

Dans le cas du réseau neuronal biologique, l'élément fondamental est le neurone, une cellule nerveuse dont le mécanisme est représenté à la (Figure 4.3) [76, 77].

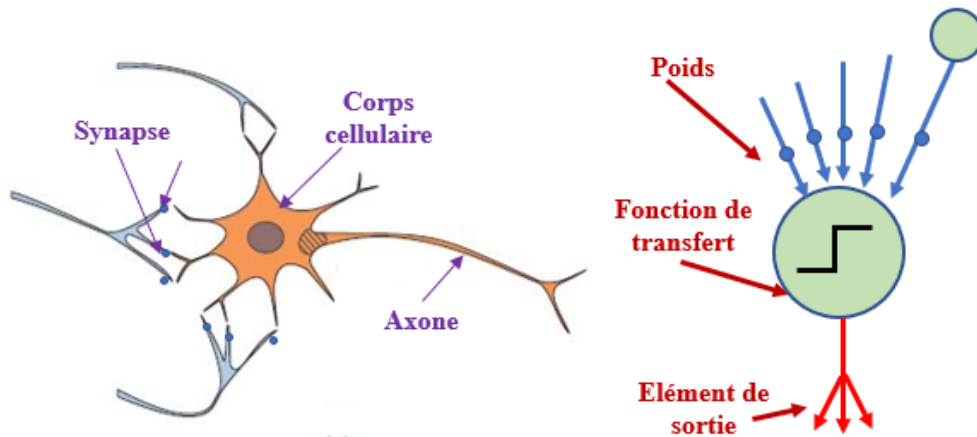


FIGURE 4.3 – Cartographie entre neurones biologiques et formels.

4.5.1.2 Applications des réseaux de neurones

Située au carrefour de disciplines variées comme l'informatique, l'électronique, la neurobiologie et même la philosophie, la recherche sur les réseaux de neurones ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de l'intelligence artificielle. Cette approche trouve aujourd'hui des applications dans de nombreux domaines :

- Diagnostic et identification des défauts : Les réseaux de neurones excellent dans la résolution de problèmes de diagnostic en classifiant les signaux et les formes et en corrélant les données fournies par différents capteurs.
- Contrôle : Ils sont employés dans la commande de processus, le contrôle de qualité, la robotique, et bien d'autres applications.
- Simulation : Utilisés pour des simulations de type boîte noire, des prévisions météorologiques, et la modélisation de l'apprentissage, ils permettent également de perfectionner les méthodes d'enseignement.
- Finance : Les réseaux de neurones servent à anticiper et modéliser l'évolution des marchés (comme les taux de change), à orienter le choix des investissements et à évaluer l'octroi de crédits.
- Ils sont employés pour le traitement et l'analyse des signaux, la réduction du bruit, la reconnaissance de motifs (sons, images, voix), ainsi que pour la compression de données.
- Environnement : Ils servent à évaluer les risques, analyser les compositions chimiques, réaliser des prévisions météorologiques, et gérer les ressources.

4.5.1.3 Fonctionnement d'un neurone formel

La (Figure 4.4) illustre le traitement des informations par un seul nœud dans un réseau neuronal. Les nœuds reçoivent des signaux pondérés en provenance d'autres nœuds à travers des connexions entrantes. Chaque neurone calcule d'abord une combinaison linéaire des entrées $(X_1, \dots, X_n)$, affectées de coefficients de pondération $(W_1, \dots, W_n)$ [76, 78].

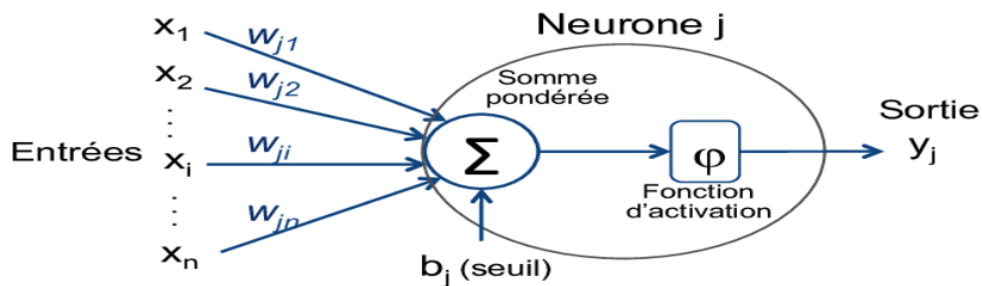


FIGURE 4.4 – Architecture d'un neurone formel.

L'équation

$$y = f(x_1w_1 + x_2w_2 + \dots + x_nw_n + bias) \quad (4.5)$$

Les fonctions d'activation occupent une place essentielle dans l'architecture des réseaux de neurones. Dans de nombreux cas, la fonction sigmoïde est adoptée comme fonction d'activation principale [79]. Les fonctions les plus couramment employées sont illustrées dans la (Figure 4.5).

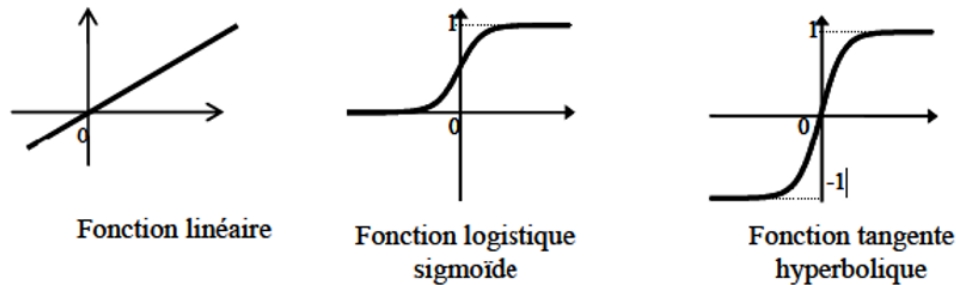


FIGURE 4.5 – Exemple de fonctions d'activations

Pour représenter les lois de fonctionnement des capteurs à courants de Foucault (CF) à l'aide d'un raisonnement, il est indispensable de recourir à un modèle non linéaire. Dans ce contexte, l'utilisation d'une architecture de réseau neuronal (RN) constitue une approche adaptée à ce type de problématique [80].

4.5.1.4 Réseaux de neurones artificiels

Un réseau de neurones artificiels (RNA) est formé d'unités élémentaires, appelées "nœuds", interconnectées et coopérant pour traiter l'information. Le transfert des données s'effectue à travers ces connexions. En règle générale, un RNA comporte trois types de couches :

- Couche d'entrée : regroupe les neurones chargés de recevoir les variables du problème étudié.
- Couche de sortie : contient les neurones délivrant les résultats attendus.
- Couches cachées : placées entre l'entrée et la sortie, elles assurent le traitement interne du réseau grâce à des fonctions d'activation, le plus souvent non linéaires.

Cette organisation hiérarchisée permet aux RNA de représenter des liens complexes entre données d'entrée et de sortie. Grâce à l'apprentissage, la structure et les poids des connexions

s'adaptent afin de résoudre efficacement différents problèmes [81], Figure 4.6.

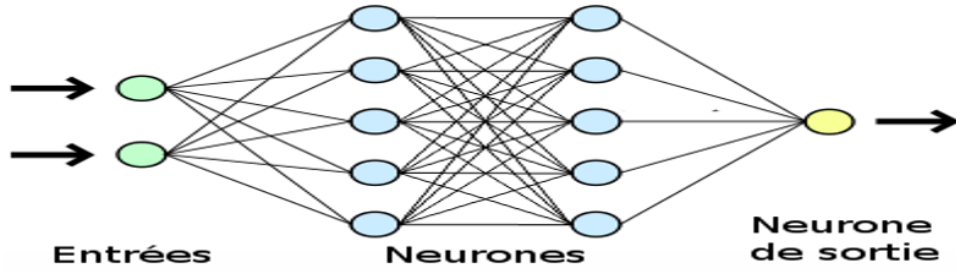


FIGURE 4.6 – Architecture générale d'un réseau de neurones

4.5.1.5 Validation et Tests

Une fois créé, le réseau neuronal doit être évalué pour vérifier la précision de ses prédictions. Cette étape finale nécessite une validation rigoureuse du modèle pour assurer une grande proportion de prédictions correctes, comme illustré dans la Figure 4.7 [82, 83].

4.5.2 Algorithmes d'Optimisation

4.5.2.1 Formulation mathématique d'un problème d'optimisation

Un problème d'optimisation à n variables peut être exprimé, de manière générale, sous la forme suivante :

$$(P) \left\{ \begin{array}{l} \min \quad \Phi(\lambda, X(\lambda)) \in \mathbb{R}^n \\ g_i(\lambda) \leq 0, \quad i = 1, \dots, p \\ h_j(\lambda) = 0, \quad j = 1, \dots, q \\ \lambda_{imin} \leq \lambda_i \leq \lambda_{imax}, \quad i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (4.6)$$

Ou bien :

- $\Phi(\lambda, X(\lambda))$ représente le critère à optimiser, également désigné sous le nom de fonction objectif.

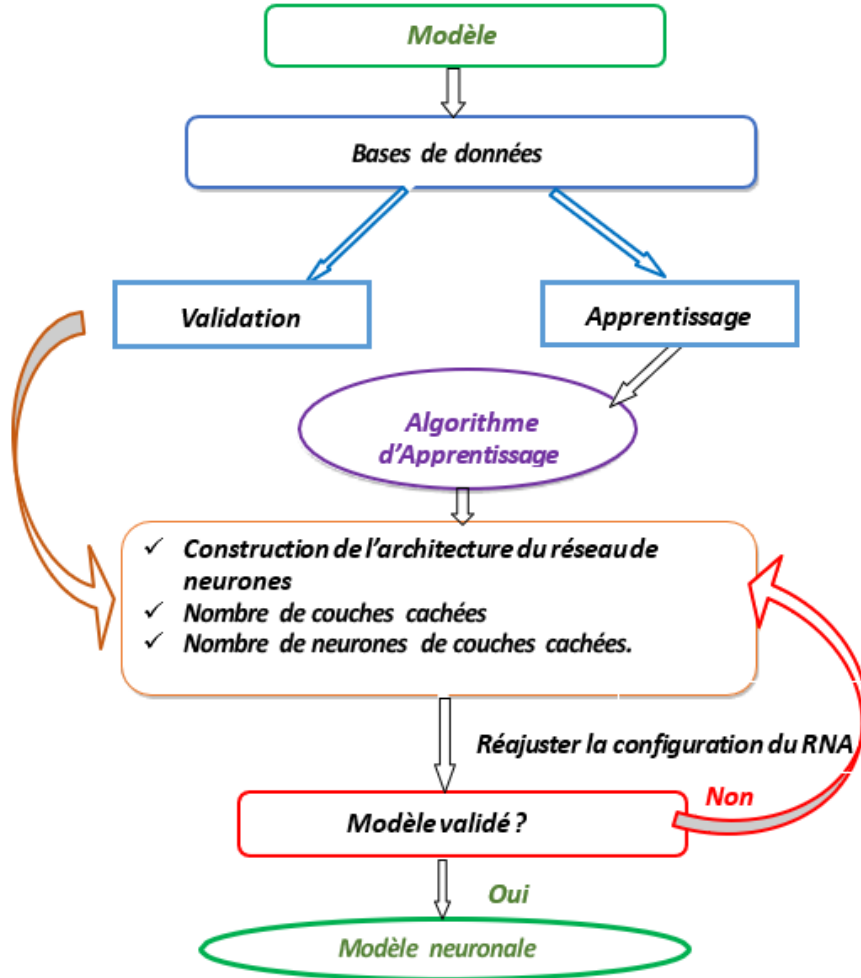


FIGURE 4.7 – Organigramme de l'entraînement du réseau de neurones

- $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ désigne un vecteur à n composantes, correspondant aux paramètres caractérisant le problème.
- $g_i(\lambda)$ et $h_j(\lambda)$ représentent respectivement les contraintes d'inégalité et d'égalité.
- λ_{imin} et λ_{imax} représentent les contraintes définissant le domaine de recherche.
- $X = (X_1, \dots, X_n)$ est un vecteur de n variables issu de la simulation numérique.

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à déterminer un vecteur de paramètres λ^* qui minimise la fonction objectif, tout en satisfaisant les contraintes d'égalité, d'inégalité ainsi que celles liées au domaine de définition.

4.5.2.2 Minimum local et minimum global

Un point λ^* de l'espace de recherche R^n représente un minimum local ou optimum local, s'il existe un voisinage de λ^* noté $V(\lambda^*)$, tel que :

$$\forall \lambda \in V(\lambda^*), \quad \Phi(\lambda) \geq \Phi(\lambda^*) \quad (4.7)$$

Cette relation signifie que dans le voisinage de λ^* , défini par un ε , il n'existe aucun point, pour lequel $\Phi(\lambda)$ est inférieur à $\Phi(\lambda^*)$.

Un point λ^* de l'espace de recherche R^n est un minimum global ou optimum global, si :

$$\forall \lambda \in \mathbb{R}^n(\lambda^*), \quad \Phi(\lambda) \geq \Phi(\lambda^*) \quad (4.8)$$

Nous pouvons dire aussi que le minimum global est le plus petit minimum local de l'espace de recherche, comme nous le montre la Figure 4.8.

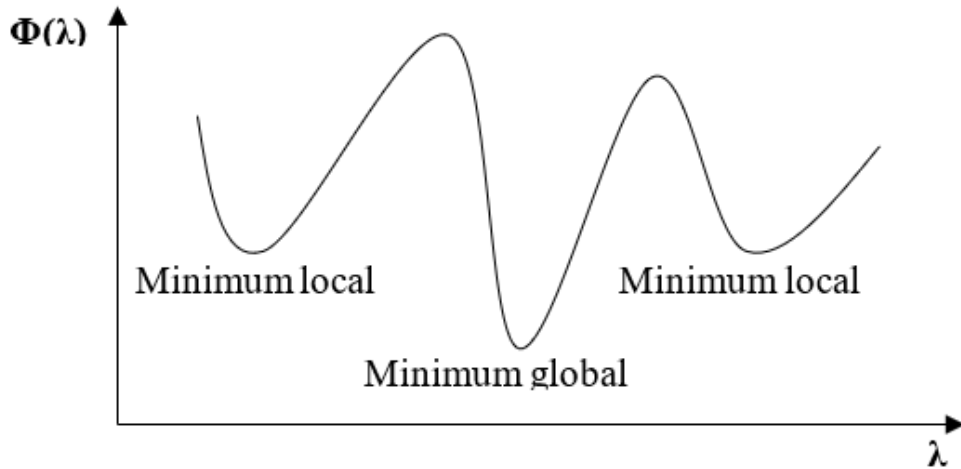


FIGURE 4.8 – Représentation du minimum local et minimum global d'une fonction.

4.5.2.3 Formulation de fonctions objectifs

Afin de résoudre le problème (4.6), il est nécessaire, dans un premier temps de définir les expressions de fonctions objectifs $\Phi(\lambda, X(\lambda))$. Les formes diverses que peuvent prendre la fonction objectif dépendent fortement du type de problème à résoudre.

Les techniques d'identification paramétrique se ramènent souvent à une procédure de régression de courbes expérimentales [65, 69]. On cherche ainsi, les valeurs des paramètres

pour lesquelles les grandeurs X_c calculées par le modèle numérique direct s'approchent en certain sens des valeurs des points expérimentaux X_m . On écrit donc :

$$X_i^m = X_i^c + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.9)$$

Où

ε_i représente les erreurs sur les données d'entrée, les erreurs de calculs et de mesures.

n nombre total de mesures.

L'objectif de l'identification paramétrique consiste à minimiser les erreurs ε_i en utilisant le plus souvent, une expression de type moindre carré, qui conduit à la formulation suivante [65, 84] :

$$\Phi(\lambda, X(\lambda)) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [X_i^m - X_i^c]^2 \quad (4.10)$$

On peut utiliser aussi, une expression de types moindres carrés pondérés, qui conduit à la formulation suivante [65, 84] :

$$\Phi(\lambda, X(\lambda)) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i^m - X_i^c)^2}{(X_i^m)^2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \beta_i (X_i^m - X_i^c)^2 \quad (4.11)$$

Lorsque le problème est mal posé, c'est-à-dire, lorsque la fonction objective présente plusieurs minimum locaux ou lorsqu'au moins deux variations de paramètres λ_i et λ_j avec $i \neq j$ impliquent les mêmes déviations des observations, alors il est conseillé d'utiliser les méthodes de régularisation. Toutes ces méthodes consistent à limiter la recherche du minimum de la fonction objectif autour des paramètres de référence. On cherchera alors, à minimiser Φ^* définit par :

$$\Phi^* = (1 - \alpha) \Phi + \alpha \Phi_r \quad (4.12)$$

où le scalaire α est le paramètre de régularisation (souvent petit devant 1) de la fonctionnelle, et le terme Φ_r est construit à partir des paramètres de référence, et qui est de préférence de forme quadratique pondérée. La méthode de régularisation de Levenberg, par exemple [4][8] consiste à chercher, à l'itération k , les paramètres λ^k dans le voisinage des valeurs des paramètres à l'itération précédente λ^{k-1} . La composante Φ_r s'écrit alors :

$$\Phi_r = \sum_{i=1}^{n_{\text{par}}} [\lambda_i^k - \lambda_i^{(k-1)}]^2 \quad (4.13)$$

Dans la méthode de régularisation de Tikhonov, la composante Φ_r s'exprime comme suit :

$$\Phi_r = \sum_{i=1}^{n_{\text{par}}} [\lambda_i^k - \lambda_i^0]^2 \quad (4.14)$$

4.6 Techniques numériques de résolution

La résolution du problème d'optimisation de type (4.6), qui consiste à minimiser la fonctionnelle $\Phi(\lambda)$, peut être effectuée selon deux cas, avec contraintes ou sans contraintes.

4.6.1 problèmes d'optimisation sans contraintes

Un problème d'optimisation est dit sans contraintes, s'il ne contient pas de fonction contrainte, c'est-à-dire, si les fonctions $g_i(\lambda)$ et $h_j(\lambda)$ du problème (4.6) ne sont pas définies, comme dans le cas du problème (4.15) :

$$(P) \quad \begin{cases} \min \Phi(\lambda) \in \mathbb{R}^n \\ \lambda_{imin} \leq \lambda_i \leq \lambda_{imax}, \quad i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (4.15)$$

Une condition nécessaire pour que λ^* soit minimum local d'un problème sans contraintes est donnée par (4.16).

$$\begin{cases} \nabla \Phi(\lambda^*) = 0 \\ H(\lambda^*) \text{ non négative} \end{cases} \quad (4.16)$$

Ou bien :

- $\nabla \Phi$ est le gradient de la fonction objectif.
- $H = \nabla^2 \Phi$ est la matrice des dérivées secondes partielles, appelée le Hessien.

Une condition suffisante pour que λ^* soit minimum local d'un problème sans contraintes est donnée par (4.17).

$$\begin{cases} \nabla \Phi(\lambda^*) = 0 \\ H(\lambda^*) \text{ positive} \end{cases} \quad (4.17)$$

Les conditions (4.16) et (4.17) son uniquement valable pour des fonctions différentiables.

En pratique, les problèmes d'optimisation sans contraintes sont classifiés en fonction des propriétés mathématiques de leur fonction objectif. Cette fonction peut être unidimensionnelle ou multidimensionnelle, continue ou discontinue, linéaire ou non linéaire, convexe ou non convexe, différentiable ou non différentiable.

En fonction des caractéristiques spécifiques du problème d'optimisation sans contraintes, différentes approches de résolution peuvent être appliquées pour déterminer sa solution. Ces approches sont généralement regroupées en deux grandes catégories : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

4.6.1.1 Méthodes d'optimisation déterministes

On qualifie une méthode d'optimisation de déterministe lorsque, pour un même point de départ, le chemin suivi vers la solution est toujours identique, sans intervention du hasard. Ces approches se distinguent par leur rapidité et leur faible coût en calcul, mais elles exigent une condition initiale pour démarrer la résolution. Elles restent généralement locales, c'est-à-dire qu'elles tendent à atteindre l'optimum le plus proche de l'initialisation, qu'il s'agisse d'un minimum global ou seulement local.

Selon la dimension de la fonction objectif étudiée, ces méthodes se divisent en deux catégories : unidimensionnelles et multidimensionnelles.

4.6.1.2 Méthodes d'optimisation déterministes

Une méthode d'optimisation est qualifiée de déterministe lorsque, pour des conditions initiales données, l'itinéraire suivi vers la solution reste identique, sans intervention aléatoire. Ces méthodes sont reconnues pour leur efficacité et leur faible coût en calcul, mais elles nécessitent toujours un point de départ convenablement choisi. Elles sont généralement locales, c'est-à-dire qu'elles mènent vers l'optimum le plus proche de l'initialisation, qu'il soit global ou simplement local.

Selon la dimension de la fonction objectif à traiter, les approches déterministes se divisent en deux catégories : unidimensionnelles ou multidimensionnelles.

— Méthodes déterministes unidimensionnelles

Les techniques unidimensionnelles concernent l'optimisation de fonctions ne dépendant que d'un seul paramètre. Également appelées méthodes de recherche linéaire, elles reposent en général sur des stratégies de réduction progressive de l'intervalle de recherche afin d'isoler le point correspondant au minimum de la fonction.

— Méthodes déterministes multidimensionnelles

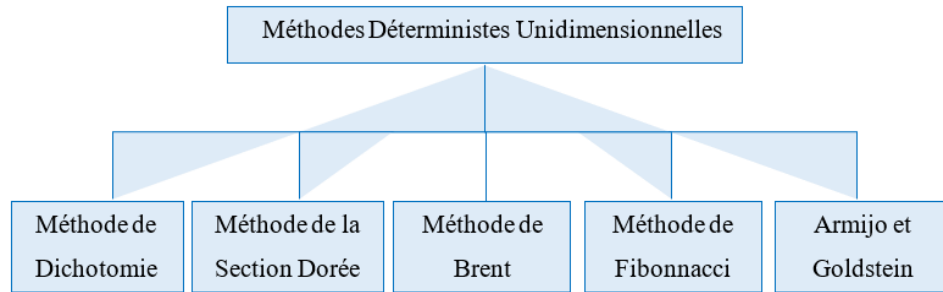


FIGURE 4.9 – Principales méthodes déterministes unidimensionnelles.

Ces méthodes s'appliquent à l'optimisation de fonctions dépendant de plusieurs variables. Leur classification repose généralement sur l'exploitation ou non des informations liées aux dérivées de la fonction objectif par rapport aux paramètres λ_i . Lorsqu'elles se basent uniquement sur l'évaluation de la fonction, elles sont qualifiées de méthodes directes ou d'ordre 0. En revanche, si elles requièrent également le calcul du gradient, elles appartiennent à la catégorie des méthodes indirectes ou d'ordre 1.

La Figure 4.10 illustre les principales méthodes multidimensionnelles ainsi que leur ordre de résolution respectif.

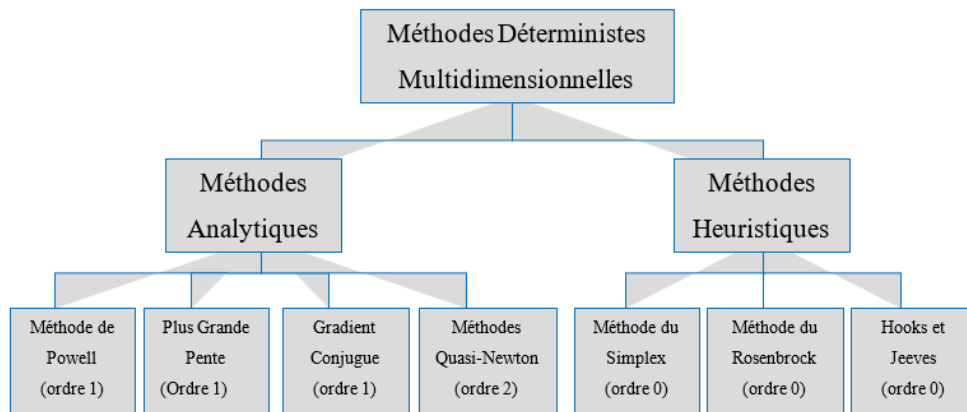


FIGURE 4.10 – Principales méthodes déterministes multidimensionnelles

4.6.1.3 Méthodes d'optimisation stochastiques

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des processus de transition aléatoires et probabilistes. Ainsi, plusieurs exécutions successives d'une même méthode peuvent

aboutir à des solutions différentes, même si les conditions initiales du problème sont identiques. Leur principal atout réside dans leur capacité à explorer l'espace de recherche de manière globale et à identifier l'optimum global. Contrairement aux approches déterministes, elles ne requièrent ni une condition initiale précise, ni le calcul du gradient de la fonction objectif pour converger vers une solution. En contrepartie, elles exigent généralement un grand nombre d'évaluations avant d'atteindre le résultat souhaité.

La Figure 4.11 illustre les principales techniques stochastiques couramment employées.

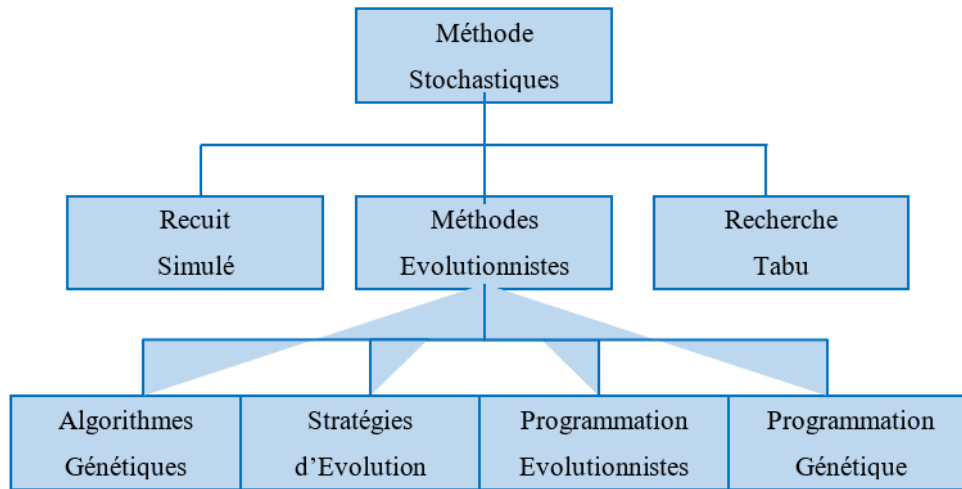


FIGURE 4.11 – principales méthodes stochastiques

4.6.2 Problèmes d'optimisation avec contraintes

Un problème d'optimisation est dit avec contraintes, s'il contient au moins une fonction contrainte $g_i(\lambda)$ ou $h_j(\lambda)$ dans sa description, comme dans le cas du problème (4.18).

$$(P) \left\{ \begin{array}{l} \min \Phi(\lambda) \in \mathbb{R}^n \\ g_i(\lambda) \leq 0, \quad i = 1, \dots, p \\ h_j(\lambda) = 0, \quad j = 1, \dots, q \\ \lambda_{i \min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{i \max}, \quad i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (4.18)$$

Si nous considérons qu'une contrainte d'égalité $h_j(\lambda) = 0$ peut être décrite par deux contraintes d'inégalité $h_j(\lambda) \leq 0$ et $-h_j(\lambda) \leq 0$, le problème (4.18) devient alors égal à celui donné par l'équation (4.19).

$$(P) \quad \begin{cases} \min \Phi(\lambda) \in \mathbb{R}^n \\ g_i(\lambda) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m = p + 2q \\ \lambda_{imin} \leq \lambda_i \leq \lambda_{imax}, \quad i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (4.19)$$

On appelle Fonction de Lagrange associée au problème (??), la fonction :

$$L(\lambda, \varphi) = \Phi(\lambda) + \sum_{i=1}^m \varphi_i g_i(\lambda) \quad (4.20)$$

Où $\varphi_i \geq 0$ sont appelés multiplicateurs de Lagrange.

Une condition nécessaire pour que λ^* soit un minimum local d'un problème avec contraintes est donnée par les équations de Kuhn–Tucker [65, 85, 86] :

$$\begin{cases} \nabla \Phi(\lambda^*) + \sum_{i=1}^m \varphi_i \nabla g_i(\lambda^*) = 0 \\ \varphi_i g_i(\lambda^*) = 0, \quad \forall i = 1, \dots, m \end{cases} \quad (4.21)$$

Qui, à l'aide de l'équation (4.20), s'écrit :

$$\begin{cases} \nabla L(\lambda^*, \varphi^*) = 0 \\ \varphi_i g_i(\lambda^*) = 0, \quad \forall i = 1, \dots, m \end{cases} \quad (4.22)$$

Lorsqu'un problème d'optimisation comporte des contraintes, il est nécessaire de veiller à ce que la solution trouvée ne se limite pas uniquement à minimiser la fonction objectif, mais qu'elle respecte également l'ensemble des contraintes imposées.

La partie de l'espace de recherche où toutes les conditions de conception sont satisfaites est appelée domaine admissible ou espace réalisable.

La résolution de ce type de problème peut être abordée au moyen de deux grandes familles de méthodes :

- les méthodes de transformation,
- les méthodes directes.

4.6.2.1 Méthodes de Transformation

Les méthodes de transformation, également appelées méthodes indirectes, consistent à convertir le problème initial comportant des contraintes en un problème équivalent sans contraintes. Pour cela, les contraintes sont intégrées directement dans la fonction objectif à optimiser.

Une fois cette reformulation effectuée, on applique un algorithme d'optimisation classique sans contraintes (par exemple le gradient conjugué, les méthodes quasi-Newton, ...). La solution obtenue permet ensuite de mettre à jour le problème, et ce processus est répété de manière itérative jusqu'à satisfaction du critère de convergence.

Parmi les techniques de transformation les plus répandues, on retrouve les méthodes de pénalisation [86], la méthode du Lagrangien augmenté, la méthode des variables mixtes ainsi que la méthode des asymptotes mobiles [85, 86], Figure 4.12.

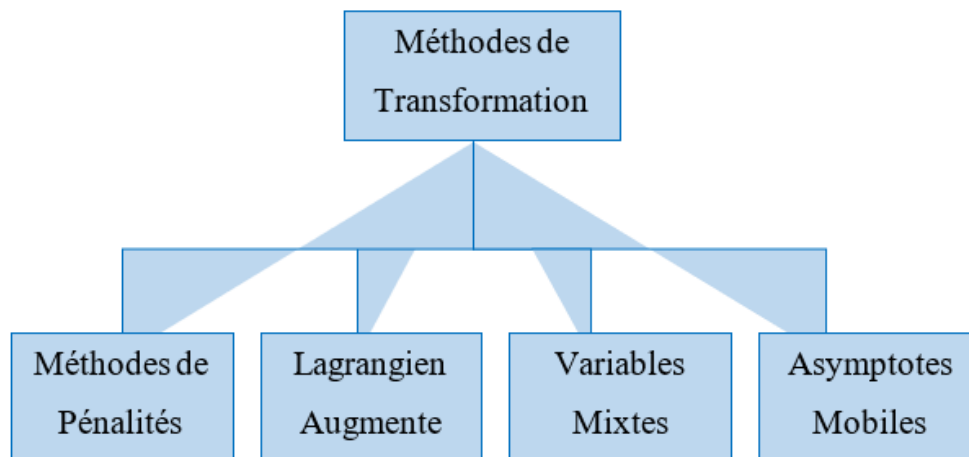


FIGURE 4.12 – Principales méthodes de Transformation

4.6.2.2 Méthodes Directes

Les méthodes directes, également appelées méthodes primales, traitent le problème contraint dans sa forme originale, sans transformation préalable. Elles permettent d'obtenir une solution soit en effectuant une série de minimisations unidirectionnelles, soit en remplaçant le problème initial par une succession de sous-problèmes approchés.

Parmi les approches directes les plus connues, on peut citer la programmation quadratique réursive [65], la méthode de l'ellipsoïde, la méthode des directions admissibles, ainsi que les méthodes du gradient réduit et du gradient projeté, Figure 4.13.

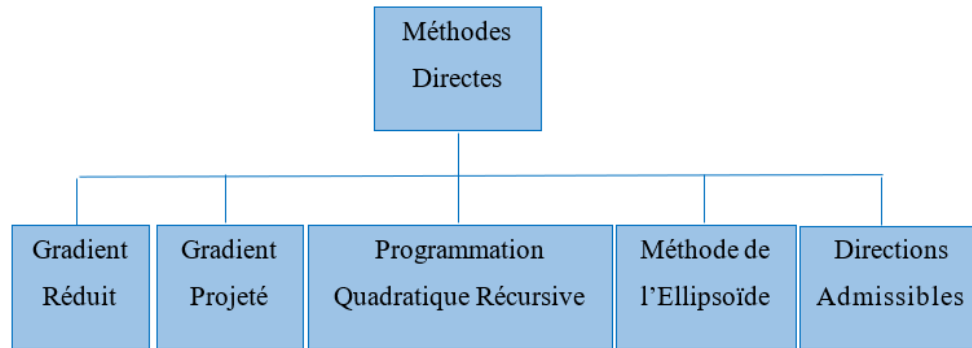


FIGURE 4.13 – Principales méthodes directes.

4.7 Conclusion

Pour conclure ce chapitre sur l'analyse par la méthodologie du problème inverse et optimisation, nous avons exploré une gamme variée de sujets cruciaux dans ce domaine complexe. Nous avons commencé par la caractérisation des problèmes inverses, en distinguant entre ceux bien posés qui permettent une solution unique et stable, et ceux mal posés qui nécessitent des techniques spécifiques pour éviter les solutions non fiables. Nous avons examiné les différences entre les problèmes inverses linéaires et non linéaires, mettant en évidence les défis et les stratégies associées à chacun.

Ensuite, nous avons exploré un éventail de techniques de résolution des problèmes inverses, allant des approches numériques traditionnelles aux méthodes modernes de machine learning et d'intelligence artificielle. Les réseaux de neurones et les machines à vecteurs de supports ont été présentés comme des outils puissants pour modéliser des relations complexes et pour optimiser la performance des modèles en ajustant les hyper-paramètres appropriés.

Nous avons également examiné divers algorithmes d'optimisation, chacun adapté à des types spécifiques de problèmes inverses et d'optimisation, et discuté de techniques numériques avancées pour résoudre efficacement ces problèmes. Enfin, nous avons souligné l'importance

cruciale du réglage minutieux des hyper-paramètres pour garantir des performances optimales des modèles.

Ce chapitre illustre ainsi la diversité et la complexité des approches nécessaires pour aborder avec succès les problèmes inverses et d'optimisation dans divers domaines d'application, en intégrant des méthodologies éprouvées avec les dernières avancées technologiques en machine learning et intelligence artificielle.

Applications et validations des méthodes inverses

5.1 Introduction

Les applications et validations constituent une étape décisive dans le processus de recherche scientifique, car elles permettent de confirmer la fiabilité et la performance des méthodes d'inversion développées. Elles assurent que les approches proposées ne se limitent pas à une validation théorique, mais qu'elles sont capables de produire des résultats cohérents et exploitables pour l'évaluation des structures inspectées.

Dans ce chapitre, nous présentons la mise en œuvre et la validation de méthodes d'inversion appliquées au contrôle non destructif par courants de Foucault. L'objectif principal est d'estimer avec précision les paramètres électromagnétiques essentiels des matériaux, en particulier la conductivité électrique (σ) et la perméabilité magnétique relative (μ_r), ainsi que de caractériser les défauts géométriques en termes de largeur, de longueur et de profondeur.

La résolution de ces problèmes inverses s'appuie sur l'utilisation d'algorithmes d'optimisation métaheuristiques récents, parmi lesquels Golden Jackal Optimization (GJO), le Sailfish Optimizer (SFO), l'Aquila Optimizer (AQO) et Runge Kutta Optimizer (RKO). Ces approches bio-inspirées se révèlent particulièrement adaptées à l'exploration d'espaces de recherche complexes et à la convergence vers des solutions précises et stables.

Deux applications principales seront étudiées au cours de ce travail : la première concerne

l'estimation simultanée de la conductivité et de la perméabilité à partir de données simulées, tandis que la seconde portera sur la caractérisation dimensionnelle des défauts. Ces investigations permettent de démontrer la pertinence des méthodes proposées pour améliorer la fiabilité et la précision de l'évaluation des matériaux et des structures dans le cadre du CND-CF.

5.2 Modèle direct et base de données simulée

L'approche adoptée pour le contrôle non destructif par courants de Foucault repose en premier lieu sur la construction d'un modèle direct précis. Celui-ci permet de relier les caractéristiques physiques du matériau et la présence éventuelle de défauts à la réponse électromagnétique mesurée par le capteur. L'objectif est de disposer d'une représentation fidèle du phénomène afin de générer une base de données de référence exploitable dans le cadre des problèmes inverses.

5.2.1 Résolution des équations de Maxwell

Le modèle direct est fondé sur la résolution des équations de Maxwell en régime harmonique. Dans le domaine fréquentiel, les équations fondamentales s'écrivent :

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}, \quad (5.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \sigma\vec{E}, \quad (5.2)$$

où $\vec{E}$ est le champ électrique, $\vec{H}$ le champ magnétique, μ la perméabilité magnétique, σ la conductivité électrique, ω la pulsation du signal excitateur, et $\vec{J}$ la densité de courant imposée dans la bobine.

En introduisant le potentiel vecteur magnétique $\vec{A}$ tel que $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$, et en adoptant la jauge de Coulomb ($\nabla \cdot \vec{A} = 0$), on obtient l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + j\omega\sigma\vec{A} = \vec{J}. \quad (5.3)$$

Cette formulation est particulièrement adaptée à la méthode des éléments finis, qui permet de résoudre le problème dans des géométries complexes et avec des conditions aux limites réalistes (bord ouvert, symétries, etc.).

5.2.2 Modélisation du capteur

Le capteur est représenté par une bobine excitatrice parcourue par un courant alternatif $I(t) = I_0 e^{j\omega t}$. Le champ magnétique généré par la bobine induit des courants de Foucault dans l'échantillon conducteur. En présence de défauts (fissures, inclusions, pertes de matière), la distribution de ces courants est localement perturbée, ce qui entraîne une variation mesurable de l'impédance de la bobine, 5.1.

L'impédance complexe de la bobine est calculée par :

$$Z = R + jX = \frac{1}{I^2} \int_V \left(\sigma |\vec{E}|^2 + j\omega\mu |\vec{H}|^2 \right) dV, \quad (5.4)$$

où R et X représentent respectivement la résistance effective et la réactance de la bobine.

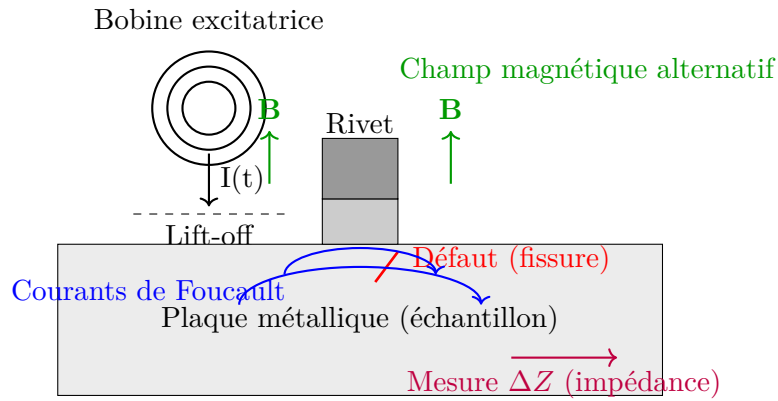


FIGURE 5.1 – Schéma conceptuel du modèle direct : bobine excitatrice, plaque métallique, rivet et défaut avec indication des courants de Foucault et du champ magnétique.

5.2.3 Grandeurs simulées

À partir de la résolution numérique via COMSOL Multiphysics, plusieurs grandeurs physiques pertinentes ont été extraites :

- la distribution spatiale des courants de Foucault, illustrant les zones de concentration et les perturbations liées aux défauts ;
- la densité de flux magnétique, permettant d’analyser la pénétration et l’interaction du champ magnétique dans la structure inspectée ;
- la variation d’impédance de la bobine en fonction des propriétés électromagnétiques du matériau et de la géométrie des défauts.

5.2.4 Base de données simulée

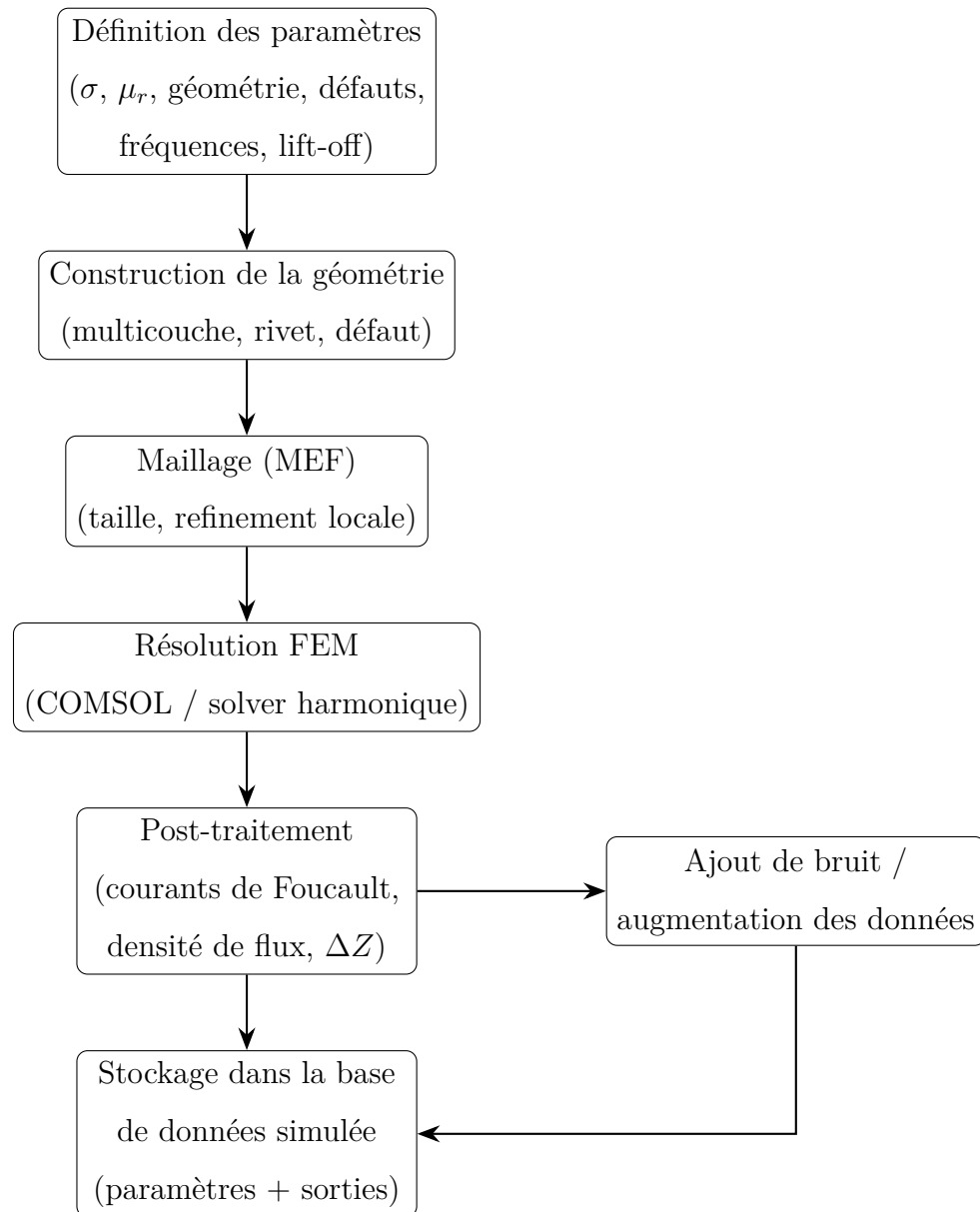
L’ensemble de ces résultats est organisé sous forme d’une base de données numérique, regroupant les réponses électromagnétiques simulées pour différentes configurations : valeurs de conductivité et perméabilité, fréquences d’excitation, dimensions et positions des défauts. Cette base de données est essentielle pour :

- évaluer la sensibilité du système aux variations des paramètres électromagnétiques et géométriques ;
- fournir un jeu de données fiable pour valider et comparer les méthodes d’inversion et les algorithmes d’optimisation ;
- réduire la dépendance aux essais expérimentaux coûteux et parfois difficiles à réaliser.

Ainsi, le modèle direct et la base de données simulée constituent la pierre angulaire de ce travail, offrant un cadre contrôlé et reproductible pour la validation des approches inverses étudiées dans les sections suivantes.

5.3 Méthodes inverses et algorithmes d’optimisation

L’identification des paramètres électromagnétiques à partir des mesures constitue un problème inverse fondamental en contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault. Ce type de problème est en général mal posé, non linéaire et sensible au bruit expérimental, ce qui rend son traitement particulièrement complexe [39, 87]. Afin de garantir une estimation fiable et robuste, il est nécessaire de recourir à des méthodes d’optimisation adaptées. La présente section introduit d’abord la formulation du problème inverse, puis décrit les algorithmes d’optimisation employés [9, 88].



Base prête pour entraînement, validation et tests inverses

FIGURE 5.2 – Chaîne de génération de la base de données simulée : de la définition des paramètres à l’archivage des résultats.

5.3.1 Problème inverse

Le problème inverse consiste à retrouver les paramètres inconnus, tels que la conductivité électrique (σ), la perméabilité magnétique relative (μ_r), ou encore les dimensions géométriques des défauts, à partir des mesures d'impédance complexe de la bobine.

La démarche repose sur la comparaison entre les mesures expérimentales ou simulées, notées $x_{\text{ref}}(t)$, et les réponses calculées par le modèle direct $x(t)$ pour un jeu de paramètres candidats (σ, μ_r) . L'objectif est de minimiser l'écart entre ces deux signaux. Ce processus se traduit par la résolution d'un problème d'optimisation de la forme :

$$\min_{(\sigma, \mu_r)} J(\sigma, \mu_r) \quad (5.5)$$

où $J(\sigma, \mu_r)$ représente la fonction coût (ou critère d'erreur) quantifiant la différence entre $x(t)$ et $x_{\text{ref}}(t)$.

Afin d'évaluer la qualité de l'estimation et de comparer les performances des algorithmes, plusieurs métriques d'erreur classiques sont utilisées :

$$J_{\text{ISE}} = \int_0^t [x(t) - x_{\text{ref}}(t)]^2 dt \quad (5.6)$$

$$J_{\text{ITSE}} = \int_0^t t \cdot [x(t) - x_{\text{ref}}(t)]^2 dt \quad (5.7)$$

$$J_{\text{IAE}} = \int_0^t |x(t) - x_{\text{ref}}(t)| dt \quad (5.8)$$

$$J_{\text{ITAE}} = \int_0^t t \cdot |x(t) - x_{\text{ref}}(t)| dt \quad (5.9)$$

Chaque critère met en évidence un aspect particulier de l'erreur :

- L'ISE mesure l'énergie totale de l'erreur.
- L'ITSE accentue les erreurs qui persistent dans le temps.
- L'IAE évalue l'écart total indépendamment du signe.
- L'ITAE pénalise à la fois l'ampleur et la durée des erreurs.

Ainsi, la prise en compte de plusieurs métriques permet une évaluation complète des performances des méthodes d'optimisation.

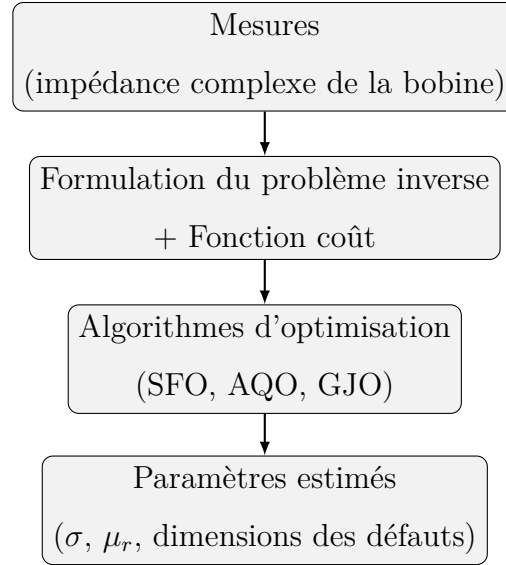


FIGURE 5.3 – Schéma conceptuel du problème inverse en CND par courants de Foucault.

5.3.2 Algorithmes d'optimisation utilisés

Pour résoudre le problème inverse décrit précédemment, trois algorithmes d'optimisation bio-inspirés sont mis en œuvre. Ces approches exploitent des mécanismes de recherche issus du comportement de certaines espèces animales, permettant de concilier exploration globale et exploitation locale de l'espace des solutions.

5.3.2.1 Sailfish Optimization (SFO)

Cet algorithme s'inspire du comportement coopératif des espadons voiliers lors de la chasse. Il repose sur l'interaction entre deux populations : les espadons (agents de recherche) et les sardines (proies). Deux phases structurent la recherche [89, 90] :

1. Phase d'exploration : les espadons explorent l'espace des solutions aléatoirement.
2. Phase d'exploitation : les espadons poursuivent les sardines en affinant la recherche localement.

L'équation de mise à jour des positions est donnée par :

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \alpha \cdot \text{Random}(0, 1) \cdot (P_{\text{best}} - X_i^t) \quad (5.10)$$

où P_{best} est la meilleure solution et α un facteur d'échelle.

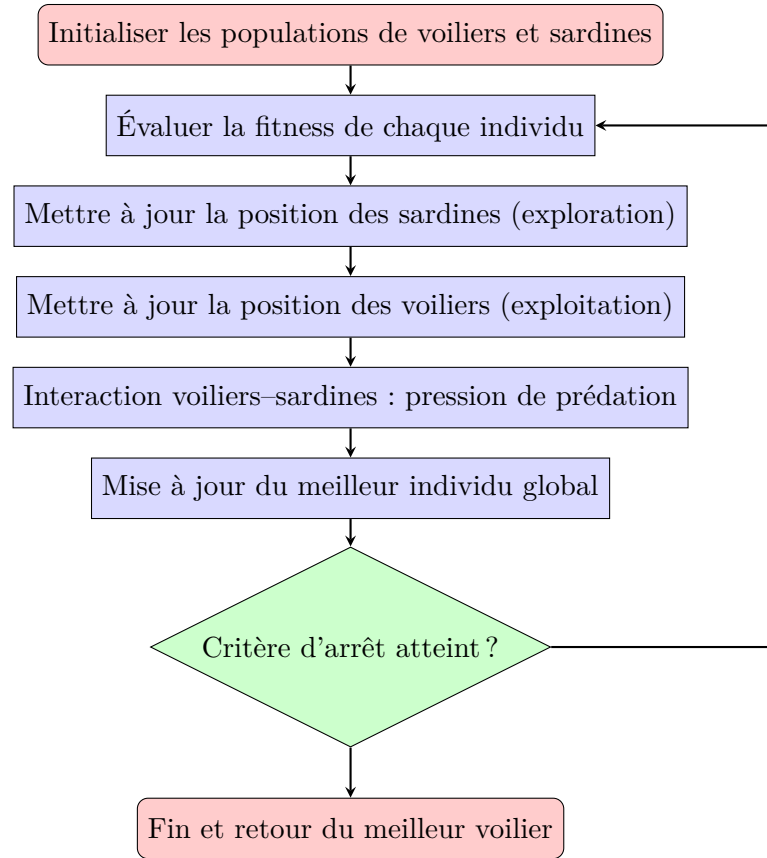


FIGURE 5.4 – Organigramme de l'algorithme SFO.

5.3.2.2 Aquila Optimization (AQO)

Inspiré du comportement de l'aigle Aquila, cet algorithme combine deux stratégies [91,92] :

- Phase de survol (Soaring) : exploration globale de l'espace.
- Phase de plongée (Diving) : recherche locale précise.

Les équations de mise à jour sont :

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \alpha_1 \cdot \text{Random}(0, 1) \cdot (X_{\text{best}} - X_i^t) \quad (\text{Survol}) \quad (5.11)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \alpha_2 \cdot \text{Random}(0, 1) \cdot (P_{\text{best}} - X_i^t) \quad (\text{Plongée}) \quad (5.12)$$

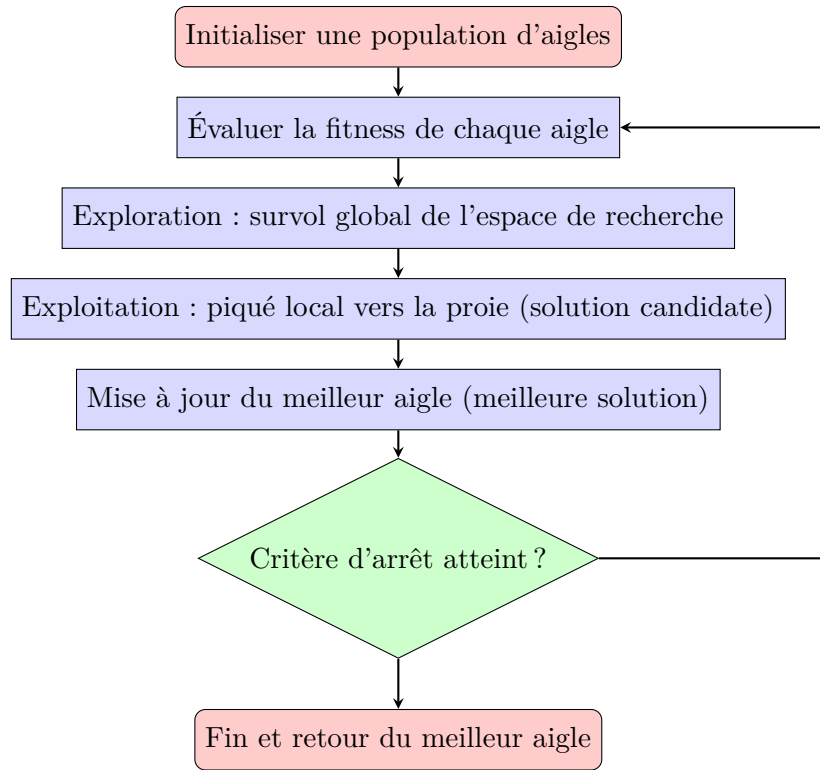


FIGURE 5.5 – Organigramme de l'algorithme AQO.

5.3.2.3 Golden Jackal Optimization (GJO)

Basé sur la coopération des chacals dorés, cet algorithme combine influence du leader et de la meute [93, 94] :

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \beta_1 \cdot \text{Random}(0, 1) \cdot (X_{\text{leader}} - X_i^t) + \beta_2 \cdot \text{Random}(0, 1) \cdot (X_{\text{pack}} - X_i^t) \quad (5.13)$$

où X_{leader} est la meilleure solution et X_{pack} la position moyenne de la meute.

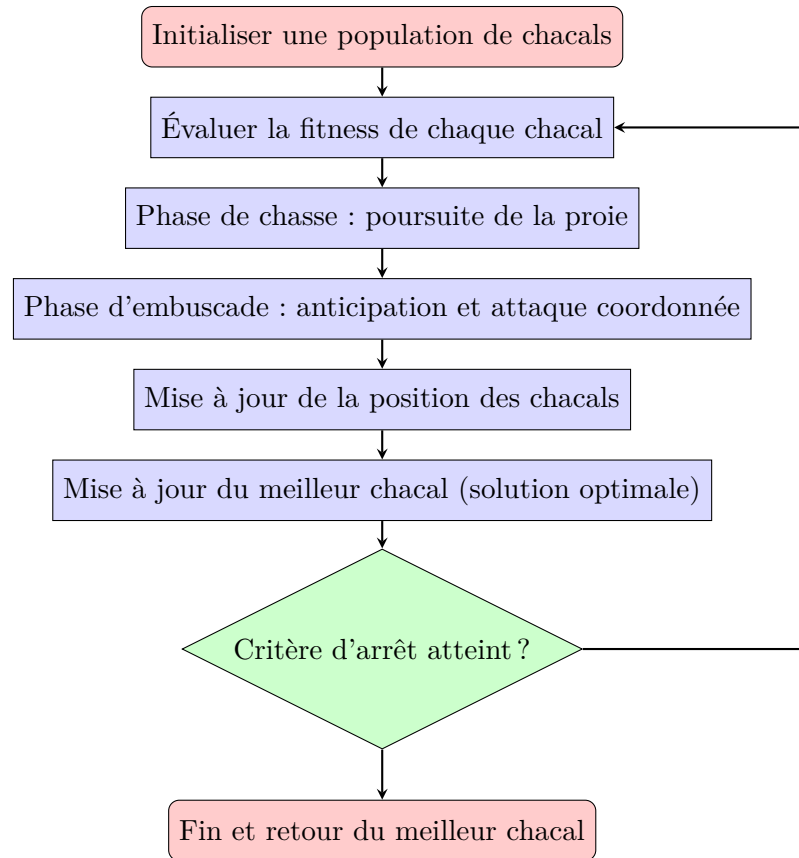


FIGURE 5.6 – Organigramme de l'algorithme GJO.

5.3.2.4 Runge Kutta Optimization (RKO)

L'algorithme RKO s'inspire du schéma numérique de Runge–Kutta utilisé pour la résolution des équations différentielles. Il combine les principes d'exploration et d'exploitation à travers des étapes de prédiction et de correction successives. L'idée principale consiste à estimer la direction de recherche en simulant le comportement dynamique d'un système [95].

Les étapes de mise à jour sont définies comme suit :

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (5.14)$$

où :

$$\begin{aligned}K_1 &= f(X_i^t), \\K_2 &= f(X_i^t + \frac{1}{2}\gamma K_1), \\K_3 &= f(X_i^t + \frac{1}{2}\gamma K_2), \\K_4 &= f(X_i^t + \gamma K_3),\end{aligned}$$

et γ est un paramètre d'ajustement du pas de mise à jour.

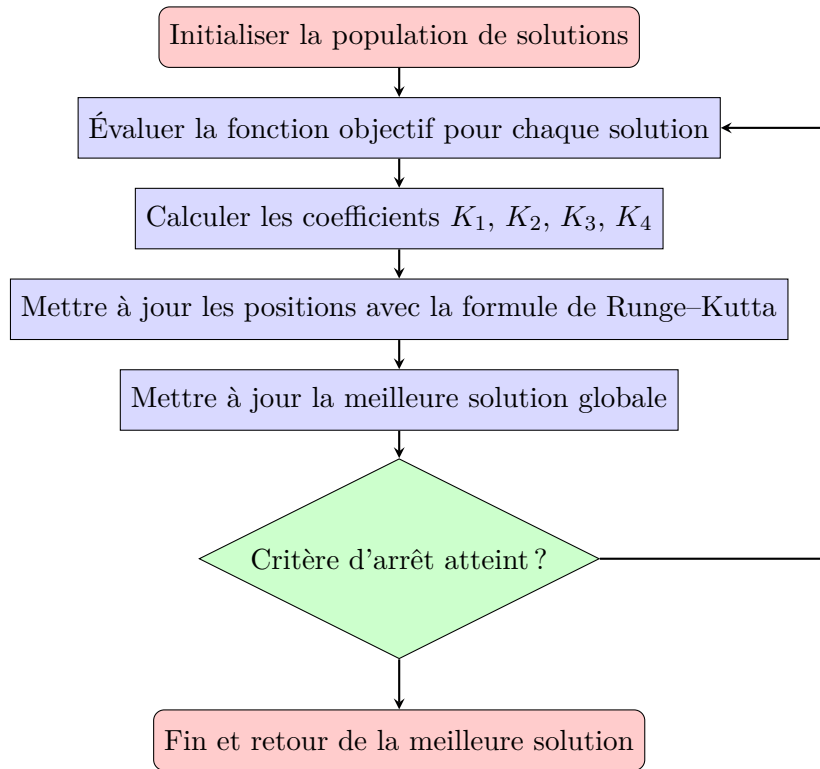


FIGURE 5.7 – Organigramme de l'algorithme RKO.

5.4 Résultats d'optimisation

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus à l'aide des algorithmes d'optimisation SFO, AQO, GJO et RKO appliqués au problème inverse décrit précédemment. Les performances de chaque méthode sont évaluées en termes de précision d'estimation et de robustesse, en utilisant les bases de données simulées issues du modèle direct. Deux scénarios distincts sont étudiés afin de mettre en évidence l'efficacité des approches proposées.

5.4.1 Application 1 : Estimation de la conductivité et de la perméabilité

Dans cette première application, l'objectif est d'estimer avec précision les paramètres électromagnétiques du matériau, à savoir la conductivité électrique σ et la perméabilité relative μ_r , à partir des mesures d'impédance complexe. Ces paramètres jouent un rôle essentiel dans la modélisation des phénomènes électromagnétiques et conditionnent directement la distribution des courants de Foucault ainsi que la réponse mesurée par la bobine.

Pour les besoins de cette étude, les valeurs réelles de référence retenues dans la simulation sont :

$$\sigma^* = 17.4 \times 10^6 \text{ S/m}, \quad \mu_r^* = 1.$$

La tâche de l'algorithme d'optimisation consiste donc à retrouver ces paramètres à partir des données issues du modèle direct.

Cette étape permet de valider la capacité des algorithmes à résoudre un problème inverse de nature ill-posé et non linéaire, et de comparer la rapidité de convergence ainsi que la précision des résultats obtenus avec chaque méthode (SFO, AQO et GJO).

5.4.1.1 Évaluation des performances avec l'ISE

La Figure 5.8 illustre l'évolution de la conductivité et de la perméabilité estimées selon le critère ISE. L'algorithme SFO présente des oscillations initiales avant de converger après une quinzaine d'itérations, tandis que AQO et GJO atteignent rapidement des solutions stables et précises dès les premières itérations. On constate que GJO est particulièrement performant pour la perméabilité, tandis que AQO fournit une bonne estimation de la conductivité.

5.4.1.2 Évaluation des performances avec l'ITSE

La Figure 5.9 montre la convergence selon le critère ITSE, plus sensible aux erreurs initiales. SFO atteint la stabilité après une dizaine d'itérations, tandis que AQO et GJO convergent immédiatement. AQO s'aligne bien sur la valeur réelle de la conductivité, et GJO fournit les estimations les plus précises de la perméabilité.

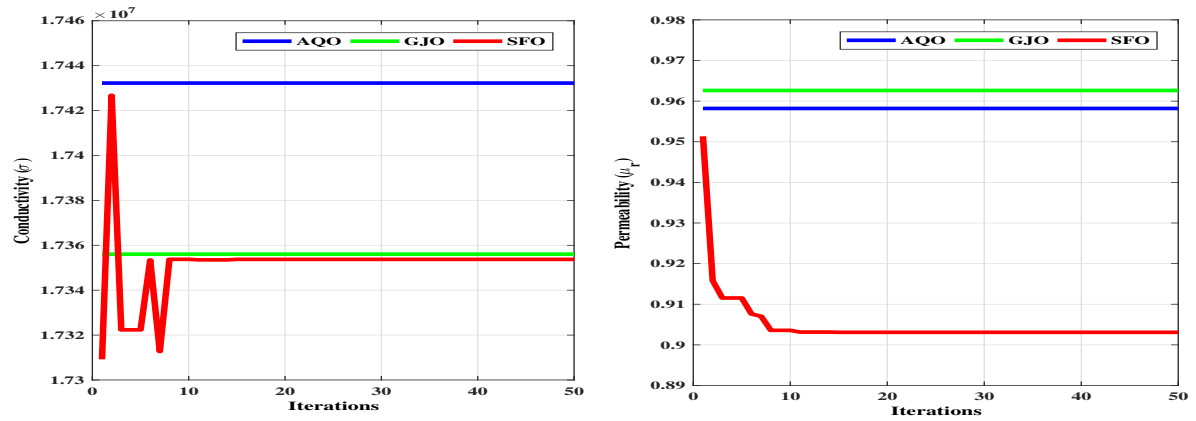


FIGURE 5.8 – Évolution de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique (critère ISE)

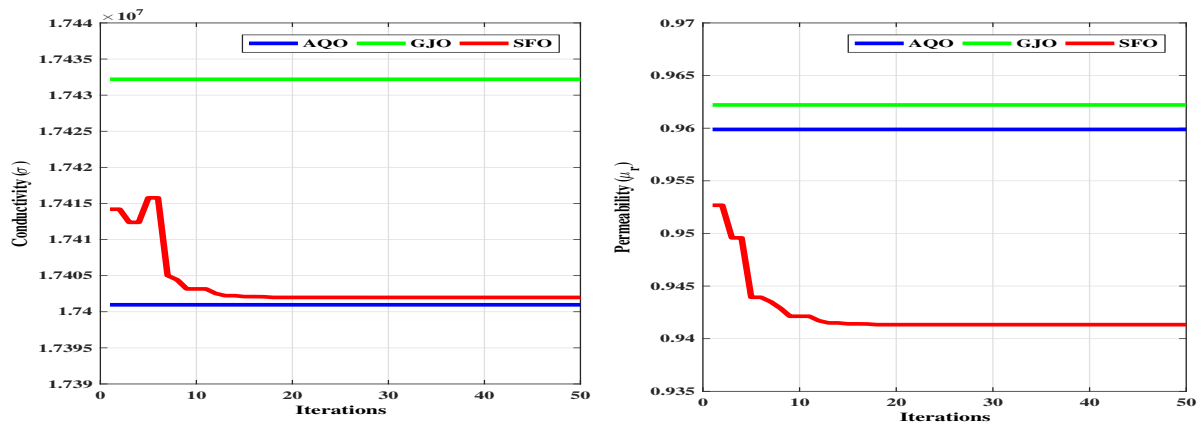


FIGURE 5.9 – Évolution de la conductivité et de la perméabilité (critère ITSE)

5.4.1.3 Évaluation des performances avec l'IAE

La Figure 5.10 utilise l'IAE comme indicateur. SFO nécessite près de 20 itérations pour converger, alors que AQO et GJO atteignent une stabilité immédiate. AQO est précis pour la conductivité, tandis que GJO se distingue dans l'estimation de la perméabilité.

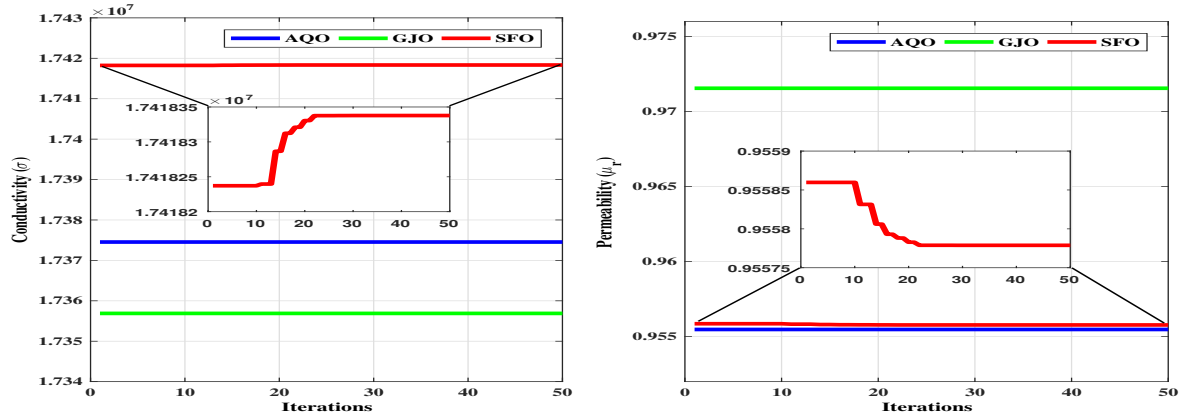


FIGURE 5.10 – Évolution de la conductivité et de la perméabilité (critère IAE)

5.4.1.4 Évaluation des performances avec l'ITAE

La Figure 5.11 présente les résultats pour le critère ITAE. SFO converge lentement et sous-estime la perméabilité, tandis que AQO et GJO montrent une convergence rapide et stable dès la première itération. AQO offre la meilleure précision pour la perméabilité, et GJO pour la conductivité.

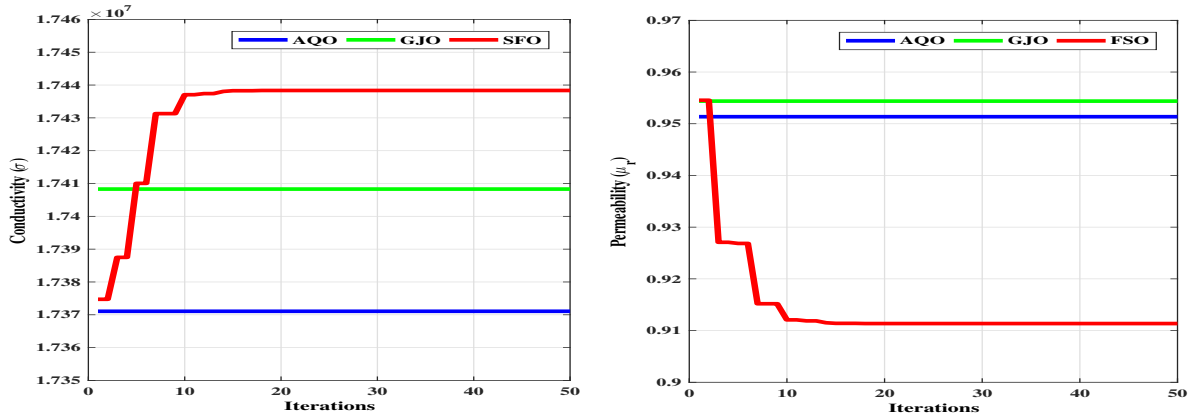


FIGURE 5.11 – Évolution de la conductivité et de la perméabilité (critère ITAE)

5.4.1.5 Comparaison globale

Les résultats comparatifs (Tableaux 5.1 et 5.2) montrent que les trois méthodes reconstituent correctement les paramètres électromagnétiques réels ($\sigma = 17.4 \times 10^6$ S/m et $\mu_r = 1$). AQO et GJO se démarquent par une convergence quasi instantanée et une grande précision, alors que SFO, plus lent (8–20 itérations), reste néanmoins robuste et fiable.

TABLE 5.1 – Comparaison des algorithmes d’optimisation pour l’estimation des paramètres

Valeur réelle	σ (S/m)			μ_r		
	17.4×10^6			1		
	SFO	AQO	GJO	SFO	AQO	GJO
ISE	17.35e6	17.43e6	17.35e6	0.903	0.958	0.962
ITSE	17.40e6	17.40e6	17.43e6	0.941	0.959	0.962
IAE	17.41e6	17.37e6	17.35e6	0.955	0.955	0.971
ITAE	17.43e6	17.37e6	17.40e6	0.911	0.951	0.954

TABLE 5.2 – Comparaison qualitative des algorithmes

Algorithme	Convergence	Précision	Atouts principaux
AQO	1 itér	Aligné sur la référence	Convergence immédiate ; précis pour σ
GJO	1 itér	Aligné sur la référence	Rapide ; performant pour μ_r
SFO	15–20 itér	Correcte	Stable et robuste à long terme

5.4.1.6 Analyse des résultats

Les comparaisons mettent en évidence des tendances claires entre les trois algorithmes. AQO et GJO présentent une convergence quasi instantanée et des estimations très proches

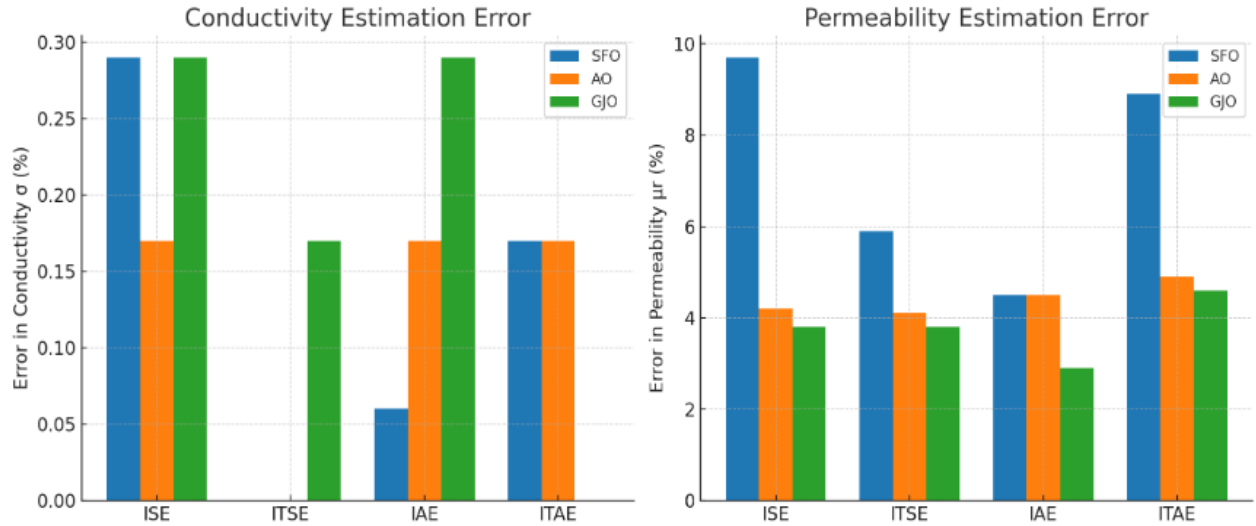


FIGURE 5.12 – Erreur d'estimation des paramètres selon les méthodes d'optimisation

des valeurs réelles, tandis que SFO, plus lent, nécessite entre 15 et 20 itérations pour se stabiliser.

Sous les critères ISE et ITSE, AQO fournit les estimations de conductivité les plus précises, alors que GJO se distingue dans l'estimation de la perméabilité. Avec l'IAE et l'ITAE, la rapidité et la robustesse de AQO et GJO confirment leur supériorité, tandis que SFO, malgré une précision acceptable, reste moins efficace.

En conclusion, AQO et GJO apparaissent comme les méthodes les plus adaptées aux applications nécessitant rapidité et précision, tandis que SFO convient mieux aux contextes où la stabilité sur un plus grand nombre d'itérations est privilégiée.

5.4.2 Application 2 : Estimation de la profondeur du défaut

Dans cette seconde application, l'analyse porte exclusivement sur l'estimation de la profondeur du défaut à partir des variations d'impédance mesurées. La profondeur constitue en effet un paramètre critique en contrôle non destructif, puisqu'elle détermine directement la sévérité du dommage et son impact potentiel sur l'intégrité structurale. Les algorithmes SFO et RKO sont appliqués pour résoudre ce problème inverse, en cherchant la valeur de profondeur qui minimise l'écart entre les réponses simulées et les réponses de référence. Cette étude permet ainsi d'évaluer la sensibilité des méthodes d'optimisation à un paramètre géo-

métrique clé, et de comparer leur précision et leur rapidité de convergence dans un contexte de caractérisation de défauts.

5.4.2.1 Évaluation des performances avec RKO

La 1^{ère} teste : nous avons fixé le nombre de particules sur =15 et nous changeons le nombre d'itération les résultats obtenus sont montrés dans les Figures 5.13 et 5.14.

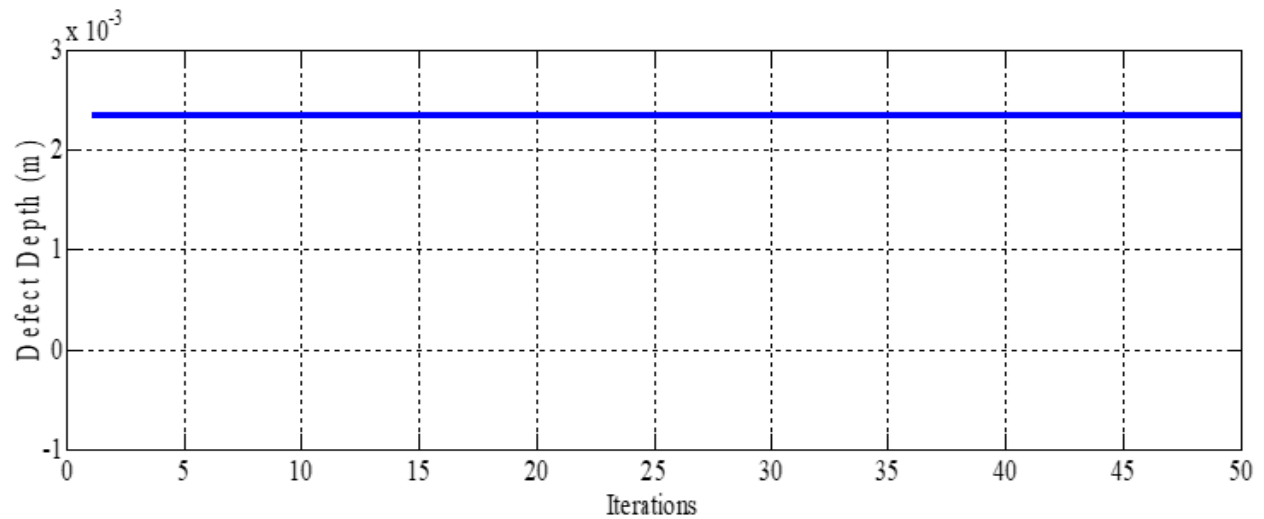


FIGURE 5.13 – Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations (itr=50)

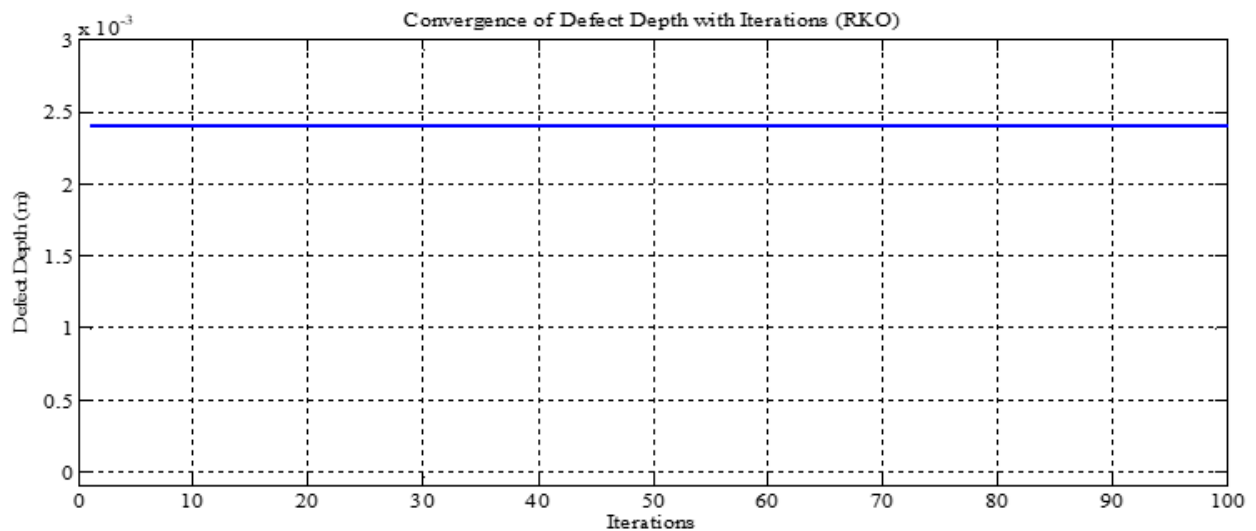


FIGURE 5.14 – Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations (itr=100)

La 2eme teste : nous avons fixé le nombres d'titration sur =100 et nous changeons le nombre de particules, les résultats obtenues sont montrés dans les Figures 5.15 et 5.16.

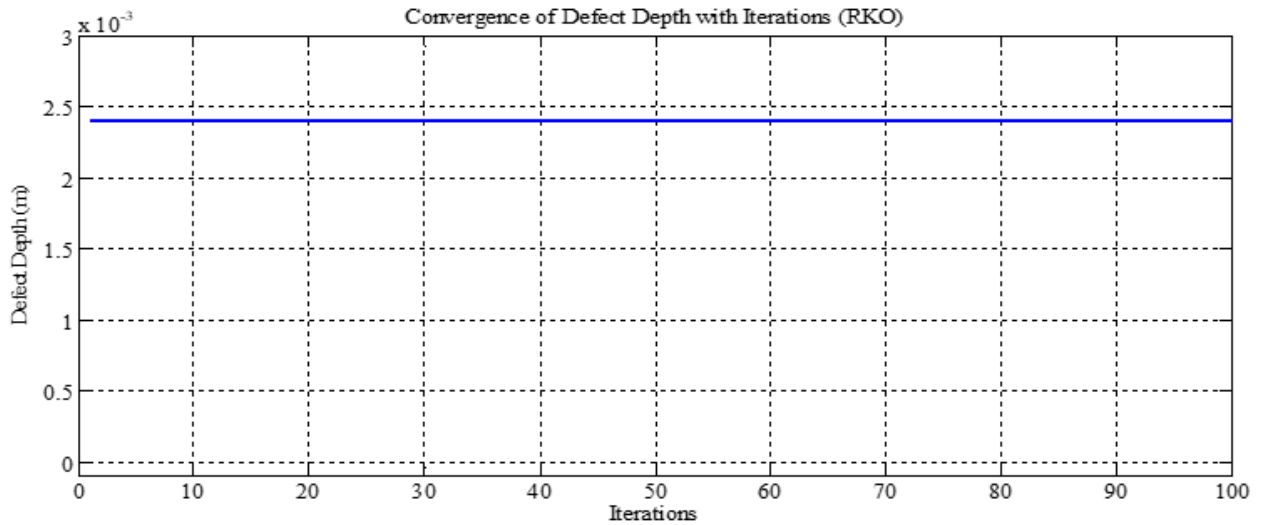


FIGURE 5.15 – Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations (N=10)

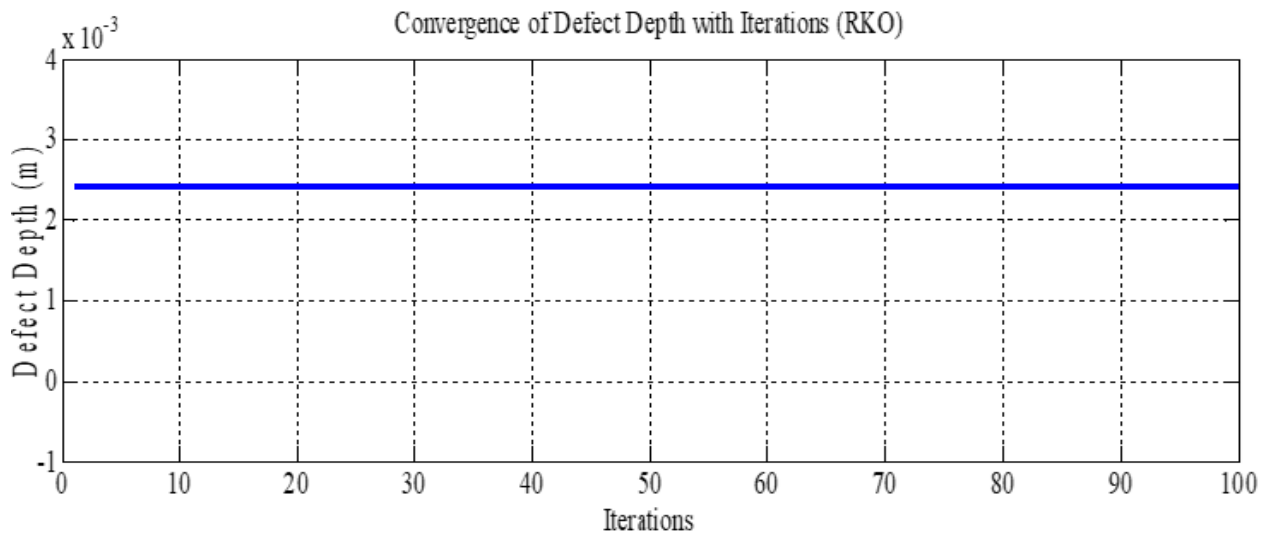


FIGURE 5.16 – Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations (N=30)

Selon les Figures 5.13-5.16, on observe que dès la première itération, la valeur de la profondeur (d) converge déjà vers une solution proche de l'optimale, atteignant environ 98% de précision. Cela montre que le processus d'optimisation est très efficace dès le début, permettant d'obtenir rapidement une estimation très proche de la valeur réelle du défaut. Cette

rapidité de convergence démontre la robustesse de la méthode employée pour estimer la profondeur.

Le Tableau 5.3 présente une synthèse des résultats obtenus à la suite des simulations et des calculs effectués. Il récapitule les valeurs estimées des profondeurs des défauts, en se basant sur les différentes itérations et populations générées au cours du processus d'optimisation. Plus précisément, la valeur de la profondeur (d) indiquée dans ce tableau correspond à celle du meilleur individu sélectionné dans la dernière population de l'algorithme d'optimisation.

TABLE 5.3 – Résultats obtenus par la méthode de Runge-Kutta.

Runge–Kutta			
Nbr d'itération (itr)	Valeur réelle d [mm]	Valeur obtenue d [mm]	Nbr Populations (N)
50	2.5	2.353	15
100	2.5	2.451	
100	2.5	2.432	10
	25	2.456	30

Dans le Tableau 5.3, en examinant les valeurs obtenues pour la profondeur du défaut, il est évident que la méthode de Runge-Kutta fournit des résultats extrêmement précis et très proches des valeurs optimales. Par exemple, avec un nombre d'itérations fixé à 100 et une population de 30 individus, la profondeur estimée du défaut est de 2,456 [mm], ce qui représente 98,24% de la profondeur réelle du défaut. Cette précision démontre l'efficacité de la méthode dans la convergence vers une solution optimale. La valeur de 2,456 [mm] correspond à la meilleure estimation fournie par l'individu le plus performant de la dernière population générée par l'algorithme, soulignant ainsi la qualité de l'optimisation obtenue dans cette simulation.

5.4.2.2 Évaluation des performances avec SFO

Le premier test consiste à fixer le nombre de voiliers à 10 et celui des sardines à 30, tout en faisant varier le nombre d'itérations à 50 puis à 100. Les résultats obtenus pour ces

configurations sont illustrés dans les figures suivantes :

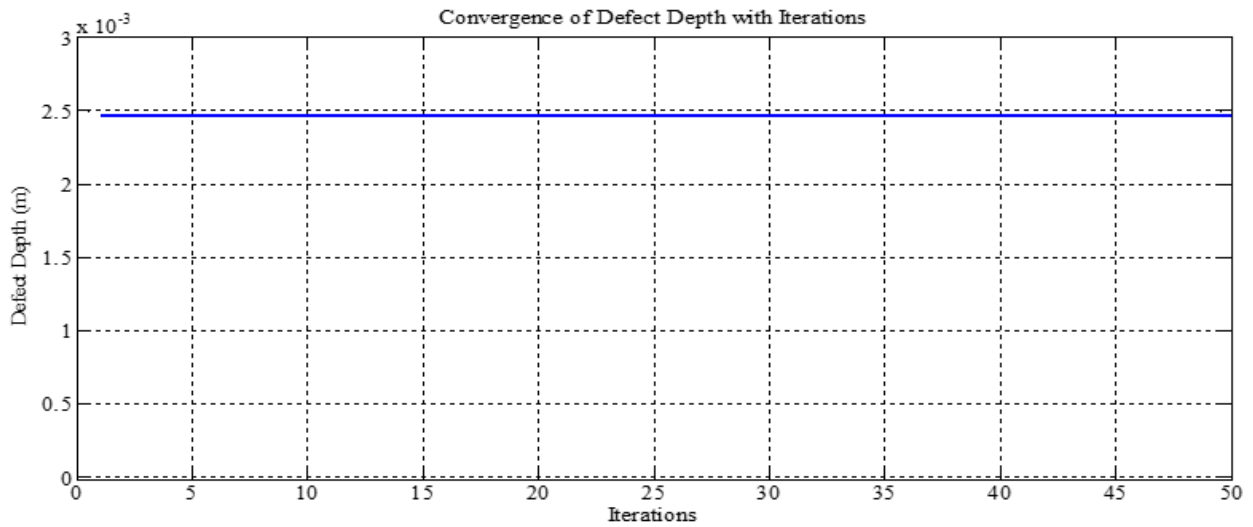


FIGURE 5.17 – Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations

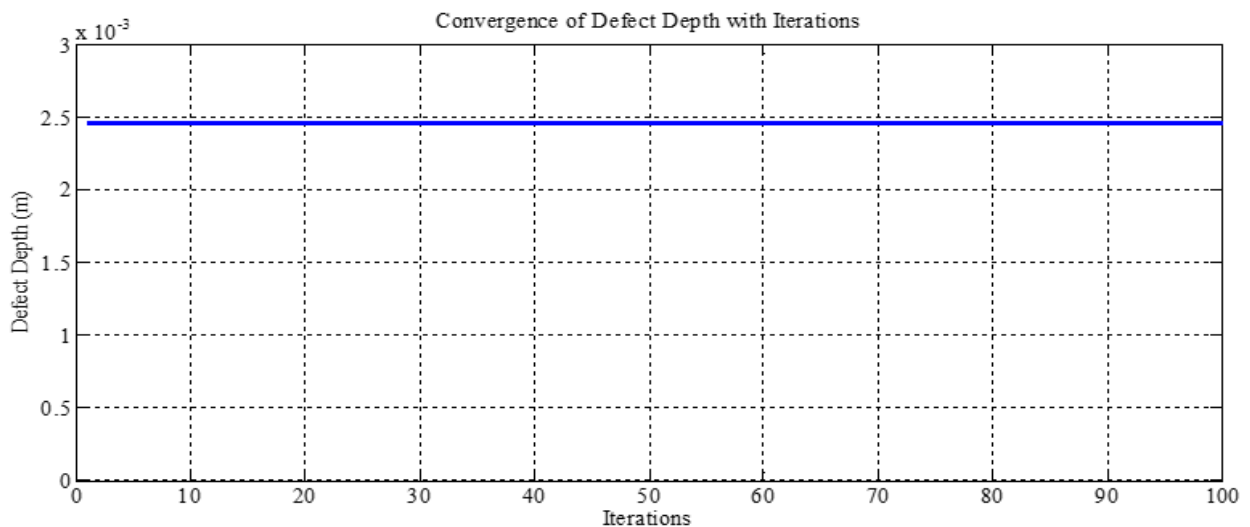


FIGURE 5.18 – Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations

La 2eme teste : nous avons fixé le nombres d'itration sur =100 et nous changeons le nombre de Voiliers et le nombre de sardines, les résultats obtenues sont montrés dans les Figures 5.19 et 5.20 :

D'après les Figures 5.17-5.20, il est évident que dès la première itération, la valeur de la profondeur (d) converge rapidement vers une solution proche de l'optimum, atteignant

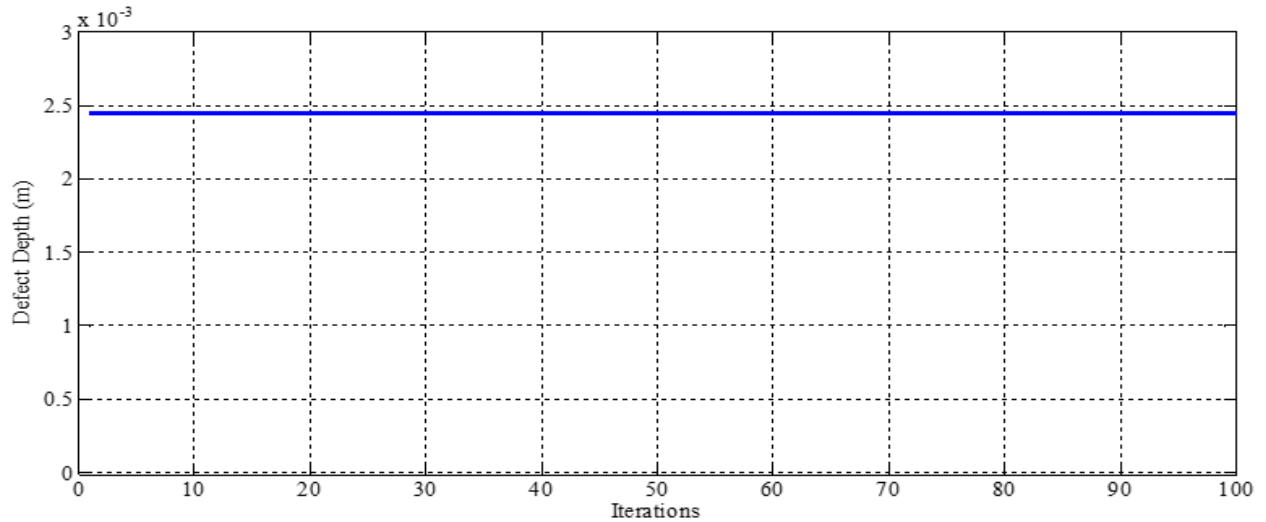


FIGURE 5.19 – Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations

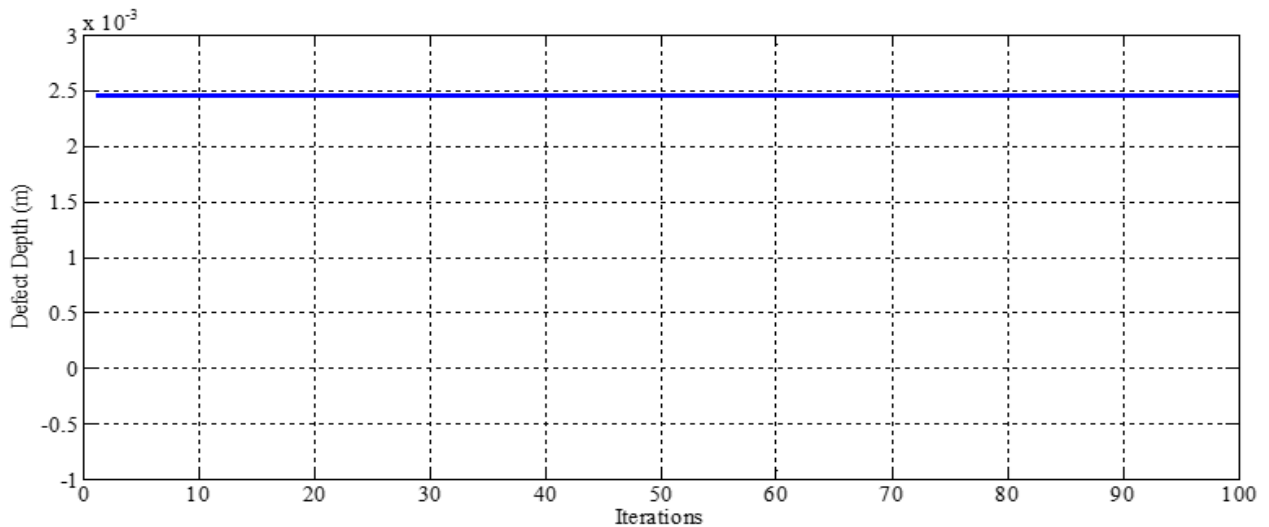


FIGURE 5.20 – Evolution de la profondeur du défaut avec les itérations

environ 98.5% de précision. Cela démontre une grande efficacité du processus d'optimisation dès les phases initiales, permettant ainsi une estimation presque exacte de la profondeur du défaut dès le début. Cette rapidité de convergence souligne la robustesse et la fiabilité de la méthode utilisée pour estimer la profondeur avec précision.

Le Tableau 5.4 présente une récapitulation des résultats obtenus.

Dans le Tableau 5.4, l'analyse des valeurs obtenues pour la profondeur du défaut révèle que la méthode Sailfish (SFO) génère des résultats d'une précision remarquable, très proches

TABLE 5.4 – Résultats obtenus par la méthode d’optimisation par Sailfish (SFO).

SFO			
Nbr d’itération (itr)	Valeur réelle d [mm]	Valeur obtenue d [mm]	Nbr Populations (N)
50	2.5	2.468	Nbr de voiliers (V)=10
100	2.5	2.456	Nbr de sardines (S)=30
100	2.5	2.458	V=15, S=30
	25	2.452	V=30, S=50

des valeurs optimales. Par exemple, avec 50 itérations et un réglage de 10 voiliers et 30 sardines, la profondeur estimée du défaut est de 2,468 mm, ce qui correspond à 98,72% de la profondeur réelle. Ce niveau de précision atteste de l’efficacité de la méthode pour converger vers une solution optimale. La valeur de 2,468 mm représente la meilleure estimation fournie par l’individu le plus performant de la dernière population créée par l’algorithme, mettant en évidence la qualité de l’optimisation réalisée au cours de cette simulation.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l’application et la validation de différentes méthodes d’inversion dédiées au contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF). Ces approches visent principalement à estimer avec précision les paramètres électromagnétiques des matériaux conducteurs et à caractériser la nature ainsi que la géométrie des défauts présents dans les structures inspectées. L’intégration d’algorithmes métaheuristiques récents, tels que GJO, SFO, AQO et RKO, a permis d’améliorer significativement l’efficacité du processus d’inversion. Ces méthodes offrent un bon compromis entre exploration globale de l’espace des solutions et exploitation locale des régions prometteuses, garantissant ainsi une convergence rapide et stable vers la solution optimale. Les deux applications étudiées, l’estimation des propriétés électromagnétiques des matériaux et la caractérisation dimensionnelle des défauts, ont mis en évidence la robustesse, la précision et la fiabilité des approches proposées.

Ces résultats confirment la pertinence des algorithmes métaheuristiques pour résoudre les problèmes inverses complexes liés au CND-CF, ouvrant la voie à des techniques d'évaluation plus performantes et automatisées dans le domaine du diagnostic des structures aéronautiques et industrielles.

Conclusion Générale

1-Conclusion

Au terme de cette recherche, plusieurs contributions scientifiques et méthodologiques significatives ont été mises en évidence. Dans un premier temps, l'étude a permis de situer avec précision les enjeux liés au contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) dans le domaine aéronautique, en soulignant non seulement les atouts de cette technique en termes de sensibilité et de fiabilité, mais également ses limites lorsqu'elle est confrontée à la complexité croissante des structures industrielles modernes, telles que les assemblages rivetés ou les configurations multicouches. Cette analyse critique a ainsi jeté les bases d'une réflexion approfondie sur les axes d'amélioration nécessaires.

Dans un second temps, la modélisation numérique, fondée en particulier sur la méthode des éléments finis (MEF), a permis d'acquérir une compréhension détaillée des phénomènes électromagnétiques gouvernant le comportement des sondes CF dans des environnements multicouches. Ces travaux ont démontré la pertinence des approches de simulation non seulement pour prédire la réponse des systèmes, mais aussi pour optimiser leur conception et réduire considérablement les coûts et contraintes liés à l'expérimentation physique. Cette étape constitue un jalon essentiel vers une meilleure maîtrise des outils de simulation dans le domaine du CND.

Un apport majeur de ce travail réside dans la conception et la validation numérique d'un dispositif innovant, basé sur une matrice rotative de capteurs. Cette architecture originale a montré, à travers les résultats de simulation, une robustesse accrue et une sensibilité renforcée vis-à-vis de la détection et du dimensionnement de défauts dans des géométries complexes,

confirmant son potentiel pour des applications industrielles réelles en aéronautique et ouvrant la voie à des dispositifs plus intelligents et polyvalents.

En parallèle, une réflexion méthodologique approfondie a été menée autour des problèmes inverses et des stratégies d'optimisation. L'introduction et l'application d'algorithmes bio-inspirés tels que SFO, AQO, GJO et RKO ont permis d'évaluer leur performance pour l'estimation de paramètres électromagnétiques essentiels (conductivité électrique et perméabilité magnétique relative) et la profondeur du défaut. Les résultats obtenus démontrent la capacité de ces méthodes à fournir des solutions précises, stables et adaptées à différentes configurations, chaque algorithme présentant des atouts spécifiques selon les critères considérés. Cette contribution méthodologique constitue une avancée originale pour la résolution de problèmes inverses en CND-CF, ouvrant de nouvelles perspectives pour l'optimisation de systèmes complexes.

Ainsi, les apports de cette thèse se déclinent à plusieurs niveaux :

- Sur le plan théorique, par une meilleure compréhension des phénomènes physiques, une formalisation rigoureuse des formulations inverses et une mise en évidence des limites des méthodes classiques.
- Sur le plan méthodologique, par l'intégration de techniques d'optimisation modernes et bio-inspirées, adaptées aux spécificités du CND-CF.
- Sur le plan pratique, par la conception d'un système innovant de détection validé numériquement, dont la mise en œuvre expérimentale pourrait représenter une avancée concrète pour l'industrie aéronautique.

2-Perspectives

Plusieurs perspectives de recherche s'ouvrent à la suite de ce travail. Parmi elles, on peut citer :

- l'intégration de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique pour l'interprétation automatique des signaux et la reconnaissance des défauts ;
- le développement de systèmes embarqués permettant des inspections rapides et fiables en temps réel ;
- l'extension des méthodes proposées à d'autres secteurs industriels critiques tels que le nucléaire, l'énergie, ou le ferroviaire, où la sûreté et la fiabilité sont également des

enjeux prioritaires.

Ces orientations confirment la pertinence et la portée des travaux réalisés, tout en soulignant leur potentiel d'impact concret sur l'amélioration de la sécurité et de la durabilité des structures industrielles de demain.

Publications et Communications

Publications

1. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala, and Bachir Abdelhadi**, “Rotating Eddy Current Array for Efficient Detection and Sizing of Defects in Multi-Layer Aerospace Structures”, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2025.
2. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala, Abderrahmane Aboura, Bachir Abdelhadi and Amor Guettafi**, “Non-destructive rapid defect testing around curved head rivets without displacement of eddy current sensors”, Studies in Engineering and Exact Sciences, 2024.
3. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala, Abderrahmane Aboura, Kamel Belkhiri and Amor Guettafi**, “Static eddy current imaging for nondestructive testing of aeronautical structures”, Studies in Engineering and Exact Sciences, 2024.

Communications

Communications internationales :

1. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala**. “Non Destructive Testing for a Multilayer Structure used in Aeronautics by Eddy Current Multi-Sensor System”, 1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences, Konya

- (Turkey), 2022.
2. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala.** “3D Imaging by Eddy Currents From Multi-Element Sensors in Multiplexed Mode Applied to Multilayer Structures Used in Aeronautics”, 1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences, Konya (Turkey), 2022.
 3. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala, Abderrahmane Aboura.** “Non Destructive Testing by Magnetic Leakage Flux Applied to Ferromagnetic Parts”, 3rd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences, Konya (Turkey), 2022.
 4. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala, Kamel Belkhiri.** “Non-Destructive Evaluation of Multi-Layer Aeronautical Structures by The Eddy Current Method”, 2nd International Seminar on Industrial Engineering and Applied Mathematics, Skikda (Algeria), 2022.

Communications nationales :

1. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala.** “Nondestructive Evaluation of Material Properties through Particle Swarm Optimization”, National Conference on Computational Engineering, Artificial Intelligence and Smart Systems, Tamanrasset (Algeria), 2024.
2. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala.** “A Runge-Kutta Method for Optimizing Defect Depth in Multilayer Structures”, National Conference on Computational Engineering, Artificial Intelligence and Smart Systems, Tamanrasset (Algeria), 2024.
3. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala.** “A Chimp Optimization Method for Defect Depth Estimation in Multilayer”, The First National Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Mascara (Algeria), 2025.
4. **Merwane Khebal, Abdelhak Abdou, Tarik Bouchala.** “Comparative Study of Meta-Heuristic Methods for Defect Depth Estimation in Multilayer Structures”, The

First National Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Mascara (Algeria), 2025.

Références bibliographiques

- [1] N. Benhadda, *Modélisation et Étude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle Non Destructif (CND)*. Thèse de doctorat en sciences, Université Batna 2, 2015.
- [2] A. Ruade, H. Lemieux, and M. Sirois, “Courants de foucault multiéléments : une alternative aux méthodes conventionnelles de contrôle non destructif surface,” in *Journées COFREND*, 2017.
- [3] M. Koornstra, J. Broughton, R. Esberger, C. Glansdorp, W. Köppel, F. Taylor, J. Cauzard, A. Evans, L. Hantula, M. Piers, *et al.*, “Transport safety performance in the eu : a statistical overview,” *European Transport Safety Council, Brussels, Belgium*, vol. 32, 2003.
- [4] M. Amor, *Contrôle non destructif par courant de Foucault en utilisant des investigations par MEF, problèmes inverses et expérimentaux pour l'analyse des propagations des fissures*. Thèse de doctorat, Université Ziane Achour, Djelfa, 2024.
- [5] Y. Shao, T. Meng, K. Yu, Z. Xia, R. Huang, Y. Tao, Z. Chen, J. R. S. Avila, and W. Yin, “Automatic detection and imaging of rivet hole defects for aircraft structures with optimized sensor array using eddy current method and image analysis,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 5, pp. 4597–4606, 2022.
- [6] Y. L. Diraison, *Imagerie à Courants de Foucault pour l'Évaluation non Destructive de Structures Rivetées Aéronautiques*. Thèse de doctorat, École Supérieure de Cachan, 2008.

- [7] D. E. Abdelli, *Estimation de la probabilité de détection dans le contrôle non destructif par courants de Foucault*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2021.
- [8] A. Grobler, G. V. Schoor, and E. Ranft, “Design and optimisation of a pcb eddy current displacement sensor,” *SAIEE Africa Research Journal*, vol. 108, no. 1, pp. 4–11, 2017.
- [9] B. M. O. Salama, A. A. N. E. Islam, and T. Bouchala, “A comparative study of optimization methods for eddy-current characterization of aeronautical metal sheets,” *Facta Universitatis, Series : Electronics and Energetics*, vol. 34, no. 4, pp. 547–555, 2021.
- [10] M. Khebal, A. Abdou, T. Bouchala, A. Aboura, A. Bachir, and G. Amor, “Non-destructive rapid defect testing around curved head rivets without displacement of eddy current sensors,” *Studies in Engineering and Exact Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 2040–2062, 2024.
- [11] P.-Y. Joubert and Y. L. Bihan, “Contrôle non destructif électromagnétique en aéronautique,” *Instrumentation Mesure Métrologie (I2M)*, vol. 4, no. 1-2, 2004.
- [12] H. Mehaddene, *Étude du Contrôle et de l'Évaluation Non-Destructifs dans les Milieux Magnétiques*. Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2019.
- [13] M. Chelabi, *Utilisation des Machines à Vecteurs de Supports pour le Contrôle Non Destructif par Méthodes Électromagnétiques*. Thèse de doctorat, 2016.
- [14] C. Ravat, *Conception de multi capteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11, 2008.
- [15] O. S. B. Moussa, *Utilisation de méthodes d'optimisation pour la résolution des problèmes inverses : application au contrôle non destructif par courants de Foucault*. Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2023.
- [16] S. Cherif, *Modélisation électromagnétique de systèmes multicapteurs-pièces à défauts complexes pour le contrôle non destructif par courants de Foucault*. Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [17] R. Cyril, *Conception de multicapteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif*. Thèse de doctorat, 2008.

- [18] Y. Choua, *Application de la Méthode des Éléments Finis pour la Modélisation de Configurations de Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11, 2010.
- [19] S. Harzallah, *Contribution à l'analyse des endommagements par la technique du contrôle non-destructif et l'utilisation des capteurs à courant de Foucault : investigation numérique et expérimentale*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger, 2017.
- [20] A. Abdou, "Contrôle non destructif par courant de foucault : Étude et réalisation d'un capteur inductif," mémoire de magister, Université El Hadj Lakhdar Batna, 2006.
- [21] H. Zaidi, *Méthodologies pour la Modélisation des Couches Fines et du Déplacement en Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault : Application aux Capteurs Souples*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, 2012.
- [22] COFREND, "Les essais non destructifs," 2019. [Accessed : 07-Mar-2019].
- [23] N. Benhadda, "Modélisation des capteurs inductifs à courants de foucault," mémoire de magister, Université El-Hadj Lakhdar, Batna, 2006.
- [24] A. Abdou, *Contrôle Non Destructif (CND) : Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif à Courants de Foucault*. Thèse de doctorat, Université Batna 2, 2018.
- [25] M. Chelabi, *Utilisation des Machines à Vecteurs de Supports pour le Contrôle Non Destructif par Méthodes Électromagnétiques*. Thèse de doctorat, Université Mohammed Seddik Benyahia, Jijel, 2016.
- [26] J. D. Fillon, "Contrôle non destructif (cnd)," *Techniques de l'Ingénieur*, 1996. Réf : R1400.
- [27] M. Klank, O. Hagedorn, C. Holthaus, M. Shamonin, and H. Dötsch, "Characterization and optimization of magnetic garnet films for magneto-optical visualization of magnetic field distributions," *NDT & E International*, vol. 36, pp. 375–381, September 2003.
- [28] B. Delabre, *Développement de capteurs flexibles à courants de Foucault : applications à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique*. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2016.

- [29] T. Bouchala, *Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directs dans les Systèmes de CND par Courants de Foucault*. Thèse de doctorat, Université El-Hadj Lakhdar, Batna, 2014.
- [30] B. Helifa, *Contribution à la Simulation du CND par Courants de Foucault en vue de la Caractérisation des Fissures Débouchantes*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2012.
- [31] B. Helifa, A. Oulhadj, A. Benbelghit, I. K. Lefkaier, F. Boubenider, and D. Boutassouna, “Detection and measurement of surface cracks in ferromagnetic materials using eddy current testing,” *NDT & E International*, vol. 39, pp. 384–390, March 2006.
- [32] V. Doirat, *Contribution à la Modélisation de Systèmes de Contrôle non destructif par Courants de Foucault : Application à la Caractérisation Physique et Dimensionnelle de Matériaux de l’Aéronautique*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2007.
- [33] J. Garcia-Martin, J. Gomez-Gil, and E. Vazquez-Sanchez, “Non-destructive techniques based on eddy current testing,” *Sensors Journal*, vol. 11, pp. 2525–2565, February 2011.
- [34] A. Zaoui, *Contribution à la Modélisation de CND par Matrice à Courants de Foucault*. Thèse de doctorat, École Militaire Polytechnique, Alger, 2008.
- [35] C. Zorni, *Contrôle non Destructif par Courants de Foucault de Milieux Ferromagnétiques : de l’Expérience au Modèle d’Interaction*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, 2012.
- [36] D. Hughett, “Statistical models for the characterization of eddy-current data,” *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 27, no. 3, pp. 2079–2086, 1991.
- [37] H. Yusa, K. Miya, N. Chen, and H. Hashizume, “Applications of numerical models to eddy current testing : Inverse problem,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 207, no. 2, pp. 199–208, 2001.
- [38] J. R. Bowler, “Eddy-current interaction with an ideal crack. i. thin-skin theory,” *Journal of Applied Physics*, vol. 75, no. 12, pp. 8128–8137, 1994.
- [39] B. Moussa, *Utilisation de méthodes d’optimisation pour la résolution des problèmes inverses : application au contrôle non destructif par courants de Foucault*. PhD thesis, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2023.

- [40] T. Miya, H. Yusa, and K. Miya, "Numerical modeling of eddy current testing for characterization of material properties," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 38, no. 2, pp. 1021–1024, 2002.
- [41] A. Sophian, G. Tian, D. Taylor, and J. Rudlin, "A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed eddy current ndt," *NDT & E International*, vol. 36, no. 1, pp. 37–41, 2003.
- [42] S. K. Burke, "A model for the probe signal due to a surface-breaking crack in eddy-current nondestructive evaluation," *NDT & E International*, vol. 31, no. 4, pp. 265–273, 1998.
- [43] A. Yamada, H. Hashizume, H. Yusa, and K. Miya, "Application of the finite element method to eddy current testing," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 32, no. 3, pp. 1349–1352, 1996.
- [44] A. Sophian, W. Chen, G. Tian, and S. Quek, "Crack characterisation and classification based on pulsed eddy current sensors," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 123, no. 2, pp. 258–262, 2005.
- [45] P. Quehe, S. S. Udpa, and L. Udpa, "Inverse problem in eddy current nondestructive evaluation," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 2, no. 4, pp. 249–262, 1991.
- [46] K. Miya, H. Yusa, and H. Hashizume, "Reconstruction of cracks from eddy current signals," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 29, no. 2, pp. 1889–1892, 1993.
- [47] C. V. Dodd and W. E. Deeds, "Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems," *Journal of Applied Physics*, vol. 39, no. 6, pp. 2829–2838, 1968.
- [48] D. Lesselier, "Inversion of eddy-current data : Imaging of flaws," *Inverse Problems*, vol. 6, no. 6, pp. 845–876, 1990.
- [49] D. García-Martín, J. Gómez-Gil, and E. Vázquez-Sánchez, "Non-destructive techniques based on eddy current testing," *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2525–2565, 2011.
- [50] Z. Ren, "Solving 3-d eddy current problem containing thin cracks using dual formulations and shell elements," *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, vol. 146, no. 1, pp. 9–14, 1999.

- [51] M. Khebal, A. Abdou, T. Bouchala, A. Aboura, K. Belkhiri, and A. Guettafi, “Static eddy current imaging for nondestructive testing of aeronautical structures,” *Studies in Engineering and Exact Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 3484–3501, 2024.
- [52] B. Marchand, J. Decitre, N. Sergeeva-Chollet, and A. Skarlatos, “Development of flexible array eddy current probes for complex geometries and inspection of magnetic parts using magnetic sensors,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1511, pp. 488–493, 2013.
- [53] R. Xie, D. Chen, M. Pan, W. Tian, X. Wu, W. Zhou, and Y. Tang, “Fatigue crack length sizing using a novel flexible eddy current sensor array,” *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 32138–32151, 2015.
- [54] F. Wendler, R. Laue, S. Härtel, B. Awiszus, and O. Kanoun, “Design of a multi-modal sensor for the in-process measurement of material properties based on inductive spectroscopy,” *Measurement*, vol. 227, p. 114187, 2024.
- [55] A. Abdou, T. Bouchala, B. Abdelhadi, and A. Guettafi, “3d surface crack characterization by eddy current array image and a fast algorithm search,” *Journal of Electrical Engineering*, vol. 74, no. 2, pp. 127–131, 2023.
- [56] A. Rosell and G. Persson, “Finite element modelling of closed cracks in eddy current testing,” *International Journal of fatigue*, vol. 41, pp. 30–38, 2012.
- [57] S. Bennoud and M. Zergoug, “Modeling and simulation for 3d eddy current testing in conducting materials,” *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 749–752, 2014.
- [58] B. M. O. Salama, A. A. N. El Islam, and T. Bouchala, “A comparative study of optimization methods for eddy-current characterization of aeronautical metal sheets,” *Facta Universitatis, Series : Electronics and Energetics*, vol. 34, no. 4, pp. 547–555, 2021.
- [59] A. Abbassi, T. Bouchala, A. Abdou, and B. Abdelhadi, “Eddy current characterization of 3d crack by analyzing probe signal and using a fast algorithm search,” *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 56, pp. 426–434, 2020.
- [60] P. Bhosale, H. Bapat, Y. Mehekare, P. Mandal, R. Veerapur, M. Jadhav, and A. Ramu, “Detection of surface opening flaws using eddy current array technique,” in *3rd Interna-*

- tional Conference & Exhibition on NDE 4.0 2025*, vol. 30, (Taj Yeshwantpur, Bengaluru, India), pp. 3–6, 2025.
- [61] N. Kasai, M. Le, K. Sekino, Y. Funada, *et al.*, “Crack detection using a cutting-edge flexible eddy current sensor with voltage and phase measurement techniques,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 219, p. 111613, 2024.
- [62] J. B. Keller, “Inverse problems,” *American Mathematical Monthly*, pp. 107–118, 1976.
- [63] J. Hadamard, *Le problème de Cauchy et les équations aux dérivées partielles linéaires*. Yale University Press, 1923.
- [64] M. Kern, “Problèmes inverses,” rapport de recherche, École Supérieure d’Ingénieurs Léonard de Vinci, 2002.
- [65] T. Hacib, “Utilisation de la méthodologie du problème inverse pour la caractérisation des matériaux et l’optimisation de forme en électrotechnique,” mémoire de magistère, Université de Jijel, 2004.
- [66] R. Forestier, *Développement d’une méthode d’identification de paramètres par analyse inverse couplée avec un modèle éléments finis 3D*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2004.
- [67] D. Hoang, *Détermination simultanée de la résistivité et de l’épaisseur des tôles métalliques et d’alliages non magnétiques par méthode électromagnétique sans contact*. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, 2002.
- [68] A. Tikhonov and V. Arsenine, *Méthodes de résolution de problèmes mal posés*. Moscou : Éditions Mir, 1974. In French.
- [69] M. Guarnieri, A. Stella, and F. Trevisan, “A methodological analysis of different formulations for solving inverse electromagnetic problems,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, pp. 1549–1552, March 1992.
- [70] Y. Gabi, *Modélisation FEM du système de contrôle non destructif 3MA en ligne de production des aciers dual phase*. PhD thesis, 2017. HAL Id : tel-00749118.
- [71] F. Kojima and J. S. Knopp, “Inverse problem for electromagnetic propagation in a dielectric medium using markov chain monte carlo method,” *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 2339–2346, 2012.

- [72] M. Chelabi, T. Hacib, and Y. L. Bihan, “Eddy current testing using support vector machines,” in *Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials*, 2015.
- [73] A. Ayad, “Solution of inverse problems in electromagnetic ndt using neural networks,” *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, vol. 87, no. 9a, pp. 330–333, 2011.
- [74] L. Janousek, M. Radilova, M. Rebican, and M. Smetana, “Assessment of partially conductive cracks from eddy current non-destructive testing signals using support vector machine,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 236–241, 2015.
- [75] M. Chelabi, T. Hacib, Y. L. Bihan, N. Ikhlef, H. Boughedda, and M. R. Mekideche, “Eddy current characterization of small cracks using least square support vector machine,” *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 49, p. 155303, Apr 2016.
- [76] A. Zeghloul, *Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture*. Université de Metz, 2004. Cours 2003–2004.
- [77] J. R. Rice, “A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, pp. 379–386, 1968.
- [78] J. Lasry, *Calculs de plaques fissurées en flexion avec la méthode des éléments finis étendus (XFEM)*. Thèse de doctorat en mathématiques appliquées, Université de Toulouse, 2010.
- [79] G. Ventura, B. Moran, and T. Belytschko, “Dislocations by partition of unity,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 62, pp. 1463–1487, 2005.
- [80] S. Harzallah, M. Chabaat, F. B. M. Belgacem, and S. Benissad, “Computational inverse techniques in nondestructive evaluation using neural networks for detection of cracks,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Communication and Information Technology (ICCIT)*, (Dubai), 2015.
- [81] M. Y. Ammar, *Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu*. PhD thesis, École doctorale : Transfert, Dynamique des Fluides, Énergétique & Procédé, 2017.

- [82] T. Chady, M. Enokizono, and R. Sikora, “Neural network models of eddy current multi-frequency system for nondestructive testing,” *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 36, no. 4, 2000.
- [83] T. Chady, M. Enokizono, R. Sikora, T. Todaka, and Y. Tsuchida, “Natural crack recognition using inverse neural model and multi-frequency eddy current method,” *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 37, no. 4, 2001.
- [84] Y. I. Favennec, V. Labbe, and F. Bay, “Inverse analysis for identification of electromagnetic parameters,” in *4th ICIPE Conference*, (Rio de Janeiro, Brésil), 2002.
- [85] M. C. Costa, *Optimisation de dispositifs électromagnétiques dans un contexte d’analyse par la méthode des éléments finis*. Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique de Grenoble, 2001.
- [86] R. R. Saldanha, *Optimisation en électromagnétisme par application conjointe des méthodes de programmation non linéaire et de la méthode des éléments finis*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1992.
- [87] X. Ma, A. Peyton, and Y. Zhao, “Measurement of the electrical conductivity of open-celled aluminium foam using non-contact eddy current techniques,” *NDT & E International*, vol. 38, no. 5, pp. 359–367, 2005.
- [88] M. Faur, *Caractérisation des défauts par une méthode d’inversion lors d’un contrôle ultrasonore. Application au contrôle des défauts proches de la paroi externe*. PhD thesis, Université Paris 11, 1998.
- [89] S. Shadravan, H. R. Naji, and V. K. Bardsiri, “The sailfish optimizer : A novel nature-inspired metaheuristic algorithm for solving constrained engineering optimization problems,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 80, pp. 20–34, 2019.
- [90] H. R. Naji, S. Shadravan, H. M. Jafarabadi, and H. Momeni, “Accelerating sailfish optimization applied to unconstrained optimization problems on graphical processing unit,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 32, p. 101077, 2022.
- [91] J. Zhao, Z.-M. Gao, and H.-F. Chen, “The simplified aquila optimization algorithm,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 22487–22515, 2022.

- [92] S. Akyol, “A new hybrid method based on aquila optimizer and tangent search algorithm for global optimization,” *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 14, no. 6, pp. 8045–8065, 2023.
- [93] P. Yuan, T. Zhang, L. Yao, Y. Lu, and W. Zhuang, “A hybrid golden jackal optimization and golden sine algorithm with dynamic lens-imaging learning for global optimization problems,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 19, p. 9709, 2022.
- [94] G. Liu, Z. Guo, W. Liu, F. Jiang, and E. Fu, “A feature selection method based on the golden jackal-grey wolf hybrid optimization algorithm,” *PLOS ONE*, vol. 19, no. 1, p. e0295579, 2024.
- [95] I. Ahmadianfar, A. A. Heidari, A. H. Gandomi, X. Chu, and H. Chen, “Run beyond the metaphor : An efficient optimization algorithm based on runge kutta method,” *Expert Systems with Applications*, vol. 181, p. 115079, 2021.